

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO PARA QUALIFICAÇÃO DE ROBÔS
INDUSTRIAIS - ENSAIO DE REPETIBILIDADE

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA

FERNANDO HUMEL LAFRATTA

FLORIANÓPOLIS, AGOSTO DE 1990.

METODOLOGIA E INSTRUMENTAÇÃO PARA
QUALIFICAÇÃO DE ROBÔS
INDUSTRIAIS - ENSAIO DE REPETIBILIDADE

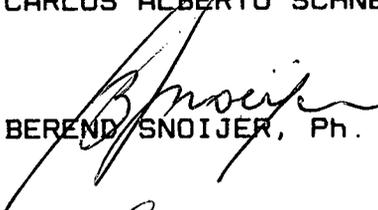
FERNANDO HUMEL LAFRATTA

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA OBTENÇÃO DO TÍTULO DE

MESTRE EM ENGENHARIA

ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
METROLOGIA E AUTOMAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.


Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - Orientador


Prof. BEREND SNOIJER, Ph. D. - Coordenador do CPGEM

BANCA EXAMINADORA:


Prof. CARLOS ALBERTO SCHNEIDER, Dr. Ing. - Presidente


Prof. CARLOS ALBERTO FLESCHE, M. Eng.


Prof. JAIR CARLOS DUTRA, Dr. Eng.


Prof. NELSON BACK, Ph. D.

ÍNDICE

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
GLOSSÁRIO.....	iii
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 DEFINIÇÕES E CARACTERÍSTICAS MAIS SIGNIFICATIVAS DOS ROBÔS INDUSTRIAIS	5
1.2 A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO NAS OPERAÇÕES MAIS USUAIS.....	7
1.3 A NECESSIDADE DE SE QUALIFICAR UM ROBÔ INDUSTRIAL.....	11
1.4 OBJETIVOS DESTE TRABALHO.....	12
2 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS ERROS DE REPETIBILIDADE DE ROBÔS INDUSTRIAIS.....	14
2.1 FONTES DE ERRO QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO DE UM ROBÔ INDUSTRIAL.....	14
2.1.1 Descrição das fontes de erro.....	14
2.1.2 Formação do erro de repetibilidade.....	16
2.2 SISTEMA DE COORDENADAS PARA ENSAIOS DE REPETIBILIDADE.....	17
2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ERROS DE POSICIONAMENTO.....	19
3 METODOLOGIA PARA ENSAIO DE REPETIBILIDADE.....	29
3.1 PLANEJAMENTO DE ENSAIO DE REPETIBILIDADE.....	29
3.1.1 Informações prévias sobre o robô industrial.....	30
3.1.2 Posicionamentos programados para o ensaio - definição e seleção.....	30
3.1.3 Direções e sentidos de aproximação a cada posicionamento programado.....	34
3.1.4 Trajetória a ser percorrida pelo robô industrial.....	34
3.1.5 Número de medições.....	35

3.1.6	Critérios de seleção do sistema de teste	36
3.1.7	Condições ambientais.....	36
3.1.8	Temperatura de regime do robô industrial.....	37
3.1.9	Carregamento.....	37
3.1.10	Velocidades e acelerações utilizadas pelo robô industrial nos ensaios de repetibilidade.....	38
3.2	EXECUÇÃO DO ENSAIO DE REPETIBILIDADE	38
3.2.1	Instalação do robô.....	38
3.2.2	Ensaio prévios.....	39
3.2.3	Programação do robô industrial.....	40
3.2.4	Documentação durante o ensaio.....	40
3.3	PROCESSAMENTO E DOCUMENTAÇÃO DOS RESULTADOS	41
3.3.1	Processamento dos dados experimentais.....	41
3.3.2	Documentação e interpretação dos resultados... ..	41
4	INSTRUMENTAÇÃO APLICADA AO ENSAIO DE REPETIBILIDADE.....	47
4.1	SISTEMAS DE TESTE COMPOSTOS POR MEDIDORES DE DESLOCAMENTO	47
4.1.1	Sistemas de teste montados com base em medidores eletro-ópticos de deslocamento.....	49
4.1.2	Sistemas de teste montados com base em medidores indutivos de deslocamento sem contato	53
4.1.3	Sistemas de teste montados com base no laser interferométrico.....	55
4.1.4	Sistemas de teste montados com base no laser de alinhamento.....	56
4.2	SISTEMAS ESPECIAIS DE TESTE.....	57
5	DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE TESTE CUBO/BERÇO.....	62
5.1	CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS.....	62
5.2	PROJETO DO SISTEMA DE TESTE.....	63

5.2.1	Modelagem matemática para o cálculo do erro de posicionamento.....	65
5.2.2	Seleção dos medidores.....	72
5.2.3	Dimensionamento.....	72
5.2.4	Outros aspectos construtivos.....	75
5.3	CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS OBTIDAS.....	76
5.3.1	Fontes de erro e suas consequências.....	77
5.4	CONCLUSÃO.....	80
6	APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS.....	81
6.1	INTRODUÇÃO.....	81
6.2	ENSAIO DE POSICIONAMENTO CONTRA ESCALA.....	81
6.2.1	O sistema de teste.....	82
6.2.2	Parâmetros de ensaio utilizados.....	82
6.2.3	Comentários sobre os resultados de medição.....	84
6.3	ENSAIO DE REPETIBILIDADE PONTUAL.....	87
6.3.1	O sistema de teste.....	88
6.3.2	Parâmetros de ensaio utilizados.....	88
6.3.3	Comentários sobre os resultados de medição.....	89
6.4	ENSAIO DE POSICIONAMENTO CONTRA ESQUADRO.....	91
6.4.1	O sistema de teste.....	91
6.4.2	Parâmetros de ensaio utilizados.....	92
6.4.3	Comentários sobre os resultados de medição.....	93
6.5	ENSAIO DE REPETIBILIDADE ANGULAR.....	97
6.5.1	O sistema de teste.....	97
6.5.2	Parâmetros de ensaio utilizados.....	98

6.5.3	Comentários sobre os resultados de medição.....	99
6.6	CONCLUSÕES.....	100
7	CONCLUSÕES.....	103
8	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	105

RESUMO

A dissertação em questão propõe uma metodologia para o ensaio de repetibilidade de robôs industriais (IR) e sugere a utilização de alguns sistemas de teste, em especial, o cubo/berço. A parte inicial deste trabalho abrange: as fontes de erro que mais influenciam o comportamento geométrico de um robô industrial e como estas agem na geração do Erro de Repetibilidade, o que se entende por Erro de Posicionamento, sua nomenclatura e a formulação para o cálculo do Erro de Repetibilidade. A seguir é apresentada a metodologia proposta para ensaios de repetibilidade contendo recomendações para as fases de planejamento, execução, processamento e documentação dos ensaios de repetibilidade prospectivos. Segue-se à proposta de metodologia, a apresentação de alguns sistemas de teste adequados a realização de ensaios de repetibilidade, compostos por medidores disponíveis em um bem equipado laboratório de metrologia dimensional. Também são citados os sistemas especiais para qualificação de robôs industriais. Especial atenção é dada ao sistema de teste cubo/berço, onde é mostrada a formulação matemática para o cálculo do posicionamento real efetuado pelo IR, os componentes do sistema de teste e suas características metroológicas obtidas em função dos erros geométricos do cubo de referência, e de outros elementos inerentes à cadeia de medição. Ao final, são apresentados os resultados e conclusões alcançados por 4 ensaios de posicionamento realizados com o IR IPSO V-15, utilizando-se alguns dos sistemas de teste citados neste trabalho.

ABSTRACT

The present dissertation proposes a methodology for industrial robot (IR) repeatability tests and suggests the use of some test systems, particularly the cube/bed. The first part of this work includes: the error sources most influential on the geometric behavior of an IR and how these generate the repeatability error, the definition of positioning error, the nomenclature to be used for it and the formulation for the repeatability error calculation. Next, the methodology proposed for the repeatability test is presented, together with recommendations for the planning, executing, processing and documenting steps of the prospective repeatability tests. Then, some test systems adequate for performing repeatability tests are present. These consist of displacement measurers available in well-equipped dimensional metrology laboratories. Special systems for IR testing are also cited. Particular attention is paid to the cube/bed test system, where the mathematical formulation to calculate the real pose done by the IR is shown, along with the test system components and metrological characteristics obtained from reference cube geometric errors and other elements inherent to the measuring chain. Finally, the results and conclusions drawn from four positioning tests done with the IR IPSO V-15, using some of the test systems cited are presented.

GLOSSÁRIO

DAS SIGLAS ADOTADAS NO TEXTO

SIGLAS	INGLÊS	PORTUGUÊS
AGV	Automated Guided Vehicle	veículo auto-guiado
C	Controller	controlador
CPC	Continuous path control	controle por trajetória contínua
CS	Coordinate system	sistema de coordenadas
CS-E	Effector coordinate system	sistema de coordenadas do efetuator
CS-R	Robot coordinate system	sistema de coordenadas do robô
CS-T	Testing coordinate system	sistema de coordenadas de ensaio
DOF	Degrees of freedom	graus de liberdade
E	Effector	efetuator
EAP	Effector active point	ponto ativo do efetuator
EI	Effector interface	interface do efetuator
Ep		erro de planicidade
EP	Error: pose	erro de posicionamento
ER	Error: repeatability	erro de repetibilidade
ES	Error: systematic	erro sistemático
FO		faixa de operação
Im		incerteza de medição
IR	Industrial robot-	robô industrial
MM	Movement module	módulo de movimentação
Pp	Programmed pose	posicionamento programado

PPC	Pose-to-pose control	controle ponto à ponto
R	Robot	robô
MS-R	Measurement system - robot	sistema de medição do robô
Rp	Real pose	posicionamento real
SC	Signal conditioning	unidade de tratamento de sinais
TS	Test system	sistema de teste
WS	Working space	volume de trabalho

1 INTRODUÇÃO

O uso de Robôs Industriais (Industrial Robot - IR), em países desenvolvidos, vem crescendo de forma acelerada, conforme pode-se denotar da figura 1.1 /1/.

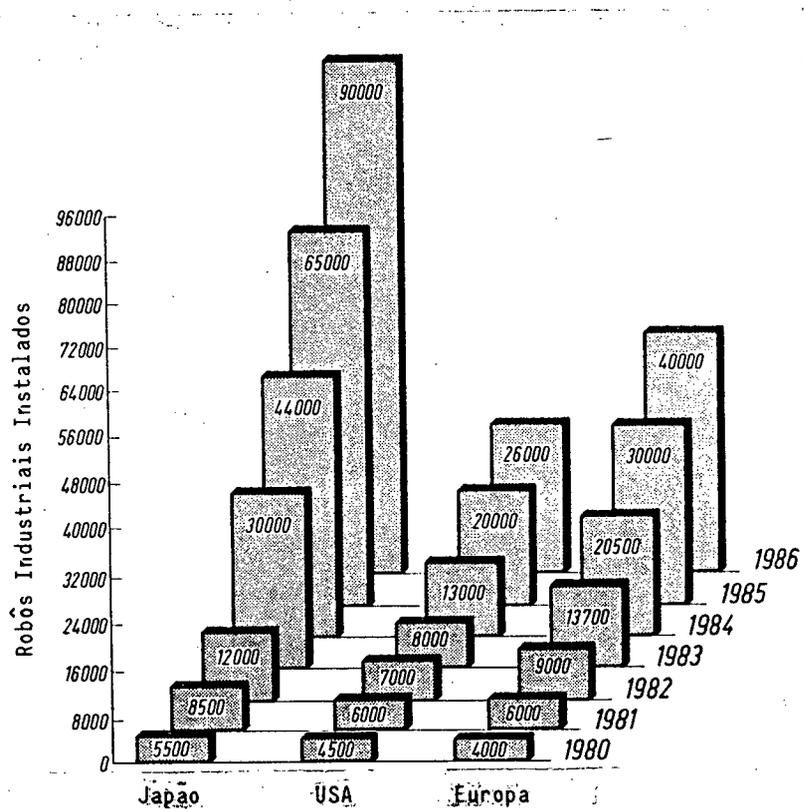


Fig. 1.1 - Quadro evolutivo da distribuição de IR's nos países desenvolvidos (Fontes: RIA, BRA, IPA; 1986).

Dentre as várias operações efetuadas por IR's, as mais usuais são (fig. 1.2): soldagem a ponto (fig. 1.3a) e a arco (fig. 1.3b), montagem (fig. 1.4) e transporte/manipulação de peças em operações de usinagem/manufatura (fig. 1.5). Destas destaca-se o vertiginoso crescimento do número de IR's em operações de montagem.

Seis razões básicas justificam tal crescimento /2/:

- redução dos custos com mão-de-obra;
- substituição do operário em trabalhos executados em ambientes e condições adversas ou perigosas;
- flexibilização do sistema de produção;
- aprimoramento da qualidade do produto;
- aumento da produtividade;
- atenuamento da escassez de mão-de-obra especializada.

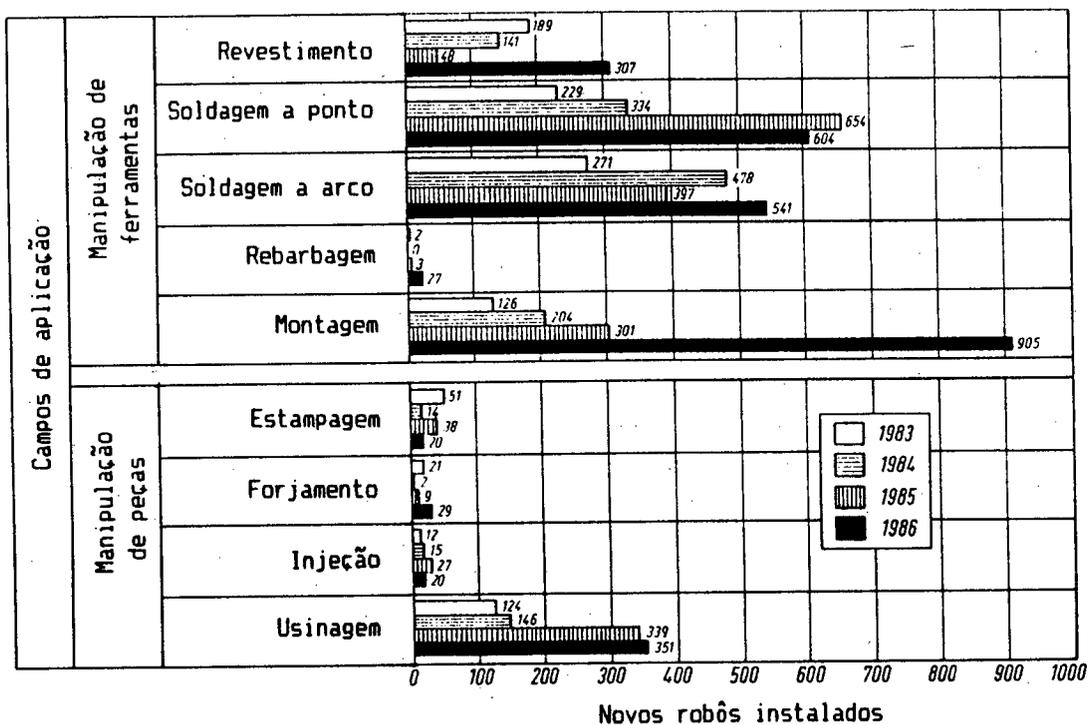


Fig. 1.2 - Quadro distributivo da população de robôs industriais existentes na RFA por atividade de produção (1983 a 1986) /1/

Apesar da incontestável afirmação sobre o crescimento do número de IR's instalados nas fábricas de países desenvolvidos, existem ainda divergências quanto a conceituação de um IR. Basicamente tem-se dois conceitos: o japonês e o norte-americano. Sob a ótica norte-americana, muito daquilo que o conceito japonês considera como IR's são meros manipuladores automatizados.

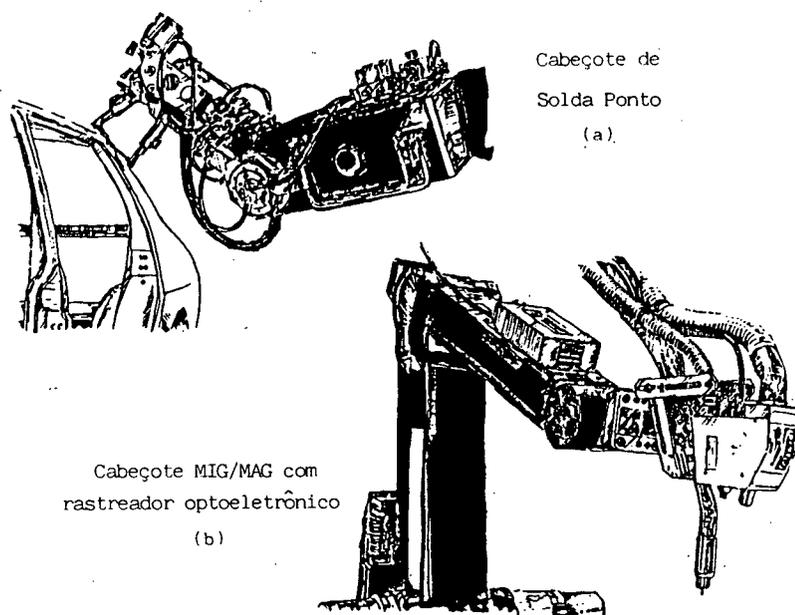


Fig. 1.3 - Soldagem a ponto (a) e a arco (b).

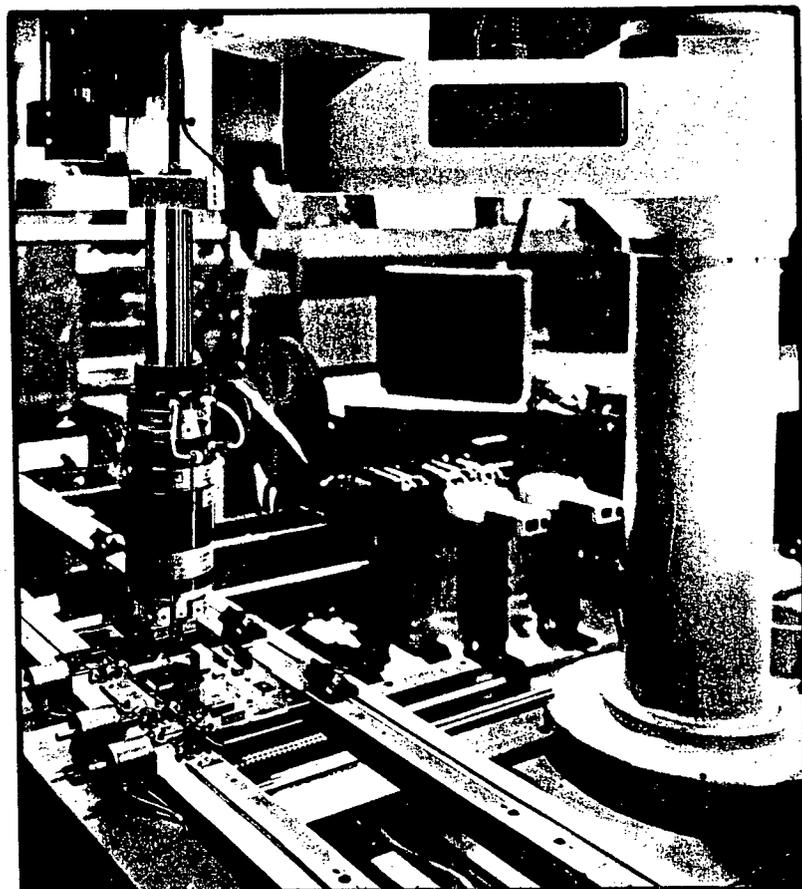


Fig. 1.4 - Montagem - inserção de CI's em placas de circuito impresso /3/.

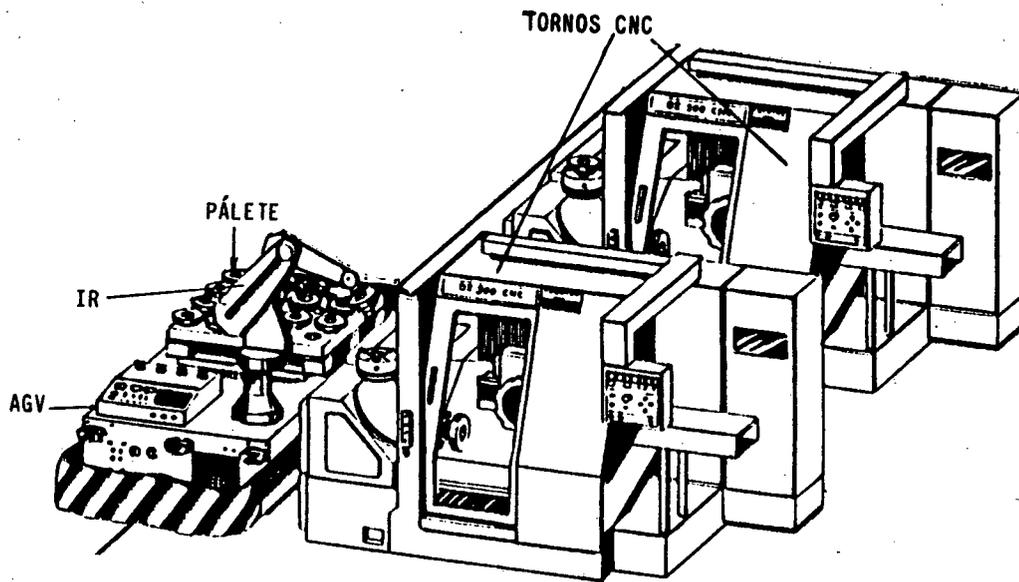


Fig. 1.5 - Manipulação de peças em operações de usinagem.

A figura 1.6 retrata a população de IR's em vários países desenvolvidos, segundo os dois critérios citados.

PAÍSES	Critérios	
	Norte-Americano*	Japonês**
Japão	14.000	25.000
Estados Unidos	4.100	6.000
Alemanha Ocidental	2.300	4.000
França	1.000	1.500
Suécia	600	1.000
Inglaterra	500	1.000
Outros	1.500	6.500
TOTAL	24.000	45.000

Fontes: * British Robot Association

** JIRA - Japan Industrial Robot Association

Fig. 1.6 - Quadro Comparativo do Número de IR's operando em 1982 segundo os Critérios Norte-Americano e Japonês /2/.

1.1 DEFINIÇÕES E CARACTERÍSTICAS MAIS SIGNIFICATIVAS DOS ROBÔS INDUSTRIAIS

Neste trabalho será considerado como um robô industrial todo aquele que se moldar à definição da ISO - International Standards Organization, que é muito similar à conceituação norte-americana dada pela RIA - Robotics Industries Association /4/:

"O Robô Industrial é uma máquina para manipulação, fixa ou móvel, multifuncional, com vários graus de liberdade, servo controlada, reprogramável, para uso em processos industriais."

A figura 1.7 ilustra algumas das características construtivas mais significativas de um IR. A determinação de seu comportamento requer a definição de um ponto de referência em sua estrutura articulada. É usual defini-lo como o ponto de origem do Sistema de Coordenadas do Efetuador (Effector Coordinate System: CS-E) estabelecido junto a Interface do Efetuador (Effector Interface - EI) ou o Ponto Ativo do Efetuador (Effector Active Point - EAP). EAP é um ponto real ou virtual definido para uma aplicação dada, referenciado ao CS-E.

A figura 1.8 mostra as partes básicas em que se divide um IR, e seus principais módulos. Como parte do Controlador (Controller - C), o programa de aplicação contém instruções para a movimentação e interação do IR com o meio que o circunda. Através do Sistema de Medição do Robô (Measurement System - Robot: MS-R) são conhecidos os posicionamentos, velocidades e acelerações dos Módulos de Movimentação (Movement Module - MM) a cada instante. A função do Controlador é fazer com que o Robô (Robot - R) cumpra

as instruções contidas no programa de aplicação com base nas informações enviadas pelo MS-R. O acoplamento entre estes dois módulos se faz através dos acionadores. Convém ressaltar que o controle dos movimentos definidos no Programa de Aplicação pode ser efetuado basicamente de duas maneiras /4/:

- a) Controle Ponto à Ponto (Pose-to-Pose Control - PPC) - a trajetória de cada Módulo de Movimentação é operada de acordo com instruções que especificam somente o próximo posicionamento programado a ser alcançado.
- b) Controle por Trajetória Contínua (Continuos Path Control - CPC) - a trajetória de dois ou mais Módulos de Movimentação é operada de acordo com instruções que especificam o próximo posicionamento requerido (normalmente obtido por interpolação) e a velocidade a ser alcançada neste.

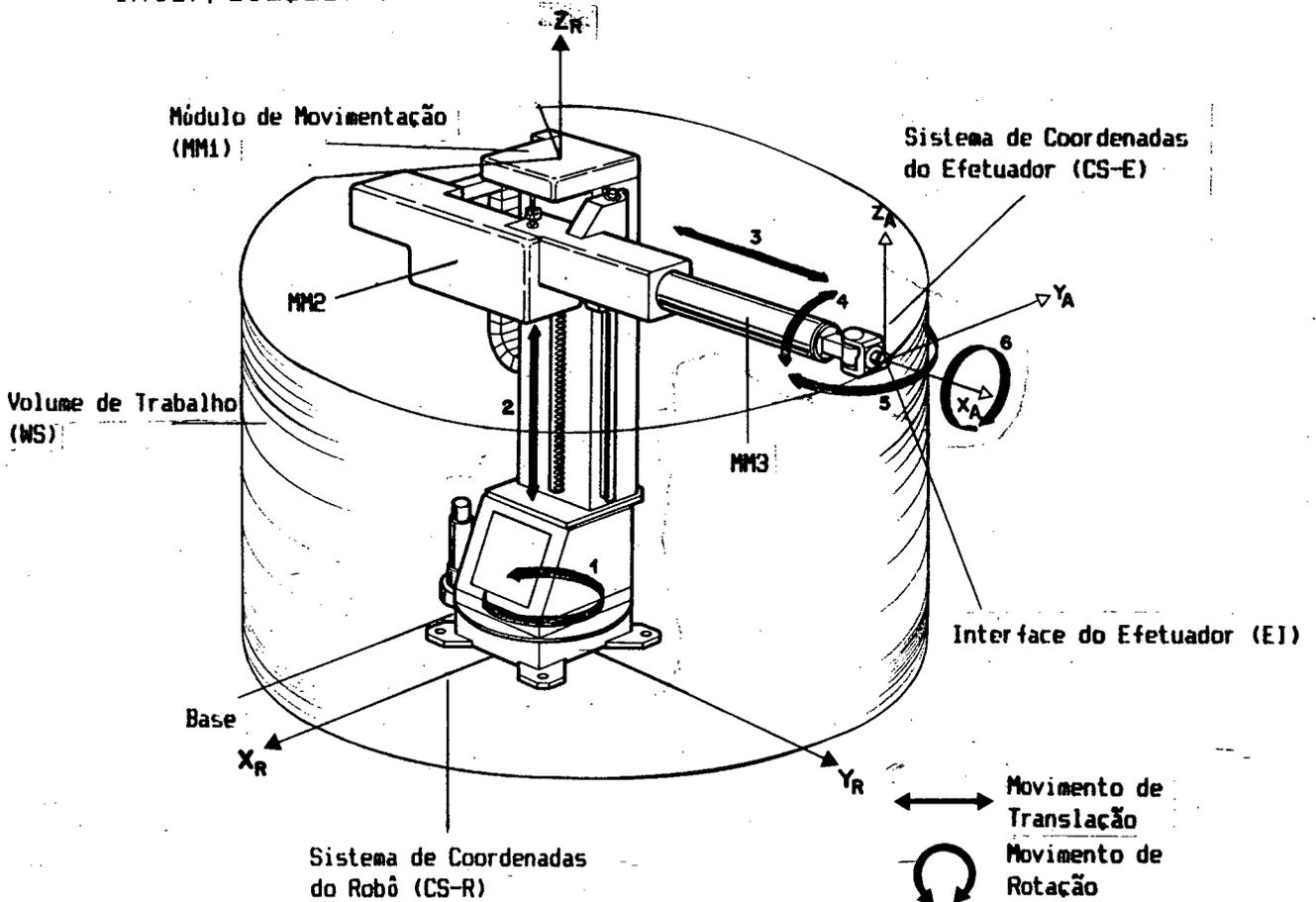


Fig. 1.7 - Módulos e algumas características de um IR.

O Robô tem por finalidade deslocar o Efetuador (Effector - E) até o posicionamento onde se deseja efetuar a tarefa definida para o IR. Efetuador é qualquer elemento fixado à EI (figs. 1.7 e 1.8).

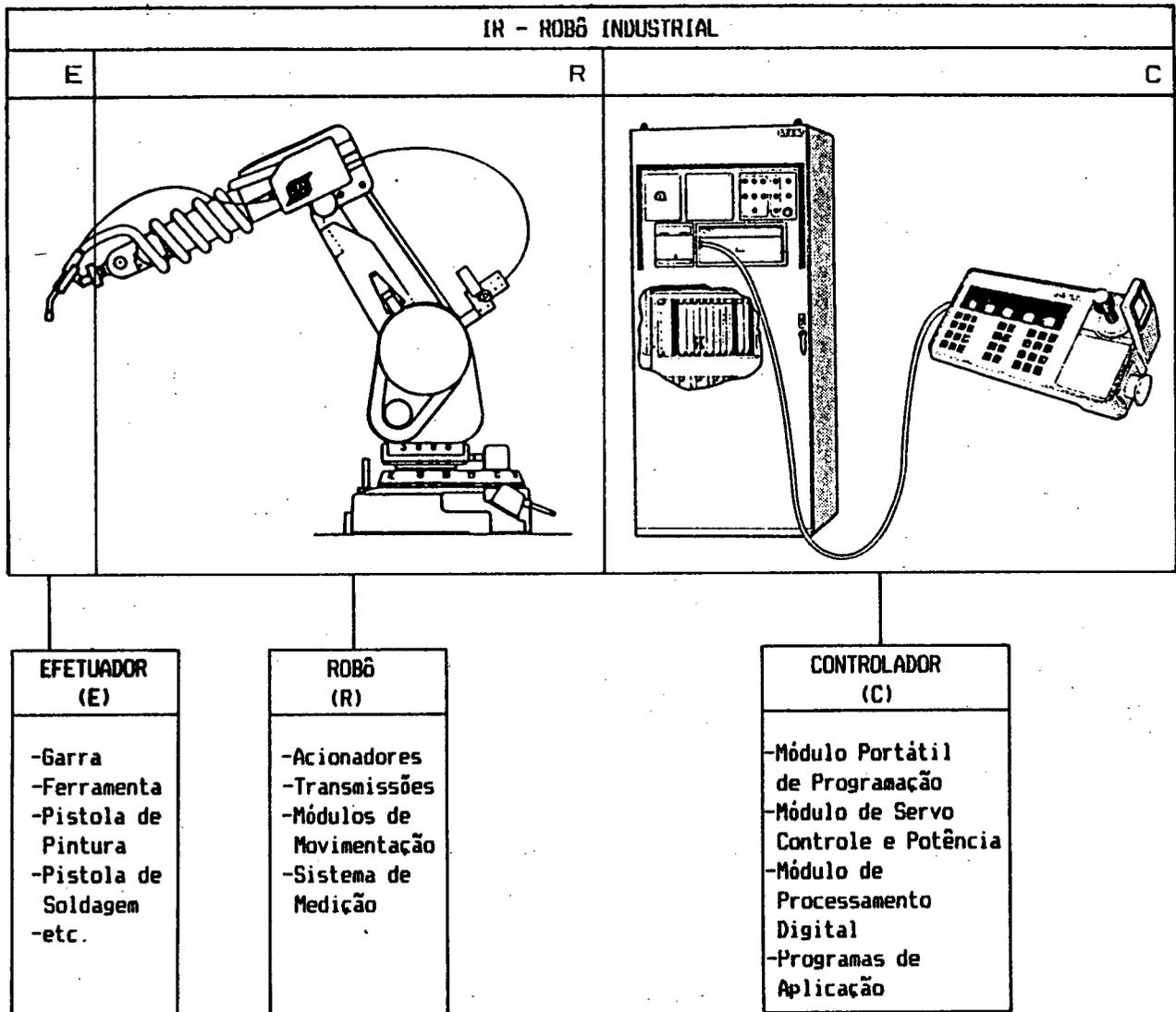


Fig. 1.8 - Partes básicas que compõem um IR.

1.2 A INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO NAS OPERAÇÕES MAIS USUAIS

A aplicabilidade de um IR é função da ordem de grandeza dos erros que, como máquina, este possui /5/. Os erros são identificados pelos parâmetros de desempenho (fig. 1.9). Destes, os geométricos são considerados bastante críticos nas operações em que são empregados IR's /6/; tendo o Erro de Repetibilidade como o mais perturbador /7/.

O Erro de Repetibilidade (Error: Repeatability - ER) é subdividido em ER Linear e ER Angular. O Erro de Repetibilidade Linear quantifica o erro aleatório de posição cometido pelo IR no posicionamento de um efetuador dentro de seu Volume de Trabalho (Working Space - WS). Já o ER Angular quantifica o erro aleatório cometido na orientação do mesmo efetuador.

Em operações de soldagem a arco e a ponto (figs. 1.10a e 1.10b) o ER influencia principalmente nas posições do início do cordão de solda e do ponto a ser soldado, respectivamente. Em ambas as aplicações o ER Angular não é crítico. Nas montagens efetuadas por IR's (fig. 1.11) tanto o ER Angular quanto o Linear são críticos. Em muitos casos utiliza-se sensores para se detectar e corrigir os desvios causados por estes erros no posicionamento do efetuador. Quando o IR é usado em operações de manipulação de peças - estampagem, forjamento, injeção e usinagem - um ER significativo pode causar danos às peças manipuladas. O posicionamento incorreto de uma peça a ser usinada na placa de um torno, por exemplo. Na maioria das operações de rebarbagem e na quase totalidade das operações de revestimento, o ER não tem grande influência no resultado da aplicação.

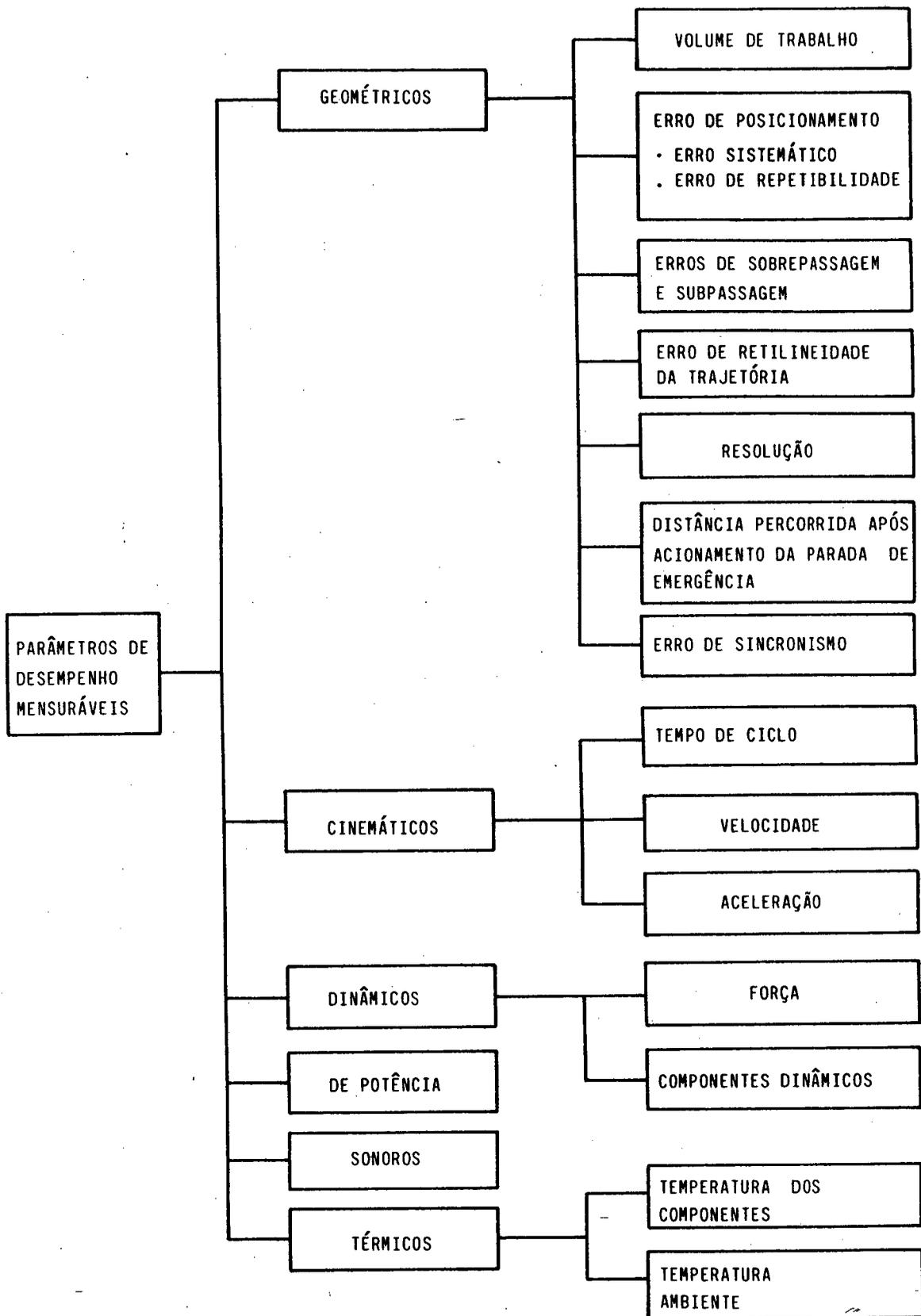
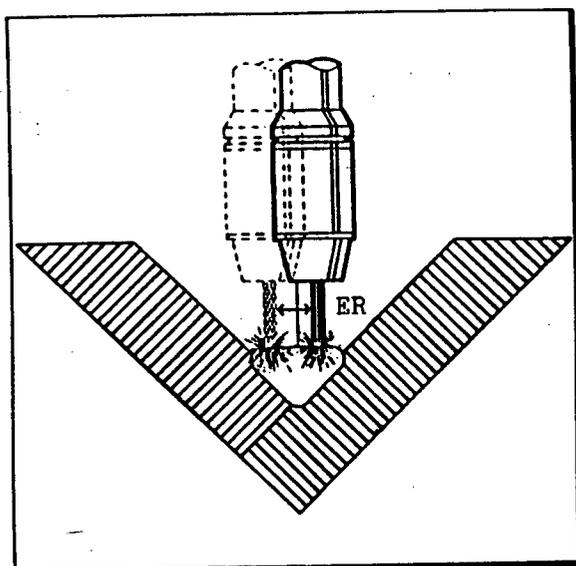
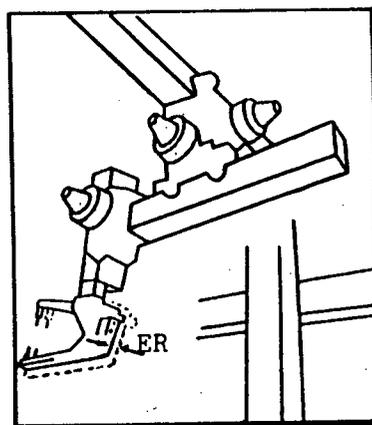


Fig. 1.9 - Parâmetros de desempenho mensuráveis de um IR.



a) soldagem a arco



b) soldagem a ponto

Fig. 1.10 - Influência do ER nas operações de soldagem a arco (a) e a ponto (b).

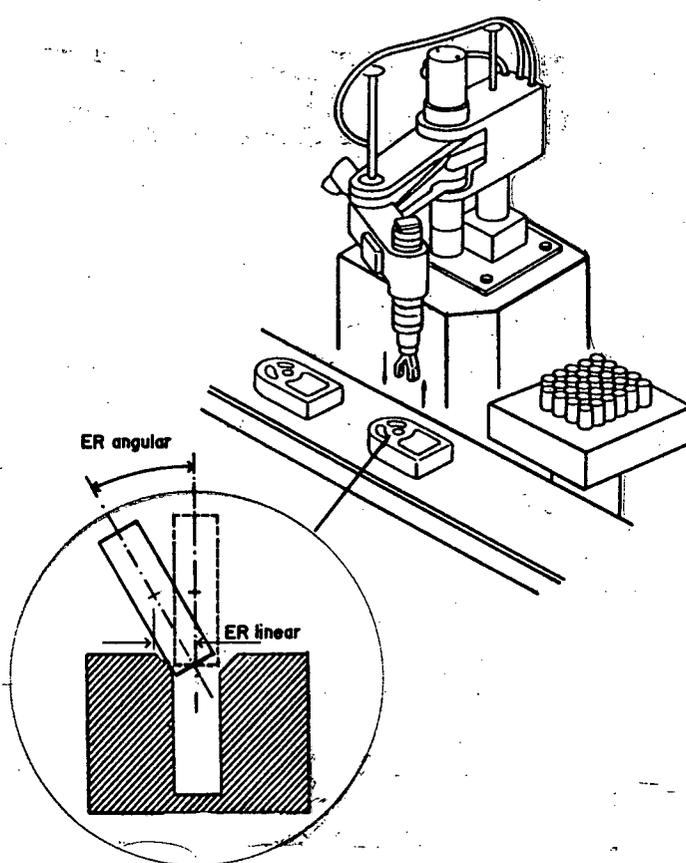


Fig. 1.11 - Influência do ER nas operações de montagem.

1.3 A NECESSIDADE DE SE QUALIFICAR UM ROBÔ INDUSTRIAL

A grande variedade de IR's, torna a escolha do mais adequado para uma aplicação particular muito difícil. Seus usuários necessitam de parâmetros de desempenho comparáveis para que se possa selecionar o IR mais adequado a aplicação desejada.

Até o presente, os parâmetros usualmente disponíveis para o usuário são aqueles fornecidos pelos fabricantes de IR's. Em geral estes parâmetros apresentam os seguintes problemas:

- são incompletos, no sentido que muitos dos parâmetros de desempenho não são fornecidos;
- inconsistentes, isto é, a terminologia usada é geralmente confusa e os métodos e condições de teste não são claramente especificados.

As razões para esta situação são inicialmente relacionadas ao repentino crescimento do mercado de IR's nos países desenvolvidos. Métodos apropriados para a avaliação dos parâmetros de desempenho não foram totalmente aceitos tanto por fabricantes quanto por usuários. Por esta razão, IR's são qualificados de acordo com os interesses e limitações dos fabricantes. De modo geral, as avaliações efetuadas pelos usuários são estritamente operacionais, isto é, a viabilidade de uma certa aplicação é comprovada efetuando-se a operação planejada.

Como consequência desta situação, os usuários têm a sua disposição uma quantidade pequena de informações para decidirem acerca do uso de um certo IR. Esta escolha geralmente se baseia

em informações subsidiárias nem sempre relacionadas com os parâmetros de desempenho.

A presente situação torna essencial o desenvolvimento de uma metodologia normalizada para a qualificação de IR's. Instituições Normativas Nacionais e Internacionais têm desenvolvido trabalhos na direção de efetivar tal objetivo. Atualmente a ISO, através de seu comitê técnico 184, sub-comitê 2 (ISO TC/184/SC2) vem se destacando na definição de terminologia e critérios de avaliação de IR's. Dos resultados já alcançados por esta instituição destacam-se algumas normas, disposições e projetos de norma /4, 8, 9, 10 e 11/.

Demais instituições como o NIST, JIRA e VDI /12,13,14/ têm dado suas contribuições para a definição de uma metodologia normalizada para qualificação de IR's, além do desenvolvimento/especificação de sistemas de teste (Test System - TS) necessários à avaliação de desempenho de IR's.

1.4 OBJETIVOS DESTE TRABALHO

Procurando enriquecer a discussão acerca do esforço mundial de normalização dos critérios de avaliação de desempenho de IR's, o presente trabalho tem como objetivos principais os seguintes pontos:

- aperfeiçoar e sistematizar uma metodologia para a determinação do Erro de Repetibilidade,
- aprofundar o conhecimento sobre o Sistema de Teste denominado Cubo/Berço.

Ainda é previsto a realização de ensaios de avaliação de desempenho do IR IPSO V15, utilizando-se dos instrumentos disponíveis nos laboratórios do LABMETRO e do CERTI.

Como consequência da análise sistemática a ser efetuada pretende-se estabelecer uma terminologia adequada ao trato da questão.

2 CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS ERROS DE REPETIBILIDADE DE ROBÔS INDUSTRIAIS

Este capítulo trata das fontes de erro que mais influenciam o comportamento geométrico de um robô industrial (IR) e como estas agem na geração do Erro de Repetibilidade. Descreve os Sistemas de Coordenadas empregados na determinação do Erro de Repetibilidade; o que se entende por Erro de Posicionamento e a nomenclatura a ser adotada em função das direções e sentidos usados para se ensaiar o posicionamento escolhido. Por último apresenta a formulação para o cálculo do Erro de Repetibilidade.

2.1 FONTES DE ERRO QUE INFLUENCIAM O COMPORTAMENTO GEOMÉTRICO DE UM ROBÔ INDUSTRIAL

Os erros de comportamento geométrico de um IR, em particular o Erro de Posicionamento, são gerados por perturbações devido ao meio ambiente, ao processo no qual o IR está inserido e ao próprio IR.

2.1.1 Descrição das fontes de erro

A figura 2.1 apresenta as fontes de erro que mais contribuem para a formação do Erro de Posicionamento de um IR. Para cada fonte de erro são citadas suas contribuições na forma de três componentes do erro total (sistemático, histerese, aleatório).

- a) Folgas - com origem nas uniões e transmissões que compõem o Robô. Seus efeitos são ampliados no caso em que os medidores

que compõem o sistema de medição do robô (MS-R) são posicionados junto aos acionadores. Geram erros sistemáticos, aleatórios e histereses /15, 16/.

Fontes de Erro	Origem	Geração dos Erros		
		Sist	Hist	Aleat
Folgas	Módulo de Movimentação	Sim	Sim	Sim
Erro de Geometria dos Componentes	Módulo de Movimentação	Sim	Não	Não
Sistema de Medição	Medidores de desl/veloc./acel.	Sim	Sim	Sim
Deformações Mecânicas (Est e Din)	Módulo de Movimentação	Sim	Não	Não
Deformações Térmicas	Módulo de Movimentação	Sim	Não	Sim
Vibrações	Módulo de Movimentação	Não	Sim	Sim
Sistema de Controle	Servo Controle	Sim	Não	Sim

Fig. 2.1 - Quadro das Fontes de Erros X Erros.

- b) Erro de Geometria dos Componentes - basicamente são os erros de forma e dimensional dos elementos mecânicos que compõem o Robô. Geram somente erros sistemáticos.
- c) Sistema de Medição - erros devido as características metrológicas dos medidores que compõem o MS-R. Geram erros sistemáticos, aleatórios e histereses.
- d) Deformações Mecânicas - deformações plásticas e elásticas apresentadas nos elementos que compõem o Robô, devido às forças inerciais, do processo e ao peso do atuador. Geram somente erros sistemáticos.

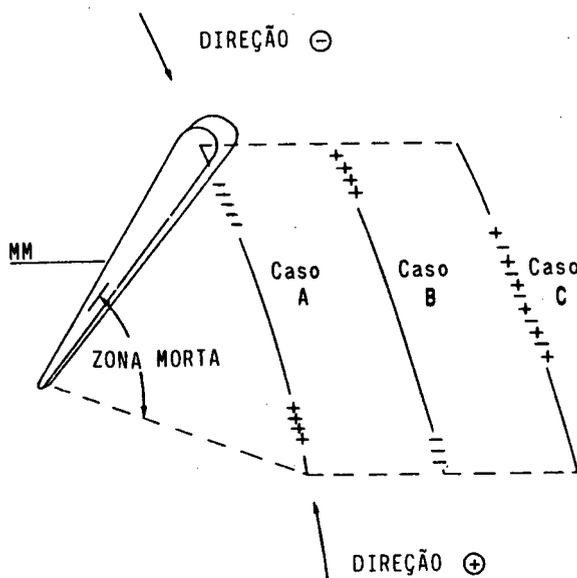
- e) Deformações Térmicas - deformações apresentadas pelos componentes do Robô devido às variações de temperatura causadas pelo meio, pelo processo e por fontes internas ao IR. Quando esta variação é estável são gerados erros sistemáticos e quando oscilante, erros aleatórios. Para o usuário de IR's é importante conhecer o comportamento do erro de posicionamento quando a variação de temperatura se apresenta progressiva, devido principalmente a fontes internas do IR. Tal erro é conhecido como erro sistemático progressivo e a sua estabilização significa que o IR atingiu a sua temperatura de regime /5/.
- f) Vibrações - de origem interna ou externa. Externa quando proveniente de qualquer fonte que não seja o IR. Interna quando são geradas pelo efeito conjunto das forças de atrito e dinâmica sobre o IR. A não consideração no modelo dinâmico de todas as forças que agem sobre IR, principalmente as forças de atrito /16,17/, contribui de maneira considerável na geração de vibrações internas, deteriorando o comportamento geométrico do IR /16/. Geram erros aleatórios e histereses.
- g) Sistema de Controle - originam-se nos servos controles. Na maioria dos IR usa-se a estratégia de controle proporcional, integral e derivativo para cada união que compõe o robô. Nesta estratégia os ganhos de retorno são fixos, quando o IR é um sistema não linear /18/. Geram erros sistemáticos e aleatórios.

2.1.2 Formação do erro de repetibilidade

Devido às fontes geradoras de erros aleatórios, surge a Zona Morta, que é uma faixa onde cada Módulo de Movimentação (MM) pode se deslocar sem que haja a geração de algum sinal de erro de posicionamento junto ao Controlador /15,19/.

Quando um MM é posicionado várias vezes em um certo ponto do espaço, cada posicionamento se fará aleatoriamente dentro desta zona morta (fig. 2.2). A variação de fatores como velocidade, aceleração, carga, mudanças na configuração da estrutura articulada, direção e sentido de aproximação ao posicionamento desejado, acarretará o posicionamento do MM em pontos diferentes dentro da zona morta.

Compondo-se os posicionamentos que ocorrem nas zonas mortas dos demais módulos de movimentação, tem-se o Erro de Repetibilidade do IR.



- Caso A - posicionamentos ocorridos no começo da zona morta.
- Caso B - posicionamentos ocorridos devido a ultrapassagem da zona morta e consequente retorno.
- Caso C - posicionamentos ocorridos na região central da zona morta.
- Caso D - combinação dos casos acima, não mostrado na figura.

Fig. 2.2 - Posicionamentos prováveis dentro de uma zona morta.

2.2 SISTEMA DE COORDENADAS PARA ENSAIOS DE REPETIBILIDADE

Para a determinação e apresentação dos Erros de Repetibilidade de um IR é necessário que se definam sistemas de coordenadas onde se possa relacionar as condições de ensaio, como direção e sentido de aproximação ao posicionamento programado, com os resultados obtidos. As coordenadas do posicionamento programado para o ensaio, são dadas em função do sistema de coordenadas do robô (CS-R). Portanto, recomenda-se descrever o Erro de Repetibilidade em função do CS-R.

Para auxiliar a determinação do Erro de Repetibilidade usa-se o Sistema de Coordenadas de Ensaio (Testing) CS-T, que a exemplo dos anteriormente citados, é definido segundo a regra da mão direita /8/. O CS-T é o sistema de coordenadas ortogonais ou não, usado pelo sistema de teste (TS) escolhido para avaliar o desempenho do IR (fig. 2.3).

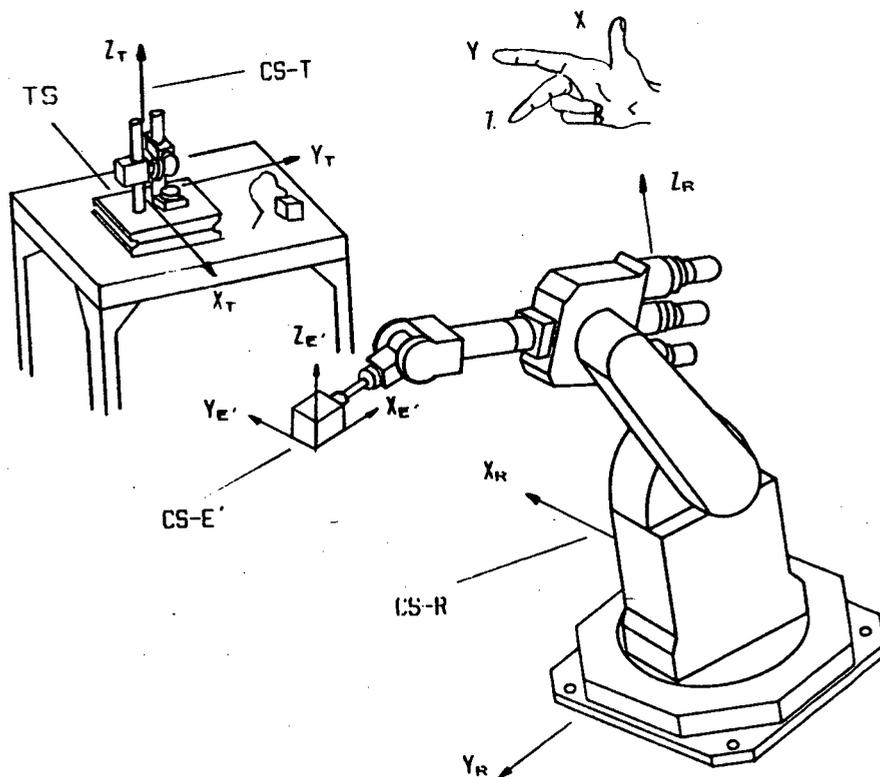


Fig. 2.3 - Sistemas de coordenadas envolvidos em um ensaio de repetibilidade.

O posicionamento real, que difere do programado, é inicialmente descrito em relação ao CS-T, e quando possível, transformado para o CS-R. A notação básica usada é a encontrada na figura 2.3. A origem dos eixos coordenados $+X_T$ e $+Z_T$ é dada conforme recomendações do fabricante e/ou usuário.

2.3 CARACTERIZAÇÃO DOS ERROS DE POSICIONAMENTO

O posicionamento de um corpo no espaço dá-se através de seis graus de liberdade (Degree of Freedom - DOF). Três para localizá-lo e três outros para sua orientação (fig. 2.4). Na operação de um IR destingui-se dois tipos de posicionamentos:

- Posicionamento programado (Programmed Pose-Pp) - é aquele especificado pelo programa de aplicação (fig. 2.5).
- Posicionamento real (Real Pose-Rp) - é aquele alcançado pelo IR em resposta ao Pp (fig. 2.5).

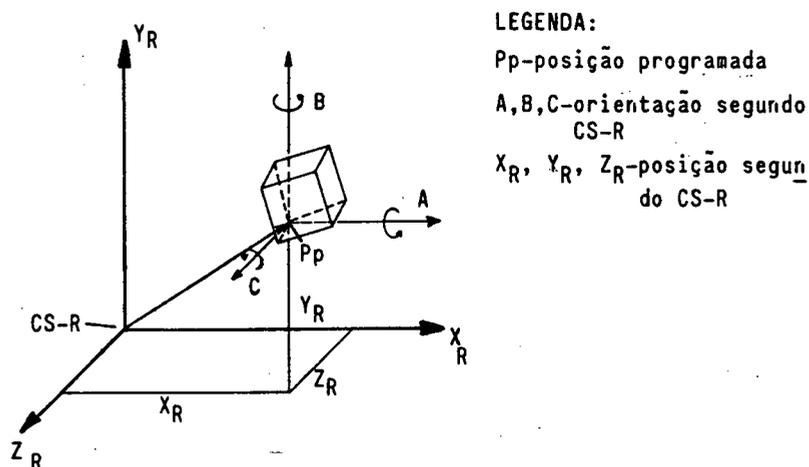


Fig. 2.4 - Posição e orientação de um corpo no espaço.

O Erro de Posicionamento (Error: Pose - EP) é composto por uma parte sistemática e outra aleatória. A parte sistemática é o Erro Sistemático (Error: Systematic - ES) Linear e Angular. A parte

aleatória é o Erro de Repetibilidade (ER) Linear e Angular. Define-se como ES a diferença entre a média dos posicionamentos reais (R_{pm}) e o posicionamento programado (fig. 2.5). O ER é a dispersão em torno da média dos posicionamentos reais (fig. 2.5).

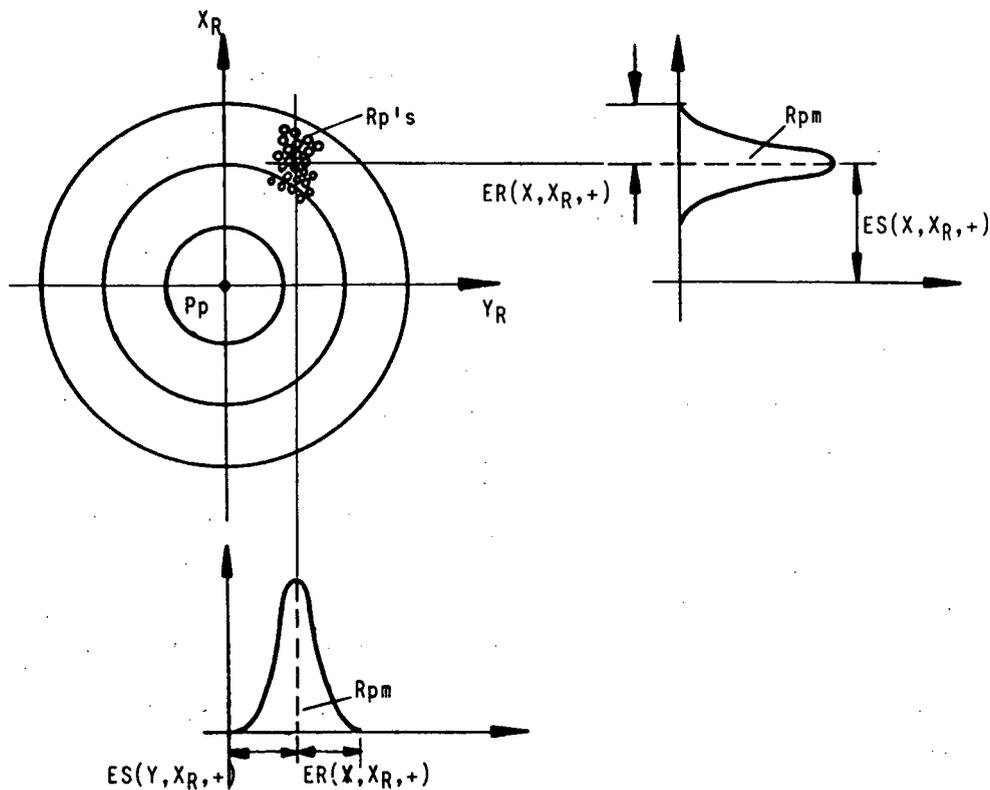


Fig. 2.5 - Representação gráfica do posicionamento programado (P_p), posicionamento real (R_p), posicionamento real médio (R_{pm}), ER e ES para um ensaio de posicionamento com direção X_R e sentido + de aproximação ao P_p .

Em sua forma mais básica - $ER(c,d,s)$, o erro de repetibilidade é apresentado em função de sua componente (c) decomposta em relação ao CS-R em X , Y , Z , A , B ou C , da direção (d) e sentido (s) de aproximação ao P_p (figs. 2.6 e 2.7). A figura 2.5, por exemplo, mostra o $ER(X, X_{R,+})$, que representa a componente X do ER obtido em função do movimento de aproximação ter sido realizado segundo a direção X_R e sentido +. A figura 2.8 apresenta a relação que cada erro de repetibilidade guarda entre si.

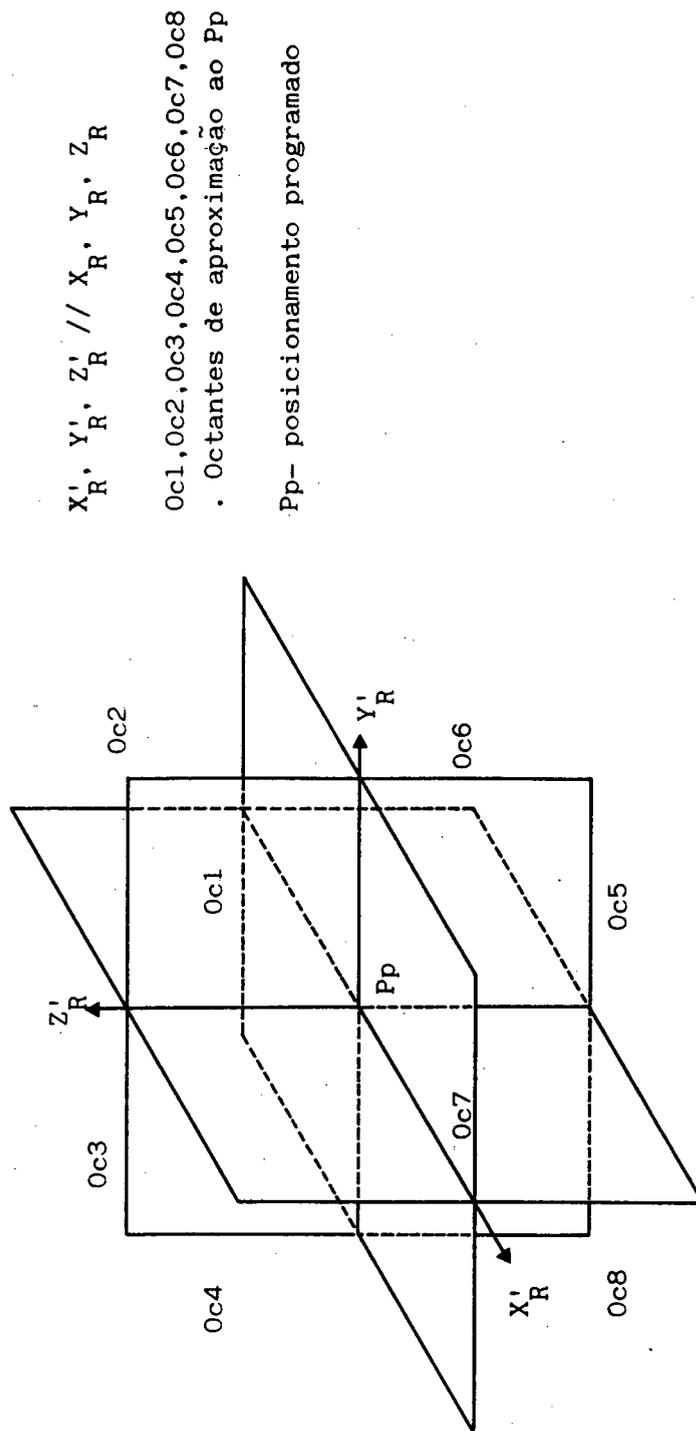


Fig. 2.6 - Representação gráfica dos octantes de aproximação ao Pp.

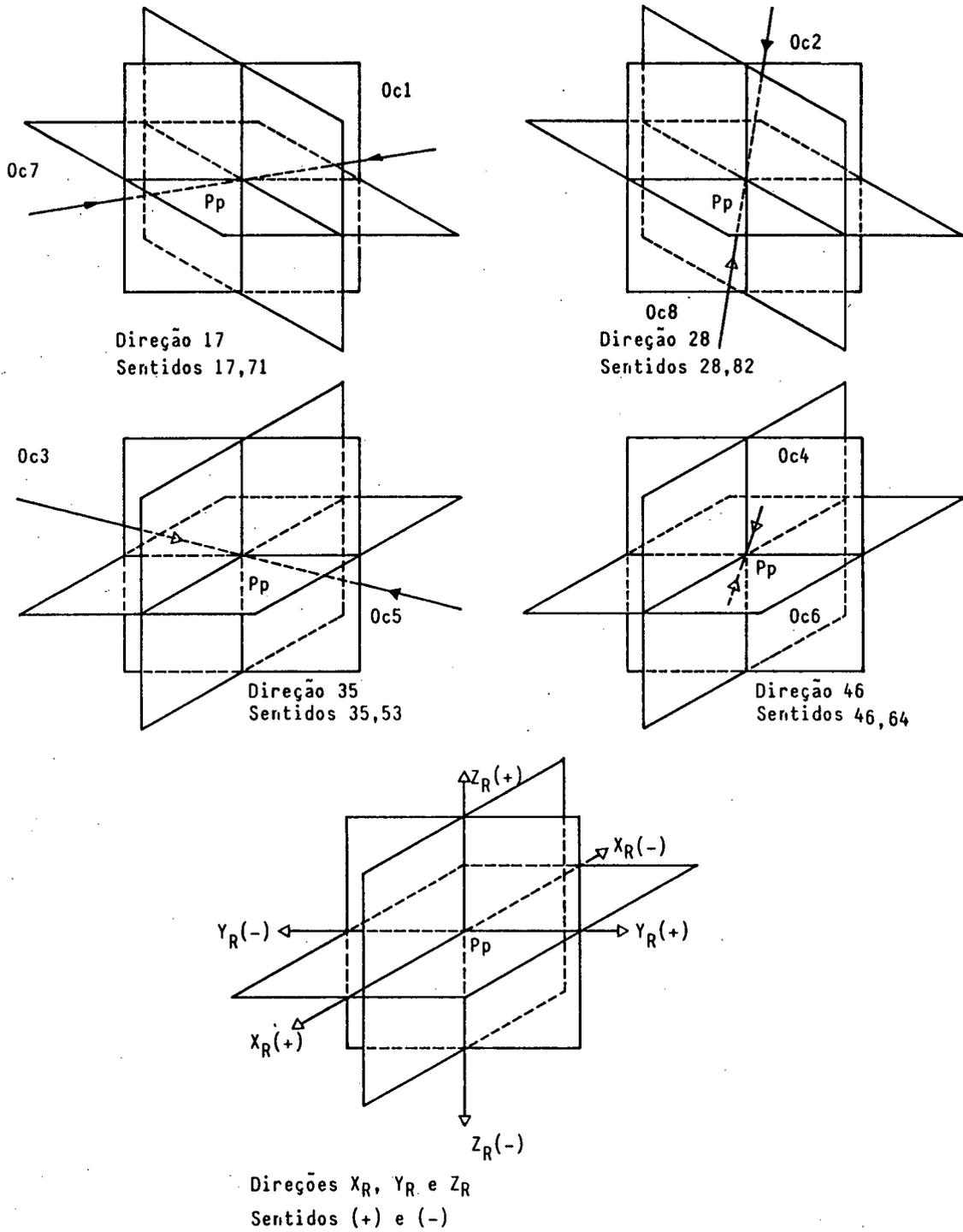
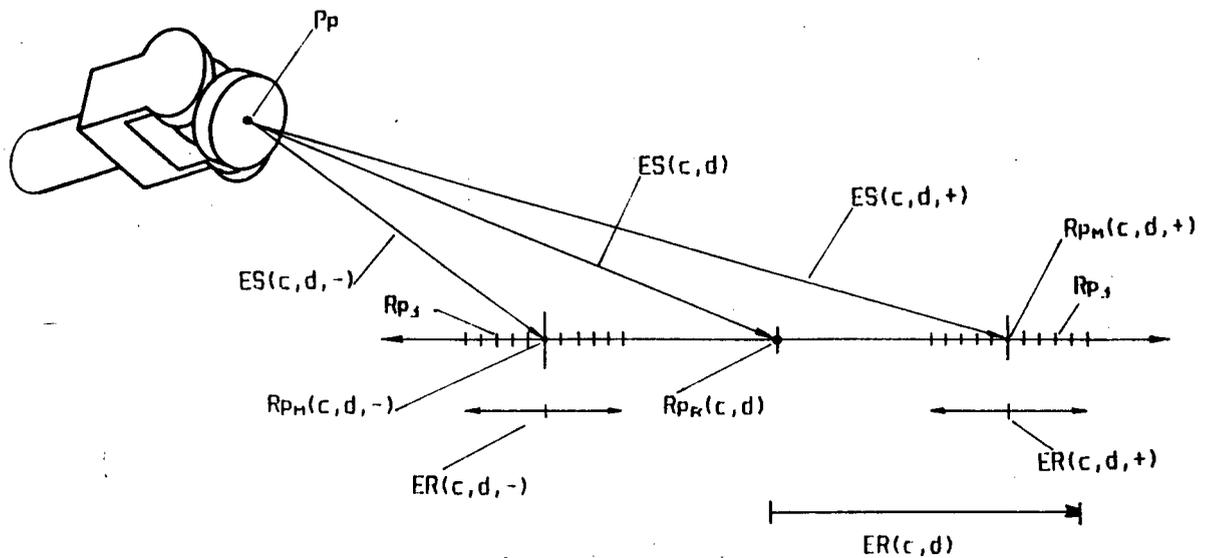


Fig. 2.7 - Direções e sentidos de aproximação ao Pp.

Fisicamente o ER Linear pode ser representado por um segmento de reta (fig. 2.9) ou por uma esfera de raio igual ao valor absoluto do ER e centro no baricentro das posições reais (fig. 2.10).



Legenda: Rp_j - posicionamento real j ($j = 1$ a n).

$Rp_M(d,s)$ - posicionamento real médio para a direção de aproximação (d) e sentido (s):

$$Rp_M = 1/n \sum_{j=1}^n Rp_j(d,s)$$

$Rp_R(c,d)$ - posicionamento real resultante entre $Rp_M(c,d,+)$ e $Rp_M(c,d,-)$.

$$Rp_R(c,d) = [Rp_M(c,d,+) + Rp_M(c,d,-)] / 2$$

$ER(c,d)$ - erro de repetibilidade linear entre $ER(c,d,+)$ e $ER(c,d,-)$.

$ER(d,s)$ - erro de repetibilidade linear para a direção (d) e sentido (s).

$ES(d,s)$ - erro sistemática linear para a direção (d) e sentido (s).

Fig. 2.9 - ER e ES lineares para o ensaio de um Pp, com direção de aproximação (d) e sentido (s).

A distribuição dos erros é considerada normal, com fator de enquadramento de 95% /20/. Seu valor é calculado em função dos parâmetros (c), (d) e (s), conforme as fórmulas abaixo.

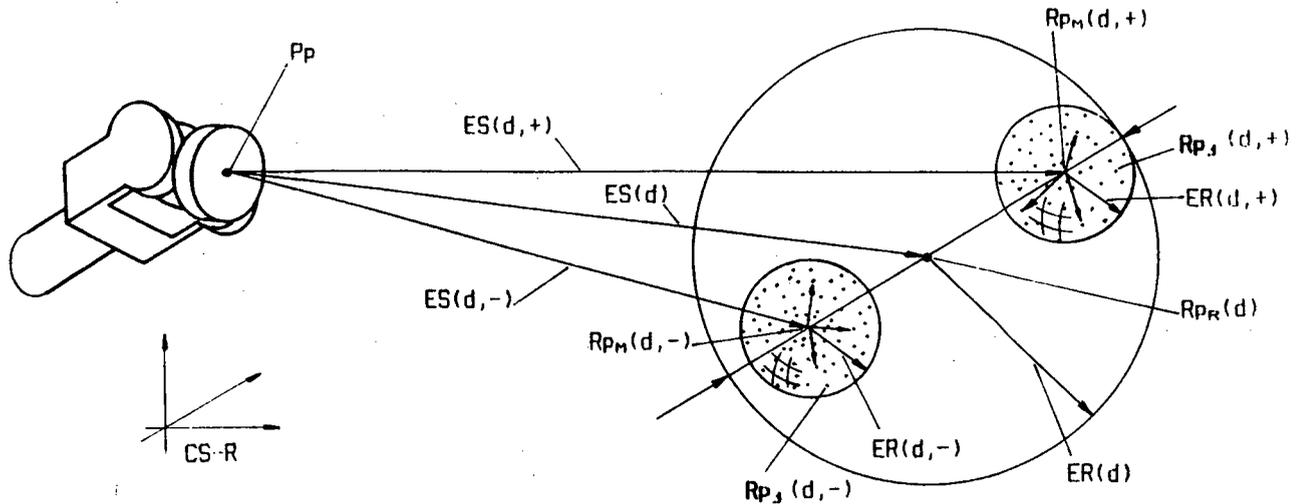
a) Erro de Repetibilidade Linear segundo (c,d,s) (fig. 2.9).

$$ER(c,d,s) = +/- t \cdot S_e ; \quad (2.1)$$

tendo (c) como X, Y ou Z, t como o fator de Student para o número de medições definidas para o ensaio e S_e como desvio padrão segundo a componente (c) selecionada.

b) Erro de Repetibilidade Linear segundo (c,d) (fig. 2.9).

$$ER(c,d) = +/- [Rp_R(c,d) - Rp_M(c,d,s) + \text{maior } ER(c,d,s)] \quad (2.2)$$



Legenda: Rp_j - posicionamento real j ($j = 1$ a n).

$Rp_M(d,s)$ - posicionamento real médio para a direção de aproximação (d) e sentido (s):

$$Rp_M = 1/n \sum_{j=1}^n Rp_j(d,s)$$

$Rp_R(d)$ - posicionamento real resultante entre $Rp_M(d,+)$ e $Rp_M(d,-)$.

$$Rp_R(c,d) = [Rp_M(c,d,+) + Rp_M(c,d,-)] / 2$$

$ES(d,s)$ - erro sistemático linear para a direção (d) e sentido (s).

$ER(d,s)$ - erro de repetibilidade linear para a direção (d) e sentido (s).

$ES(d)$ - erro sistemática linear resultante entre $ES(d,+)$ e $ES(d,-)$.

$ER(d)$ - erro de repetibilidade linear resultante entre $ER(d,+)$ e $ER(d,-)$.

Fig. 2.10 - ER e ES lineares para o ensaio de um Pp, com direção de aproximação (d) e sentido (s).

c) Erro de Repetibilidade Linear segundo (d,s) (fig. 2.10).

$$ER(d,s) = +/- [r_{m\pm} + t \cdot S_r] ; \quad (2.3)$$

tendo $r_{m\pm}$ como a média aritmética das posições r_j , t como fator de Student para o número de medições definidas para o ensaio e S_r com desvio padrão dos r_j .

$$r_{m\pm} = 1/n \sum_{j=1}^n r_j ; \quad (2.4)$$

$$r_j = \sqrt{(x_j - x_M)^2 + (y_j - y_M)^2 + (z_j - z_M)^2} \quad (2.5)$$

d) Erro de Repetibilidade segundo (d) (fig. 2.10).

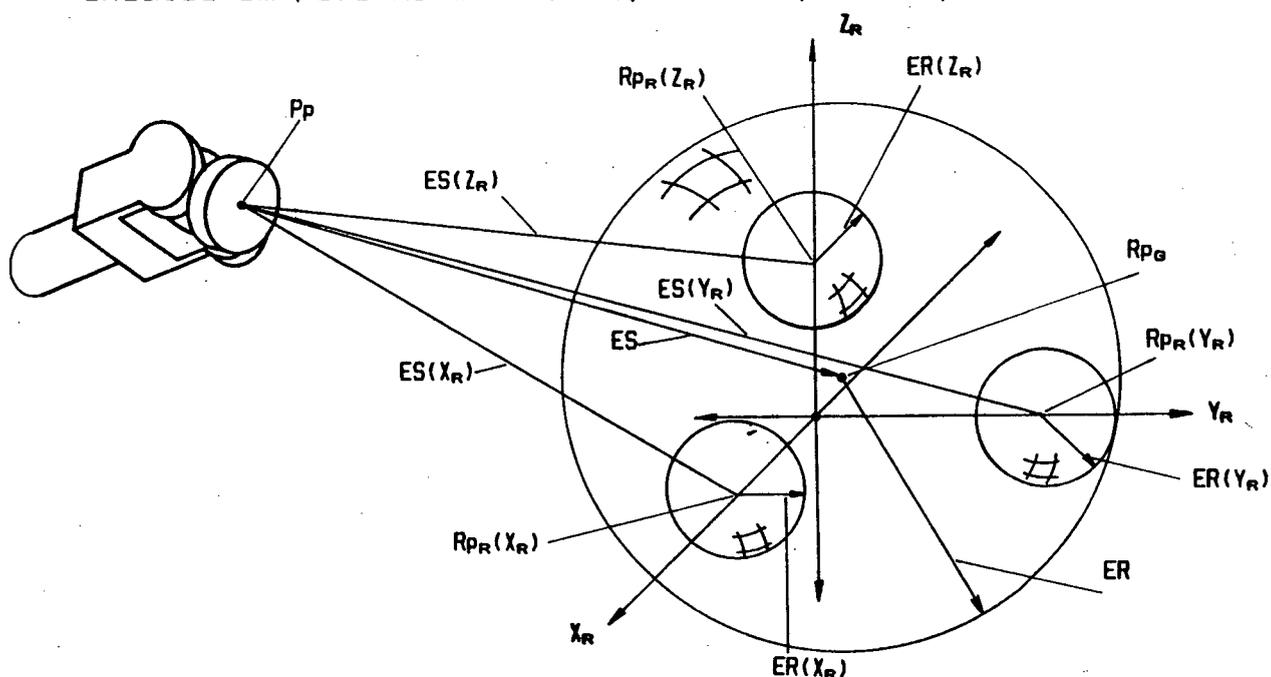
$$ER(d) = +/- [R_{PR}(d) - R_{PM}(d,s) + \text{maior } ER(d,s)] \quad (2.6)$$

O resultado é representado por uma esfera de raio $ER(d)$ com centro no $R_{PR}(d)$.

e) Erro de Repetibilidade Global (fig. 2.11).

$$ER = +/- [R_{PG} - R_{PR}(d) + \text{maior } ER(d)] \quad (2.7)$$

O resultado é representado por uma esfera de raio igual ao valor absoluto do ER e centro no R_{PG} . Para o cálculo do Erro de Repetibilidade Global é necessário que se tenha realizado ensaios em pelo menos 2 direções de aproximação diferentes.



Legenda: R_{PG} - posicionamento real global

$$R_{PG} = 1/g \sum_{j=1}^g R_{PR}(d) \quad \text{onde } g \text{ é o nº de direções}$$

$ES(d)$ - erro sistemático linear para a direção de aproximação (d), onde $d = X_R, Y_R$ e Z_R .

ES - erro sistemático linear global.

$ER(d)$ - erro de repetibilidade linear para a direção de aproximação (d), onde $d = X_R, Y_R$ e Z_R .

ER - erro de repetibilidade linear global.

Fig. 2.11 - ER e ES lineares para o ensaio de um Pp, com direção de aproximação X_R, Y_R e Z_R .

O ER Angular é a dispersão dos ângulos em torno de seu valor médio, representando uma faixa (fig. 2.12). A dispersão do erro é considerada normal, com fator de enquadramento de 95% /20/. Seu valor é calculado em função dos parâmetros (c), (d) e (s), conforme as fórmulas abaixo.

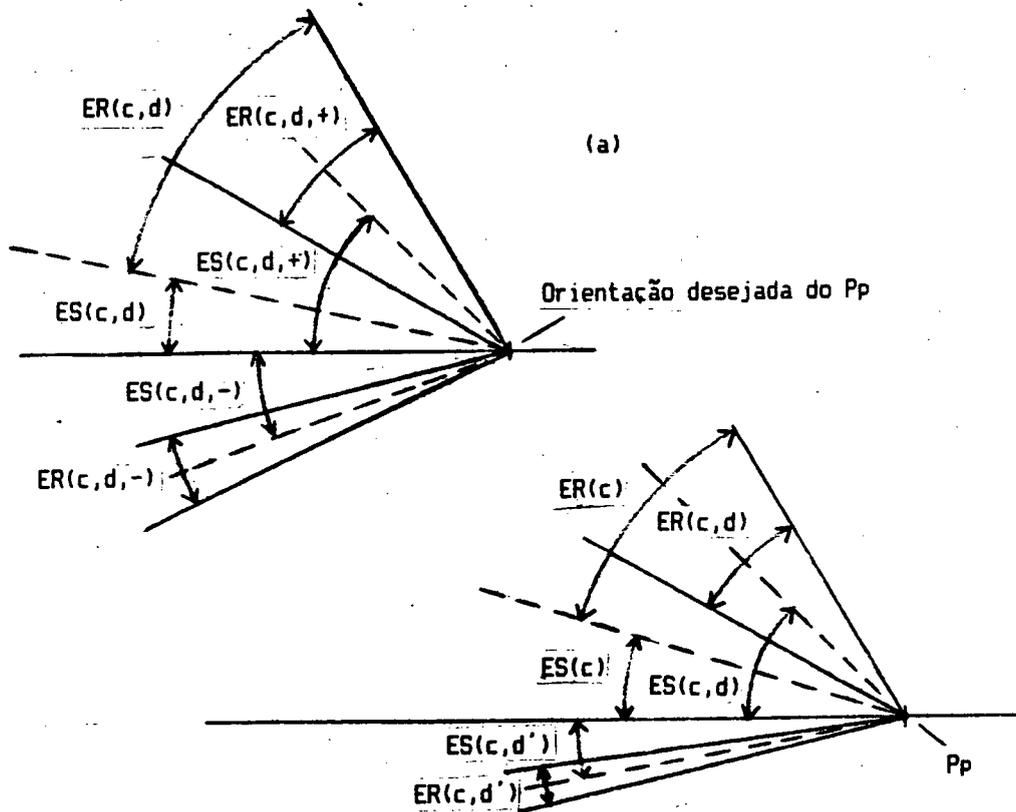


Fig. 2.12 - ES e ER angular, para a componente (c), de um IR ensaiado segundo a direção (d) e sentidos + e - (caso a) e segundo as direções (d) e (d') (caso b).

a) Erro de Repetibilidade Angular segundo (c,d,s) (fig. 2.12a).

$$ER(c,d,s) = +/- t \cdot S_{\alpha} ; \quad (2.8)$$

tendo (c) como A, B ou C, t como fator de Student para o número de medições definidos para o ensaio e S_{α} como o desvio padrão para a componente selecionada.

b) Erro de Repetibilidade segundo (c,d) (fig. 2.12a).

$$ER(c,d) = +/- [ES(c,d) - ES(c,d,s) + \text{maior } ER(c,d,s)] \quad (2.9)$$

c) Erro de Repetibilidade segundo (c) (fig. 2.12b).

$$ER(c) = +/- [ES(c) - ES(c,d) + \text{maior } ER(d,c)] \quad (2.10)$$

3 METODOLOGIA PARA ENSAIOS DE REPETIBILIDADE

Os ensaios de repetibilidade podem ser classificados em:

- a) Normalizados: verifica se estão sendo cumpridas as especificações do fabricante e/ou usuário conforme a norma, recomendação técnica ou condições contratuais estabelecidas.
- b) Verificativos: verifica se o robô industrial (IR) cumpre satisfatoriamente a aplicação para qual foi destinado.
- c) Prospectivos: verifica o efeito de uma ou mais variáveis sobre o desempenho do IR.

Não é objetivo deste trabalho discutir os ensaios normalizados e verificativos. Neste capítulo serão apresentadas as recomendações para as fases de planejamento, execução, processamento e documentação dos ensaios prospectivos de repetibilidade.

3.1 PLANEJAMENTO DO ENSAIO DE REPETIBILIDADE

O planejamento do trabalho experimental visa garantir a objetividade e a reprodutibilidade dos resultados. Nos ensaios prospectivos, as condições de ensaio são fixadas de acordo com o que se deseja conhecer do IR. A seguir são apresentadas sugestões para a fixação das condições de ensaio tais como: posicionamentos a ensaiar, direções e sentidos de aproximação, trajetória a ser percorrida, números de medições, critérios de seleção do sistema de teste, condições ambientais, temperatura de regime do IR, carregamento, velocidades e acelerações.

3.1.1 Informações prévias sobre o robô industrial

Objetiva conhecer o IR a ser ensaiado e suas particularidades. Características operacionais, condições de funcionamento, modos de operação e restrições de funcionamento são informações básicas que devem ser buscadas junto ao fabricante.

Quando possível, as informações sobre o erro de repetibilidade (ER) fornecidas pelo fabricante, devem vir acompanhadas das condições de ensaio em que foram obtidas e quais os posicionamentos ensaiados.

3.1.2 Posicionamentos programados para o ensaio - definição e seleção

A qualificação de um IR quanto ao ER, exigiria o ensaio de todos os posicionamentos possíveis de serem alcançados pelo IR dentro de seu volume de trabalho (WS). Obviamente, o tempo requerido para esta tarefa torna-a impossível, em vista do grande número de pontos e variações das condições de ensaio a serem cumpridas.

As restrições quanto ao número de posicionamentos a ensaiar é função direta do objetivo definido para o ensaio e do tempo disponível para realizá-lo. Há casos onde os posicionamentos são previamente explicitados pelo requerente do ensaio.

Propõe-se, para auxiliar na escolha dos Pp's, a criação de uma matriz de pontos /21/ (figs. 3.1 e 3.2). Os posicionamentos definidos para o ensaio são escolhidos entre aqueles que compõem a matriz de pontos, que está contida no WS. O número de pontos e o espaçamento entre eles é uma função diretamente proporcional às

dimensões do WS. Para se ter uma melhor distribuição dos pontos na matriz, recomenda-se que o espaçamento entre estes, em um mesmo eixo, seja constante.

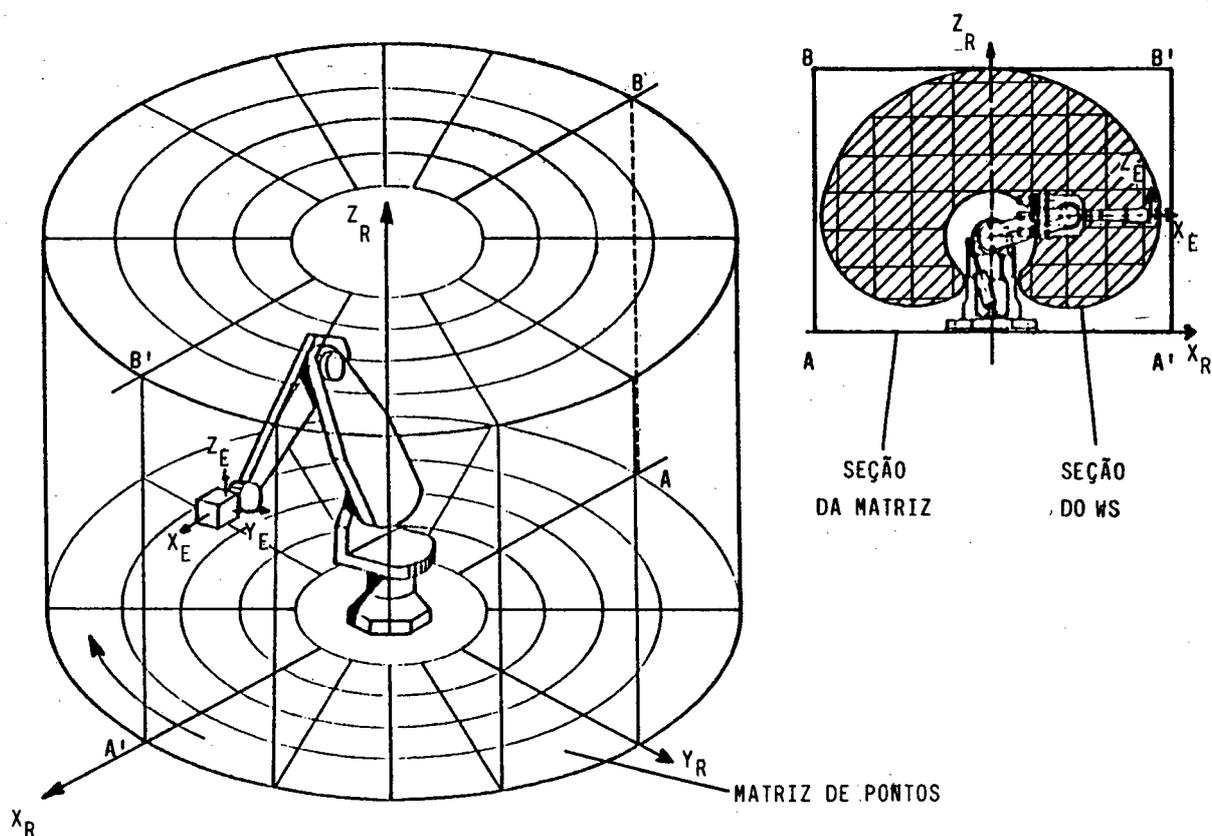


Fig. 3.1 - Matriz de pontos de um IR de revolução.

Para os IR's os valores do ER não apresentam uma distribuição racional dentro do WS, o mesmo não acontece com o erro sistemático (ES), que no caso de robôs industriais de revolução, tende a apresentar valores piores na região periférica superior do WS /22,23,24/. Mesmo assim algumas regiões tendem a ser mais representativas no que diz respeito ao ER. São elas: a região central do WS, a periférica e as de singularidade. Como primeira opção, recomenda-se a escolha de um ou mais posicionamentos situados na região central do WS. A razão para tal escolha reside no fato de que para a maioria dos IR's existentes no mercado, os

valores do ganho de retorno usados na estratégia de controle são fixados para posicionamentos nesta região /17,22/. A opção seguinte recai nos posicionamentos localizados na periferia do WS. Nesta região os ganhos de retorno necessários para a compensação do amortecimento, provocado pela força de atrito, não coincidem com os fixados pela estratégia de controle /17,22/. Os Pp's situados nas proximidades das regiões de singularidade constituem a escolha restante entre as regiões críticas; pois o controle dos posicionamentos torna-se deficiente junto a estas. Os demais posicionamentos são distribuídos nas regiões restantes do WS.

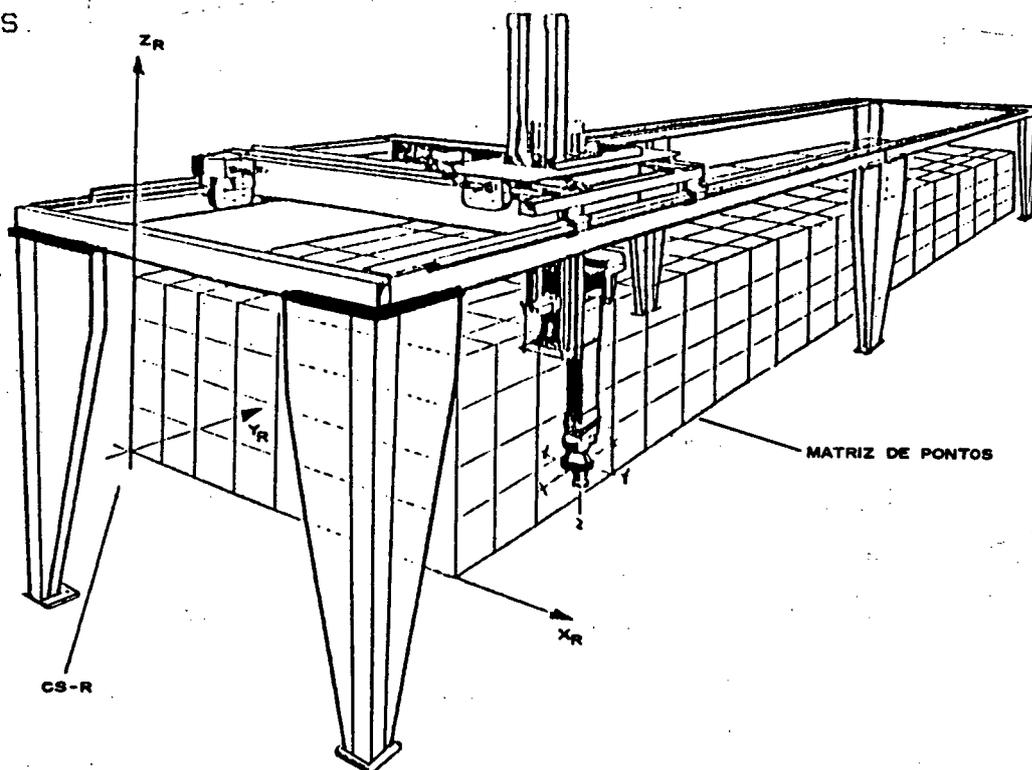


Fig. 3.2 - Matriz de pontos de um IR tipo portal.

Certos tipos de IR's possibilitam a restrição dos posicionamentos escolhidos para ensaio a uma seção planã do WS. Como, por exemplo, o caso de IR de revolução que não são influenciados de maneira significativa pelo primeiro módulo de movimentação (MM)

(fig. 3.3) /22/. As figuras 3.4 e 3.5 exemplificam a escolha de alguns posicionamentos para uma seção plana específica.

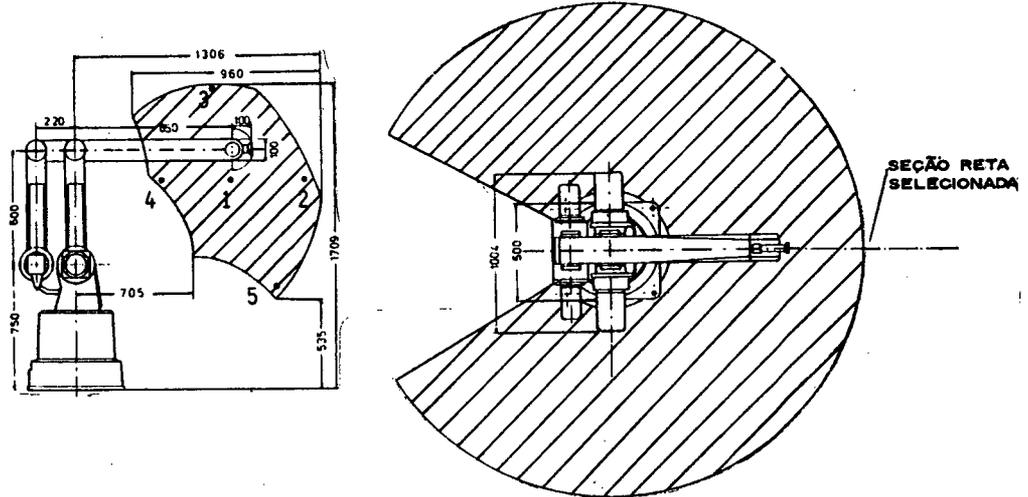


Fig. 3.3 - Exemplo de localização de Pp's em uma seção reta do WS de um IR de revolução.

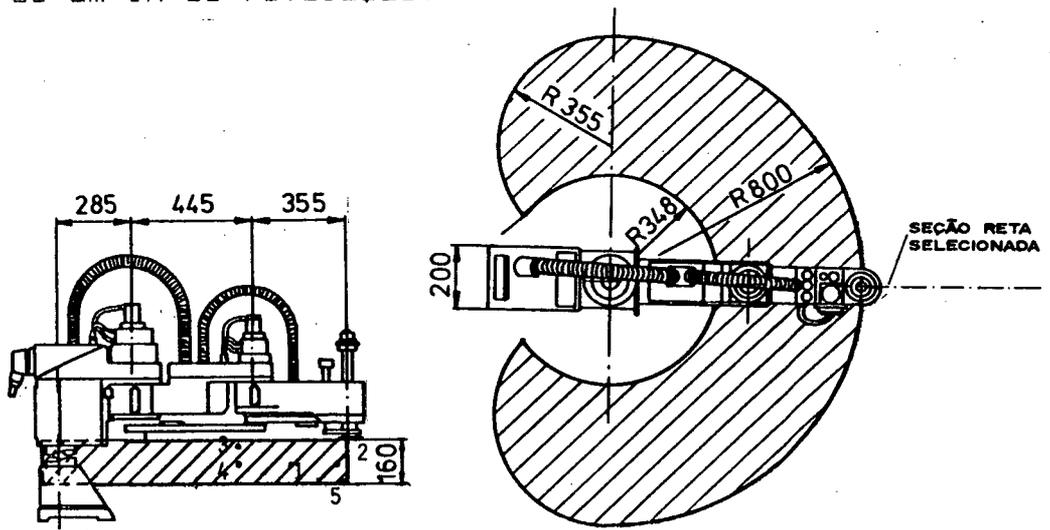


Fig. 3.4 - Exemplo de localização de Pp's em uma seção reta do WS de um IR tipo SCARA

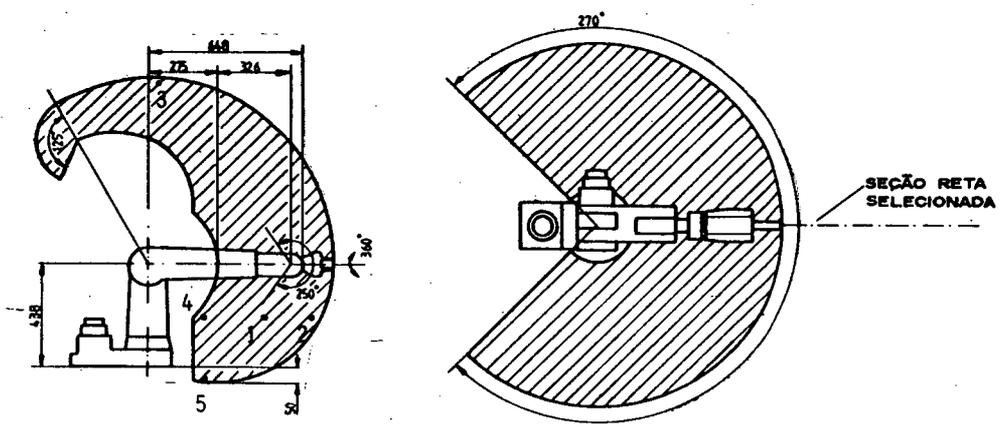


Fig. 3.5 - Exemplo de localização de Pp's em uma seção reta mais complexa.

3.1.3 Direções e sentidos de aproximação a cada posicionamento programado

As direções selecionadas para os ensaios de posicionamento - X_R , Y_R , Z_R , 17, 28, 35 e 46 (figs. 2.6 e 2.7) - além de sistematizar a escolha da direção e sentido de ensaio, permite obter a máxima variação do ER. A escolha das direções e sentidos de aproximação ao posicionamento programado, depende do tempo disponível para a realização do ensaio e do objetivo a ser alcançado. A seguir são apresentadas, em ordem decrescente, as direções e sentidos tidas como as mais críticas.

A primeira direção e sentido de aproximação ao Pp, é aquela coincidente com a aceleração da gravidade /25/. Nesta condição reúnem-se fatores que tendem a aumentar o valor do ER, em relação as demais direções, tornando-a a mais crítica. Sugere-se como direção seguinte, qualquer das diagonais 17,28,35 ou 46, com sentido de aproximação ao Pp à favor da gravidade. Nas demais direções e sentidos, as mais críticas são aquelas que propiciam a movimentação do maior número de MM's durante a aproximação ao Pp.

3.1.4 Trajetória a ser percorrida pelo robô industrial

Nos ensaios prospectivos há ocasiões em que se deseja conhecer a influência de cada módulo de movimentação sobre o ER para um certo posicionamento. Não sendo este o objetivo do ensaio, recomenda-se usar como trajetória de aproximação ao Pp, aquela que envolva todos os MM's nos sentidos positivo e negativo de movimentação dos mesmos (fig. 3.6) /16,22/. A não inclusão de um

ou mais módulos de movimentação durante a trajetória de aproximação ao Pp pode ocasionar uma diferença considerável no resultado do ER. Sempre que possível, procurar efetuar a aproximação ao Pp no modo de controle CPC.

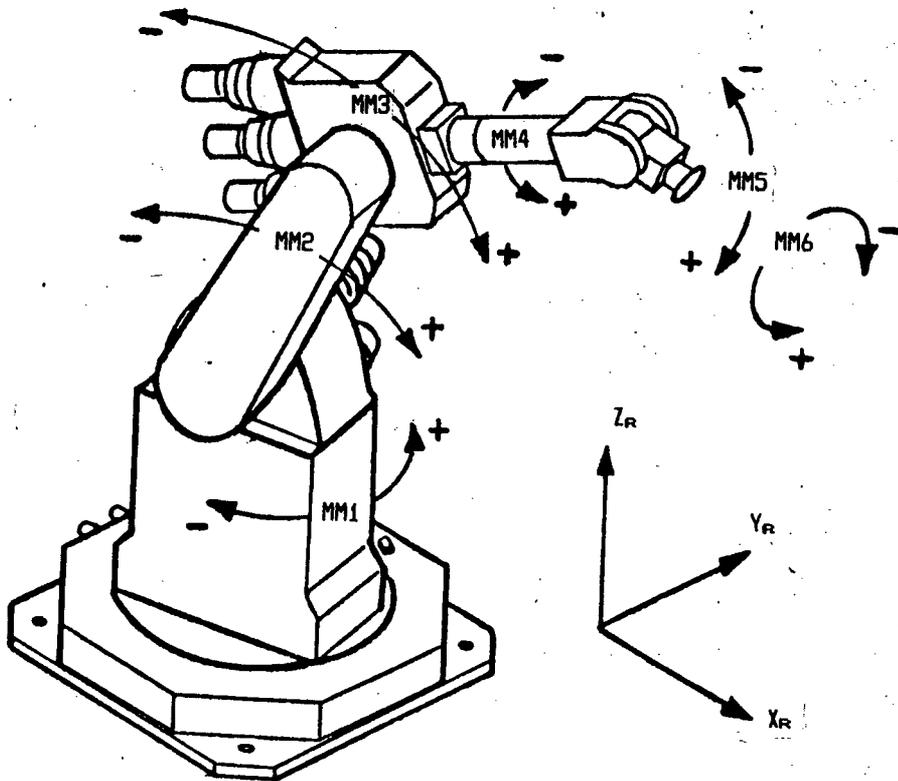


Fig. 3.6 - Módulos de movimentação de IR e seus sentidos de movimento.

3.1.5 Número de medições

Propõe-se como critério de determinação do número de medições para um posicionamento, a estabilização do desvio padrão dos resultados, obtidos a partir das leituras da terceira medição. As leituras são tomadas até o momento em que o desvio padrão de pelo menos 4 resultados consecutivos se repetem. Tal critério foi baseado em observações realizadas em laboratório. Não é recomendado tomar como número de medições para o ensaio prospectivo de mais de um Pp, aquele obtido para um dos

posicionamentos. Frequentemente o número de medições necessários para a estabilização do resultado de um Pp não é igual ao de outro /26/.

3.1.6 Critérios de seleção do sistema de teste

A ordem de grandeza da menor tolerância estabelecida para o ER é o fator determinante na escolha do sistema de teste padrão. Os demais fatores, como princípio de funcionamento do transdutor, faixa de operação, resolução e sensibilidade, são definidos quando se tem bem claros os objetivos a serem alcançados com o ensaio. A automação ou não da medição está ligada ao princípio de funcionamento escolhido e da disponibilidade de equipamentos específicos para tal. Os capítulos 4 e 5 apresentam alguns dos sistemas de teste possíveis de serem encontrados e/ou montados em boa parte dos laboratórios de metrologia do país.

3.1.7 Condições ambientais

Envolve a definição dos níveis toleráveis de temperatura ambiente, radiação, pressão atmosférica, umidade relativa do ar, vibrações externas, ondas eletromagnéticas e partículas em suspensão no ar. Seus níveis são fixados conforme as metas que se deseja alcançar nos ensaios prospectivos. Em vários casos tem-se como objetivo dos ensaios a influência destas condições no valor do ER. Independente do objetivo, é necessário que se faça a monitoração das condições ambientais escolhida para que se possa relacionar o ER com possíveis variações destas condições. Atenção

especial deve ser dada a variação de temperatura do meio ambiente e as possíveis fontes de vibrações externas.

3.1.8 Temperatura de regime do robô industrial

A temperatura de regime ou tempo necessário para se alcançar a condição de regime, é função das condições de aplicação definidas para o IR. A determinação destes valores é efetuada através de ensaios de posicionamento. A estabilização dos Rp's em um patamar é a referência para se computar os valores de tempo decorrido e temperaturas das partes do Robô (R), alcançados até este momento. A ordem de grandeza de tais valores está relacionada com o princípio de acionamento do IR (hidráulico, pneumático ou elétrico). Ensaios realizados sem que a temperatura de regime tenha sido alcançada, terá os seus resultados de medição mascarados. Esta influência será maior ou menor dependendo da relação entre o tempo requerido para se atingir o estado de regime e o tempo de ensaio.

3.1.9 Carregamento

Em ensaios prospectivos, o carregamento é uma variável importante na determinação do ER. Cargas de valores variados, fixadas à estrutura articulada, modificam a dinâmica do IR. Para vários IR de mercado, estas modificações não são previstas em seus modelos dinâmicos; acarretando uma deterioração de seu desempenho geométrico /17/. O valor e localização destas cargas na estrutura articulada do IR é função direta do objetivo definido para o ensaio.

3.1.10 Velocidades e acelerações utilizadas pelo robô industrial nos ensaios de repetibilidade

Para uma mesma trajetória programada, o uso de diferentes velocidades e acelerações podem acarretar uma variação do ER gerado pelo IR ao alcançar o posicionamento programado. As diferentes velocidades e acelerações modificam a dinâmica do IR, aumentando as vibrações e folgas que influem no ER esperado. Conforme o modelo dinâmico e a estratégia de controle definidas para o IR, tais variações são notadas em maior ou menor intensidade durante os ensaios. De uma maneira geral, o aumento da velocidade e/ou aceleração causam um aumento do ER /27/.

3.2 EXECUÇÃO DO ENSAIO DE REPETIBILIDADE

A execução do ensaio de repetibilidade se faz de acordo com o definido na fase de planejamento. O andamento do ensaio, assim como modificações dos parâmetros previamente definidos devem ser registrados no memorial do ensaio para posterior análise.

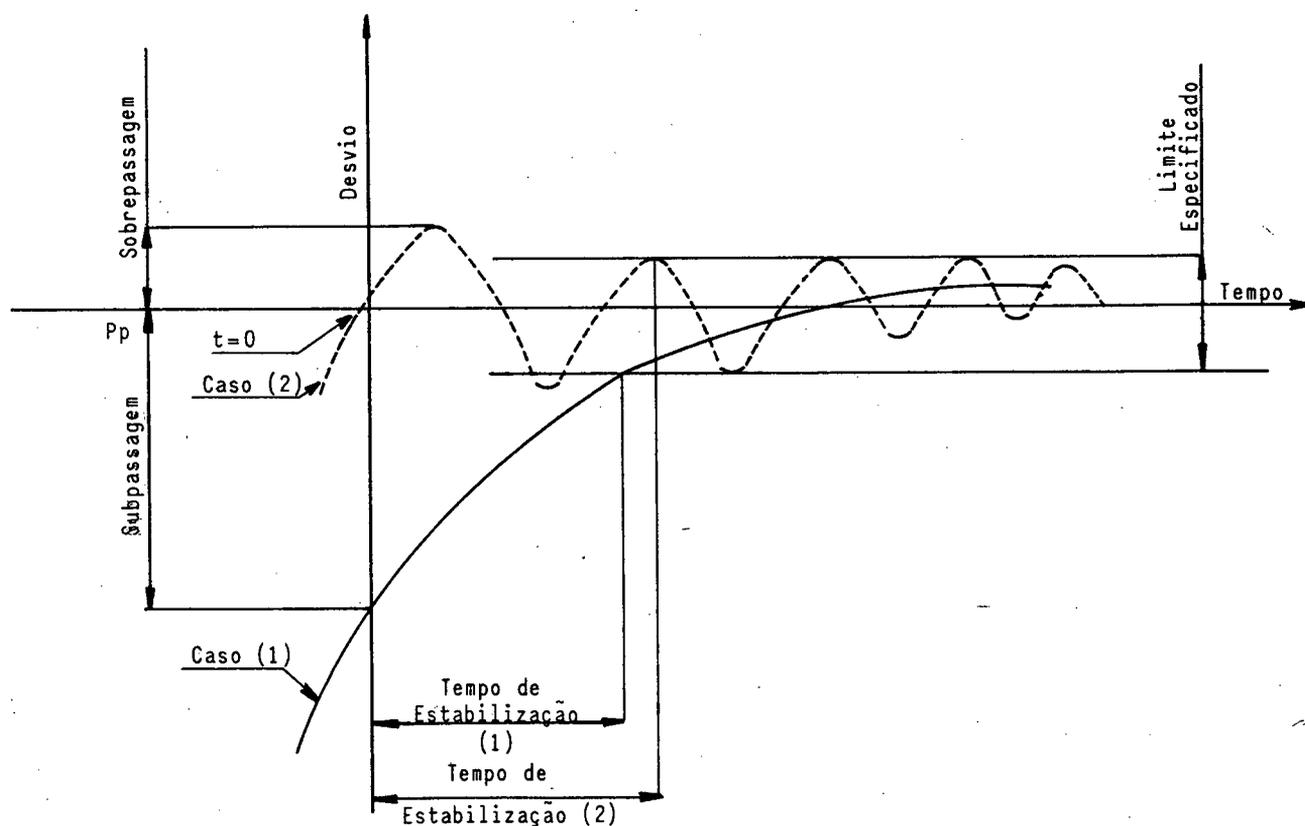
3.2.1 Instalação do robô industrial

Nos ensaios prospectivos as próprias condições de instalação podem ser consideradas como variáveis de ensaio. Uma fixação mal feita do IR ou um nível de tensão ou ganho de retorno fora do especificado, podem ocasionar erros durante o funcionamento do IR que geram -ER's. Quando não for objetivo do ensaio quantificar a influência destes parâmetros na geração do ER, procurar seguir as recomendações do fabricante e/ou usuário. Não as possuindo,

procurar no mínimo, efetuar a fixação do IR a mais rígida possível e de preferência sobre uma base de grande massa em relação ao IR, para que se possa diminuir o efeito das vibrações sobre o ER. Procurar garantir um nível de tensão estabilizado.

3.2.2 Ensaios prévios

São realizados quando não se tem informações prévias para subsidiar o planejamento. Os ensaios prévios mais comuns são o de tempo de estabilização e determinação da ordem de grandeza do ER. Tempo de estabilização é o tempo para que a oscilação apresentada pela estrutura do IR atinja um valor específico (fig. 3.7). A fixação deste valor específico é função do objetivo que se deseja alcançar no ensaio.



Casos (1) e (2) representam 2 fases diferentes de aproximação ao P_p .

Fig. 3.7 - Tempo de estabilização de um IR.

A determinação do tempo de estabilização tem por função principal minimizar o efeito da oscilação da estrutura articulada sobre a geração do ER. O tempo de estabilização de um IR varia significativamente conforme a localização do Pp no WS e o sentido e direção de aproximação utilizado /5/. A determinação da ordem de grandeza do ER visa confirmar a escolha do sistema de teste selecionado para efetuar o ensaio de repetibilidade. Recomenda-se iniciar a determinação da ordem de grandeza com baixas velocidades de aproximação ao Pp, para se evitar surpresas.

3.2.3 Programação do robô industrial

Independente do modo de controle utilizado para se definir a trajetória a ser seguida pelo IR até o Pp, recomenda-se que os programas de aplicação sejam testados para que se possa detectar falhas de programação, evitando assim consequências maiores em decorrência das possíveis falhas.

3.2.4 Documentação durante o ensaio

A documentação a ser obtida é basicamente o registro das observações efetuadas durante o andamento do ensaio. Consiste em informações, que de uma maneira ou de outra, auxiliam na obtenção dos resultados de medição e sua consequente análise. Modificações nas condições de ensaio fixadas, perturbações ambientais e a constatação de mal funcionamento de partes do IR são exemplos significativos. Portanto, recomenda-se que as observações registradas sejam as mais completas possíveis, contendo dados como tempo de ensaio decorrido, condições ambientais e

operacionais observadas no momento em que foi constatado o fato perturbador e possíveis causas que acarretaram o efeito registrado. Sempre que possível, anexar informações ilustrativas.

3.3 PROCESSAMENTO E DOCUMENTAÇÃO DOS RESULTADOS

Envolve a transformação dos dados obtidos, em informações gráficas e valores numéricos representativos do parâmetro de desempenho em questão. São gerados para auxiliar a interpretação do comportamento do IR.

3.3.1 Processamento dos dados experimentais

O processamento dos dados experimentais para a obtenção do ER é efetuado de acordo com a formulação apresentada no item 2.3 (fórmulas 2.1 a 2.10). Características inerentes ao sistema de teste escolhido para a realização do ensaio podem determinar a adequação das leituras obtidas para que se aplique as fórmulas acima citadas.

3.3.2 Documentação e interpretação dos resultados

Os dados brutos e processados de um ensaio de repetibilidade são apresentados na forma de tabelas e gráficos. As tabelas apresentadas são divididas em tabelas de leituras e tabelas de resultados. As tabelas de leituras apresentam as leituras por medição para cada posicionamento programado (fig. 3.8). Além de documentar, tem por função auxiliar a análise das informações obtidas. A tabela de resultados apresenta os resultados de

medição (ER neste trabalho) por Pp ensaiado para uma dada condição de ensaio.

Medidores	M_1	M_2	M_3	M_4	M_5	M_6
Medições						
1	111	222	333	123	231	321
2	444	555	666	456	564	654

Velocidade: xxx mm/s

Direção de aproximação: 35

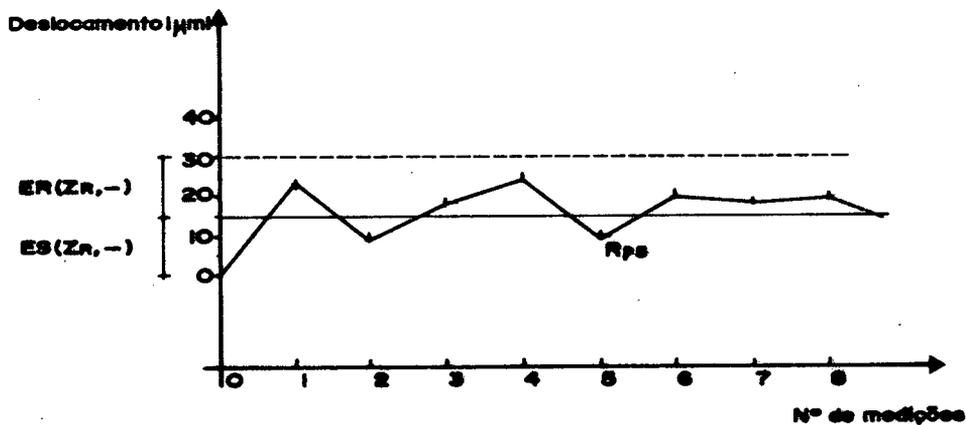
Aceleração: yyy mm/s²

Sentido de aproximação: 53

Carga: zzz kg

Pp: (X_R, Y_R, Z_R, A, B, C)

Fig. 3.8 - Tabela de leituras obtidas para um Pp sobre condições específica de ensaio.



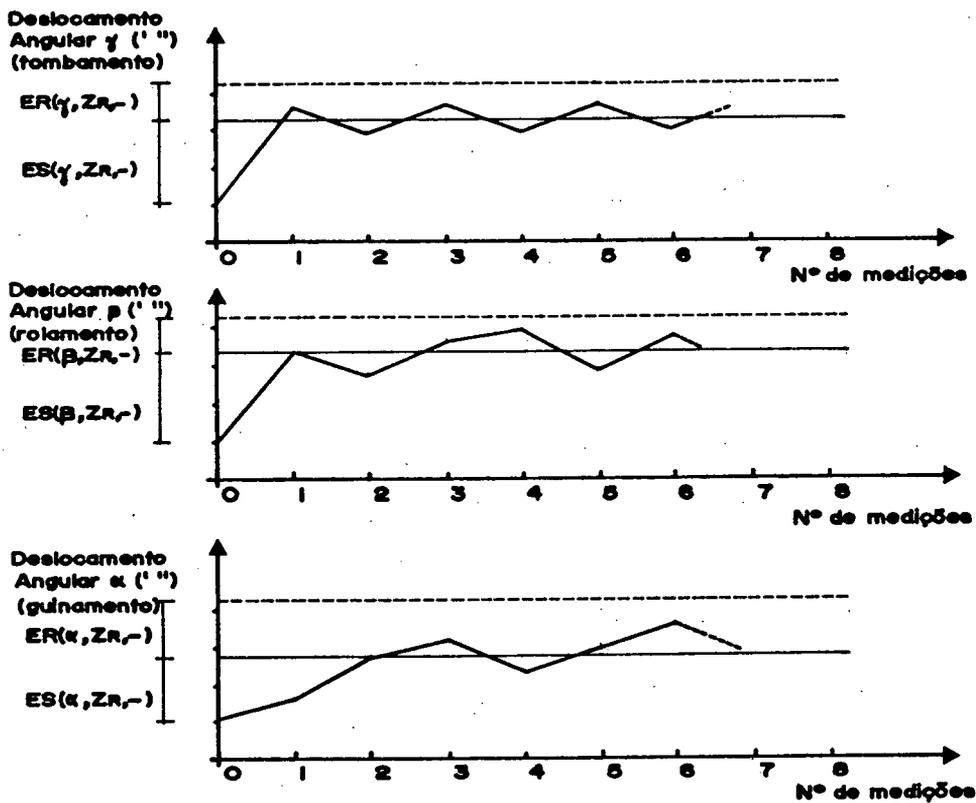
Condições de ensaio:

- . Coordenadas do Pp: (X_R, Y_R, Z_R, A, B, C)
- . Direção e sentido de aproximação: $Z_R(-)$
- . Velocidade: xxxx mm/s
- . Aceleração: yyyy mm/s²
- . Carga: zzz kg.
- . Robô industrial: SAPIENS modelo 63

Fig. 3.9 - Gráfico de resultados de medição por posicionamento programado para uma dada condição de ensaio.

A representação gráfica dos resultados obtidos é feita por meio dos gráficos de resultados de medição por posicionamento

programado (figs. 3.9, 3.10 e 3.11) ou por seções de WS ensaiado (figs 3.12 e 3.13). A escolha de um ou mais destes gráficos para a representação do ER é função do objetivo definido para o ensaio. O gráfico de resultados de medição por posicionamento programado fornece o ER, ES e os posicionamentos reais (R_p) por medição e para uma mesma condição de ensaio (fig 3.9).



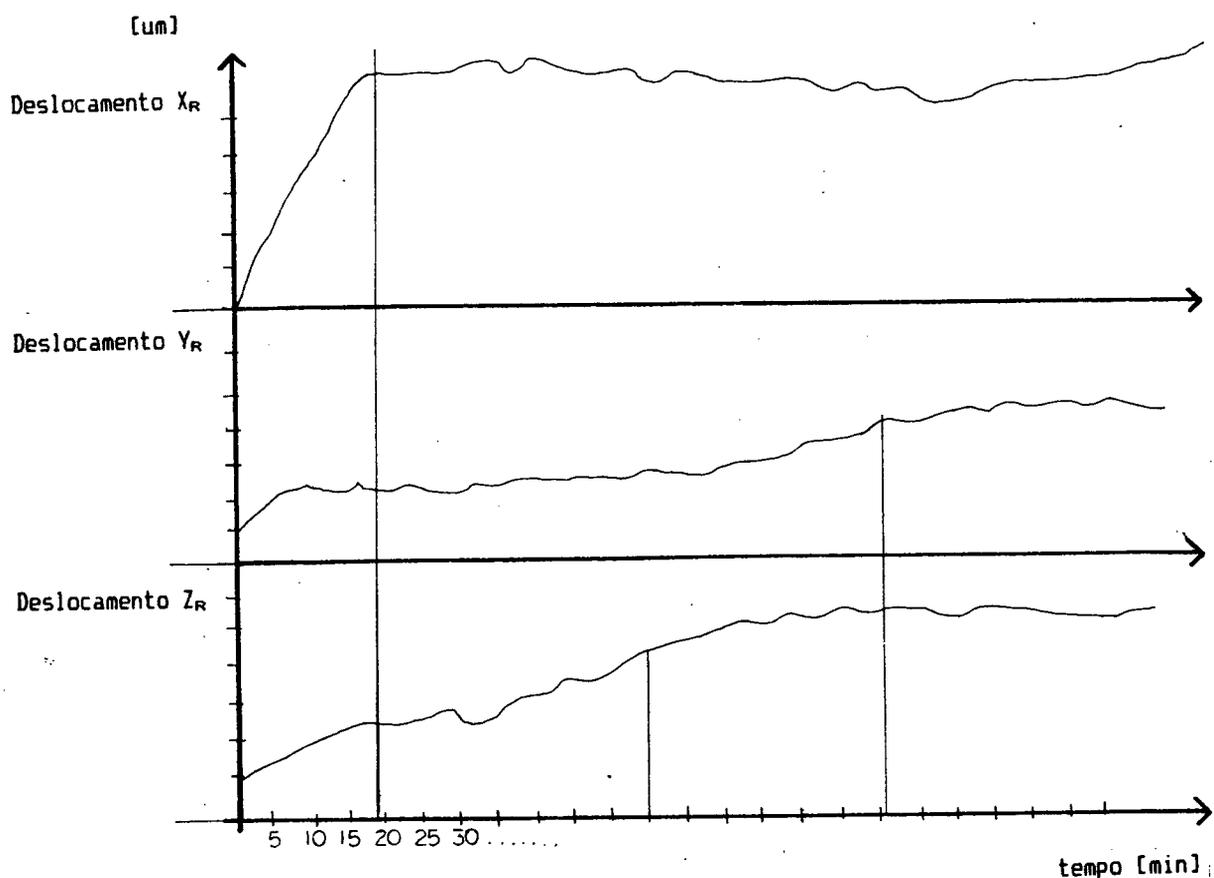
Condições de ensaio:

- .Coordenadas do Pp: (X_R, Y_R, Z_R, A, B, C)
- .Direção e sentido de aproximação: $Z_R(-)$
- .Velocidade: xxxx mm/s
- .Aceleração: yyyy mm/s².
- .Carga: zzz kg.
- .Robô industrial: SAPIENS modelo 63

Fig. 3.10 - Gráfico de resultados de medição por posicionamento programado, medidos em relação ao CS-E, para uma dada condição de ensaio.

Informações sobre o ER angular segundo o -CS-E (rolamento, guinamento e tombamento) também podem ser representadas (fig 3.10). O gráfico por posicionamento programado procura dar uma

visão instantânea do comportamento do IR durante o ensaio, auxiliando na visualização das variações do ER durante o seu transcorrer. Tomando o eixo das abcissas como escala de tempo, o mesmo gráfico é usado para determinar o tempo que o ER e o ES progressivo do IR leva para atingir o patamar de estabilização (fig. 3.11). O gráfico do ER por seção do WS da figura 3.12 visualiza as áreas do WS com a mesma faixa de erro, para uma mesma condição de ensaio; auxiliando na determinação da área de trabalho mais adequada.



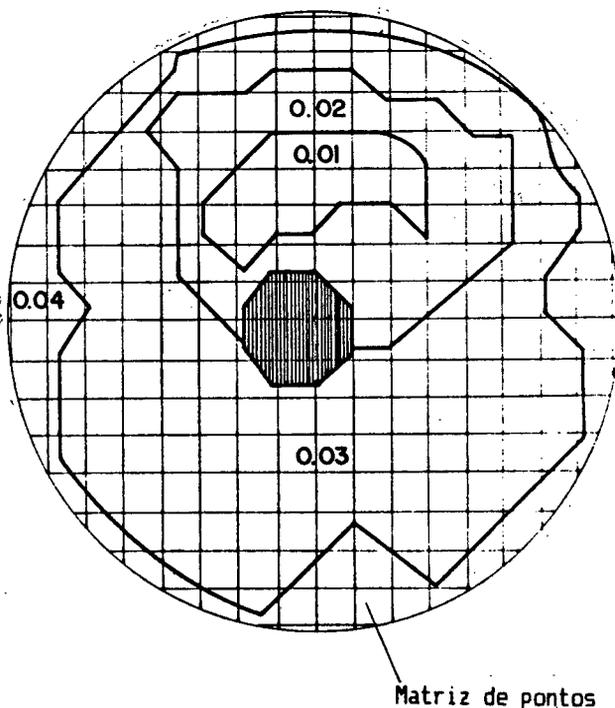
Condições de ensaio:

- .Coordenadas do Pp: (X_R, Y_R, Z_R, A, B, C)
- .Direção e sentido de aproximação: $Z_R(-)$
- .Velocidade: xxxx mm/s
- .Aceleração: yyyy mm/s².
- .Carga: zzz kg.
- .Robô industrial: SAPIENS modelo 63

Fig. 3.11 - Gráfico ilustrativo do tempo necessário para se alcançar a temperatura de regime de um IR.

Já o mostrado na figura 3.13 fornece o ER, segundo os eixos coordenados do CS-R, para cada Pp da seção reta, ensaiados para uma mesma condição de ensaio. A informação mais imediata é a constatação da direção que possui o maior ER. As seções são definidas durante a fase de planejamento, conforme o objetivo do ensaio.

Os resultados processados e documentados, são utilizadas principalmente na geração do programa de aplicação e em sugestões para melhoria de desempenho do IR. O tempo de estabilização, por exemplo, é informação importante acerca da estratégia de controle e do MS-R utilizados pelo IR /5,17,18/.



Condições de ensaio:

- .Direções de aproximação aos Pp's:
 $X_R, Y_R, Z_R, 17, 28, 35$ e 46 .
- .Sentidos de aproximação aos Pp's:
 $+, -, 17, 71, 28, 82, 35, 53, 46$ e 64 .
- .Velocidade: $xxxx$ mm/s.
- .Aceleração: $yyyy$ mm/s².
- .Carga: zzz kg.
- .Coordenada da seção reta:
 $Z_R: zzzz$ mm.
- .Temperatura ambiente: 20 ± 1 °C
- .Unidade métrica: [mm]
- .Robô industrial: SAPIENS modelo 63

Fig. 3.12 - Gráfico do ER por áreas de mesmo erro de uma seção do WS.

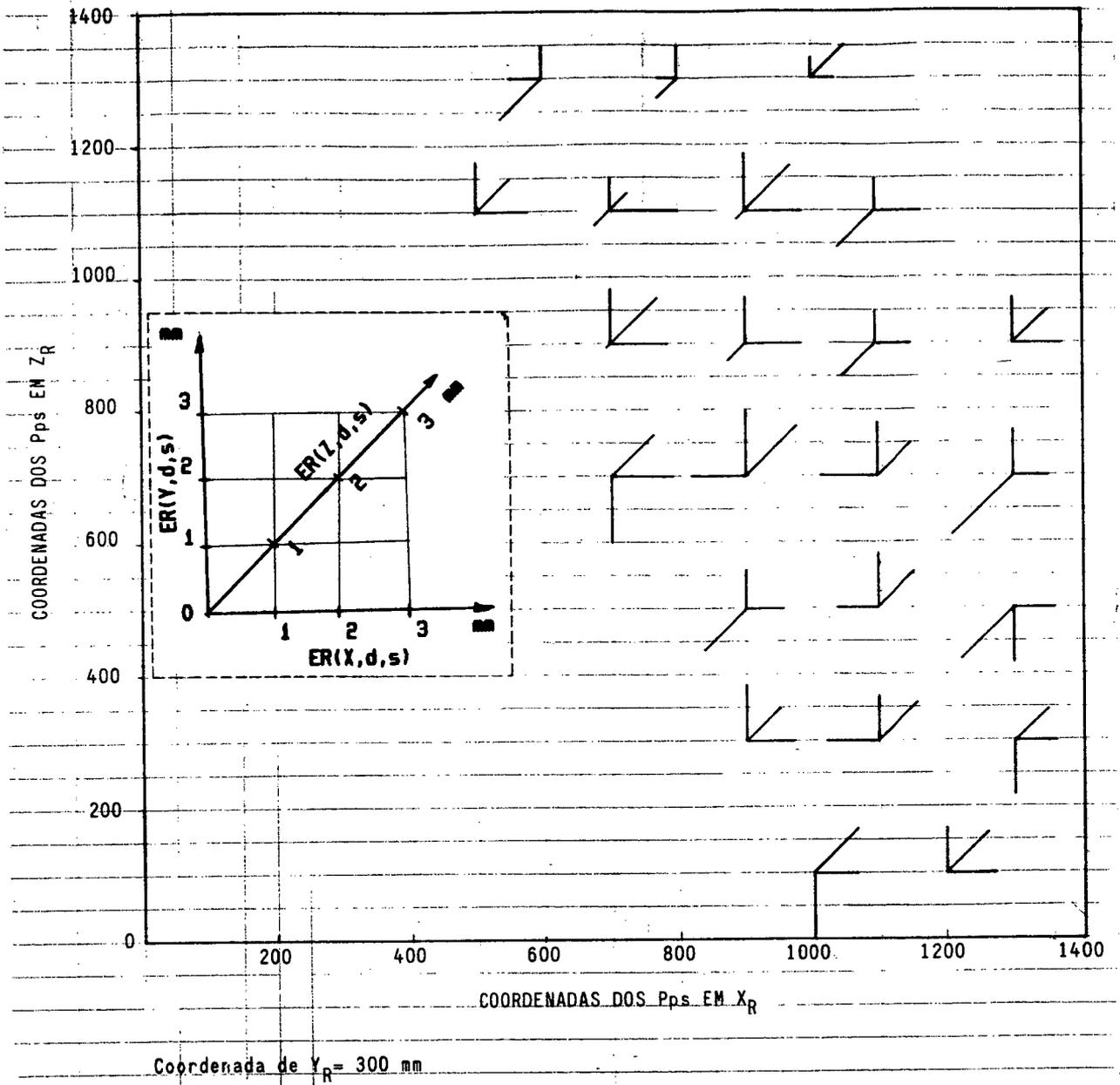


Fig. 3.13 - Gráfico dos ER dos Pp's de uma seção do WS.

4 INSTRUMENTAÇÃO APLICADA AO ENSAIO DE REPETIBILIDADE

O capítulo em questão apresenta alguns sistemas de teste (TS), adequados a realização de ensaios de repetibilidade, compostos por medidores disponíveis em um bem equipado laboratório de metrologia dimensional. Tais sistemas são capazes de medir componentes de erros nos 6 graus de liberdade (DOF) conforme a montagem e o princípio utilizado pelo medidor de deslocamento. Os sistemas de teste envolvidos são apresentados segundo o princípio de funcionamento de seus transdutores. Acompanham informações sobre a montagem do sistema, suas vantagens e desvantagens mais significativas e componentes principais. Ao final são apresentados os sistemas de teste especiais para ensaios de robôs industriais (IR) com seus aspectos metrológicos e operacionais mais relevantes.

4.1 SISTEMAS DE TESTE COMPOSTOS POR MEDIDORES DE DESLOCAMENTO

Basicamente permitem obter o erro de repetibilidade (ER) linear e/ou angular para o posicionamento programado (Pp). Em função da escolha do medidor para compor o sistema de teste, pode-se medir outros parâmetros geométricos além do ER e erro sistemático (ES). Os medidores de deslocamento podem ser -de princípio mecânico, pneumático, elétrico, eletrônico e óptico /28/.

A figura 4.1 mostra:

- a) os TS possíveis de se montar com os medidores de deslocamento disponíveis nos laboratórios do LABMETRO;

Parâmetros	Resolução linear	Resolução angular	FO linear	FO angular	Direções (d) sentidos	Automação da Medição	DOF Mensuráveis
TS	[μm]	[$''$]	[mm]	[$^{\circ}$]			
de deslocamento linear unidirecional	1 - 10	--	5 - 30	--	7d, 9s	VIÁVEL	1
de deslocamento linear bidirecional	1 - 10	--	5 - 30	--	5d, 6s	VIÁVEL	2
de deslocamento linear e angular unidirecional	1 - 10	< 15	5 - 30	5 - 2	7d, 9s	VIÁVEL	2
de deslocamento linear unidirecional e angular bidirecional	1 - 10	< 15	5 - 30	5 - 2	7d, 9s	VIÁVEL	3
Cubo/Berço	1 - 10	< 15	5 - 30	5 - 2	4d, 4s	VIÁVEL	6
Cubo/Berço Indutivo	1 - 10	--	> 10	--	4d, 4s	EFETIVA	3
Interferométrico de deslocamento linear unidirecional	< 1	--	> 10	--	1d, 2s	EFETIVA	1
Interf. de desl. linear e angular unidirecional	< 1	< 10	> 10	> 5	1d, 2s	EFETIVA	2
Interf. de desl. linear unidir., ang. bi	< 1	< 10	> 10	> 5	1d, 2s	EFETIVA	3
de deslocamento por fotodetetores	1 - 10	--	< 10	--	7d, 14s (MÁXIMO)	EFETIVA	2

Fig. 4.1 - Algumas características metrológicas e operacionais de dez sistemas de teste selecionados para o ensaio de posicionamento de um IR.

- b) suas principais características metrológicas e operacionais;
- c) direções (d) e sentidos (s) possíveis de se utilizar, conforme definido em 2.3, para a aproximação ao Pp;
- d) possibilidade de se automatizar a medição;
- e) o número de componentes do erro possíveis de se obter (DOF mensuráveis).

Tais sistemas utilizam medidores de princípio óptico, elétrico e/ou eletro-óptico. A seleção dos medidores se baseou principalmente na faixa de operação condizente com os erros esperados /23,24,29/, na Incerteza de Medição adequada /30,31,32,33/, e na possibilidade de se automatizar a medição.

O número de componentes de erros possíveis de se medir é função da montagem definida para o sistema de teste. Um sistema com bom rendimento é aquele que permite obter as componentes do erro nos seis DOF em uma única medição.

4.1.1 Sistemas de teste montados com base em medidores eletro-ópticos de deslocamento

Os sistemas de teste compostos por medidores eletro-ópticos de deslocamento atuam sempre contra uma superfície de referência, por exemplo, uma régua padrão ou partes da própria estrutura articulada do IR (figs. 4.2 e 4.3). Com o uso de dispositivos adequados, os transdutores podem ser fixados à Interface do Efetuador (EI) ou posicionados dentro do volume de trabalho (WS).

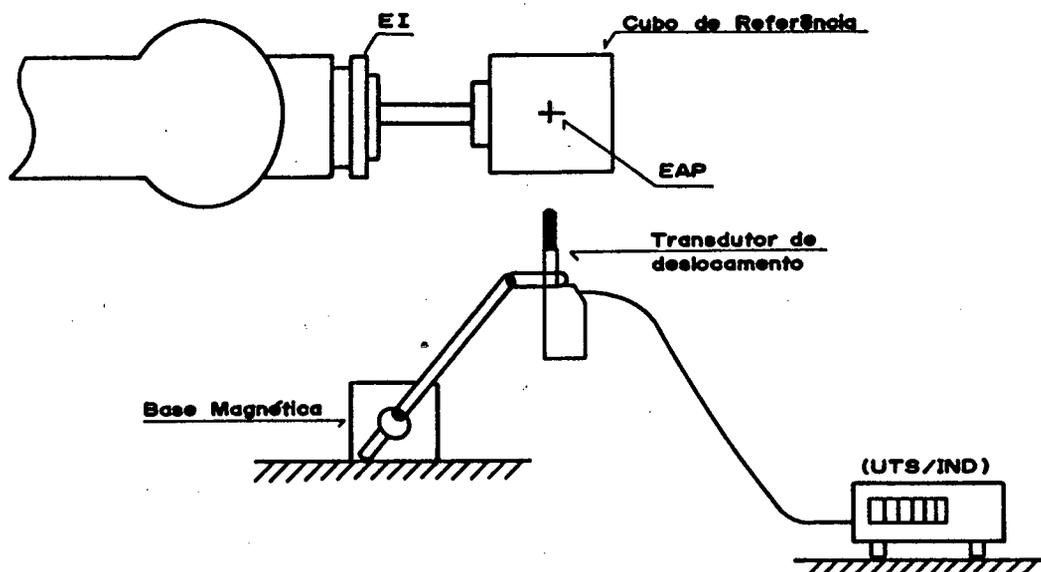


Fig. 4.2 - TS de deslocamento linear unidirecional.

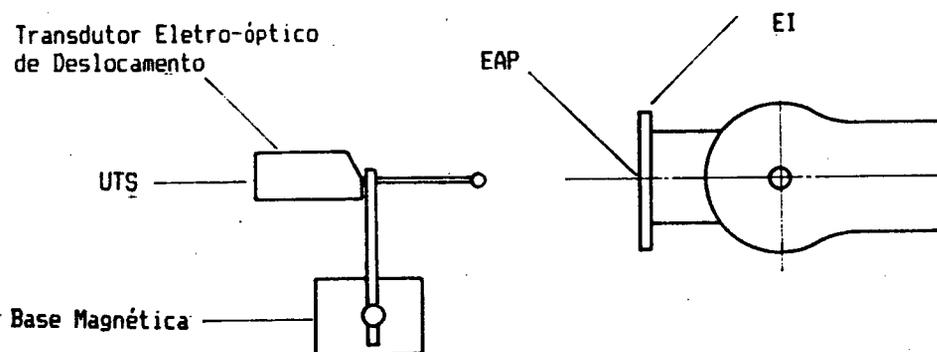


Fig. - 4.3 - TS de deslocamento linear unidirecional usando como superfície de referência a EI.

Dos sistemas de teste possíveis de se montar com base nos medidores eletro-ópticos, cinco foram selecionados como aptos a efetuar ensaios de repetibilidade. São os cinco primeiros sistemas de teste apresentados no quadro da figura 4.1, onde são citadas as características metrológicas e operacionais mais significativas destes. As figuras 4.2, 4.4, 4.5 e 4.6, apresentam os detalhes de montagem de alguns destes sistemas. A análise de cada um destes demonstra que conforme se aumenta o número de DOF possíveis de se ensaiar, aumenta-se a complexidade da montagem do

sistema e as restrições às direções e sentidos de aproximação ao Pp.

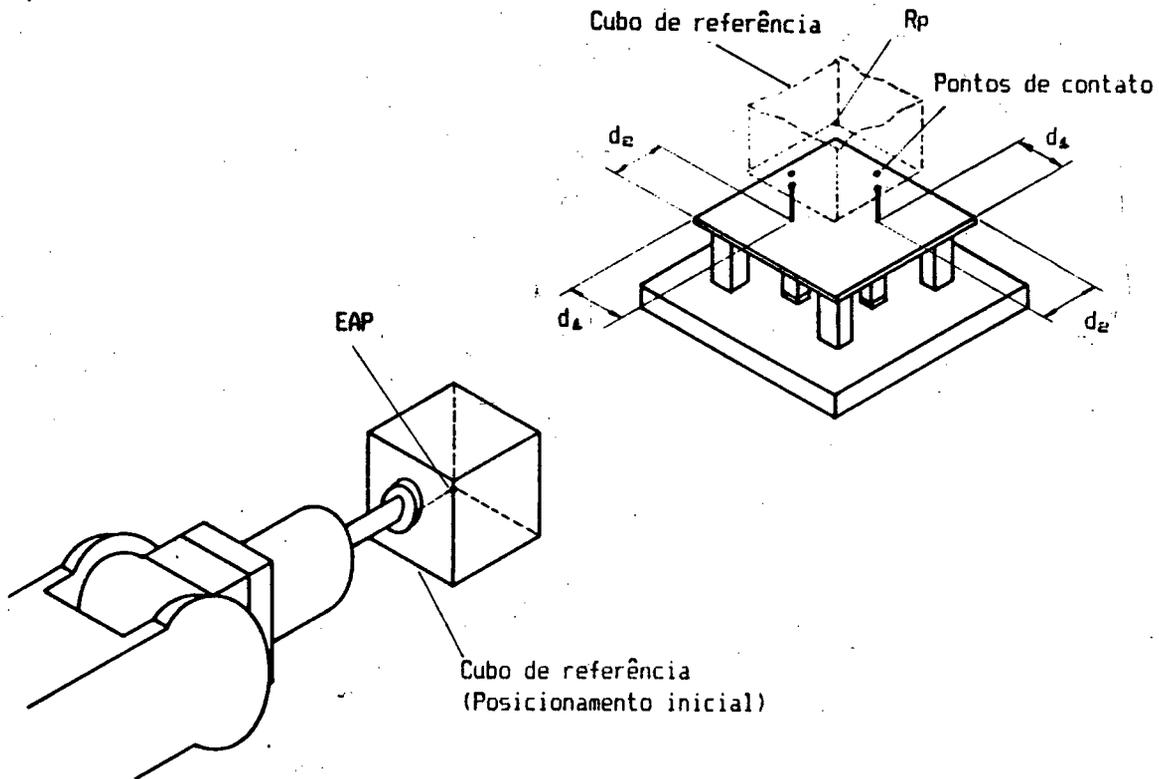


Fig. 4.4 - TS de deslocamento linear e angular unidirecional.

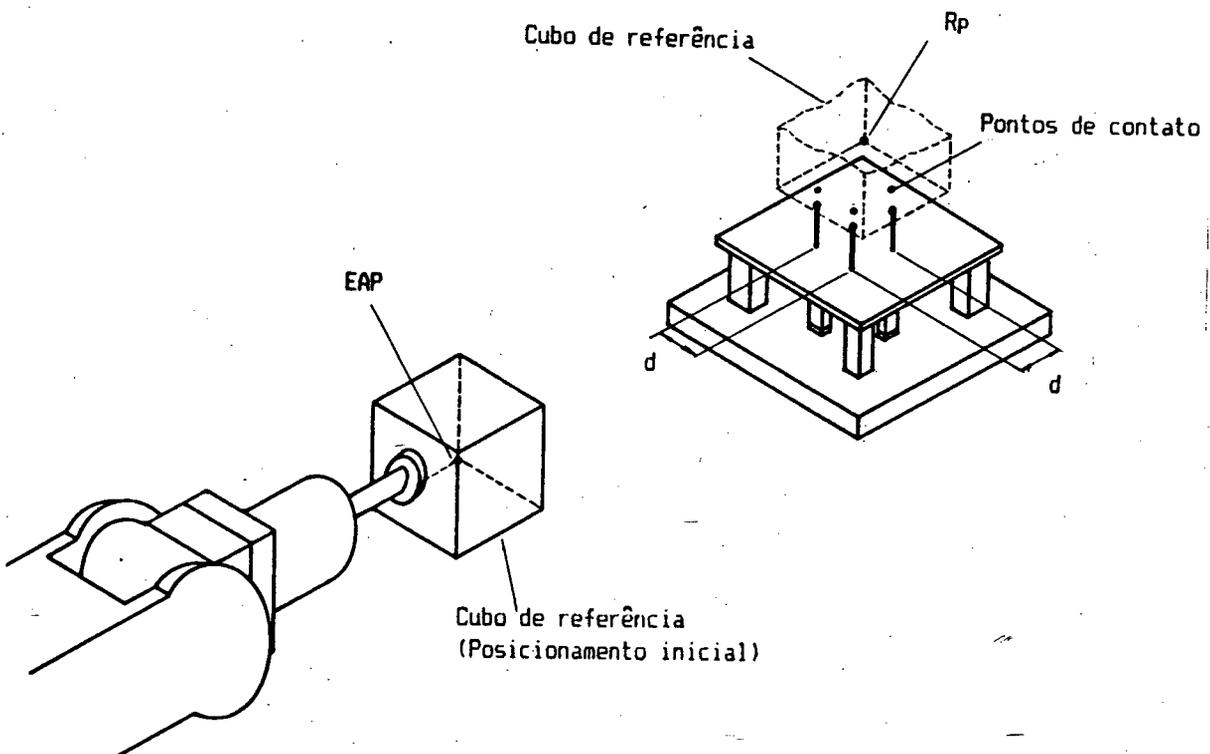


Fig. 4.5 - TS de deslocamento linear unidirecional e angular bidirecional.

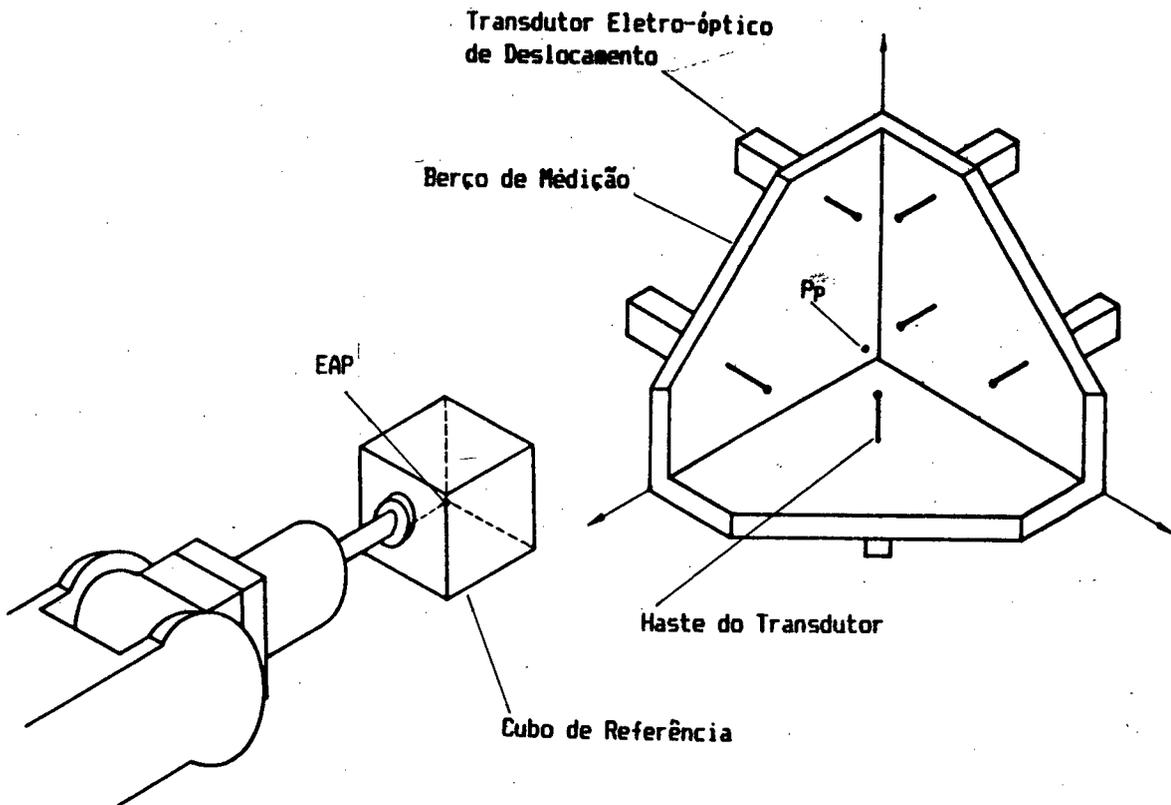


Fig. 4.6 - TS cubo/berço.

A existência ou não de um sistema automático de retração das hastes dos transdutores, é também um fator restritivo ao número de direções e sentidos utilizáveis. Os dados mostrados na figura 4.1 são tomados considerando-se que os sistemas analisados possuem tal dispositivo. Quando o número de direções especificadas para o ensaio é maior que aquele permitido pelo sistema de teste selecionado, é necessário que haja uma rotação do sistema, permitindo com isto o ensaio nas direções restantes. Em especial, todos estes sistemas permitem a realização do ensaio de repetibilidade de cada um dos módulos de movimentação (MM) que compõem o Robô.

Em um ensaio de repetibilidade o resultado mais desejado é o ER Global. Portanto, dos sistemas de teste apresentados na figura

4.1, o TS Cubo/Berço (fig. 4.6) é aquele que possui as melhores características para efetuar tal tarefa. Além de permitir a medição dos 6 DOF, apresenta a vantagem de ter um custo relativamente baixo e utilizar medidores que também são encontrados nos laboratórios de metrologia das indústrias.

4.1.2 Sistemas de teste montados com base em medidores indutivos de deslocamento sem contato

Para se fazer uso metrológico destes medidores, é necessário que se utilize um corpo metálico de geometria bem definida, ferroso ou não, para interagir junto aos transdutores indutivos. Os transdutores podem ser fixados à EI ou posicionados dentro do WS, por meio de dispositivos adequados.

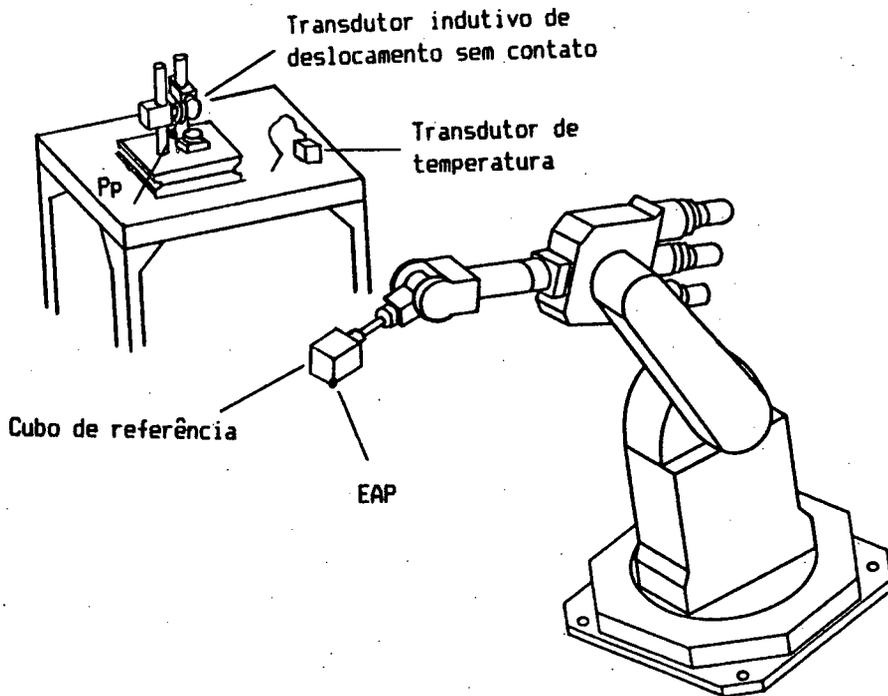


Fig. 4.7 - TS cubo/berço indutivo.

A figura 4.7 mostra o sistema de teste baseado em medidores indutivos sem contato, construído para efetuar ensaios de repetibilidade. Suas principais características metroológicas estão resumidas na figura 4.1. É possível a utilização de nove medidores de deslocamento (fig. 4.8) /34/.

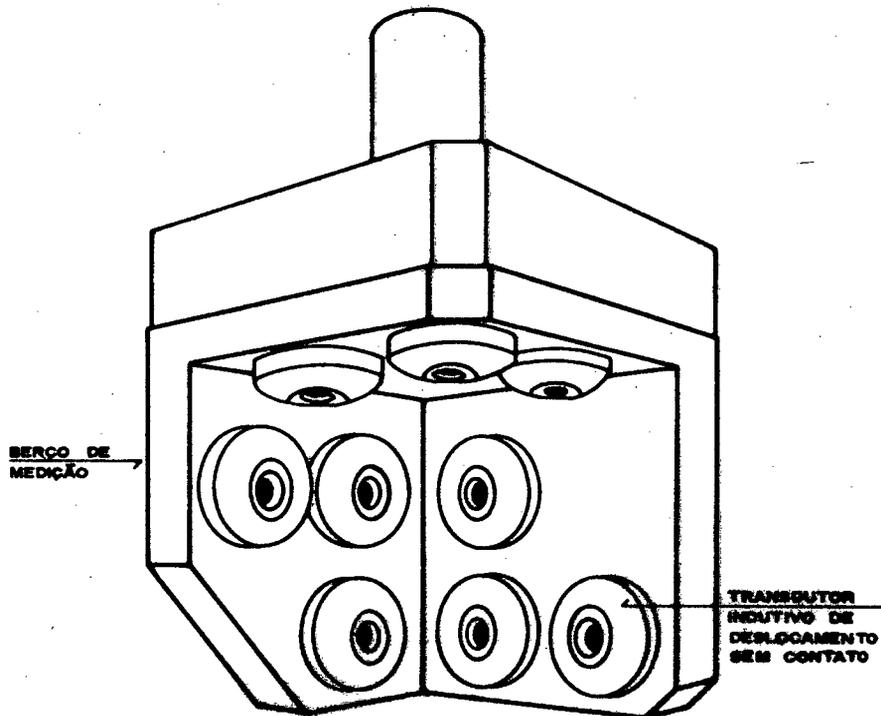


Fig. 4.8 - Berço de medição composto por nove transdutores indutivos de deslocamento sem contato - medição em 6 DOF

As restrições quanto as direções e sentidos de aproximação ao Pp e a operacionalidade do sistema, são praticamente as mesmas encontradas para o sistema de teste Cubo/Berço, excluindo-se a referente a retração das hastes dos transdutores eletro-ópticos.

Este sistema de teste, além de permitir a realização de ensaios de repetibilidade para cada um dos MM que compõem um IR, possibilita a obtenção do tempo de estabilização do IR e as amplitudes de sobrepassagem e subpassagem. Montado em conjunto

com o sistema de teste Cubo/Berço amplia a capacitação para ensaio deste último, tornando-o ainda mais completo.

4.1.3 Sistemas de teste montados com base no laser interferométrico

São, em síntese, compostos por um Laser Interferométrico He-Ne, Fotodetectores, Interferômetros e Retrorefletores /30/. O laser interferométrico, fotodetectores e interferômetros podem ser fixados fora do WS do IR a ser ensaiado. Os espelhos retrorefletores são sempre fixados junto à estrutura articulada, geralmente à EI.

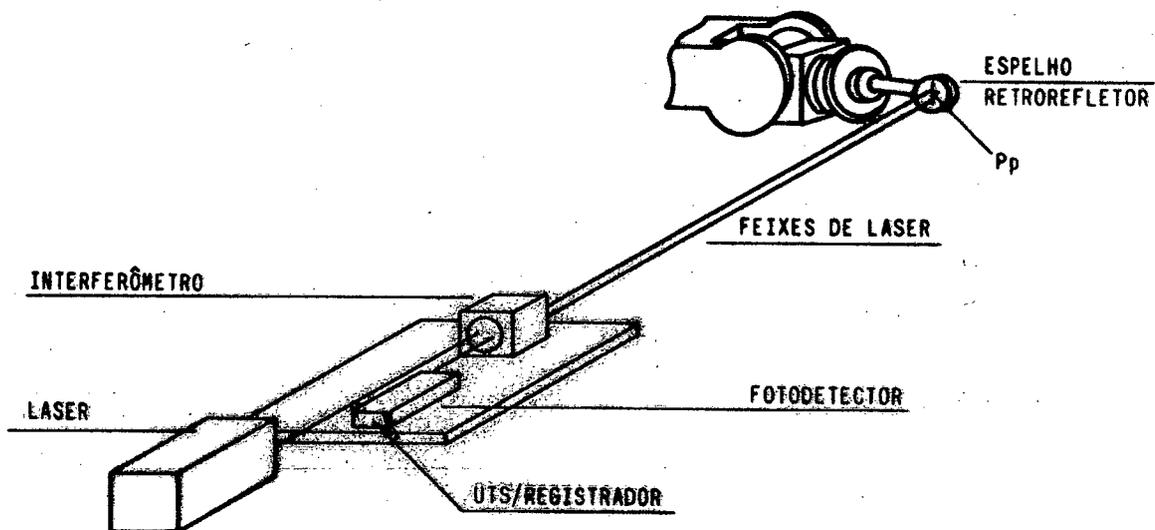


Fig. 4.9 - TS interferométrico de deslocamento linear unidirecional

As figuras 4.9 e 4.10 mostram dois dos três sistemas selecionados com base no laser interferométrico. Os dados metrológicos e operacionais dos três sistemas selecionados, são mostrados na

figura 4.1. Estes sistemas permitem a medição de parâmetros geométricos e cinemáticos de desempenho do IR.

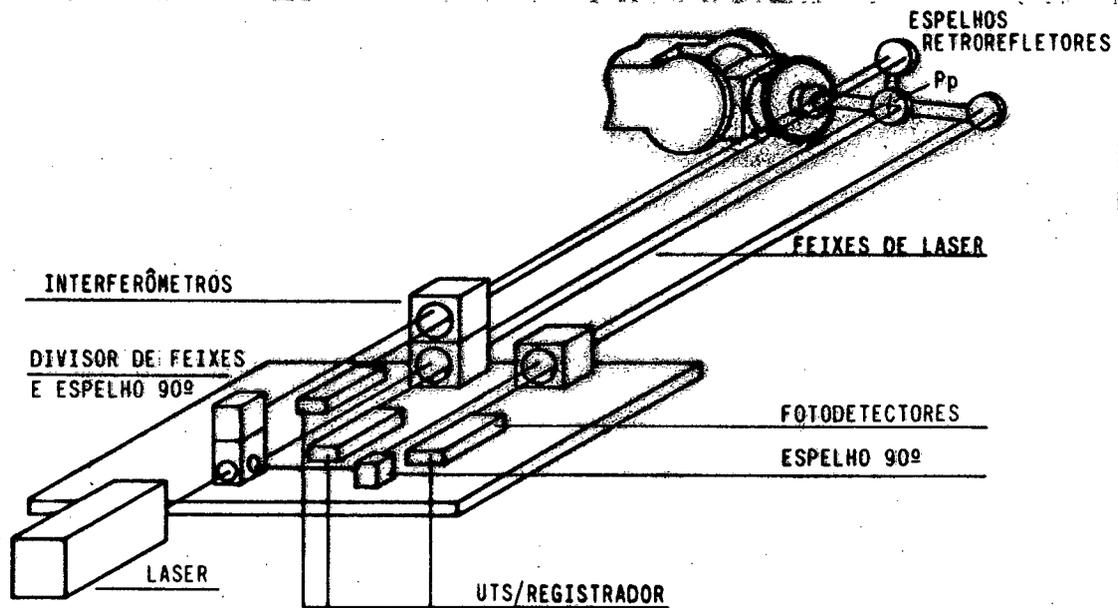


Fig. 4.10 - TS interferométrico de deslocamento linear unidirecional e angular bidirecional.

Os posicionamentos programados para o ensaio devem estar sobre a reta gerada pelo laser interferométrico, que por sua vez, não pode ser interrompido. Portanto, só é permitido o ensaio de módulos de movimentação em separado quando estes forem de deslocamento retilíneo. O alinhamento do feixe de laser pode ser de difícil obtenção e não raro há a necessidade de se encurtar a trajetória escolhida para o ensaio /27,35/. Uma solução para diminuir tal influência é o uso de um retrorefletor auto-ajustável /36/, não disponível no mercado nacional.

4.1.4 Sistemas de teste montados com base no laser de alinhamento

São, em síntese, compostos por um laser He-Ne e por um fotodetector de posição /37/. A figura 4.11 mostra o sistema de teste proposto. Suas características metrológicas e operacionais são descritas na figura 4.1. A fonte de laser pode ser posicionada fora do WS do IR, aumentando a segurança dos ensaios e diminuindo as restrições à movimentação do IR.

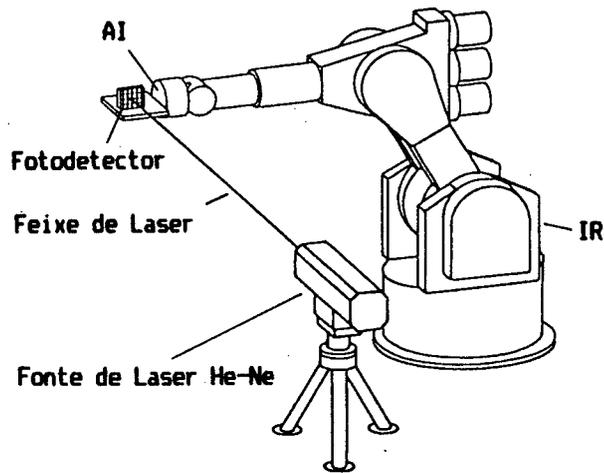


Fig. 4.11 - TS de deslocamento por fotodetector.

Um ou vários Pp's podem ser definidos sobre a reta padrão gerada pelo laser, permitindo a realização de ensaios de repetibilidade e/ou de retilidade da trajetória. Por permitir a interrupção do feixe de laser e não necessitar fixar dispositivos dentro do WS, pode-se efetuar o ensaio dos MM's em separado e utilizar qualquer direção e sentido de aproximação ao Pp.

4.2 SISTEMAS ESPECIAIS DE TESTE

Existem sistemas de teste especiais para a qualificação de IR's, capazes de realizar ensaios para a determinação de mais de um parâmetro de desempenho ao mesmo tempo. As figuras 4.12 a 4.15 mostram alguns destes sistemas /38,39,40,41/. Utilizando o

princípio de funcionamento eletro-óptico, estes sistemas podem efetuar medições sem contato, dispensando a presença de dispositivos dentro do WS do IR a ser ensaiado e diminuindo as restrições as direções e sentidos de aproximação ao Pp. Acompanha a todos um programa específico para a aquisição, processamento e documentação dos resultados.

O sistema de teste "Laser Track" (fig. 4.12) /38/, efetua o ensaio de posicionamento através do acompanhamento passo à passo dos movimentos de um dado ponto, localizado na estrutura articulada do IR, até que seja alcançado o Pp. Permite a medição do ER linear, ES linear e do Erro de retilineidade da trajetória. Sistemas similares estão sendo desenvolvidos para se obter o erro em seis DOF /42,43/.

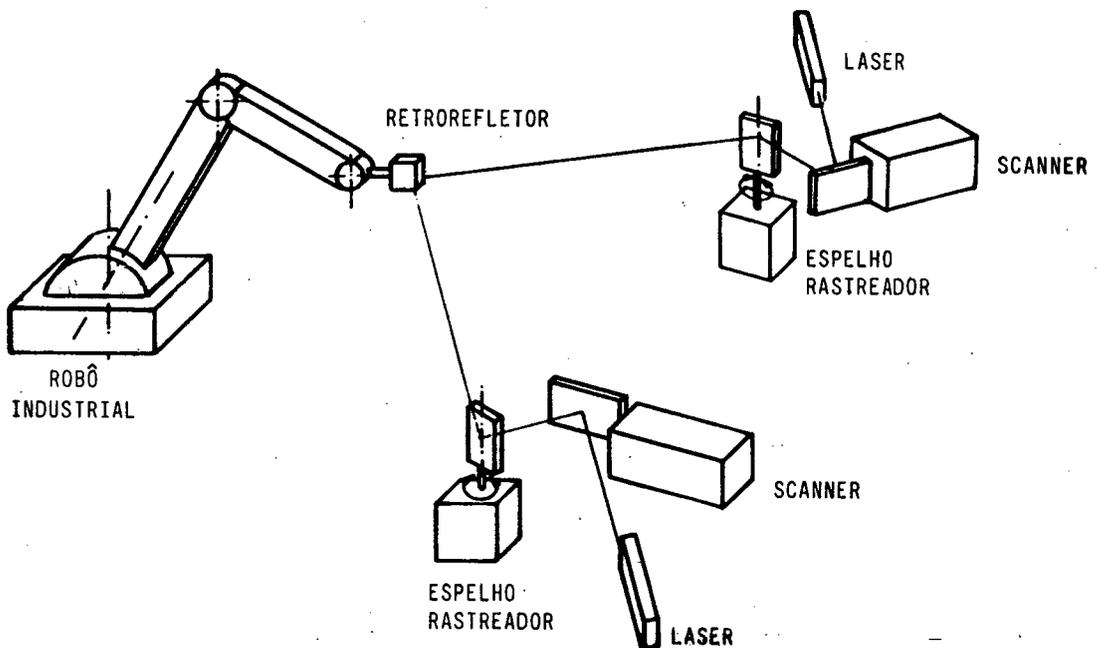


Fig. 4.12 - TS "Laser Track".

O sistema de teste "Robotest" (fig. 4.13) permite a obtenção do erro de posicionamento em seis DOF e o erro de velocidade cometidos pelo IR /39/. Possui uma resolução de dez micrômetros e

Im linear de $\pm 0,010$ mm e angular de $\pm 0,006^\circ$. Possibilita o ensaio de robôs industriais com ES linear até ± 10 mm e angular até $\pm 3^\circ$. Sua principal desvantagem reside no fato de que os posicionamentos escolhidos para o ensaio devem se situar sobre a reta gerada pelo laser interferométrico, que por sua vez, não pode ser interrompido.

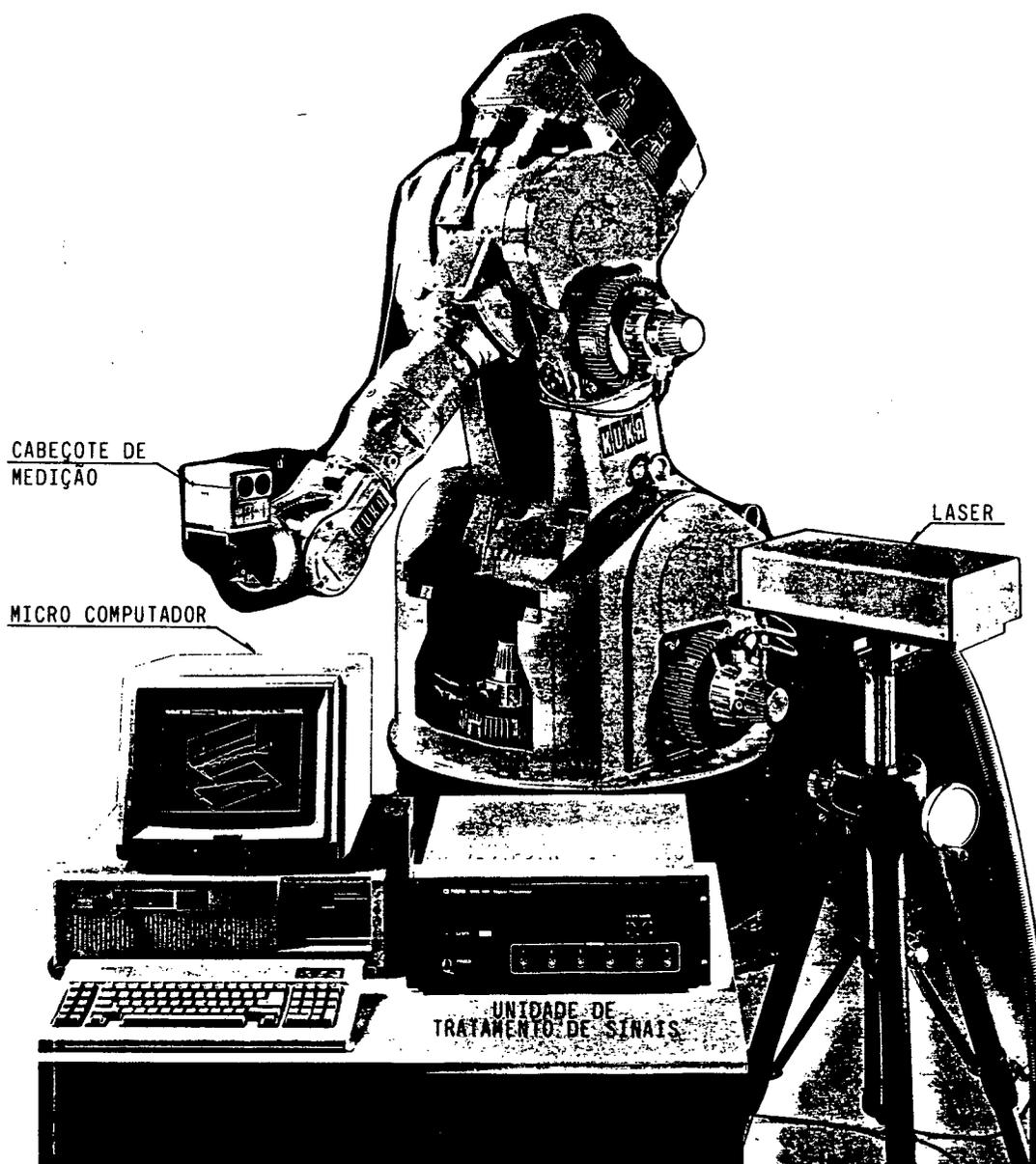


Fig. 4.13 - TS "Robotest".

O sistema de teste por análise de imagem (fig. 4.14) /40/ permite a obtenção do ER linear, ES linear e o erro de velocidade do IR;

com resolução de 0,025% e incerteza de medição de $\pm 0,5\%$, ambas em relação a uma faixa de operação máxima de 15 m /40/. Apresenta a desvantagem de exigir o posicionamento das câmeras a, no mínimo, 50 mm do Pp para se obter uma resolução adequada ao ER habitualmente apresentado pela maioria dos IR de mercado /44/.

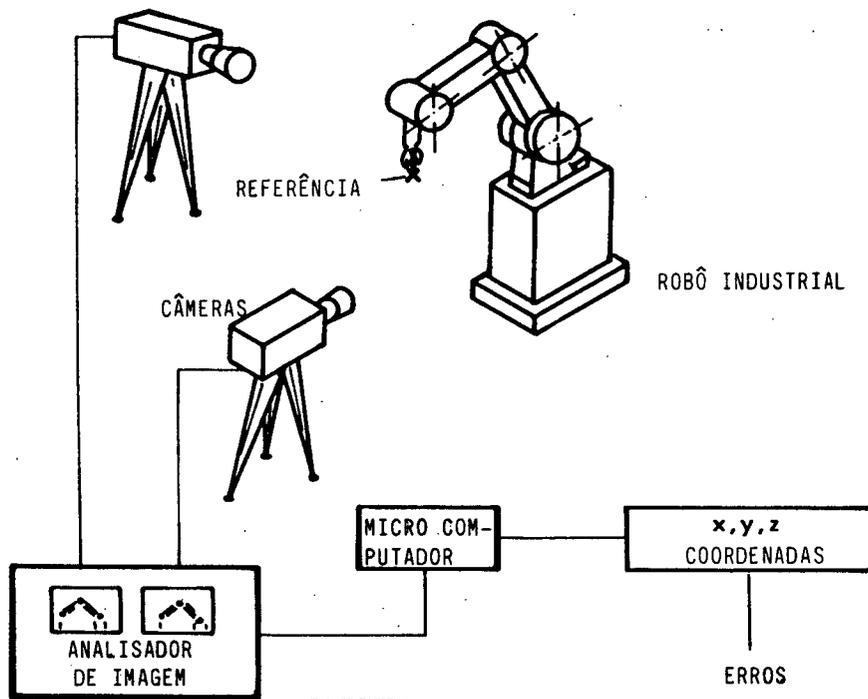


Fig. 4.14 - TS por análise de imagem.

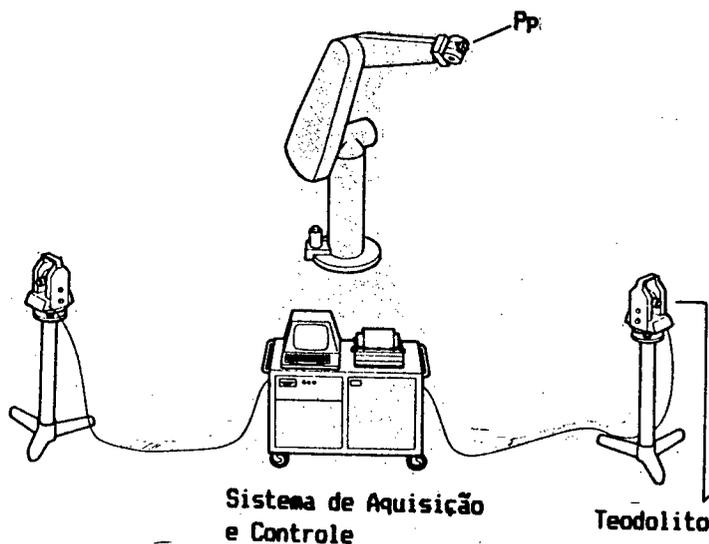


Fig. 4.15 - TS por Teodolito.

O sistema de teste por teodolito (fig. 4.15) /41/ mede o ER e ES lineares. Para que se possa efetuar medições utilizando-se deste sistema, é necessário que se conheça a distância entre os teodolitos. O sistema possui uma incerteza de medição típica de $\pm 0,001\%$ da distância entre o ponto focado e o teodolito, e distância focal mínima de 0,60 m.

5 DESENVOLVIMENTO DO SISTEMA DE TESTE CUBO/BERÇO

O desenvolvimento do sistema de teste Cubo/Berço consiste em: formular o algoritmo matemático para o cálculo do posicionamento real efetuado pelo robô industrial (IR), dimensionar o cubo de referência, e conseqüentemente o berço de medição, e selecionar os medidores de deslocamento. Também são apresentadas as características metrológicas do sistema, em função dos erros geométricos do cubo de referência e de outros elementos inerentes à cadeia de medição.

5.1 CARACTERÍSTICAS DESEJÁVEIS

As características ideais, desejadas para um sistema de teste (TS) empregado em ensaios de posicionamento, são listadas abaixo:

- a) Instalação do Sistema: instalação rápida, tanto em campo como em laboratório, que permita uma boa mobilidade dentro do volume de trabalho (WS) para o realocamento do sistema de teste nos posicionamentos programados (Pp) definidos para ensaio;
- b) Execução de Ensaio: coleta automatizada dos dados sem que haja intervenção do operador;
- c) Obtenção dos Resultados: tabelas e gráficos onde são mostrados os erros de repetibilidade (ER) e sistemáticos (ES), gerados de maneira automatizada;
- d) Exigências Metrologicas e Operacionais: medir as componentes dos erros em seis graus de liberdade com uma incerteza de

medição (I_m) menor que $\pm 0,01$ mm, em função dos erros apresentados pela maioria dos IR's /44/; possuir faixa de operação (FO) de no mínimo 10 mm na direção de cada eixo coordenado do sistema de coordenadas do robô (CS-R), devido ao efeito de sobrepassagem, subpassagem e ES /23,44/; permitir que o IR possa ser ensaiado utilizando-se velocidades, acelerações e cargas variáveis, inclusive as máximas.

5.2 PROJETO DO SISTEMA DE TESTE

O sistema de teste proposto, o Cubo/Berço, satisfaz as condições desejáveis descritas no item acima. É basicamente constituído de seis medidores eletro-ópticos de deslocamento, um cubo de referência, uma estrutura para fixar os seis transdutores (berço de medição) e um sistema computacional (fig. 5.1).

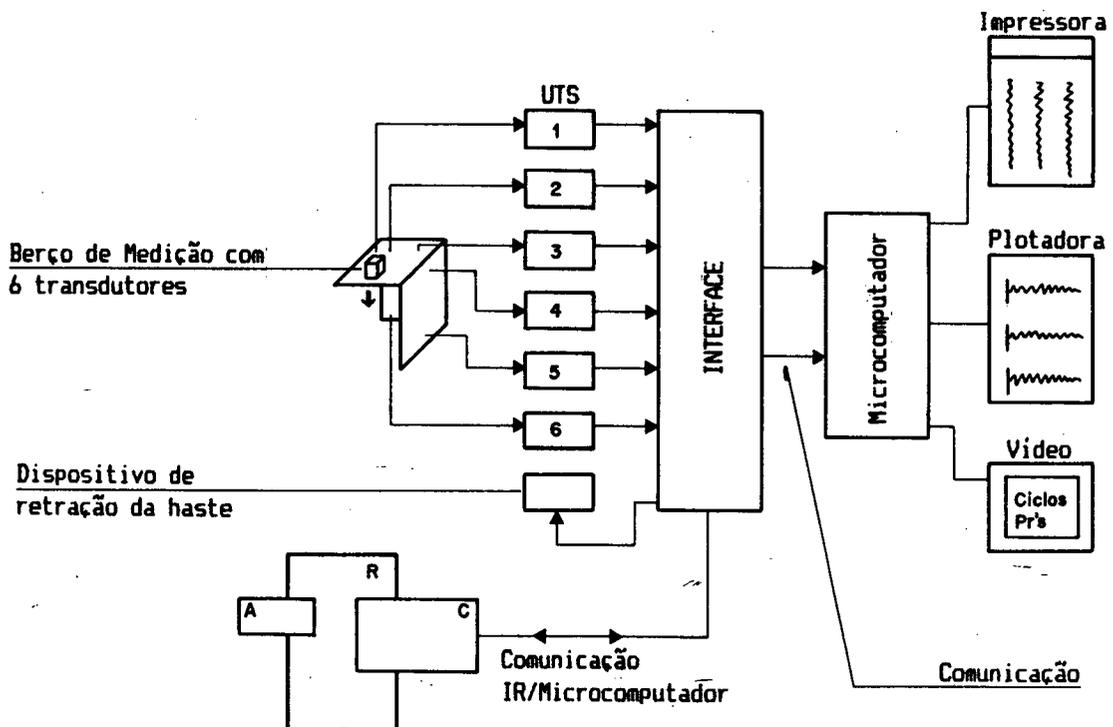


Fig. 5.1 - Sistema de teste cubo/berço - montagem esquemática.

Dispositivos para a adaptação das cargas à interface do efetuator (EI) e do berço de medição ao seu apoio complementam o sistema de teste. O funcionamento do sistema de teste cubo/berço se resume em localizar um sistema de coordenadas em relação a outro. O sistema de coordenadas de ensaio (CS-T), situado junto ao berço de medição, localiza o sistema auxiliar de coordenadas do efetuator (CS-E'), com origem no cubo de referência, através de cálculos matemáticos onde são utilizadas as posições captadas pelos transdutores fixados no berço de medição (fig. 5.2).

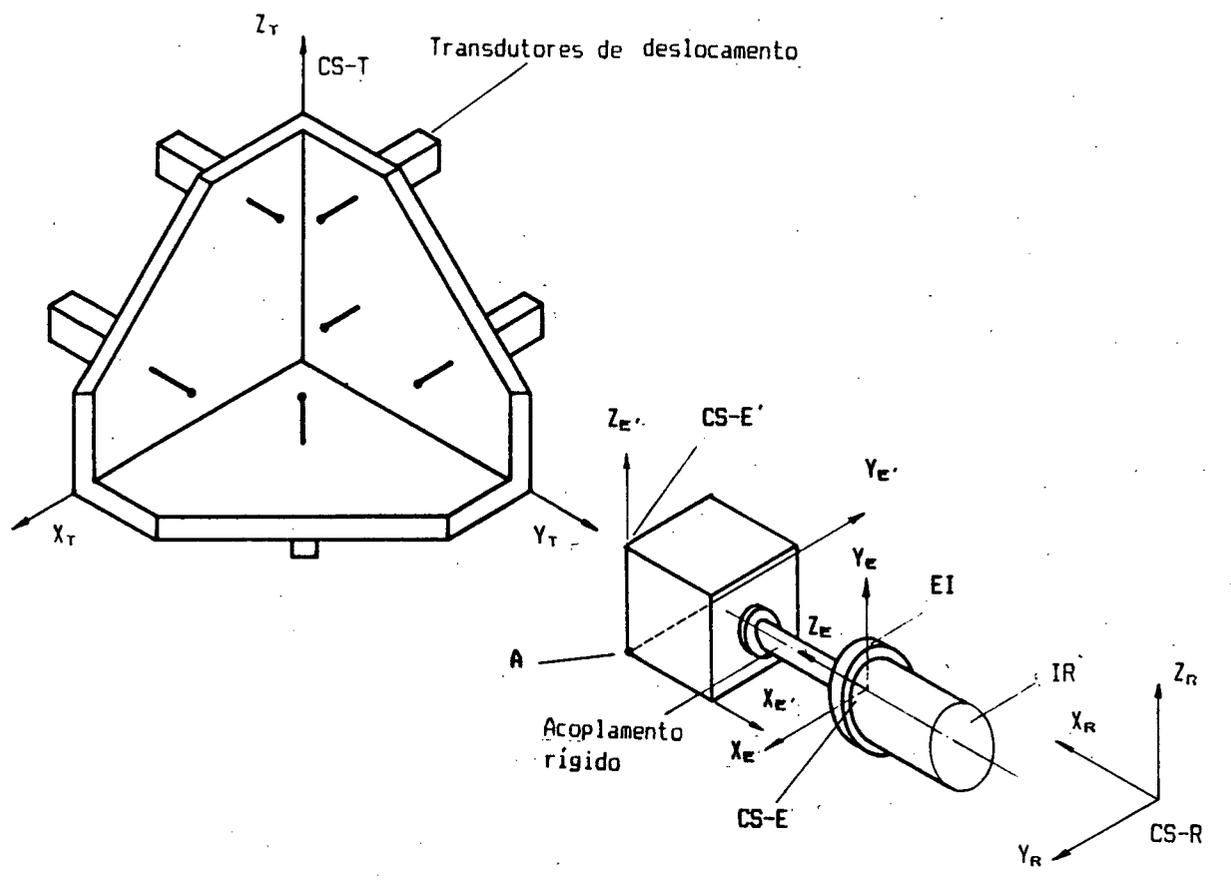


Fig. 5.2 - Situação dos sistemas de coordenadas envolvidos em um ensaio de posicionamento.

Por simplificar os cálculos para a determinação do posicionamento de um sistema de coordenadas em relação a outro e diminuir a complexidade do TS, optou-se pelo uso de seis medidores de

deslocamento, dispostos segundo a figura 5.2. Alguns sistemas apresentam até 9 unidades (fig. 4.8) /24,34/.

5.2.1 Modelagem matemática para o cálculo do erro de posicionamento

Consiste em obter o algoritmo necessário para transformar as leituras fornecidas pelos seis medidores de deslocamento, em posições e orientações do CS-E', descritos em relação ao CS-T (fig. 5.2). A cada posicionamento efetuado pelo IR, tem-se um conjunto de leituras. A seguir é descrito de maneira resumida, o processo para se chegar ao resultado desejado. As posições fornecidas pelos 3 medidores situados no plano $Y_T Z_T$ (fig. 5.3a), geram o plano YZ e sua normal N_{YZ} . As posições fornecidas pelos 2 medidores situados no plano $X_T Z_T$ fornecem o vetor diretor da reta que passa por estes, que em conjunto com a normal N_{YZ} geram o plano XZ e sua normal N_{XZ} (fig. 5.3b). Com a posição fornecida pelo medidor situado no plano $X_T Y_T$ e as normais N_{YZ} e N_{XZ} gera-se o plano XY e sua normal N_{XY} (fig. 5.3c). A interseção destes 3 planos fornecem o ponto "A" no CS-T (fig. 5.2), cuja posição e orientação, neste trabalho, é coincidente com a do ponto ativo do efetuador (EAP). As normais destes planos, que compõem o CS-E', tem como origem comum o ponto de interseção dos 3 planos e fornecem a orientação deste ponto.

Para a obtenção do algoritmo de cálculo proposto, faz-se uso da seguinte nomenclatura:

M_i : medidor de deslocamento linear de número i ($i = 1$ a 6) (fig. 5.3).

L_{in} : leitura obtida na i -ésima medição com relação ao CS-T, pelo medidor i (M_i).

P_{in} : ponto no CS-T obtido na i -ésima medição, com base na posição do medidor i (M_i) em relação ao CS-T e na leitura (L_{in}) fornecida por este.

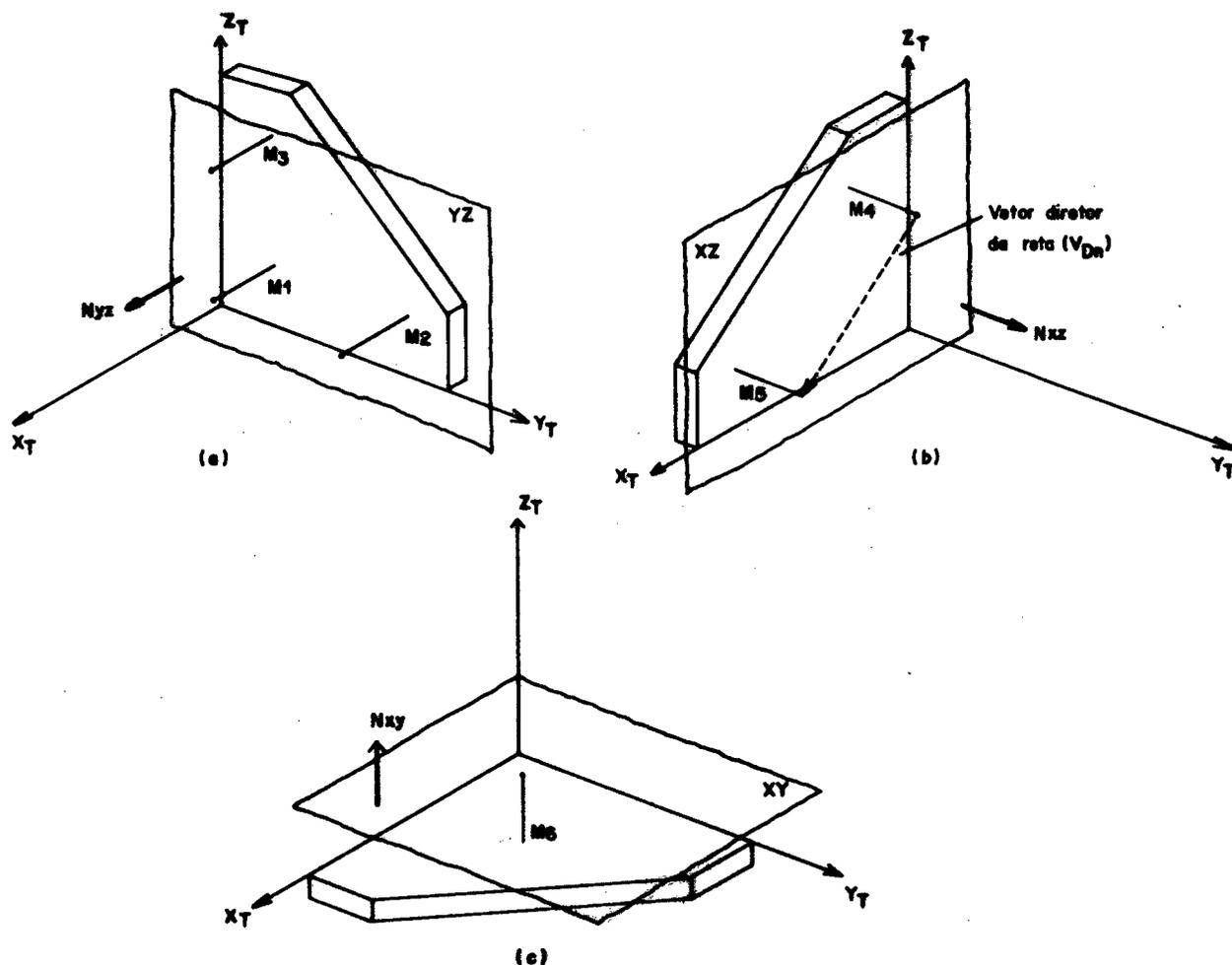


Fig. 5.3 - Disposição dos medidores, planos e normais geradas a cada medição pelo TS cubo/berço.

x_i , y_i e z_i : posição das esferas de apalpação, em relação ao CS-T, quando os medidores são zerados, onde i = número do medidor M_i .

V_{Dn} : vetor diretor da reta que passa pelos pontos P_{4n} e P_{5n} obtido na i -ésima medição (fig. 5.3b).

A_{Dn} , B_{Dn} , C_{Dn} : coeficientes do vetor diretor V_{Dn} .

YZ: plano gerado em consequência das posições obtidas pelos medidores M1, M2 e M3 (fig. 5.3a).

XZ: plano gerado em consequência das posições obtidas pelos medidores M4 e M5 e a normal N_{yz} (fig. 5.3b).

XY: plano gerado em consequência das posições obtida pelo medidor M6 e as normais N_{yz} e N_{xz} (fig. 5.3c).

$A_{xy}, B_{xy}, C_{xy}, D_{xy}$: coeficientes da equação geral do plano XY.

$A_{xz}, B_{xz}, C_{xz}, D_{xz}$: coeficientes da equação geral do plano XZ.

$A_{yz}, B_{yz}, C_{yz}, D_{yz}$: coeficientes da equação geral do plano YZ.

N_{yz} : vetor normal ao plano YZ (fig. 5.3a).

N_{xz} : vetor normal ao plano XZ (fig. 5.3b).

N_{xy} : vetor normal ao plano XY (fig. 5.3c).

$l_{xy}, m_{xy}, n_{xy}, p_{xy}$: coeficientes da equação normal do plano XY.

$l_{xz}, m_{xz}, n_{xz}, p_{xz}$: coeficientes da equação normal do plano XZ.

$l_{yz}, m_{yz}, n_{yz}, p_{yz}$: coeficientes da equação normal do plano YZ.

N_{xyu} : vetor unitário normal ao plano XY e também vetor unitário do eixo Z_A que compõe o CS-E', descrito em relação ao CS-T.

N_{xzu} : vetor unitário normal ao plano XZ e também vetor unitário do eixo Y_A que compõe o CS-E', descrito em relação ao CS-T.

N_{yzu} : vetor unitário normal ao plano YZ e também vetor unitário do eixo X_A que compõe o CS-E', descrito em relação ao CS-T.

* P_Y : vetor posição do ponto Y relativo ao sistema de coordenadas com origem em X.

* R_Y : matriz de rotação que descreve os vetores unitários do sistema de coordenadas atado ao ponto Y relativo ao CS-X.

Inicialmente são definidas as seguintes hipóteses simplificadoras para o cálculo da posição e orientação do CS-E' com relação ao CS-T:

- a) as faces do cubo de referência são perfeitamente planas;
- b) as faces do mesmo cubo são perfeitamente ortogonais;
- c) os transdutores de deslocamento estão perfeitamente ortogonais aos planos do CS-T (sem erros de cosseno);
- d) as I_m dos medidores são desprezáveis;

Abaixo são apresentadas as condições iniciais que devem ser satisfeitas para o desenvolvimento do algoritmo.

- a) os medidores são zerados usando-se uma superfície plana padrão - placa de referência (fig. 5.4);
- b) a zeragem é realizada de modo que a haste de cada transdutor fique na posição mais retraída possível;
- c) após a zeragem, o medidor acusa como positivo o deslocamento feito conforme se definiu o CS-T (fig. 5.4).

A seguir são descritos os passos necessários para se obter a posição e orientação do CS-E', em relação ao CS-T. As posições fornecidas pelos medidores M1, M2 e M3 geram os pontos P_{1n} , P_{2n} e P_{3n} .

$$P_{1n} = (x_1 + L_{1n} ; y_1 ; z_1);$$

$$P_{2n} = (x_2 + L_{2n} ; y_2 ; z_2);$$

$$P_{3n} = (x_3 + L_{3n} ; y_3 ; z_3).$$

Aplicados à formulação abaixo tem-se a equação geral do plano YZ e sua normal $N_{YZ} = (A_{YZ}, B_{YZ}, C_{YZ})$.

Equação geral do plano que passa por três pontos dados /45/:

$$\begin{vmatrix} x - (x_1 + L_{1n}) & y - y_1 & z - z_1 \\ (x_2 + L_{2n}) - (x_1 + L_{1n}) & y_2 - y_1 & z_2 - z_1 \\ (x_3 + L_{3n}) - (x_1 + L_{1n}) & y_3 - y_1 & z_3 - z_1 \end{vmatrix} = 0$$

resultando em:

$$A_{Vz} x + B_{Vz} y + C_{Vz} z + D_{Vz} = 0$$

A equação normal pode ser obtida da geral aplicando-se um fator multiplicativo:

$$\pm \mu = \frac{1}{\sqrt{A_{Vz}^2 + B_{Vz}^2 + C_{Vz}^2}}$$

Multiplicando-se N_{Vz} pelo fator $\pm \mu$ tem-se o vetor unitário N_{Vzu} . O sinal do fator μ é contrário ao apresentado pelo parâmetro D_{Vz} da equação geral do plano.

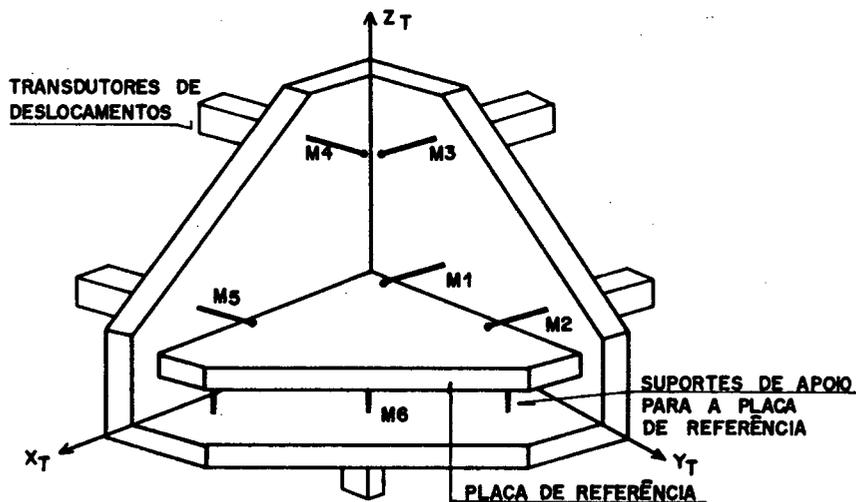


Fig. 5.4 - Zeragem dos medidores que compõem o TS cubo/berço.

As posições fornecidas pelos medidores M4 e M5 geram os pontos P_{4n} e P_{5n} e por conseguinte, o vetor diretor V_{Dn} .

$$P_{4n} = (x_4 ; y_4 + L_{4n} ; z_4) ;$$

$$P_{5n} = (x_5 ; y_5 + L_{5n} ; z_5) ;$$

$$V_{Dn} = P_{5n} - P_{4n}.$$

Aplicados à formulação abaixo tem-se a equação geral do plano XZ e sua normal $N_{xz} = (A_{xz}, B_{xz}, C_{xz})$.

Equação do plano que passa por um ponto dado, paralelo a dois vetores (N_{VZU} e V_{Dn}) /45/:

$$\begin{vmatrix} x - x_4 & y - (y_4 + L_{4n}) & z - z_4 \\ l_{VZ} & m_{VZ} & n_{VZ} \\ A_{Dn} & B_{Dn} & C_{Dn} \end{vmatrix} = 0$$

resultando em:

$$A_{xz} x + B_{xz} y + C_{xz} z + D_{xz} = 0$$

e tendo $\pm \mu = \frac{1}{\sqrt{A_{xz}^2 + B_{xz}^2 + C_{xz}^2}}$ como fator multiplicador.

Multiplicando-se N_{xz} pelo fator $\pm \mu$ tem-se o vetor unitário N_{xzu} .

As posições fornecidas pelo medidor M_6 geram os pontos P_{4n} .

$$P_{4n} = (x_4 ; y_4 ; z_4 + L_{4n}).$$

Aplicados à formulação abaixo tem-se a equação geral do plano XY e sua normal $N_{xy} = (A_{xy}, B_{xy}, C_{xy})$.

Equação do plano que passa por um ponto dado, paralelo a dois vetores (N_{VZU} e N_{xzu}) /45/:

$$\begin{vmatrix} x - x_4 & y - y_4 & z - (z_4 + L_{4n}) \\ l_{VZ} & m_{VZ} & n_{VZ} \\ l_{xz} & m_{xz} & n_{xz} \end{vmatrix} = 0$$

resultando em:

$$l_{xy} x + m_{xy} y + n_{xy} z + p_{xy} = 0$$

sendo seu vetor unitário $N_{xyu} = (l_{xy}, m_{xy}, n_{xy})$.

Portanto a cada posicionamento "j" do cubo de referência dentro do campo de atuação do berço de medição, obtem-se um conjunto de equações normais e respectivos vetores unitários. Os coeficientes destas equações, aplicados à formulação abaixo, fornecem a posição do A_j (TP_{A_j}).

Equação para a obtenção do ponto de interseção dos planos XY, XZ e YZ a cada posicionamento "j" /45/:

$TP_{A_j} = (x_j, y_j, z_j)$ sendo:

$$x_j = -\frac{\Delta_x}{\Delta}, \quad y_j = -\frac{\Delta_y}{\Delta} \quad \text{e} \quad z_j = -\frac{\Delta_z}{\Delta} \quad (5.1)$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} l_{yz} & m_{yz} & n_{yz} \\ l_{xz} & m_{xz} & n_{xz} \\ l_{xy} & m_{xy} & n_{xy} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_x = \begin{vmatrix} p_{yz} & m_{yz} & n_{yz} \\ p_{xz} & m_{xz} & n_{xz} \\ p_{xy} & m_{xy} & n_{xy} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_y = \begin{vmatrix} l_{yz} & p_{yz} & n_{yz} \\ l_{xz} & p_{xz} & n_{xz} \\ l_{xy} & p_{xy} & n_{xy} \end{vmatrix}$$

$$\Delta_z = \begin{vmatrix} l_{yz} & m_{yz} & p_{yz} \\ l_{xz} & m_{xz} & p_{xz} \\ l_{xy} & m_{xy} & p_{xy} \end{vmatrix}$$

Os vetores unitários, arranjados em colunas, compõem a matriz de rotação do CS-E' descrito em relação ao CS-T (TR_{A_j}). Aplicando-se a formulação abaixo, tem-se o valor dos ângulos p_j , q_j e r_j onde:

p : é ângulo de rotação do CS-E' em torno do X_T ;

q : é ângulo de rotação do CS-E' em torno do Y_T ;

r : é ângulo de rotação do CS-E' em torno do Z_T ;

$$TR_{A_j} = \begin{bmatrix} l_{yz} & l_{xz} & l_{xy} \\ m_{yz} & m_{xz} & m_{xy} \\ n_{yz} & n_{xz} & n_{xy} \end{bmatrix}$$

$$p_j = \text{arc tg } (n_{xz}/n_{xy}) \quad ; \quad (5.2)$$

$$q_j = \text{arc tg } (-n_{xz} / \sqrt{l_{yz}^{2m} + m_{yz}^{2m}}) \quad ; \quad (5.3)$$

$$r_j = \text{arc tg } (m_{yz}/l_{yz}) \quad ; \quad (5.4)$$

É importante notar que a formulação precedente descreve a orientação final de um corpo quando as rotações em torno dos eixos de referência forem executadas na ordem que se segue: primeiro (p), segundo (q) e por último (r).

Para o cálculo do ER é necessário que se considere o primeiro posicionamento ($j = 0$), efetuado durante a elaboração do programa de aplicação, isento de erros /46, 47/. Os posicionamentos seguintes ($j = 1$ a n), aplicadas à formulação apresentada em 2.3 (equações 2.1 a 2.10), fornecem o ER desejado.

5.2.2 Seleção dos medidores

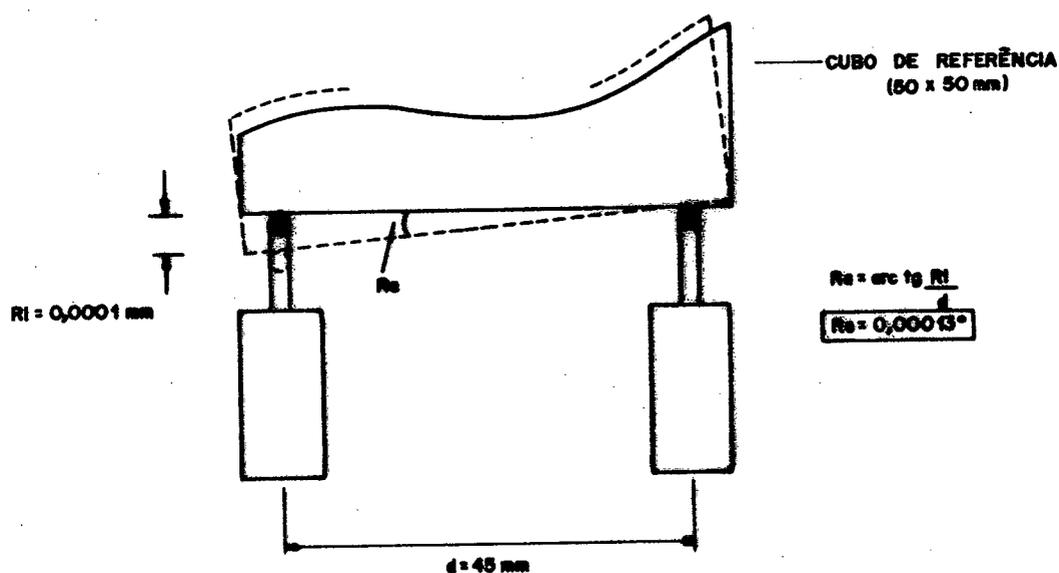
Dentre os vários princípios de funcionamento utilizados pelos medidores de deslocamento, optou-se pelo eletro-óptico. Os principais motivos são /31,32/:

- Im menor ou igual a $\pm 0,001$ mm;
- grande faixa de operação (FO); na ordem de 30 mm;
- permite a automatização da leitura.

Os medidores de deslocamento, neste trabalho, apresentam $I_m = \pm 0,0005$ mm, FO = 10 mm e resolução de 0,0001 mm.

5.2.3 Dimensionamento

O cubo de referência possui uma aresta de 50 mm. Esta dimensão possibilita que se tenha um TS cubo/berço compacto, sem que seja comprometida a sua resolução angular, que depende da distância entre os transdutores. Com o TS cubo/berço composto pelos medidores acima mencionados e o cubo de referência em questão, obtém-se se uma resolução angular de aproximadamente $0,00013^\circ$, correspondente a 0,46 segundos de arco (fig. 5.5). A resolução linear é igual a dos medidores selecionados para compor o TS. O berço de medição tem suas dimensões em concordância com as do cubo de referência. O material definido para a confecção do cubo de referência é o aço, por propiciar melhores características de forma e superfície, tais como erro de planicidade e rugosidade superficial.



SIGLAS:

RI - resolução linear dos transdutores de deslocamento

Ra - resolução angular

d - distância entre os transdutores

Fig. 5.5 - Resolução angular estimada para o TS cubo/berço

Para que se possa obter uma Im que permita utilizar o TS cubo/berço em ensaios de posicionamento de IR's, especial atenção

deve ser dada às tolerâncias de planicidade e ortogonalidade das faces do cubo de referência. Devido ao erro de repetibilidade, os transdutores não atuam sobre um mesmo ponto das faces do cubo. Para melhor entendimento, supor que o IR, durante o ensaio de repetibilidade, só apresente erros de repetibilidade linear e em uma única direção - X_R (fig. 5.6). Os medidores posicionados perpendicularmente à direção X_R apresentarão leituras que traduzem o erro de ortogonalidade da face em contato com estes e a variação do perfil de sua superfície (fig. 5.6).

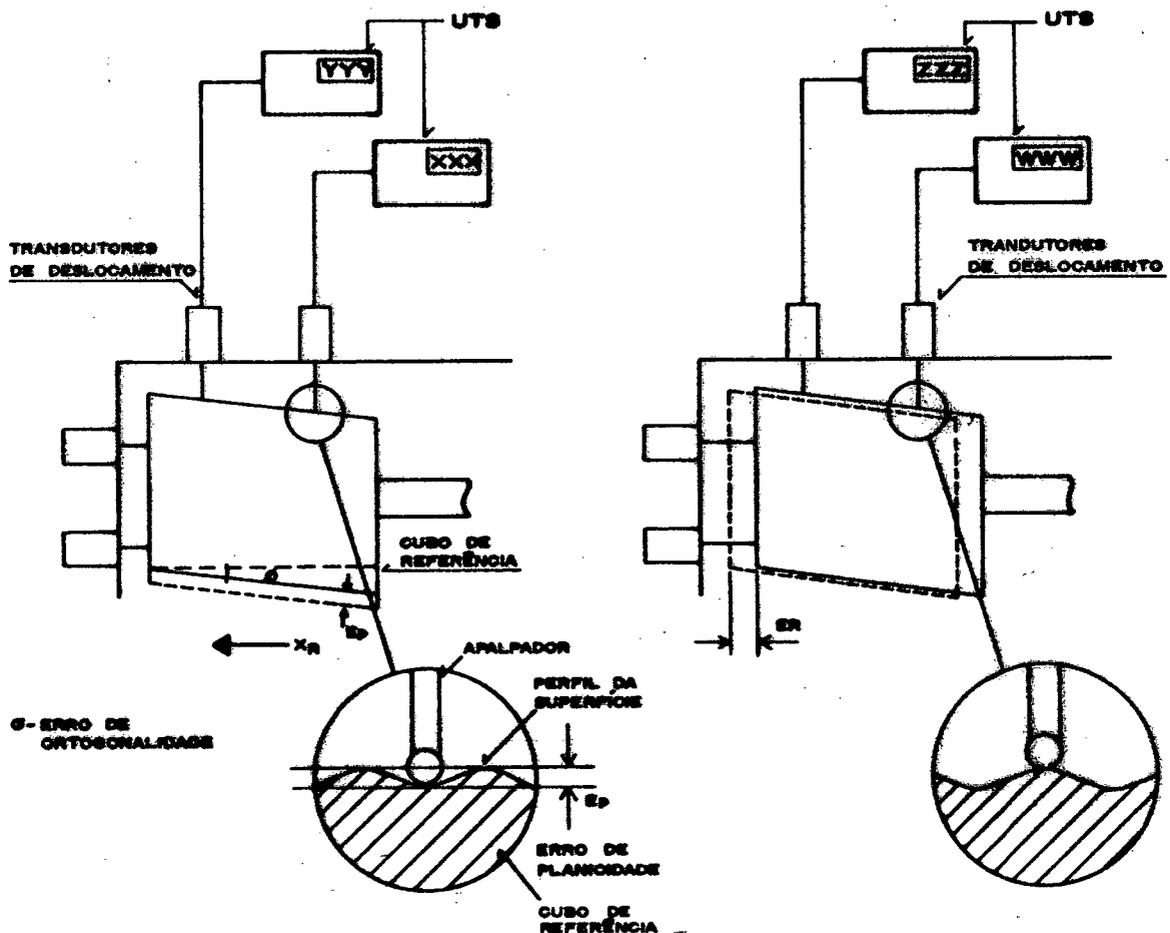


Fig. 5.6 - Representação gráfica da influência dos erros de planicidade e ortogonalidade sobre as leituras obtidas pelos medidores de deslocamento do TS cubo/berço.

O estabelecimento de uma tolerância para os erros de planicidade e ortogonalidade das faces, é de difícil obtenção. A solução

adotada consistiu em fabricar um cubo de referência com aresta de 50 mm, com os melhores recursos disponíveis na oficina de fabricação mecânica, e levantar os erros de planicidade e ortogonalidade obtidos. Com tais resultados disponíveis, calcula-se a incerteza de medição que estes erros, em conjunto com as demais fontes de erro, acarretam ao sistema.

5.2.4 Outros aspectos construtivos

Para a operacionalização do TS proposto, é necessário que se construa alguns dispositivos, tais como:

- sistema de sustentação do berço de medição;
- sistema de fixação de cargas à EI;
- sistema automático de retração das hastes dos transdutores eletro-ópticos de deslocamento.

A utilização de um sistema computacional para aquisição das leituras, processamento dos dados e gerenciamento do ensaio é de grande valia. Suas funções principais devem ser:

- coleta das leituras fornecidas pelos medidores eletro-ópticos de deslocamento e possíveis sensores de monitoração das condições ambientais estabelecidas para o ensaio;
- processamento das leituras coletadas, em especial o cálculo e fornecimento "on line" dos desvios padrão para cada resultado de medição obtido nas diversas medições, conforme proposto na metodologia;
- coordenação dos movimentos de avanço e recuo das hastes dos transdutores para a realização das medições;
- sincronização dos movimentos do IR com o dos transdutores.

Como função complementar, tem-se a documentação em forma de gráficos e tabelas dos resultados obtidos pelo ensaio de posicionamento.

5.3 CARACTERÍSTICAS METROLÓGICAS OBTIDAS

Usinado o cubo, obteve-se o Erro de Planicidade de cada face e o Erro de Ortogonalidade entre as faces. Os ensaios foram realizados na Máquina de Medir por Coordenadas (CMM) ZEISS ZMC 550.

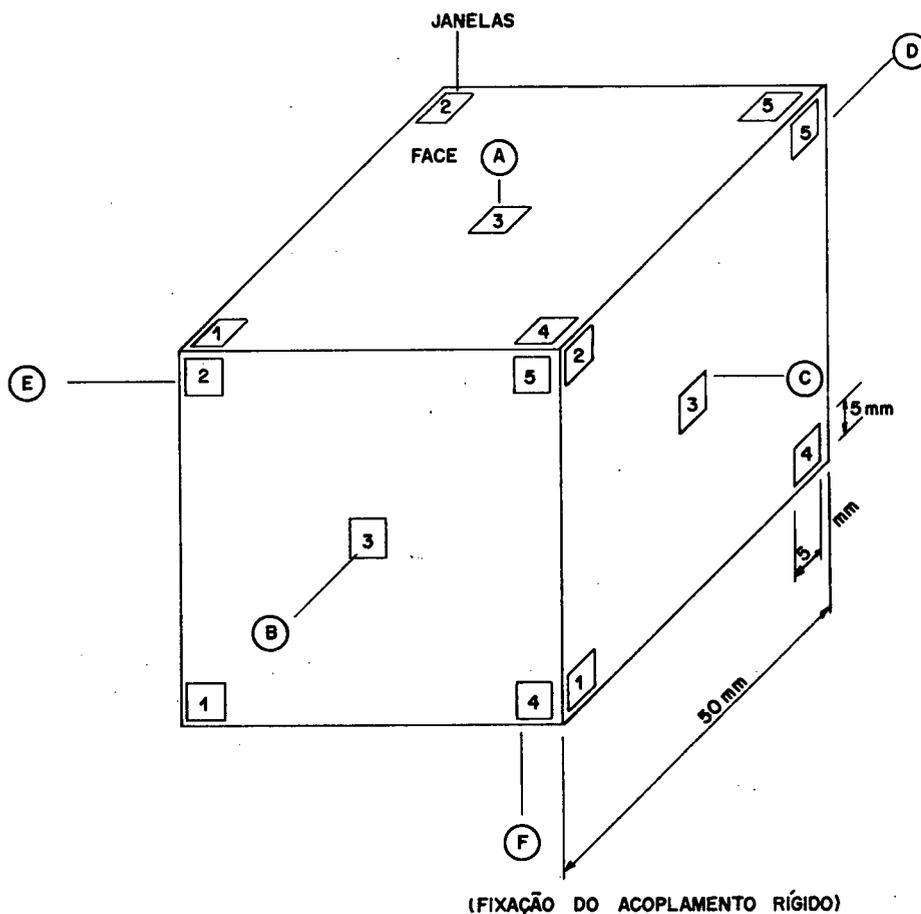


Fig. 5.7 - Localização das janelas e denominação das faces do cubo de referência.

Para tal, foi escolhida uma região de seu volume de trabalho que propicia uma $Im = \pm 0,0007 \text{ mm} / 48/$. As leituras foram obtidas

pele modo de operação "scanning", onde o apalpador da CMM toca continuamente a superfície a ser ensaiada. O diâmetro do apalpador usado para o ensaio foi de 3,0 mm, o mesmo utilizado como sensores nos transdutores eletro-ópticos. Com tal artifício, elimina-se a necessidade de se conhecer a rugosidade superficial das faces; pois os erros gerados nas leituras obtidas por cada medidor, como consequência da rugosidade superficial, não serão maiores que os obtidos no ensaio de planicidade acima citado. Em cada face do cubo foram definidas cinco regiões, denominadas janelas, onde os medidores de deslocamento podem atuar (fig. 5.7). Cada região foi ensaiada quanto a planicidade. A figura 5.8 mostra os resultados principais alcançados para o erro de planicidade (E_p). A coluna "total" representa o E_p de toda a face.

FACES	total (μm)		janela1 (μm)		janela2 (μm)		janela3 (μm)		janela4 (μm)		janela5 (μm)	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
A	-1,0	3,6	-0,9	3,2	-0,4	0,5	-0,4	0,6	-0,4	3,3	-0,4	1,2
B	-1,3	6,9	-0,6	6,4	-0,5	1,4	-	-	-0,4	0,8	-0,4	1,7
C	-1,1	3,6	-0,5	0,3	-0,4	0,4	-0,5	4,2	-0,4	0,4	-0,4	0,6
D	-1,7	1,5	-0,5	0,5	-0,4	0,6	-0,4	0,6	-0,4	0,6	-0,4	0,7
E	-2,0	1,6	-0,8	1,0	-0,4	0,5	-0,5	0,7	-0,7	1,2	-0,3	0,5

Fig. 5.8 - Principais resultados do E_p obtidos no ensaio do cubo de referência.

5.3.1 Fontes de erro e suas consequências

Todos os elementos que compõem o TS devem ser questionados como fontes de erro. Nos instrumentos de medição a principal fonte é a incerteza de medição.

No cubo de referência são:

- rugosidade superficial das faces;
- erro de planicidade das faces;
- erro de ortogonalidade entre as faces;
- deformações térmicas.

Nos elementos mecânicos que compõem o sistema de teste:

- rigidez insuficiente na fixação do cubo de referência à EI, dos medidores ao berço de medição e deste ao seu sistema de sustentação;
- erro de cosseno devido a montagem dos medidores no berço de medição;
- erros durante a zeragem dos medidores;
- deformações térmicas.

Durante a aquisição e avaliação dos dados, erros podem ser cometidos, tais como:

- aquisição incorreta dos dados;
- erro de arredondamento;
- erro de software.

Para a obtenção do ER, as fontes de erro mais significativas são:

- erro de planicidade das faces do cubo de referência;
- erro de ortogonalidade entre as faces do cubo de referência;
- Im dos medidores de deslocamento.

Os demais erros são tidos como desprezáveis ou sistemáticos. Naturalmente os erros sistemáticos do TS cubo/berço são eliminados, uma vez que a medição é diferencial. Para a determinação da I_m do TS cubo/berço, em função dos erros mais significativos acima citados, selecionou-se as faces A, C e D por apresentarem menores erros de planicidade e ortogonalidade (figs. 5.7 e 5.8). Entre as faces selecionadas, o maior erro de ortogonalidade é igual a $\pm 0,04''$, acarretando um erro máximo de leitura de 0,07% do ER do robô industrial a ser ensaiado; portanto desprezável.

O erro de planicidade, apresentado pelas três faces, acarreta uma I_m de $\pm 0,005$ mm, quando o deslocamento for linear, e de $\pm 0,006$ " quando angular. Estes resultados foram obtidos com base na teoria de propagação e combinação de erros. Pela metodologia de cálculo apresentada no item 5.2.1, as fontes de erro mais significativas geram erros no cálculo da equação do plano YZ. Estes erros se propagam na determinação das equações gerais dos planos seguintes, XZ e XY. Conseqüentemente, a determinação do posicionamento real (R_p) também terá um erro. O erro aleatório gerado em cada medidor é composto pela I_m deste, pelas imperfeições superficiais da face onde atua o medidor e pelo erro de ortogonalidade da mesma face. O erro de ortogonalidade, como já foi visto, é desprezável. Para o cálculo da I_m do TS cubo/berço, combinou-se as situações de erro máximo de cada medidor/face na obtenção da equação geral de cada plano. Com isto, levantou-se as situações onde o desvio do plano calculado em relação ao plano ideal eram máximas. O passo final consistiu em achar a combinação de planos, cuja interseção gerasse a maior

Im linear. A determinação da Im angular foi efetuada através da combinação dos casos extremos encontrados na definição dos planos XZ e YZ, uma vez que a definição do plano XY não gera erros angulares.

5.4 CONCLUSÃO

O TS proposto permite o ensaio de IR's que possuam ER superiores a cinco vezes o valor da Im do TS cubo/berço, que é de $\pm 0,005$ mm de erro linear e $\pm 0,006''$ de erro angular. No entanto, os posicionamentos possíveis de se obter estarão descritos em relação ao CS-T. A condição ideal a ser alcançada é ter estes posicionamentos descritos em relação ao CS-R; como fora sugerido em 2.2. A transformação dos posicionamentos de um sistema de coordenadas (CS) para outro é perfeitamente viável; desde que se conheça as posições e orientações dos CS's envolvidos /24/.

6 APLICAÇÕES EXPERIMENTAIS

O capítulo em questão trata dos resultados alcançados por 4 ensaios de posicionamento realizados com o robô industrial (IR) IPSO V-15 /48/. São eles: Ensaio de Posicionamento contra Escala /35/, Ensaio de Repetibilidade Pontual /26/, Ensaio de Posicionamento Contra Esquadro /49/ e Ensaio de Repetibilidade Angular /50/. São citados os parâmetros de ensaio definidos, os sistemas de teste utilizados e observações sobre seu funcionamento. Ao final é apresentada conclusão sobre a metodologia empregada, a caracterização dos erros e a instrumentação utilizada nos ensaios.

6.1 INTRODUÇÃO

As aplicações experimentais apresentadas no presente capítulo serviram como base para a elaboração da metodologia e do projeto cubo/berço apresentados, respectivamente, nos capítulos 3 e 5.

A não realização de ensaios prospectivos de repetibilidade, envolvendo o sistema de medição cubo/berço, se deveu a sucessivos atrasos ocorridos no processo de importação dos seis medidores eletro-ópticos de deslocamento, que não permitiram a conclusão da fabricação e teste do sistema proposto em tempo hábil para a inclusão de seus resultados neste trabalho.

6.2 ENSAIO DE POSICIONAMENTO CONTRA ESCALA

Tem por objetivo obter os erros sistemáticos e de repetibilidade linear (ER e ES) do IR, para posicionamentos definidos ao longo de uma reta contida em seu volume de trabalho (WS).

6.2.1 O sistema de teste

Utilizou-se o sistema de teste interferométrico de deslocamento unidirecional (fig. 4.9), com leitura e processamento automatizados. A sincronização entre as tarefas de leitura e movimentação do IR é efetuada pelo operador do ensaio. Durante a realização do ensaio foram constatados alguns problemas de ordem operacional, que exigiram modificações na montagem inicialmente planejada /35/.

6.2.2 Parâmetros de ensaio utilizados

A trajetória escolhida, paralela ao eixo coordenado X_R do sistema de coordenadas do robô (CS-R), possui um comprimento de 500 mm e se situa próxima a área central do WS (figs. 6.1 e 6.2). Além de ser a área de maior uso em potencial, presume-se que os ganhos de retorno foram fixados para a operação nesta região /17/. Foram escolhidos seis posicionamentos programados (Pp) sobre a trajetória (fig. 6.1).

Para cada Pp efetuou-se 10 medições, com tempo de estabilização de dez segundos. A velocidade do ponto ativo do efetuador (EAP) é de 37,5 mm/s e a aceleração de 37,5 mm/s², para uma carga fixada à interface do efetuador (EI) de 2,6 kg. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 19,5 +/- 0,1 °C, sem que fosse

averiguada a temperatura de regime do IR. Não houve registro de vibrações externas.

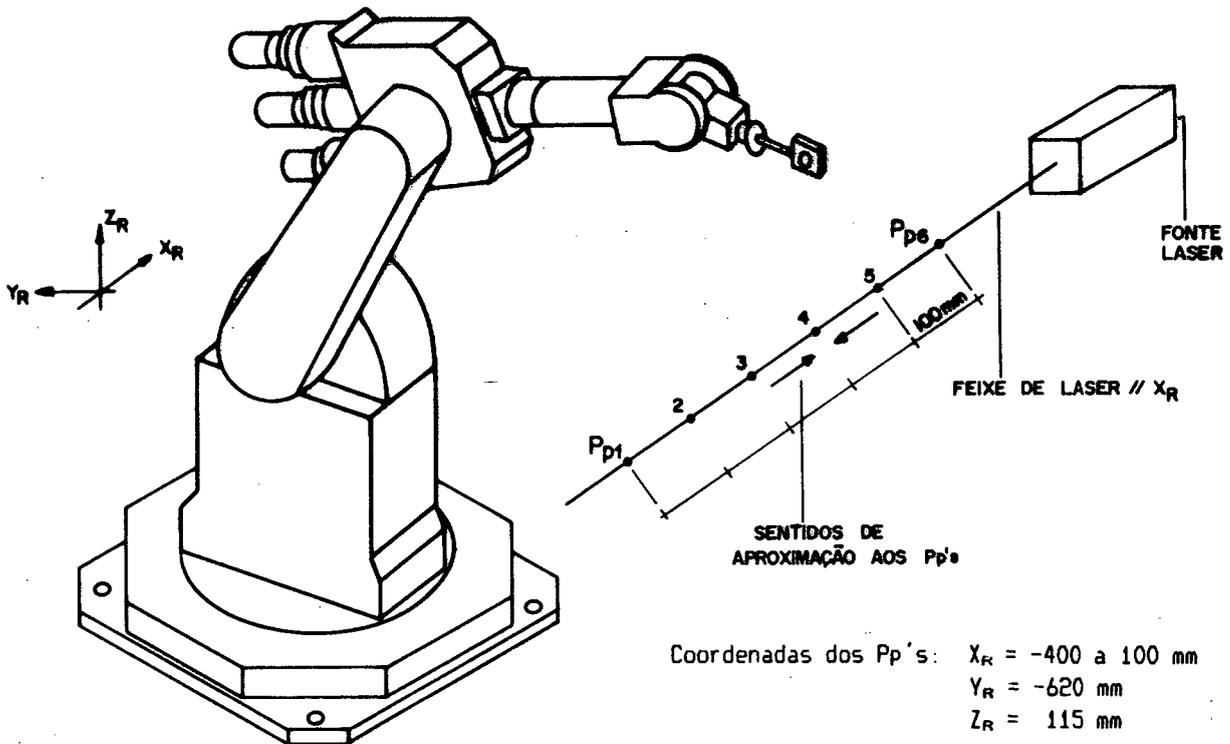


Fig. 6.1 - Direção, sentido de aproximação e Pp's definidos para o ensaio de posicionamento contra escala.

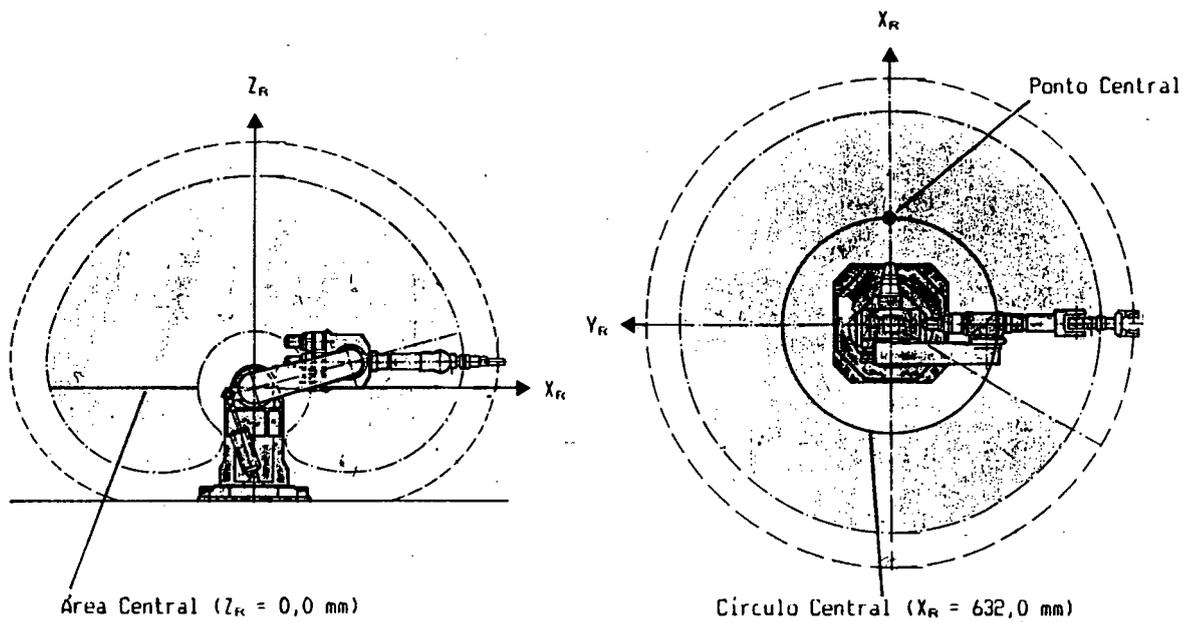


Fig. 6.2 - Localização da área e círculo central do IR IPSO V-15.

6.2.3 Comentários sobre os resultados de medição

O sistema de teste utilizado mostrou-se satisfatório para se atingir os objetivos definidos. A tabela de resultados da figura 6.3 e o gráfico da figura 6.4, mostram a histerese, o ER e ES linear resultantes.

Pt	Pp [mm]	Rp [mm]	ES(X, X _R) [um]	ER(X, X _R) [um]	Média Hist. [um]
1	-400,0	-399,998	-1,9	9,6	----
2	-300,0	-299,500	-499,8	8,0	----
3	-200,0	-199,020	-900,5	9,8	----
4	-100,0	-98,307	-1693,3	9,0	----
5	0,0	-2,173	-2172,7	7,6	----
6	100,0	97,350	-2650,3	20,1	----
7	100,0	97,391	-2628,5	12,9	21,8
8	0,0	-2,129	-2129,4	8,5	43,2
9	-100,0	-98,313	-1687,0	41,3	6,4
10	-200,0	-199,051	-948,9	51,5	31,6
11	-300,0	-299,506	-493,5	25,8	6,3
12	-400,0	-399,987	-12,6	10,2	-10,7

$ER(X, X_R) = t \cdot S$ onde $t(95\%, 10 \text{ medições}) = 2,3$

Velocidade = 37,5 mm/s, Aceleração = 37,5 mm/s², Carga = 2,6 kg

Tempo de estabilização = 10 s Coordenadas: X_R = -400 a 100 mm

Y_R = -620 mm

Z_R = 115 mm

Fig. 6.3 - Tabela de resultados do ensaio de posicionamento contra escala /36/.

Os ER linear se apresentaram abaixo do valor especificado pelo fabricante de $\pm 0,1$ mm /48/. O uso de baixas velocidades contribui para que o ER apresente melhores valores, conforme constatou-se em ensaios similares /27/. Verifica-se ainda que o ER diminui a medida que o EAP se aproxima da coordenada $X_{FR} = 0,0$ mm e aumenta a medida que se afasta (fig 6.3).

As 10 medições decrescentes, pontos 1 à 6 (fig. 6.3), ao contrário das crescentes, pontos 7 à 12 (fig. 6.3) não tiveram o valor dos resultados de medição estabilizados conforme proposto na metodologia deste trabalho (fig. 6.5).

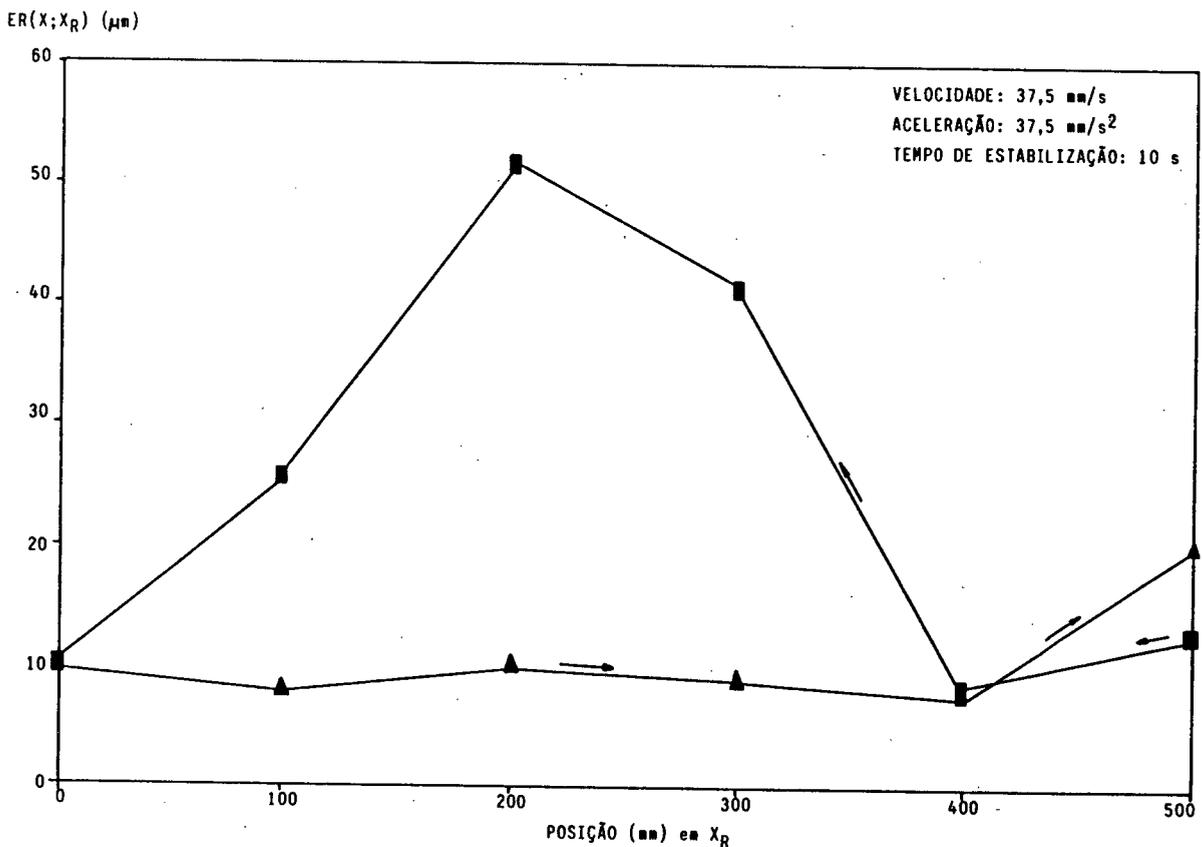


Fig. 6.4 - Gráfico do ER($X;X_{FR},+$) e ES($X;X_{FR},+$) dos Pp's definidos para o ensaio de posicionamento contra escala.

As medições decrescentes apresentaram ER's bem maiores do que os observados nas medições crescentes e uma histerese bastante aleatória em seu comportamento. Em ensaio similar (fig. 6.6)

/27/, a diferença de resultado entre as medições crescentes e decrescentes não chega a ser tão grande, inclusive para a histerese, apesar da diferença de velocidades definidas para cada ensaio. Como entre os dois ensaios o IR não foi utilizado intensamente, fica excluída das fontes de erro o fator folga. Como justificativa mais plausível para os erros observados durante o ensaio em questão, tem-se o erro na regulagem dos ganhos de retorno, detectados no decorrer do ensaio e confirmados durante a manutenção corretiva.

S Pt's	S_2	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9	S_{10}	Status
1	2	2	5	5	5	5	5	4	OK
2	3	4	3	3	4	4	4	4	OK
3	9	6	6	5	5	5	4	4	NÃO
4	6	5	5	5	4	4	4	4	OK
5	4	3	3	4	3	3	3	3	OK
6	2	8	7	7	8	8	8	9	NÃO
7	5	5	5	5	4	4	5	6	OK
8	5	5	4	4	4	3	4	4	NÃO
9	26	23	23	23	21	20	19	18	NÃO
10	3	22	20	20	22	22	21	23	NÃO
11	3	3	16	14	14	13	12	11	NÃO
12	7	6	6	5	5	5	5	4	OK

Legenda: S - desvio padrão

S_i - desvio padrão obtido para o resultado de medição de i medições de um Pp (valores em um).

Status - Informa se houve estabilização dos resultados de medição (OK) ou não (NÃO).

Fig. 6.5 - Quadro dos desvios padrão obtido para cada medição do ensaio, a partir da terceira medição.

Pt	Pp [mm]	Rp [mm]	ES(X, X _{PR}) [um]	ER(X, X _{PR}) [um]	Média Hist. [um]
1	-1000	-1000	-13	13	----
2	-900	-899	724	14	----
3	-800	-799	1144	18	----
4	-700	-699	1339	24	----
5	-600	-599	1490	17	----
6	-500	-499	1342	11	----
7	-400	-399	1265	58	----
8	-400	-399	1329	22	64
9	-500	-499	1421	39	79
10	-600	-598	1573	19	84
11	-700	-699	1438	18	99
12	-800	-799	1228	26	84
13	-900	-899	820	19	96
14	-1000	-1000	94	19	107

$ER(X, X_{PR}) = t \cdot S$ onde $t(95\%, 4 \text{ medições}) = 3,2$

Velocidade = 250 mm/s, Tempo de estabilização = 10 s

Coordenadas: $X_{PR} = -1000$ a -400 mm

$Y_{PR} = -500$ mm

$Z_{PR} = 100$ mm

Fig. 6.6 - Tabela de resultados do ensaio de posicionamento contra escala /35/.

6.3 ENSAIO DE REPETIBILIDADE PONTUAL

Tem por objetivo determinar o ER linear do IR, a influência da direção de aproximação ao Pp e o tempo de estabilização para cada um dos 3 Pp's definidos.

6.3.1 - O sistema de teste

Utilizou-se o sistema de teste cubo/berço indutivo (fig. 4.7), com leitura automatizada. A sincronização entre as tarefas de leitura e movimentação do IR é efetuada pelo operador do ensaio. O deslocamento inicial do cubo de referência em relação a cada transdutor, exigido pelo sistema de teste empregado, foi efetuado com o auxílio de blocos padrão. Devido às características de montagem do sistema de teste, o ensaio de Pp's situados na periferia superior do WS torna-se de difícil realização.

6.3.2. Parâmetros de ensaio utilizados

A figura 6.7 mostra a localização dos 3 Pp's definidos. Cada Pp teve de 20 a 25 medições; com um tempo de estabilização de 10 segundos para cada; segundo levantamento realizado durante o ensaio /26/. A trajetória de ensaio foi dividida em dois estágios. O primeiro com velocidade de 100 mm/s e aceleração de 102,4 mm/s² em controle ponto à ponto (PPC), e o segundo com velocidade de 10 mm/s e a aceleração de 51,2 mm/s² em controle por trajetória contínua (CPC). Utilizou-se uma carga equivalente fixada à EI de 5,6 kg. No ensaio do Pp 1, com direção X_{R1} e sentido positivo, a velocidade de aproximação foi reduzida para 5 mm/s para que o cubo de referência não resvalasse no transdutor de deslocamento responsável pela medição do deslocamento em Z_{R1} .

No Pp 1 as direções e sentidos de aproximação utilizadas foram: X_{R1} sentido positivo, Y_{R1} sentido positivo, Z_{R1} sentido negativo e 35 sentido 35. Nos dois Pp's restantes a direção utilizada foi a

35, com sentido de aproximação 35. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de $21,0 \pm 0,5$ °C, sem que fosse averiguada a temperatura de regime do IR. Não houve registro de vibrações externas.

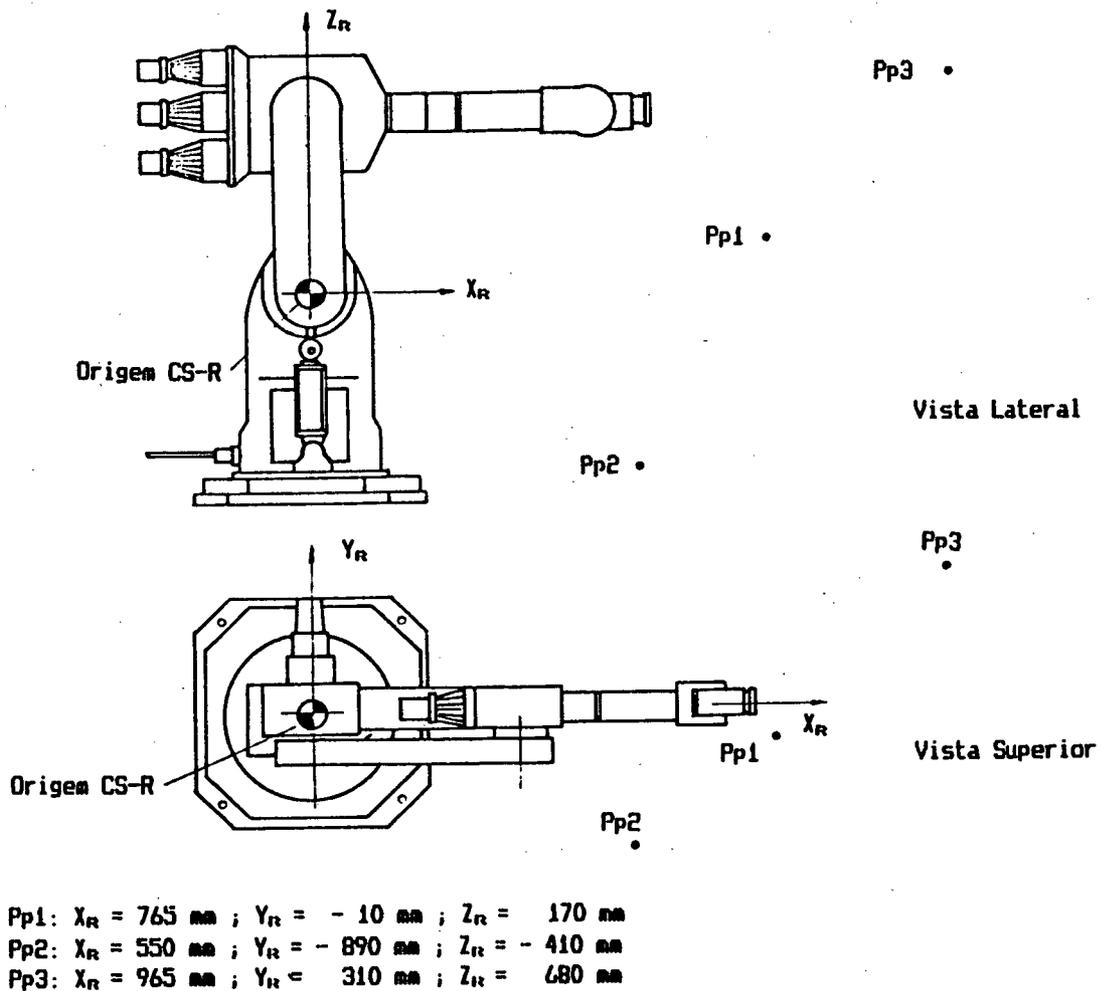


Fig. 6.7 - Pp's definidos para o ensaio de repetibilidade pontual.

6.3.3 Comentários sobre os resultados de medição

O sistema de teste utilizado mostrou-se satisfatório para se atingir os objetivos definidos. O cálculo do ER se fez em função das componentes X, Y e Z do CS-T. A tabela da figura 6.8 apresenta

os resultados alcançados com a direção e sentido de aproximação 35 para os 3 Pp's.

O ER(Z,35,35) constitui a parcela de maior erro para os 3 pontos, inclusive não apresentando a estabilização dos resultados de medição conforme proposto neste trabalho. Explica-se, principalmente, pela ação da gravidade sobre as transmissões e uniões que compõem o Robô /25/. Em particular o Pp 3 apresenta um valor de ER(Z,35,35) consideravelmente maior que os demais.

Pp's	ER(X,35,35) [mm]	ER(Y,35,35) [mm]	ER(Z,35,35) [mm]
1	0,009	0,010	0,036
2	0,027	0,031	0,064
3	0,035	0,031	0,104

$ER(c,35,35) = t \cdot S$, onde $t(95\%, 20 \text{ medições}) = 2,1$
e $c = X, Y \text{ e } Z$.

Velocidade = 10 mm/s, Aceleração = 51,2 mm/s²,

Tempo de estabilização = 10 s Carga = 5,6 kg.

Fig. 6.8 - Erro de repetibilidade linear com a aproximação aos Pp's segundo a direção e sentido 35.

Vibrações internas, causadas pelo aumento do atrito entre as uniões /17/, e o maior momento fletor em relação ao ponto de origem do CS-R, contribuem para a geração deste ER. A figura 6.9 apresenta os resultados alcançados no Pp 1 segundo as direções X_R sentido positivo, Y_R sentido positivo, Z_R sentido negativo.

Direções e Sentidos (d) (s)	ER(X,d,s) [mm]	ER(Y,d,s) [mm]	ER(Z,d,s) [mm]
X_R +	0,025	0,032	0,096
Y_R +	0,015	0,009	0,052
Z_R -	0,029	0,026	0,095

$ER(c,d,s) = t.S$, onde $t(95\%, 20 \text{ medições}) = 2,1$, $c = X, Y \text{ e } Z$,

$d = X_R, Y_R \text{ e } Z_R$ e $s = + \text{ ou } -$. Carga = 5,6 kg

Velocidade = 10 mm/s, Velocidade para $X_R + = 5 \text{ mm/s}$

Aceleração = 51,2 mm/s², Tempo de estabilização = 10 s.

Fig. 6.9 - Erro de repetibilidade linear do Pp 1, segundo as direções e sentidos $X_R +$, $Y_R +$ e $Z_R -$.

Imediatamente pode-se concluir que o ER depende da direção escolhida para a aproximação ao Pp. Destes resultados destaca-se os $ER(Z, Z_R, -)$ e $ER(Z, X_R, +)$. O valor demasiado encontrado para este último se justifica pelo ajuste incorreto dos ganhos de retorno do módulo de movimentação três, que foi mais utilizado durante a aproximação ao Pp pela direção X_R . Neste ensaio não se pode constatar a influência da diminuição da velocidade no valor do ER durante a aproximação por X_R , mas com certeza conclui-se que a sua diminuição implica num melhor controle da trajetória.

6.4 ENSAIO DE POSICIONAMENTO CONTRA ESQUADRO

Tem por objetivo a determinação do Erro de Posicionamento do IR IPSO V-15, em uma região crítica do WS, com relação a duas trajetórias ortogonais.

6.4.1 O sistema de teste

Composto por um transdutor eletro-óptico de deslocamento, acoplado ao IR, respectiva unidade de tratamento de sinais (SC - signal conditioning) e esquadro padrão (fig. 6.10).

As leituras são realizadas manualmente. Devido a falta de um dispositivo remoto para a retração da haste que compõe o transdutor, operou-se o IR durante o ensaio a uma baixa velocidade. Alinhando-se a haste do transdutor com a superfície do esquadro padrão onde se localizam os Pp, com a ajuda de um outro esquadro padrão de dimensões compatíveis com a do transdutor, o erro de cosseno torna-se desprezável. A fixação do transdutor à EI limita os movimentos do IR, restringindo as trajetórias possíveis de serem definidas para o ensaio.

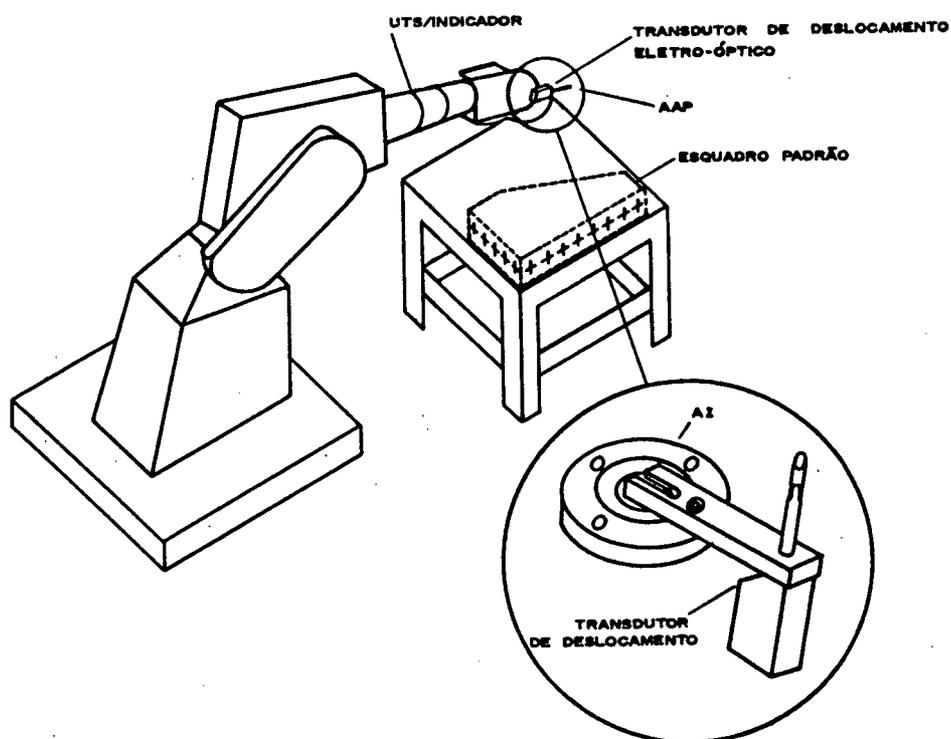
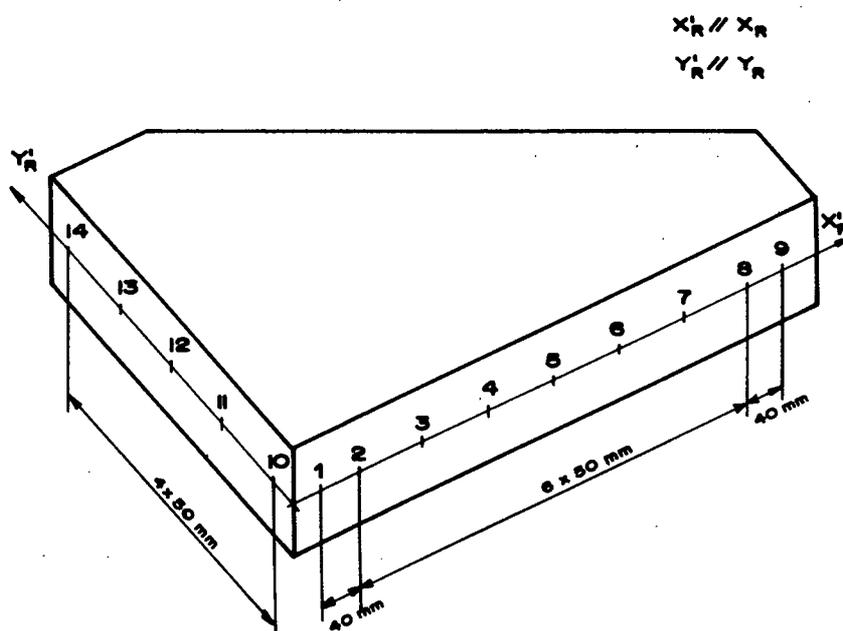


Fig. 6.10 - TS composto por medidor eletro-óptico de deslocamento e esquadro padrão.

6.4.2 Parâmetros de ensaio utilizados

Os Pp's, 14 no total, são definidos sobre duas retas ortogonais contidas nas superfícies do esquadro padrão (fig. 6.11). Nove Pp's sobre a reta alinhada com o eixo coordenado X_E e cinco sobre a reta alinhada com o eixo coordenado Y_E , com espaçamentos

conforme definido na figura 6.11. O número de medições para cada Pp é de 16 com tempo de estabilização de aproximadamente 10 segundos. A trajetória de aproximação aos Pp's foi dividida em dois estágios. O primeiro efetuado com velocidade de 200 mm/s em PPC e aceleração de 102,4 mm/s² e o segundo com velocidade de 150 mm/s em controle por trajetória contínua CPC e aceleração igual ao do primeiro. A direção de aproximação utilizada para os 9 primeiros Pp's é a Y_R, sentido positivo. Para os pontos restantes usou-se a direção X_R e sentido positivo. Não houve fixação de carga à EI. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de 20,2 +/- 0,9 °C, sem que fosse averiguada a temperatura de regime do IR. Não houve registro de vibrações externas.



Coordenadas:

Pp 1 a 9: $X_R = 670 \text{ mm}$; $Y_R = 70 \text{ A } 270 \text{ mm}$; $Z_R = 25 \text{ mm}$
 Pp 10 a 14: $X_R = 600 \text{ a } 900 \text{ mm}$; $Y_R = -85 \text{ mm}$; $Z_R = 25 \text{ mm}$

Fig. 6.11 - Pp's definidos para o ensaio de posicionamento contra esquadro.

6.4.3 Comentários sobre os resultados de medição

O sistema de teste mostrou-se satisfatório para se atingir os objetivos definidos. As tabelas e gráficos apresentados nas figuras 6.12 à 6.14 mostram os ER's e ES's linear dos Pp's definidos.

Os resultados contidos nas figuras 6.12 a 6.14 demonstram que os erros aleatórios são bem menores que os erros sistemáticos. Na figura 6.15 os ES representados referem-se aos maiores valores encontrados. Apesar das diversas panes apresentadas pelo IR durante o ensaio dos nove primeiros Pp's, os ER's não apresentaram grandes variações em seus valores, a exceção de alguns poucos Pp's. O ensaio dos Pp's 10 à 14 não apresentou interrupções, possibilitando a estabilização de seus resultados de medição conforme a metodologia proposta neste.

EP Pp's	ES(Y, Y _R , +)		ER(Y, Y _R , +)		em [mm]	
	Medições 1 a 5 ES	ER	Medições 6 a 10 ES	ER	Medições 12 a 16 ES	ER
1	0,003	0,012	0,003	0,012	0,003	0,012
2	0,006	0,008	0,021	0,013	0,015	0,012
3	0,051	0,009	0,100	0,013	0,087	0,012
4	0,048	0,004	0,125	0,027	0,112	0,009
5	0,027	0,005	0,139	0,018	0,128	0,009
6	0,005	0,024	0,139	0,019	0,118	0,014
7	-0,005	0,008	0,156	0,010	0,144	0,014
8	-0,049	0,019	0,144	0,011	0,117	0,023
9	-0,179	0,018	0,036	0,016	0,011	0,017

$ER(Y, Y_R, +) = t.S$ onde $t(95\%, 5 \text{ medições}) = 3,2$

Velocidade = 150 mm/s, Aceleração = 102,4 mm/s²,

Tempo de estabilização = 10 s.

Fig. 6.12 - Tabela de resultados (ES, ER) dos Pp's 1 à 9 do ensaio de posicionamento contra esquadro.

Seus ER's apresentaram-se dentro de uma mesma ordem de grandeza. Aparentemente, o defeito apresentado pelo servo controle do módulo de movimentação 3, não influenciou nos resultados de medição, comparando-se com os apresentados em 6.2. A ausência de carga também contribui para que se tenha ER's melhores.

EP Pp's	Medições 1 à 16	
	ES(X, X _{ER} , +) [mm]	ER(X, X _{ER} , +) [mm]
10	0,002	0,009
11	-0,495	0,010
12	-0,194	0,007
13	-0,658	0,004
14	-0,783	0,008

$ER(X, X_{ER}, +) = t \cdot S$ onde $t(95\%, 17 \text{ medições}) = 2,2$

Velocidade = 150 mm/s, Aceleração = 102,4 mm/s²,

Tempo de estabilização = 10 s.

Fig. 6.13 - Tabela de resultados (ES, ER) dos Pp's 10 à 14 do ensaio de posicionamento contra esquadro.

Velocidade: 150 mm/s
 Aceleração: 102,4 mm/s²
 Tempo de estabilização: 10 s
 Direção e sentido de aproximação Pp's 1 a 9: Y_R +
 Direção e sentido de aproximação Pp's 10 a 14: X_R +

Escala ES: 30 mm da escala = 1 mm de ES
 Escala ER: 10 mm da escala = 1 μm de ER

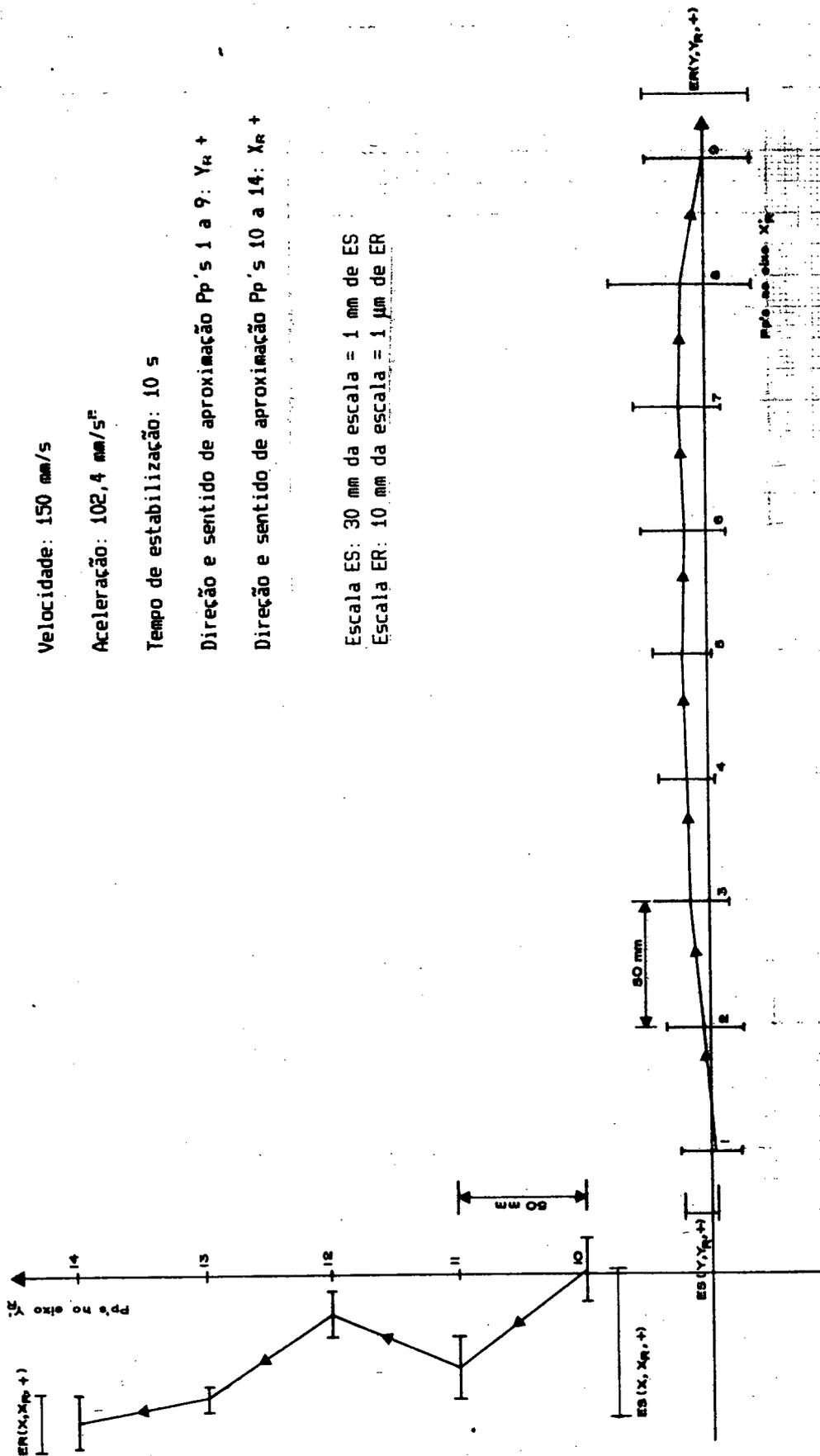


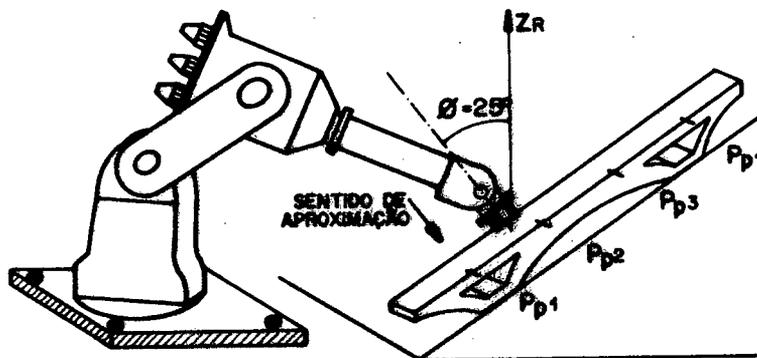
Fig. 6.14 - ES e ER nos eixos X_R' e Y_R', sendo no eixo X_R' os resultados da 12^a à 16^a medição (fig. 6.12) e no eixo Y_R' os resultados da 1^a à 16^a medição (fig. 6.13).

6.5 ENSAIO DE REPETIBILIDADE ANGULAR

Tem por objetivo determinar a componente do ER angular em dois graus de liberdade (p e q) do IR IPSO V-15, para 4 Pp's localizados sobre uma régua padrão.

6.5.1 O sistema de teste

Composto por 3 transdutores de deslocamento eletro-ópticos acoplados à EI, respectivas SC's e uma régua padrão (fig. 6.15 e 6.16). As leituras foram realizadas manualmente.



COORDENADAS:

Pp1:	$X_R = 740 \text{ mm}$	$Y_R = -110 \text{ mm}$	$Z_R = -350 \text{ mm}$
	$A = 130^\circ$	$B = -25^\circ$	$C = 155^\circ$
Pp2:	$X_R = 930 \text{ mm}$	$Y_R = -110 \text{ mm}$	$Z_R = -220 \text{ mm}$
	$A = 130^\circ$	$B = -25^\circ$	$C = 155^\circ$
Pp3:	$X_R = 1160 \text{ mm}$	$Y_R = -100 \text{ mm}$	$Z_R = -60 \text{ mm}$
	$A = 130^\circ$	$B = -25^\circ$	$C = 155^\circ$
Pp4:	$X_R = 1290 \text{ mm}$	$Y_R = -100 \text{ mm}$	$Z_R = 30 \text{ mm}$
	$A = 130^\circ$	$B = -25^\circ$	$C = 155^\circ$

Fig. 6.15 - Direção e sentido de aproximação definidos para o ensaio de repetibilidade angular.

Devido a falta de um dispositivo remoto para a retração das hastes que compõem o transdutor, operou-se o IR durante o ensaio a uma baixa velocidade. Alinhando-se os transdutores com a superfície do esquadro padrão onde se localizam os Pp's, com a ajuda de um outro esquadro padrão de dimensões compatíveis com a dos transdutores, o erro de cosseno torna-se desprezável. A

fixação do transdutor à EI limita os movimentos do IR, restringindo as trajetórias possíveis de serem definidas para o ensaio.

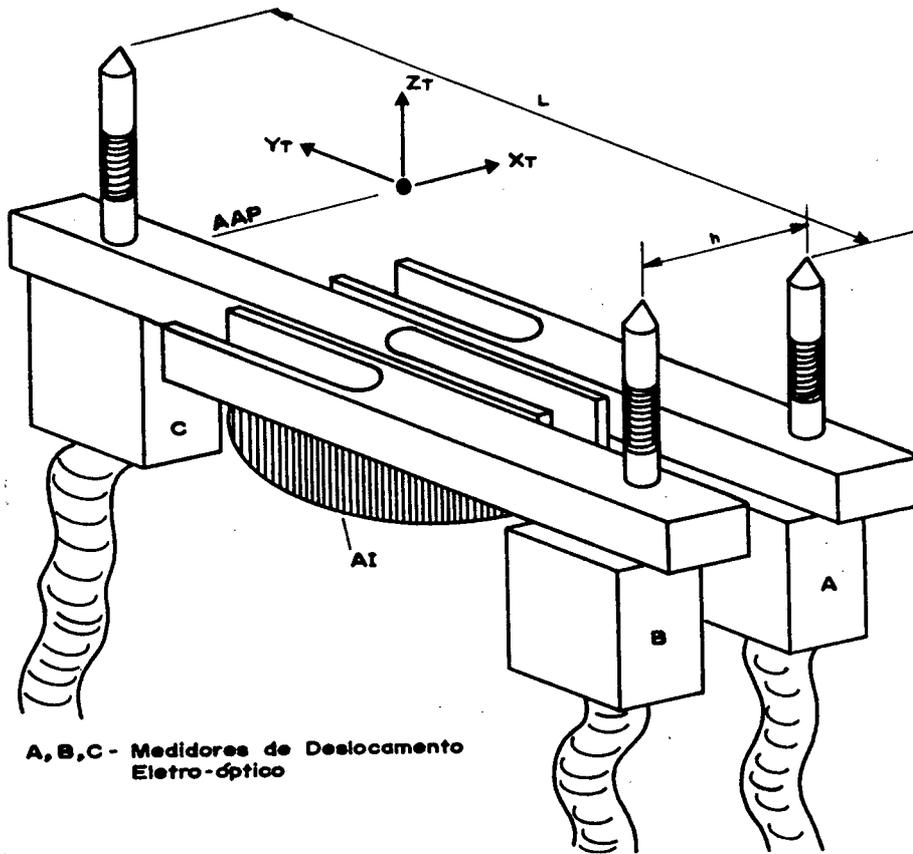


Fig. 6.16 - Detalhe de montagem do sistema de teste usado no ensaio de repetibilidade angular.

6.5.2 Parâmetros de ensaio utilizados

Foram definidos 4 Pp's sobre a reta padrão, conforme figura 6.15. O número de medições para cada Pp é de 20 com tempo de estabilização de aproximadamente 10 segundos nos Pp's 1 e 2, passando para 15 segundos nos Pp's 3 e 4. A trajetória de aproximação aos Pp's foi dividida em dois estágios. O primeiro efetuado com velocidade 200 mm/s em PPC e aceleração de 102,4 mm/s² e o segundo com velocidade de 75 mm/s em CPC e aceleração de 51,2 mm/s², para uma carga fixada à EI de 1,2 kg - peso dos

transdutores mais dispositivos de fixação destes. A direção de aproximação utilizada faz um ângulo de aproximadamente 25° com o eixo coordenado Z_R e sentido negativo a este (fig. 6.15). Procurou-se movimentar previamente o IR para que se atingisse uma temperatura de regime mais estável. O ensaio foi realizado a uma temperatura ambiente de $21,5 \pm 0,5 \text{ }^\circ\text{C}$, sem que fosse averiguada a temperatura de regime do IR. Não houve registro de vibrações externas.

6.5.3 Comentários sobre os resultados de medição

O sistema de teste utilizado mostrou-se insatisfatório para se atingir os objetivos. A tabela da figura 6.17 apresenta os resultados alcançados.

Pp's	Valores em ["]	
	ER(p, ϕ , +)	ER(q, ϕ , +)
1	6,4	6,2
2	6,6	10,3
3	10,3	13,6
4	8,5	5,2

$ER(A, \phi, +) = ER(B, \phi, +) = t.S$ onde $t(95\%, 20 \text{ medições}) = 2,1$

Velocidade = 75 mm/s, Aceleração = $51,2 \text{ mm/s}^2$,

Tempo de estabilização para os Pp's 1 e 2 = 10 s,

Tempo de estabilização para os Pp's 3 e 4 = 15 s,

Carga = 1,2 kg.

Fig. 6.17 - Tabela de resultados - $ER(p, \phi, +)$ e $ER(q, \phi, +)$ - do ensaio de repetibilidade angular.

O ER angular obtido possui a mesma ordem de grandeza que a Im do sistema de teste padrão /50/, tornando-se necessário um novo sistema que tenha uma Im no mínimo 5 vezes melhor que o ER angular encontrado. O aumento do tempo de estabilização dos Pp's 3 e 4 para 15 segundos, efetuado durante o ensaio, caracteriza a influência do momento fletor e do atrito entre as uniões, sobre as oscilações apresentadas na EI.

6.6 CONCLUSÕES

Os objetivos e as condições de ensaio fixadas têm um caráter pouco abrangente. Portanto os resultados alcançados apresentam-se para um caso particular de utilização do IR, sem que se possa estender completamente seus resultados para os demais posicionamentos e condições de operação possíveis de se efetuar dentro do WS.

A metodologia empregada nos ensaios descritos neste capítulo apresentou-se variada, tendo em vista que estas serviram de base para a formulação final da metodologia sugerida neste trabalho. Portanto, os ensaios descritos deveriam ser acrescidos de certos parâmetros que ampliariam o significado de seus resultados. São eles:

- variação da velocidade e aceleração para uma mesma trajetória;
- variação do valor da carga fixada à EI;
- utilização das demais direções e sentidos de aproximação ao Pp propostos neste trabalho;

- definição do número de medições conforme a estabilização dos resultados de medição;
- verificação da temperatura de regime do IR;
- uso do tempo de estabilização adequado a cada Pp definido para ensaio.

A ampliação do significado se daria na forma de uma confiabilidade maior dos resultados obtidos, e conhecimento do comportamento geométrico do IR para um maior número de variáveis significativas na geração do Erro de Posicionamento.

Os resultados são apresentados em tabelas de leituras e de resultados, e gráficos especificamente gerados em função das características dos sistemas de teste utilizados. Dos resultados obtidos, pode-se concluir de uma maneira geral, que os ER são bem melhores que os ES. As velocidades definidas, assim como as direções e sentidos de aproximação ao Pp escolhido para ensaio, influem no valor encontrado para o ER. Nestes ensaios, a parcela que mais influencia na composição do ER é a componente Z, descrita em relação ao CS-T. A medida que se define Pp's mais próximos a área central do WS (fig. 6.2), o ER tende a diminuir. Já os posicionamentos definidos na periferia do WS requerem um tempo de estabilização maior. O ER angular do IR apresentou valores que podem ser considerados desprezáveis para a maioria das operações de manipulação que utilizam IR's.

Dos sistemas de teste padrão utilizados nos ensaios descritos neste capítulo, o denominado cubo/berço indutivo apresenta-se como o mais flexível. Possui recursos para cumprir com maior facilidade as condições de ensaio sugeridas na metodologia deste

trabalho. Os demais sistemas, apesar de oferecerem dados interessantes, não apresentam a flexibilidade necessária para efetuar as mesmas medições. Conclui-se ainda que a automação da medição é um fator essencial para agilizar o acompanhamento/documentação dos resultados e variações ocorridas no meio ambiente /35/.

7 CONCLUSÕES

Os resultados alcançados no presente trabalho, cumprem os principais objetivos definidos em sua parte inicial. São estes:

- a) o aperfeiçoamento e sistematização de uma metodologia para a determinação do erro de repetibilidade;
- b) o estabelecimento de uma terminologia adequada ao trato da questão;
- c) o aprofundamento do conhecimento sobre o sistema de teste cubo/berço.

A metodologia proposta, direcionada para ensaios prospectivos, traz como uma de suas contribuições mais significativas, as recomendações para a determinação do número de medições. A realização de medições até que o desvio padrão de quatro resultados de medição consecutivos sejam iguais, permite que se caracterize melhor a influência das condições de ensaio sobre o erro de repetibilidade.

A terminologia estabelecida abrange algumas das características construtivas de um robô industrial, suas partes básicas e a nomenclatura utilizada para a representação do erro de repetibilidade. Esta última traz informações mneumônicas sobre a decomposição do erro de repetibilidade, segundo os eixos do sistema de coordenadas selecionado, e qual a direção e sentido de aproximação estabelecidos para se efetuar o ensaio de repetibilidade do robô industrial.

O sistema de teste cubo/berço, composto por seis medidores de deslocamento, apresentou uma incerteza de medição linear de +/-

0,005 mm e angular de $\pm 0,006^{\circ}$. Em função dos erros de posicionamento apresentados pelos robôs industriais atualmente comercializados no Brasil, conclui-se que este sistema de teste pode ser utilizado em ensaios de posicionamento. Sua maior vantagem com relação aos demais sistemas apresentados neste trabalho, reside em sua capacidade de medir as componentes dos erros em seis graus de liberdade.

Visando a otimização dos ensaios de posicionamento, recomenda-se para futuros trabalhos o uso de sistemas de teste de princípio óptico, que permitam a obtenção das componentes dos erros em seis graus de liberdade, sem a utilização de estruturas auxiliares dentro do volume de trabalho do robô industrial. Com isso, cria-se melhores condições para a definição e execução destes ensaios.

8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- /1/ - Warnecke, H.J.
Gzik, H. Trends in robot development with special reference to welding technology. Welding and Cutting, p. 52-56, April 1987.
- /2/ - Feldmann, P.R. Robô, ruim com ele, pior sem ele. 1ª Ed. SP: Trajetória Cultural, 1988.
- /3/ - Robotics World, Communication Channels Ed., EUA, p 20, Nov/Dec 1989.
- /4/ - ISO ISO/TR - 8373, Manipulating industrial robots - Vocabulary Draft Technical Report. ISO - International Standards Organization, 1988.
- /5/ - Warnecke, H.J.
Schraft, R.D. Industrial robots, application experience. I.F.S. (Publications) Ltd., Inglaterra, 1982.
- /6/ - Gavagnari, G. Development and evaluation of a dynamic robot tracking devices. Dissertação de mestrado, Cranfield Institute of Technology, Inglaterra, Set. 1986.
- /7/ - Badami, V.V. New sensors promise more flexibility. I& CS; p. 27-31, July 1986.
- /8/ - ISO ISO/DP 9787.2, Manipulating industrial robots-coordinate systems and motions. ISO - International Standards Organization, Nov. 1987.
- /9/ - ISO ISO 9409-1: 1988(E), Manipulating industrial robots - Mechanical interfaces - Part 1: Circular (form A). Primeira Edição, ISO - International Standards Organization, Dezembro de 1988.
- /10/ - ISO ISO/DP - 9283, Manipulating industrial robots - Performance criteria and related testing methods. ISO - International Standards Organization, Oct. 1988.

- /11/ - ISO ISO/DIS 9946, Manipulating industrial robots - Presentation of characteristics. ISO - International Standards Organization, Aug. 1989.
- /12/ - VDI VDI 2861 Blatt 1, Kenngrößen für Handhabungsgeräte Achsbezeichnungen. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, Sept. 1980.
- /13/ - VDI VDI 2861 Blatt 2, Kenngrößen für Handhabungsgeräte Achsbezeichnungen. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, April 1987.
- /14/ - VDI VDI 2861 Blatt 3, Kenngrößen für Handhabungsgeräte Achsbezeichnungen. VDI - Verein Deutscher Ingenieure, April 1987.
- /15/ - Ackerson, D.S.
Harry, D. R. Theory, experimental results, and recommended standards regarding the static positioning and orienting precision of industrial robots. Robotics & Computer Integrated Manufacturing, vol 2, nº 3/4, p. 247 - 259, 1985.
- /16/ - Lhote, F.
Kauffmann, J.
et al. Robot technology - Robot components and systems. Kogan Page, Londres, 1984.
- /17/ - Craig, J.J. Introduction to robotics, mechanics and control. Addison-Wesley, 300 p., 1986.
- /18/ - Fu, K.S.
Gonzalez, R.C.
Lee, C.S.G. Robotics - Control, sensing, vision, and intelligence. McGraw-Hill, 580 p., 1987.
- /19/ - Martin, C.A.
Lichtblau, M. Posicionadores: as hábeis e precisas mãos da máquina-ferramenta CNC-Análise do comportamento dinâmico. Anais SOBACON, p 1-22, 1988.
- /20/ = Schneider, C.A. Técnicas de pesquisa experimental. Apostila do curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, UFSC, 76 p., 1986.

- /21/ - Schneider, C.A.
Lafretta, F.H. Characterization and processing of industrial robots pose errors. International Proceedings of 2nd IMEKO TC 14 Symposium on Metrology for Quality Control in Production, International Academic Publishers, Beijing, China, 1989.
- /22/ - Phillips, N.
Cowell, J.R.
Bell, R. The measurement capability of an industrial robot. 7th British Robot Association Annual Conference - British Robot Association and North Holland Publ., p. 423-429, May 1984.
- /23/ - IPA Relatório de ensaio do robô industrial Hitachi Process Robot. Publicação interna, IPA - Institute for Production Technology and Automation, Stuttgart, RFA, Aug. 1981.
- /24/ - Schiele, G. Entwicklung eines messverfahrens zur bestimmung des positionier- und orientierungsverhaltens von industrierobotern. Tese de doutorado, Spring Verlag, 1987.
- /25/ - Ahmad, S. Second order nonlinear kinematic effects and their compensation. IEEE, p. 307 a 314, 1985.
- /26/ - Rosso, R.S.U.
Stoeterau, R.L. Determinação da repetibilidade no posicionamento do robô industrial IPSO V-15, Utilizando Transdutores Indutivos sem Contato. Publicação interna, pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 1989.
- /27/ - Riffel, G. Ensaio de posicionamento com laser interferométrico. Publicação interna, pós-graduação em Eng. Mecânica, -UFSC, Set. 1988.
- /28/ - Schneider, C.A. Sistemas de medição. Publicação interna, CERTI - Centro Regional de Tecnologia em Informática, 129 p. 1986.
- /29/ - Pereira, A.A. Relatório da disciplina: EMC 1531 - Estágio Profissional/ Indústria Villares S/A, Publicação interna, UFSC, 1988.

- /30/ - Hewlett Packard Manual de operação do medidor interferométrico de deslocamento, modelo 5501, EUA.
- /31/ - DIADUR Catálogo do medidor eletro-óptico de deslocamento, modelo MT 12, Brasil.
- /32/ - MITUTOYO Catálogo do medidor eletro-óptico de deslocamento, modelo 542-201, RFA, 1985.
- /33/ - MICRO-EPSILON Catálogo do medidor indutivo de deslocamento sem contato, modelo série 300, RFA.
- /34/ - Priel, M.
Schatz, B. Project for development of a photogrammetric method for the evaluation of the dynamic performance of industrial robots. p. 19-30, Laboratoire National d'Essais - DMI, Paris, França.
- /35/ - Lepikson, H.A.
Gorges, M. Posicionamento linear contra escala. Publicação interna, pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, Set. 1989.
- /36/ - Schüssler, H. Metrology of robots and large coordinate measuring machines by means of axial and oblique laser interferometer measurements. Proceedings of the 11th Triennial World Congress of the International Measurement Confederation, Houston, Texas, EUA, p. 149-166, Oct. 1988.
- /37/ - Schneider, C.A. Ensaios geométricos de máquinas-ferramentas. Publicação interna, CERTI - Centro Regional de Tecnologia em Informática, 1988.
- /38/ - OXBRIDGE
TECHNOLOGY Sistema de teste de robôs industriais "3D Lasertrace Tracking System". Oxbridge Technology Ltd., Breckland, Linford, Milton Keynes MK 14 6LD, UK

- /39/ - POLYTEC Sistema de teste de robôs industriais "ROBOTEST". Polytec GmbH, D-7541 Waldbronn, Postfach 1140, DBR
- /40/ - SELSPINE Sistema de teste de robôs industriais "ROBOT CHECK". Selspine AB, Flojelberg 14, S-43137, Moindal, SWEDEN
- /41/ - Katowski, D. RMS 2000 - A System for non-contact measurements of large objects. Wild Heerbrug Ltd., Suíça, 1989.
- /42/ - Lau, K.
Hocken, R.J. Automatic laser tracking interferometer system for robot Haight, W.C. Metrology. Precision Engineering, Butter and Co, vol 8, nº1, p. 3-8, jan. 1986.
- /43/ - Gilby, J.H.
Parker, B.A.
Parker, G.A. Robot arm position measurement using laser tracking techniques. Proceedings of The 7th British Robot Association Annual Conference, British Robot Association and North Holland Publishers, p. 85-95, may de 1984.
- /44/ - Warnecke, H.J.
Schraft, R.D. IndustrieRoboter Katalog '85. Vereinigte Fachverlage, RFA, 253 p., 1985.
- /45/ - Bronstein, I.
Semendiaev, K. Manual de matemática para engenheiros e estudantes. Editora Mir, URSS, 832 p., 1984.
- /46/ - Chandra, M.J.
Rosenshine, M.
Soyster, A.L. Analysis of robot positioning error. Int. J. Prod. Res., vol. 24, nº 5, pag 1159-1169, 1986.
- /47/ - Bowles, D.G. A study of the point repeatability of industrial robots at different defined positions in their operating envelopes. Dissertação de mestrado, Cranfield Institute of Technology, set. 1984.
- /48/ - ZEISS Calibração de entrega da Máquina de Medir por Coordenadas ZEISS, modelo ZMC 550, Publicação interna, ZEISS, 1988.

- /49/ - Maleski, A.J.
Ribeiro, L.F.M. Ensaio de posicionamento contra esquadro. Publicação interna, pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, Set. 1989.
- /50/ - Santos, R.A.P.
Villaruel, J.C. Ensaio de repetibilidade angular. Relatório de trabalho da disciplina Metrologia Dimensional, Curso de Pós-graduação em Eng. Mecânica da UFSC, Setembro de 1989.