

JOSÉ PUCCI CALY

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MESA DE ACOPLAMENTO CINEMÁTICO
DE ALTA REPETIBILIDADE DE POSICIONAMENTO E BAIXO CUSTO**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em
Engenharia.**

**São Paulo
1995**

OK

Ficha catalográfica de Dissertação de Mestrado

Caly, José Pucci

**Projeto e construção de uma mesa de
acoplamento cinemático de alta repetibilidade
de posicionamento e baixo custo.
São Paulo, 1995.**

85 p.

**Dissertação (Mestrado)-Escola Politécnica
da Universidade de São Paulo. Departamento
de Engenharia Mecânica.**

**1.Acoplamento cinemático 2.Projeto.
3.Construção. 4.Ensaio de repetibilidade.
Escola Politécnica. Departamento de
Engenharia Mecânica.**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010049

**Aos meus pais
Laurinda e José,**

**À minha esposa
Wanda Regina,**

AGRADECIMENTOS

Ao orientador Prof.Dr. Carlos Chien Ching Tu, pelo apoio e incentivo na execução deste trabalho.

Ao engenheiro e amigo Flávius Portella Ribas Martins, pela valiosa colaboração e grande espírito científico, pontos que foram determinantes no desenvolvimento deste estudo.

Ao engenheiro e amigo José Antonio Oka, pelo estímulo de sempre e o auxílio valioso nas diretrizes estatísticas utilizadas neste trabalho.

Ao engenheiro e amigo José Carlos Zanutto e sua equipe, pelo auxílio na elaboração da instrumentação do sistema de pré-carga.

A todos os colegas do Laboratório de Metrologia, pelo auxílio nas medições das peças.

Ao colega Carlos Alberto Estevam, pelo valioso auxílio técnico na construção do projeto.

À bibliotecária Srta Glécia Regina Camargo da Silva, pela ajuda na aquisição da literatura necessária.

Aos colegas da Seção de Projetos, Processos e Automação, e a todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

ÍNDICE

Página

| | |
|---|-----------|
| Lista de tabelas | |
| Lista de figuras | |
| Resumo | |
| <i>Abstract</i> | |
| 1 INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 1.1 Objetivos do Trabalho..... | 5 |
| 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 7 |
| 2.1 Acoplamento de Kelvin | 7 |
| 2.2 Acoplamento de três ranhuras..... | 10 |
| 3 PROJETO DO ACOPLAMENTO CINEMÁTICO | 14 |
| 3.1 O projeto..... | 16 |
| 3.1.1 Fixando algumas variáveis..... | 18 |
| 3.1.2 Disposição geométrica das ranhuras..... | 18 |
| 3.1.3 Geometria das ranhuras..... | 19 |
| 3.1.3.1 A ranhura em "V"..... | 19 |
| 3.1.3.2 A ranhura em arco gótico..... | 20 |
| 3.1.3.3 A ranhura com cilindros justapostos..... | 21 |
| 3.1.4 Tensões e deformações..... | 23 |
| 3.2 Cálculo da força máxima de contato sobre os elementos de interface..... | 27 |
| 3.3. Cálculo da força de pré-carga na interface (F)..... | 29 |
| 3.4. Projeto mecânico da mesa de acoplamento cinemático..... | 29 |
| 4 FABRICAÇÃO DO SISTEMA MECÂNICO..... | 30 |
| 4.1 Usinagem das peças..... | 31 |
| 4.2 Montagem do conjunto..... | 32 |
| 4.2.1 Montagem da base superior..... | 32 |
| 4.2.2 Montagem da base inferior..... | 35 |
| 4.2.3..Montagem das células de carga..... | 37 |
| 4.2.3.1 Os sensores..... | 37 |

| | |
|---|-----------|
| 4.2.3.2. Montagem dos extensômetros elétricos nos prisioneiros de pré-carga..... | 37 |
| 4.2.4 Colagem dos roletes de pré-carga nos grampos de pré-carga | 39 |
| 4.3 Montagem da mesa..... | 39 |
| 5 ENSAIOS DE DESEMPENHO DO ACOPLAMENTO CINEMÁTICO..... | 40 |
| 5.1 Seleção da peça padrão para os testes de desempenho..... | 40 |
| 5.2 Seleção dos instrumentos empregados..... | 42 |
| 5.2.1 Máquina tridimensional de medida..... | 42 |
| 5.2.2 Apalpador eletrônico..... | 44 |
| 5.2.3 Máquina para medição de circularidade e cilindricidade..... | 44 |
| 5.2.4 Medidores de força..... | 46 |
| 5.2.5 Máquina universal de ensaio..... | 47 |
| 5.3 Metodologia para a medição do erro de repetibilidade..... | 48 |
| 5.3.1 O erro de repetibilidade..... | 48 |
| 5.3.2 Número de medições (n)..... | 49 |
| 5.3.2.1 Repetição das medições..... | 51.. |
| 5.3.3 As medições de posicionamento..... | 51 |
| 5.3.3.1 Metodologia para a medição da posição da peça padrão..... | 52 |
| 5.3.3.2 Determinação do erro de inclinação do eixo em função da aplicação de esforços..... | 52 |
| 5.3.3.3 Medições para a determinação do erro de repetibilidade de repetibilidade de posicionamento..... | 52 |
| 6 RESULTADOS..... | 54 |
| 7 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES..... | 77 |
| 7.1 Considerações sobre o projeto..... | 77 |
| 7.2 Considerações sobre a fabricação | 78 |
| 7.3 Considerações sobre os ensaios realizados | 79 |
| 7.4 Conclusões..... | 80 |
| ANEXO A Projeto Mecânico..... | 82 |
| 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 83 |
| APÊNDICE A Resultados da aferição geométrica da peça padrão | |
| APÊNDICE B Resultados da medição da circularidade dos roletes e esferas de interface | |
| APÊNDICE C Resultados da calibração dos sensores | |

LISTA DE TABELAS

| | Página |
|---|--------|
| Tabela 3.1 Valores de $\cos \theta$ | 25.. |
| Tabela 6.1 Medição da posição do centro da peça padrão Condição de carga: peso próprio da base superior | 55 |
| Tabela 6.2 Erro de repetibilidade Condição de carga: peso próprio da base superior..... | 56 |
| Tabela 6.3 Medição da posição do centro, em função do ciclo de acoplamento através do par de coordenadas X-Y, Condição de carga: 15 kN..... | 57 |
| Tabela 6.4 Erro de repetibilidade Condição de carga: 15 kN | 58 |
| Tabela 6.5 Medição da posição do centro em função do ciclo de acoplamento através do par de coordenadas X-Y. Condição de carga: 30 kN | 59 |
| Tabela 6.6 Erro de repetibilidade Condição de carga: 30 kN | 60 |
| Tabela 6.7 Medição do erro de inclinação Condição de carga: 15 kN | 61 |
| Tabela 6.8 Erro de inclinação Condição de carga: 15 kN..... | 62 |
| Tabela 6.9 Inclinação do eixo Condição de carga 15 kN | 63 |

| | |
|--|----|
| Tabela 6.10 Medição do erro de inclinação | |
| Condição de carga: 3 0kN | 64 |
| Tabela 6.11 Erro de inclinação | |
| Condição de carga: 3 0kN | 65 |
| Tabela 6.12 Inclinação do eixo | |
| Condição de carga: 30kN | 66 |

LISTA DE FIGURAS

| | Página |
|---|--------|
| Figura 1.1 Acoplamento de Kelvin | 3 |
| Figura 1.2 Acoplamento de três ranhuras | 4 |
| Figura 2.1 Seis pontos de contato do acoplamento cinemático | 9 |
| Figura 3.1 Forças de contato e graus de liberdade em uma ranhura genérica | 15 |
| Figura 3.2...Disposição das ranhuras | 15 |
| Figura 3.3 Ranhura em "V" | 20 |
| Figura 3.4 Ranhura em Arco Gótico..... | 21 |
| Figura 3.5 Ranhura com dois cilindros justapostos..... | 22 |
| Figura 3.6 Forças atuantes na interface esfera-rolete..... | 23 |
| Figura 4.1 Detalhe da colagem das esferas de interface..... | 34 |
| Figura 4.2 Detalhe da colagem das esferas de interface..... | 34 |
| Figura 4.3...Detalhe da colagem dos roletes de interface..... | 36 |
| Figura 4.4 Detalhe da colagem dos roletes de interface..... | 36 |
| Figura 4.5 Posição de montagem dos extensômetros elétricos..... | 38 |
| Figura 4.6 Esquema da ligação da ponte de Wheatstone..... | 38 |
| Figura 5.1 Peça padrão..... | 41 |
| Figura 5.2 Máquina tridimensional de medida..... | 43 |
| Figura 5.3 Apalpador eletrônico..... | 43 |
| Figura 5.4 Máquina para medição de circularidade e cilindricidade..... | 45 |

| | | |
|-------------|---|----|
| Figura 5.5 | Máquina para medição de circularidade e cilindridade..... | 45 |
| Figura 5.6 | Indicador de deformações e caixa seletora..... | 46 |
| Figura 5.7 | Máquina universal de ensaios..... | 47 |
| Figura 5.8 | Fixação da peça padrão..... | 52 |
| Figura 6.1 | Erro de repetibilidade em relação a X. Condição de carga: peso próprio da base superior..... | 67 |
| Figura 6.2 | Erro de repetibilidade em Y. Condição de carga: peso próprio da base superior..... | 68 |
| Figura 6.3 | Erro de repetibilidade em relação a X. Condição de carga: pré-carga de 15 kN..... | 69 |
| Figura 6.4 | Erro de repetibilidade em relação a Y. Condição de carga: 15 kN..... | 70 |
| Figura 6.5 | Erro de repetibilidade em relação a X. Condição de carga: 30 kN..... | 71 |
| Figura 6.6 | Erro de repetibilidade em relação a Y. Condição de carga: 30 kN..... | 72 |
| Figura 6.7 | Erro de inclinação em relação a X. Condição de carga: 15 kN..... | 73 |
| Figura 6.8 | Erro de inclinação em relação a Y. Condição de carga: 15 kN..... | 74 |
| Figura 6.9 | Erro de inclinação em relação a X. Condição de carga: 30 kN..... | 75 |
| Figura 6.10 | Erro de inclinação em relação a Y. Condição de carga: 30 kN..... | 76 |

RESUMO

Os acoplamentos cinemáticos de três ranhuras e de Kelvin são projetos eficientes e econômicos para o posicionamento de precisão dos sistemas mecânicos.

Em particular, o do tipo três ranhuras tem sido usado como mesa porta-peças em máquina-ferramenta. Entretanto, seu uso tem sido limitado devido ao alto custo de produção das ranhuras e o rápido desgaste dos contatos.

Neste trabalho, um acoplamento três ranhuras foi construído simplesmente usando roletes e esferas de rolamento comerciais nos pontos críticos de contato. Deste modo, este tipo de acoplamento pode ser feito econômica e rapidamente e substituído quando gasto.

Embora a rigidez e a capacidade de carga sejam muito menores do que as obtidas pelo uso de esferas e ranhuras de arco-gótico, é suficiente para a maioria das operações de acabamento de alta precisão, como retificação, brunimento, lapidação, etc.

Abstract

The three-groove and Kelvin kinematic couplings are efficient and economical devices for the accurate location of mechanical systems.

In particular, the three-groove type has been used for holding work pieces in machine tool. However, their use has been limited due to the high cost of machining the grooves and the rapid wear of the contacts.

In this work, a three-groove is constructed simply by using ordinary anti-friction bearing rollers and balls for the critical contacts. In this way, this type of coupling can be made cheaply and quickly and replaceable when worn. Even though the rigidity and load capacity are much lower than obtainable by using balls and gothic-arc grooves, it is sufficient for most high precision, finishing operations such as grinding, honing, lapping, etc.

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UMA MESA DE ACOPLAMENTO CINEMÁTICO DE ALTA REPETIBILIDADE DE POSICIONAMENTO E BAIXO CUSTO

1. Introdução

A cadeia cinemática dos mecanismos pode ser dividida em duas partes distintas: os vínculos e os acoplamentos que fazem a conexão destes. O projeto de vínculos tem sido amplamente aplicado pelos projetistas de máquinas e muitos trabalhos vem sendo escritos sobre o assunto ao longo dos anos. Por outro lado, com relação aos acoplamentos, o interesse é mais recente, principalmente em função da evolução da robótica, embora algumas publicações sobre o assunto datem do começo do século.

POLLARD (1933), faz uma abordagem detalhada sobre os projetos cinemáticos na engenharia, onde classifica os acoplamentos cinemáticos de acordo com o número de graus de liberdade que possuem. Assim, os acoplamentos cinemáticos classificam-se em :

- Acoplamentos sem graus de liberdade : Estes acoplamentos agem como posicionadores ou fixadores, tendo por finalidade manter os dois elementos do acoplamento seguramente travados entre si.
- Acoplamentos com um grau de liberdade: São acoplamentos translacionais ou guias, acoplamentos rotativos e os acoplamentos por rosca. Estes acoplamentos permitem a translação ou rotação entre seus elementos .
- Acoplamentos com dois graus de liberdade: São acoplamentos que permitem apenas os seguintes movimentos entre seus componentes: duas rotações ou uma rotação e uma translação. .

- **Acoplamentos com três graus de liberdade:** São dois os tipos mais utilizados onde os graus de liberdade são três rotações ou uma rotação com duas translações.
- **Acoplamentos com quatro graus de liberdade:** os casos possíveis de acoplamento com quatro graus de liberdade são: uma translação e três rotações ou duas translações e duas rotações.
- **Acoplamentos com cinco graus de liberdade:** os casos possíveis para este tipo de acoplamento são : duas rotações e três translações ou três rotações e duas translações.

Vale observar no entanto, que os acoplamentos com mais de dois graus de liberdade normalmente são formados pela combinação de acoplamentos com zero, um ou dois graus de liberdade.

O projeto de uma mesa de alta repetibilidade e baixo custo, justifica tecnicamente o emprego do acoplamento cinemático com zero graus de liberdade, denominado a partir deste ponto, apenas por **acoplamento cinemático**. Esta solução vem sendo adotada por projetistas, pela sua fundamental importância na obtenção de resultados satisfatórios quanto a estabilidade, rigidez e posicionamento . Um bom acoplamento cinemático deve ser projetado baseado nas seguintes premissas: Um corpo tem seis graus de liberdade e cada um deles deve ter uma única restrição. Qualquer restrição redundante acima do número mínimo requerido pelo princípio do acoplamento cinemático pode se tornar uma restrição indesejável, resultando em distorções e mal funcionamento.

Existem basicamente dois tipos clássicos de acoplamentos cinemáticos: o primeiro é conhecido como **acoplamento de Kelvin** e o segundo denominado **acoplamento de Três ranhuras**.

O acoplamento de Kelvin, conforme fig.1.1, é composto de duas bases sobrepostas que serão denominadas **base superior** e **base inferior** . A base superior consiste de uma placa plana onde são posicionados três terminais de extremidade esférica. Na base inferior, verificamos um plano, uma ranhura em "V" e uma cavidade triédrica. Baseado nesta

geometria, o encaixe conveniente entre as bases superior e inferior estabelecem os princípios básicos do acoplamento de Kelvin. Assim, as três superfícies da cavidade triédrica, as duas superfícies da ranhura e plano fazem contato em diferentes níveis. Esta disposição geométrica traz como vantagem a impossibilidade da montagem invertida.

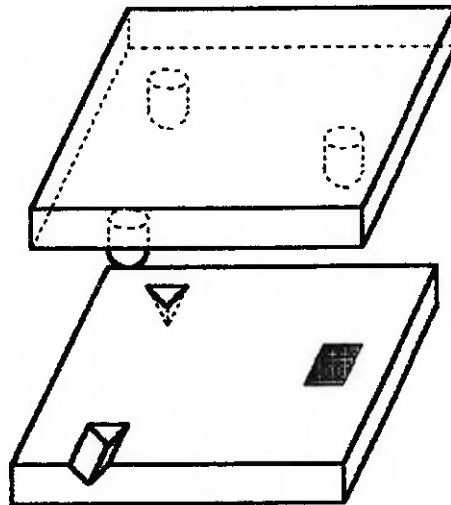


Fig. 1.1. Acoplamento de Kelvin

O acoplamento de três ranhuras, a exemplo do anterior, também é constituído de duas bases: uma base superior onde são posicionados 3 terminais de extremidade esférica, e outra inferior, na qual são usinadas 3 ranhuras, onde os terminais da primeira se encaixam. Estas ranhuras podem ser construídas baseadas nas mais diversas geometrias, desde que não contraponham ao princípio cinemático do acoplamento anteriormente citado. Um exemplo de acoplamento de três ranhuras, com ranhuras em "V" de 90° e disposta de 120° entre si, é mostrado na fig.1.2.

Os acoplamentos cinemáticos têm se mostrado um meio econômico e eficiente para o posicionamento de peças com alta repetibilidade. Por outro lado, devido aos contatos

pontuais com altas tensões de Hertz [TIMOSHENKO;GOODIER (1970); SPOTTS (1964)], o desgaste e a corrosão são elevados, exigindo do projetista a escolha de materiais de alta resistência. Tal comportamento é normalmente encontrado em ligas especiais de aço carbono e em materiais cerâmicos.

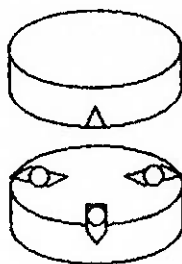


Fig. 1.2 Acoplamento cinemático de Três Ranhuras

Na utilização de ligas de aço carbono se faz necessário tratamento térmico adequado das peças, a fim de garantir a resistência superficial necessária às solicitações impostas pelo acoplamento. Em consequência do tratamento térmico e da geometria das peças, a usinagem destes materiais exige equipamentos e métodos específicos, a fim de atingir a qualidade necessária. Por razões técnicas, o tratamento térmico é dado à toda peça. Tal processo provoca deformações no material e provocadas pelas tensões residuais geradas durante o processo. Assim, outro tratamento visando o alívio das tensões internas se faz necessário, com o intuito de minimizar os riscos de trincas e deformações pós-usinagem. Isto resulta em altos custos, que até o momento têm limitado a aplicação dos acoplamentos cinemáticos.

Por outro lado, as máquinas-ferramenta de precisão não trabalham com esforços elevados, e portanto as mesas de acoplamento cinemático não precisam de resistência de contato

elevadas, como as conseguidas por acoplamentos de três ranhuras com arcos góticos. Na usinagem de precisão, as frequências naturais de trabalho geralmente assumem faixas muito acima das frequências naturais do conjunto peça-máquina (como nas retificadoras), ou muito abaixo destas (como nas lapidadoras). Portanto, a rigidez não precisa ser tão alta.

Surgiu assim, a idéia da utilização de roletes e esferas de rolamento, que são componentes comerciais de custo acessível e que reúnem características técnicas satisfatórias para esta aplicação. É portanto com base nesta proposta que está fundamentado este projeto.

1.1. Objetivos do Trabalho

O presente estudo tem por objetivo o projeto, construção e avaliação de uma mesa que permita a separação da base superior em relação à inferior, e posteriormente, recolocação da mesma, com repetibilidade média da ordem de $\pm 1\mu\text{m}$. São necessárias características de estabilidade e rigidez que permitam seu emprego em máquinas-ferramenta de acabamento (retificadoras, brunidoras, lapidadoras). O projeto será desenvolvido de forma a permitir que a fabricação da mesa seja viável em uma ferramentaria convencional.

A fabricação de dispositivo com tais características seria solução para uma série de problemas relacionados à repetibilidade de posicionamento, encontrados tanto na fabricação quanto em equipamentos de precisão.

Na tentativa de alcançar o objetivo proposto, este trabalho será apresentado da seguinte maneira:

- **Capítulo 2 : Revisão Bibliográfica:** Este capítulo consta da interpretação de várias publicações referentes ao assunto em questão.

- **Capítulo 3: Projeto do Acoplamento Cinemático e do Sistema de Pré-carga:** Aqui serão apresentados os critérios adotados para projeto da mesa de acoplamento cinemático a ser estudada.
- **Capítulo 4: Fabricação do Sistema Mecânico:** Neste capítulo serão apresentadas informações sobre a manufatura e montagem do dispositivo.
- **Capítulo 5: Ensaio de Desempenho do Acoplamento Cinemático:** Aqui são apresentados os ensaios realizados para a avaliação do acoplamento cinemáticos.
- **Capítulo 6: Resultados:** Os resultados obtidos nos testes de desempenho e a avaliação dos mesmos serão discutidos neste capítulo.
- **Capítulo 7 : Conclusões:** As considerações finais, recomendações e conclusões resultantes deste estudo, serão aqui colocadas.

Capítulo 2

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo será apresentado um breve resumo de publicações sobre acoplamentos cinemáticos. Com base neste levantamento de literatura, é que foi desenvolvido o presente trabalho.

Para facilitar esta apresentação, o capítulo será dividido em duas partes: na primeira será feita a abordagem sobre as publicações referentes ao acoplamento de Kelvin, e na segunda serão abordados os trabalhos consultados sobre o acoplamento de três ranhuras.

2.1 Acoplamento de Kelvin

O acoplamento de Kelvin vem sendo aplicado no projeto de instrumentos ou dispositivos, quando estes necessitam se manter em uma posição fixa. O seu posicionamento depende apenas do peso próprio. Neste caso, o fechamento é feito apenas através da força da gravidade, que é igual e oposta à resultante do sistema de forças que age nas restrições.

Porém, em alguns casos, o fechamento pode ser feito por molas. O ponto de aplicação e a resistência dependerá da distribuição de forças sobre os apoios.

POLLARD (1933) adverte aos projetistas quanto ao uso de um rebaixo cônico para o assento da esfera em lugar do assento triédrico. Esta cavidade é mais simples para a fabricação (ela pode ser feita com uma broca comum), e ainda cumprir de forma quase que satisfatória, sua tarefa nas aplicações práticas. Porém a essência do princípio geométrico pode ser violada conforme relatado, por POLLARD(1933), baseado neste caso genérico citado por Kelvin: *"Suponhamos que a cavidade cônica tenha sido usinada e ao invés de ter a forma circular cônica, ela assuma uma forma ligeiramente elíptica. O terminal de extremidade esférica não assentará na cavidade com a restrição necessária ao deslocamento, podendo em função do perfil elíptico, se deslocar ligeiramente na direção paralela ao eixo maior da secção elíptica"*. Com este exemplo o autor tenta nos realatar o fato de que se o acoplamento for construído com alterações no princípio geométrico, qualquer fragmento de madeira ou papel, ou qualquer sujeira por menor que seja, pode causar alterações no comportamento do acoplamento. Por outro, lado com o método geométrico ideal, tais condições não devem se apresentar.

Segundo SCARR(1967), um bom acoplamento cinemático é aquele que requer um ponto de contato restritivo para cada grau de liberdade, conforme fig.2.1. Cada ponto de contato redundante acima do número mínimo necessário, pode ocasionar restrições indesejáveis ao corpo, resultando em distorções e mal funcionamento. Na forma ideal, as restrições cinemáticas deveriam ser pontuais, porém na prática, quando os pontos de contato recebem esforços solicitantes, verifica-se que as superfícies de contato, são necessariamente

maiores do que os seus respectivos pontos, trazendo desta forma novos problemas relacionados à geometria das regiões de contato.

SCARR (1967) cita ainda o acoplamento de Kelvin, mostrado na fig. 1.1, como um exemplo clássico de acoplamento cinemático que permite a dois corpos definidos, o posicionamento preciso de um em relação ao outro. Neste caso, bons resultados são obtidos sem a necessidade de usinagens superespecializadas. O referido sistema também não fica sujeito a outros tipos de erros, como por exemplo, o erro devido à dilatação térmica dos materiais.

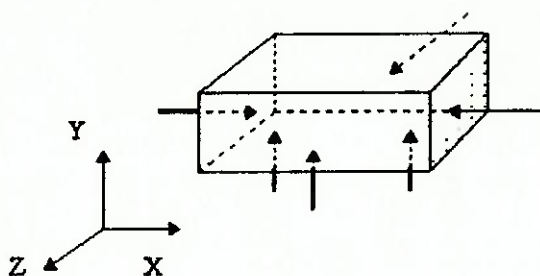


Fig. 2.1. Seis pontos de contato do acoplamento cinemático

SHERRINGTON; SMITH (1993) desenvolveram um trabalho de projeto e avaliação de desempenho de um acoplamento de Kelvin, usado para análise de recolocação de superfícies topográficas. O seu objetivo era desenvolver um dispositivo de baixo custo, adequado para a recolocação de pequenas amostras em um instrumento de medida de

rugosidade, que permitisse a observação de mudanças na topografia de superfícies provocadas por contato, desgaste ou corrosão. Para tanto, construíram um dispositivo, utilizando-se de um acoplamento de Kelvin, onde as bases inferior e superior foram construídos em aço de baixo carbono e utilizadas três esferas para as interfaces do acoplamento. Os autores enfatizam a necessidade de tratamento térmico, para evitar deformações devido ao acúmulo de tensões internas geradas durante o processo de fabricação. Tais deformações segundo os mesmos, poderiam comprometer os resultados.

Para a confecção de um acoplamento de Kelvin ideal, a fabricação da cavidade triédrica se faz necessária. Entretanto, tal cavidade não é de fabricação simples, e conforme já referido anteriormente, a cavidade cônica é uma aproximação considerada adequada, mas não obedece aos princípios cinemáticos do acoplamento. Assim, os autores evitaram a manufatura de uma cavidade triédrica, com o uso de um conjunto de três parafusos com extremidade pontiaguda, dispostos nos vértices de um triângulo, que oferece os três pontos de contato para a esfera, sem no entanto, se contrapor aos princípios do acoplamento.

Como resultado do desempenho deste dispositivo, foi obtida a repetibilidade de posicionamento média de $1.8\mu\text{m}$, para a recolocação sem o reajuste da origem da mesa de translação x-y e a repetibilidade de posicionamento média de $3.5\mu\text{m}$ para a recolocação com o o reajuste da origem da mesa de translação x-y.

2.2 Acoplamento de Três Ranhuras

Em seu trabalho "*Kinematic couplings for precision fixturing-Part I : Formulation and design parameters*", SLOCUM (1988a), faz um estudo detalhado do comportamento de um

acoplamento cinemático do tipo Três-Ranuras. Neste acoplamento as bases inferior e superior são de secção circular de diâmetro de 356 mm (14 polegadas), e para o interfaceamento utilizou esferas de Carboneto de Silício com diâmetro de 28.6 mm, com as ranhuras em arco gótico com o raio de 17.15 mm e dispostas a 120° entre si. O dispositivo foi instalado no eixo porta-peça de um torno CNC e a pré-carga foi feita através de um mandril a vácuo, com força axial de 45 kN e forças cortantes atuantes de 45 N. O acoplamento de três ranhuras foi escolhido por ser simétrico, o que elimina os problemas de balanceamento. Nestas condições, a repetibilidade na montagem e desmontagem do sistema, foi observada através da variação da espessura de parede de uma concha hemisférica construída em aço inoxidável, com diâmetro de 254 mm (10 polegadas). Os resultados observados foram erros de 0.36 μ m na espessura da parede sem variação da pré-carga de fechamento, e 0.89 μ m com a variação de 2% da mesma.

Ensaio realizados em condições semelhantes foram desenvolvidos no mesmo acoplamento, onde foram substituídas as esferas de carboneto de silício por esferas de aço, com conseqüente diminuição da pré-carga para 22kN. Os novos resultados obtidos foram : erro de espessura da parede da concha hemisférica de 0.74 μ m.

SLOCUM; DONMEZ(1988b), desenvolveram experimentalmente testes para determinar a repetibilidade de posicionamento e rigidez de um acoplamento cinemático constituído de dois discos de ferro fundido com diâmetro de 356 mm e espessura de 102 mm, com ranhuras construídas em insertos de arco góticos feitos em aço, com tratamento para aumento da dureza e esferas de 28.6 mm. Foi construído um sistema especial para aplicação

de esforços em vários ciclos em testes com pré-carga de 5800 N. Houve variação na utilização das esferas e lubrificantes na interface. Para medir a repetibilidade de posicionamento do acoplamento utilizou-se apenas a movimentação relativa entre as duas bases. Para isso foram usados LVDTs, fixados em suportes instalados na base inferior e posicionados contra superfícies polidas da base superior.

O acoplamento cinemático testado por SLOCUM; DONMEZ(1988), foi construído com o objetivo de ser utilizado na fixação de peças em torno CNC. Neste sentido os erros de posicionamento do disco superior nas direções radial e axial, bem como as inclinações ao redor dos eixos ortogonais são de interesse. A fim de detectar estes erros foram montados seis transdutores de deslocamento distribuídos da seguinte forma: Três montados no suporte da base inferior na posição vertical dispostos a 120° e independentes um do outro. Estes transdutores tinham como função medir os deslocamentos na direção axial e as inclinações da base superior em relação à inferior. Os outros três transdutores foram instalados radialmente nos mesmos suportes e usados para determinar o erro de posicionamento radial entre as bases.

Na primeira série de testes foram empregadas esferas de aço e a repetibilidade de posicionamento obtida foi da ordem de $0.5\mu\text{m}$. Posteriormente, as esferas de aço foram substituídas por esferas de nitrato de silício, que com o uso de lubrificantes convenientes obteve a repetibilidade da ordem de $0.3\mu\text{m}$.

Em SLOCUM (1992a) e SLOCUM (1992b) é apresentado um modelo matemático completo para o projeto de um acoplamento cinemático de três ranhuras, abordando características como rigidez, estabilidade, tensões atuantes na interface do acoplamento e análise dos erros

devido às deformações do sistema. Neste artigo ainda são discutidas algumas diretrizes para auxílio da manufatura.

Capítulo 3

3. Projeto do Acoplamento Cinemático

Para o dimensionamento do acoplamento cinemático de 3 ranhuras tomaremos como base a metodologia proposta por SLOCUM (1988a), SLOCUM (1992a) e SLOCUM (1992b), que utiliza os seguintes critérios de projeto:

- **Estabilidade do acoplamento:** Para que o dispositivo opere como acoplamento cinemático é necessário que cada um dos graus de liberdade seja restrito por um único ponto de contato esfera-ranhura como mostra a fig 3.1. Assim sendo, o acoplamento deve ser projetado de tal forma, que as ranhuras sejam dispostas ao longo da base em posições e orientações angulares, indicadas na fig 3.2, de tal modo que se desenvolvam forças de contato que equilibrem as forças e momentos externos. Assim, deve-se ter:

$$\sum F_i = F_{ext}$$

$$\sum M_i = M_{ext}$$

Onde F_i são as forças que se desenvolvem no contato esfera ranhura e M_i os momentos dessas forças.

F_{ext} são as forças externas que agem sobre o acoplamento e M_{ext} os momentos dessas forças.

- **Tensão e deformação de contato:** Com base na teoria de Hertz [TIMOSHENKO;GOODIER (1970) e SPOTTS (1964)], determinam-se as expressões relacionando tensões e deformações nos pontos de contato, com força de contato, geometria esfera-ranhura e propriedades dos materiais. Essas expressões podem ser utilizadas para o cálculo das características geométricas do par esfera-ranhura, desde que sejam especificados a priori, os materiais e a força de contato máxima esperada.

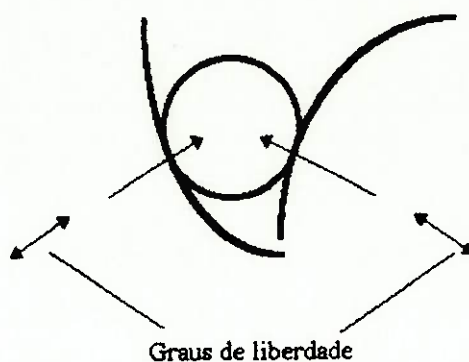


Fig.3.1. Forças de contato e graus de liberdade em uma ranhura genérica

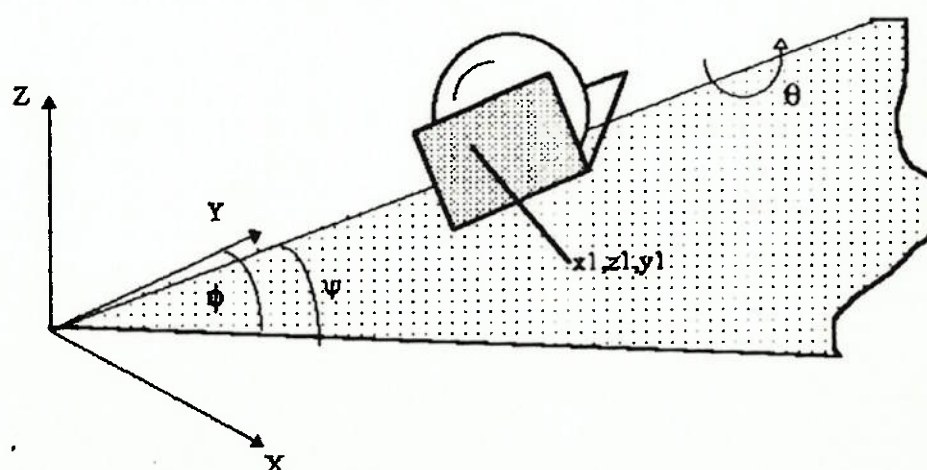


Fig.3.2 Disposição das ranhuras

Considerando-se então as características geométricas essenciais de um acoplamento cinemático de três ranhuras, o problema de projeto pode ser enunciado da seguinte forma:

Determinar:

- (1) As posições e orientações das ranhuras
- (2) Os raios das esferas
- (3) A geometria das superfícies de contato
- (4) As propriedades dos materiais das esferas e das ranhuras onde se apoiam, de tal forma que:
 - (I) O dispositivo de comporte como um sistema isostático quando submetido as forças e momentos externos previstos.
 - (II) Não se desenvolvam nos pontos de contato tensões que excedam a uma fração da tensão de escoamento de ambos os materiais.
 - (III) As deformações não excedam a um valor máximo admissível, e previamente estabelecido.

3.1.O Projeto

Baseado nas considerações anteriores, pode-se enumerar as variáveis de projeto da seguinte forma:

- Forças de pré-carga (P)
 - Força de pré-carga da ranhura 1 (P1)
 - Força de pré-carga da ranhura 2 (P2)
 - Força de pré-carga da ranhura 3 (P3)

- Forças de contato na interface esfera-ranhura (F_{iA} , F_{iB})

Forças de contato na ranhura i :

F_{iA} , F_{iB}

$i = 1 \dots 3$

Características geométricas da base superior e da base inferior: A princípio existe liberdade na definição das formas; porém, é razoável considerar formas geométricas simples: circular, retangular, triangular, etc.

- Propriedades mecânicas do material das bases superior e inferior
- Características geométricas da ranhura
 - planos
 - arcos góticos
 - cilindros
- Disposição geométrica das ranhuras
- Propriedades mecânicas do material das ranhuras
- Diâmetro das esferas
- Propriedades mecânicas do material das esferas

3.1.1. Fixando algumas das variáveis

Com base nas variáveis envolvidas, pode-se concluir que não é razoável fazer uma síntese completa do projeto, pois há mais variáveis que critérios de projeto e equações. Desta forma, vamos a priori, fixar algumas das variáveis do projeto, a saber:

- **Características geométricas da base superior e da base inferior**

. Foi escolhida a secção circular para ambas e realizado um pré-dimensionamento da estrutura, para garantir que ela tivesse a rigidez adequada. Em seguida, a espessura foi adotada de maneira a permitir a fixação de peças na base superior, e o alojamento para grampos fixadores na base inferior.

- **Material das bases superior e inferior**

Foi adotado o aço ABNT 1020, por ser um aço comercial, de baixo custo e que atenderá às solicitações impostas pelo projeto.

3.1.2. Disposição geométrica das ranhuras

Adotou-se pares esfera-ranhura idênticos, coplanares, dispostos angularmente a 120° e submetidos às mesmas forças de pré-carga. Nestas condições, as equações de forças e momentos são naturalmente satisfeitas.

3.1.3. Geometria das ranhuras

Na bibliografia consultada, sobre os acoplamentos cinemáticos de três ranhuras são apresentadas basicamente duas configurações geométricas para as ranhuras: em “V”[POLLARD (1933)] e a ranhura em arcos góticos[SLOCUM (1988a)]. Admitindo-se que a ranhura possa assumir qualquer configuração, desde respeite o princípio do acoplamento cinemático, isto é, deve existir apenas um ponto de contato restritivo para cada um dos seis graus de liberdade do sistema.

Será apresentada a seguir, uma breve explanação sobre os tipos de ranhuras mencionados na revisão bibliográfica, assim como a configuração alternativa da ranhura com dois cilindros justapostos, que será a empregada no acoplamento em estudo.

3.1.3.1. A ranhuras em “V”

A ranhura em “V” é uma configuração clássica composta de dois planos concorrentes entre si, conforme fig. 3.3 . Na região da interface o contato mecânico é do tipo esfera-plano. Neste contato, as deformações elástica, projetam impressão de contato circular, com tensões de Hertz máxima no centro do círculo projetado.

A adoção desta configuração, implica no emprego de aços ligados na construção da base que as contiver, dos respectivos tratamentos térmicos e a necessidade de usinagem de precisão para o acabamento das superfícies de contato.

O emprego de insertos com as ranhuras, encaixados sob a condição de ajuste interferente é uma solução adotada para evitar o tratamento na base como um todo. Com o emprego de insertos, a base pode ser construída em aço comercial (baixo carbono).

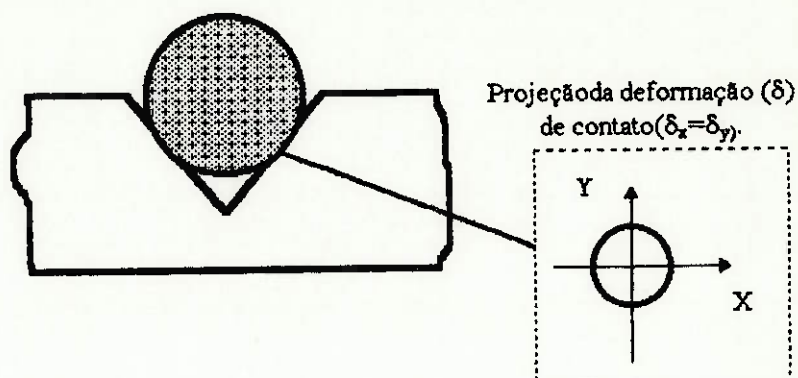


Fig. 3.3. Ranhura em "V"

3.1.3.2. A ranhura em Arco Gótico

O arco gótico foi a configuração adotada por SLOCUM (1988a), na construção do acoplamento cinemático descrito em seu trabalho. A vantagem em se utilizar arco gótico é justificada pelo contato do setor cilíndrico côncavo com a esfera. Este contato produz uma deformação elástica e impressão elíptica. Nessa condição, as tensões de Hertz são bastante reduzidas quando comparada aos outros contatos. Dessa forma verifica-se um menor desgaste dos componentes. A fig. 3.4. ilustra uma ranhura em arco gótico.

Esta escolha exige usinagem especial para a execução do perfil. SLOCUM (1988a) e SLOCUM (1988b) se utilizou de insertos encaixados na base através de ajuste interferente.

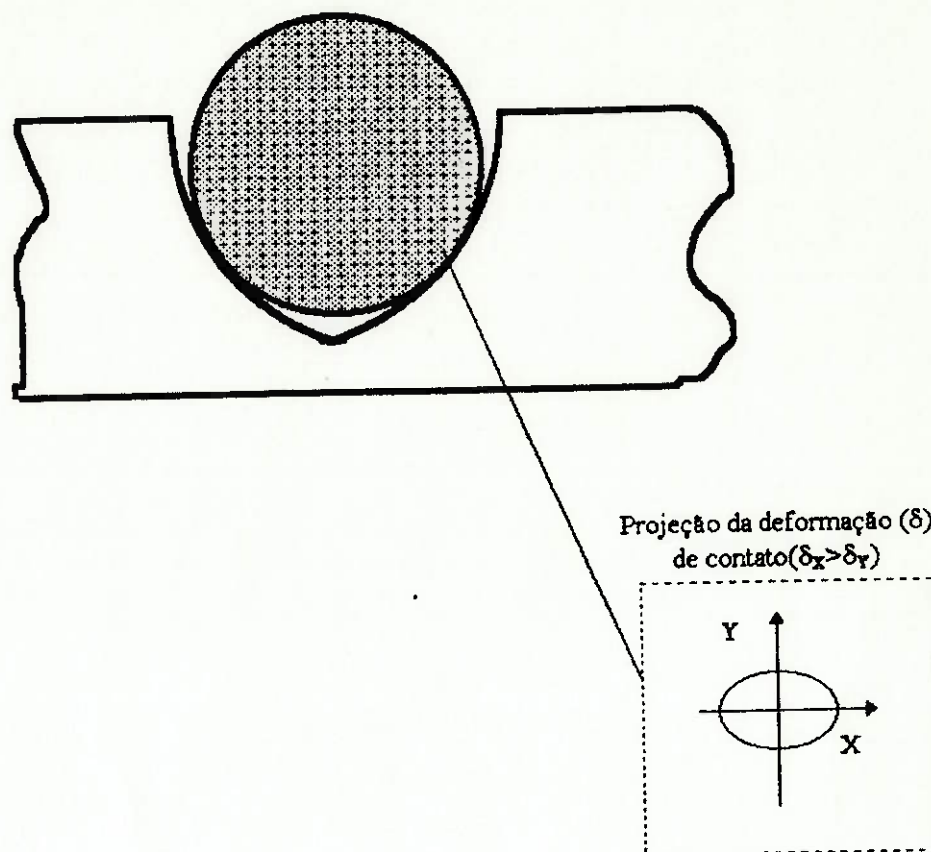


Fig. 3.4. Ranhura em Arco Gótico

3.1.3.3. A ranhura com Cilindros Justapostos

A ranhura com cilindros justapostos é uma opção construtiva bastante simples para as ranhuras de interface do acoplamento cinemático (fig.3.5.) Ela se baseia no ajuste interferente de dois cilindros calibrados, quando encaixados em ranhura de perfil retangular

e posicionados em uma das bases do acoplamento cinemático. O assentamento de dois cilindros justapostos produz uma ranhura formada por dois setores cilíndricos convexos. Este tipo de ranhura quando em contato com a esfera de interface, provoca o surgimento de tensões de Hertz bastante elevadas, quando comparada com a ranhura em "V" e em arco gótico. Por outro lado, a rigidez do par esfera-rolete não é tão alta como nas ranhuras com arco gótico.

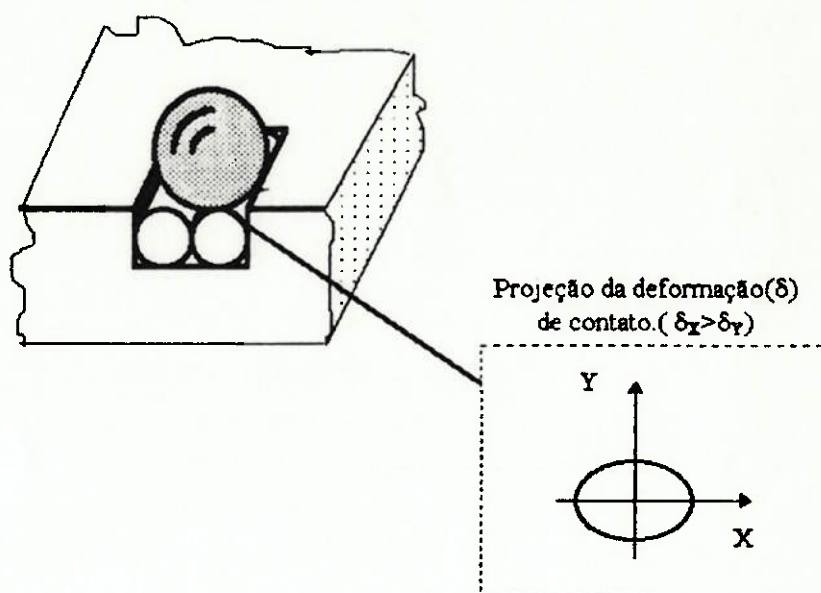


Fig.3.5.Ranhura com dois cilindros justapostos

Por outro lado, este tipo de ranhura permite a construção de um acoplamento cinemático com os processos convencionais de usinagem, pois só haverá necessidade de precisão e emprego de aços especiais, nos cilindros e esferas de interface. Porém, a adoção de roletes de rolamentos, por se tratar de cilindros calibrados e fabricados em aço carbono 52100, resistente ao carregamento e ao desgaste por contato mecânico, se constitui em solução

econômica por se tratar de produto comercial. Acredita-se também que a rigidez e capacidade de carga são compatíveis com os processos de usinagem de precisão ou de acabamento usuais.

Como estes dispositivos trabalham com elevadas tensões de contato, normalmente têm desgaste acelerado. Assim sendo, a escolha dos cilindros justapostos também traz como vantagem o fato de uma vez desgastados, estes cilindros não precisam ser necessariamente substituídos, como acontece com os inserts. Basta proporcionar uma rotação ao redor do eixo e eles poderão ser novamente utilizados enquanto houver superfícies livres de deformações.

3.1.4. Tensões e Deformações

Graças a opção pela simetria, o problema de projeto fica reduzido ao dimensionamento dos elementos de interface do acoplamento. As forças atuantes no contato esfera-roléte, serão estudadas a seguir, conforme esquematizado na fig. 3.6.

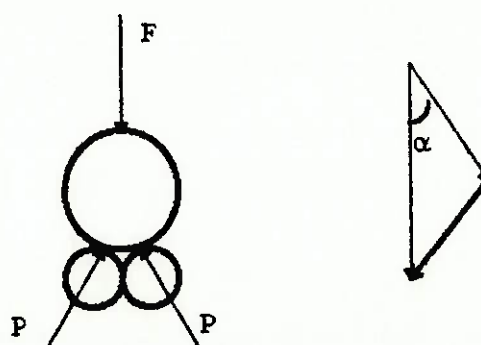


Fig. 3.6 Forças atuantes na interface esfera-roléte

Para calcular o contato entre duas superfícies curvas, podemos empregar a teoria de Hertz, de acordo com TIMOSHENKO;GOODIER(1970),p414; foi calculada a força máxima de contato entre uma esfera e um cilindro, cuja formulação será apresentada a seguir:

Define-se nas equações abaixo as constantes A e B que dependem da intensidade da curvatura principal das superfícies em contato e do ângulo entre os planos das curvaturas de duas superfícies. Se R_1 e R_1' indicam os raios de curvatura principais da superfície 1, e analogamente, R_2 e R_2' para a superfície 2. Define-se Ψ como o ângulo normal entre as curvaturas $1/R_1$ e $1/R_2$ então as constantes A e B podem ser determinadas pelas seguintes equações:

$$A + B = 1/2 (1/R_1 + 1/R_1' + 1/R_2 + 1/R_2') \quad (1)$$

$$B - A = 1/2 [(1/R_1 - 1/R_1')^2 + (1/R_2 - 1/R_2')^2 + 2 (1/R_1 - 1/R_1') (1/R_2 - 1/R_2') \cos 2\Psi]^{1/2} \quad (2)$$

Também, TIMOSHENKO; GOODIER (1970) define q_0 como a pressão máxima de contacto, a e b os semi-eixos do contorno elíptico de contato e P sendo a força de contacto. Desta forma q_0 é obtido da seguinte equação:

$$q_0 = 3/2 (P/\pi . a . b) \quad (3)$$

Os valores de a e b podem ser obtidos das seguintes expressões:

$$a = m \sqrt[3]{ \frac{3\pi P(k_1 + k_2)}{4(A+B)} } \quad (4)$$

$$b = n \sqrt{\frac{3\pi P(k_1 + k_2)}{4(A+B)}} \quad (5)$$

Os valores de m e n são números que dependem da razão:

$$(B - A) : (A + B)$$

Usando a notação:

$$\cos \theta = (B - A) / (A + B) \quad (6)$$

os valores de m e n para os vários valores de θ podem ser obtidos na tabela 3.1 (TIMOSHENKO; GOODIER, 1970, p.416):

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| $\theta =$ | 30° | 35° | 40° | 45° | 50° | 55° | 60° | 65° | 70° | 75° | 80° | 85° | 90° |
| $m =$ | 2.731 | 2.397 | 2.136 | 1.926 | 1.754 | 1.611 | 1.486 | 1.378 | 1.284 | 1.202 | 1.128 | 1.061 | 1.000 |
| $n =$ | 0.493 | 0.530 | 0.567 | 0.604 | 0.641 | 0.678 | 0.717 | 0.759 | 0.802 | 0.846 | 0.893 | 0.944 | 1.000 |

Tabela 3.1. Valores de $\cos \theta$

Os valores de k_1 e k_2 podem ser calculados pelas fórmulas:

$$k_1 = 1 - \nu_1^2 / \pi E_1 \quad (7)$$

$$k_2 = 1 - \nu_2^2 / \pi E_2 \quad (8)$$

Onde

E é o Módulo de resistência de material

ν é o coeficiente de Poisson

Considerando-se como corpo 1 o cilindro e 2 a esfera, podemos facilmente avaliar que:

R_1 = Raio do rolete

$R_1' = \infty$ (por se tratar do comprimento do cilindro)

$R_2 = R_2' =$ Raio da esfera

$\psi = \pi/2$

Substituindo estes dados nas equações (1) e (2) obtemos as seguintes expressões:

$$A + B = 1/2 (1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_2')$$

$$B - A = 1/2R_1$$

3.2. Cálculo da Força Máxima de Contato Admissível sobre os Elementos de Interface

A fig. 3.6. mostra que F é a soma vetorial das duas forças de contato P .

Dada uma força vetorial F , a força P de contato será ampliada pela expressão:

$$P = F / 2 \cos \alpha$$

Por outro, se o raio do cilindro for muito pequeno, as tensões de Hertz aumentam significativamente. Foi adotada a razão abaixo como sendo um meio termo entre essas duas exigências.

$$R_1/R_2 = 0.5$$

Assim, foram escolhidas esferas com diâmetro de 26mm para a interface e os respectivos roletes com diâmetro de 13mm. Ambos utilizados em rolamentos e fabricados em aço ABNT52100. As outras variáveis envolvidas encontram-se a seguir:

$$q_0 = 2.8 \text{ GPa [valor obtido de SLOCUM(1988a)]}$$

$$E = 207 \text{ Gpa}$$

$$\nu = 0.3$$

Assim, de posse dos valores acima mencionados, foram executados os cálculos de P como segue abaixo:

- Cálculo de $A+B$ e $B-A$

Para $R_1 = 0.0065 \text{ m}$ e $R_2 = 0.013 \text{ m}$, das equações (1) e (2) obtém-se

$$A + B = 153.8 \text{ [1/m]}$$

$$B - A = 76.92 \text{ [1/m]}$$

Cálculo de k_1 e k_2

Das equações de (7) e (8) obtem-se:

$$k_1 = k_2 = 1.399 \times 10^{-12} \text{ [m}^2\text{/N]}$$

• Cálculo de a e b

Das equações (4) e (5) e dos valores de m e n da tabela 3.1., obtem-se:

$$a = 0.000052 \sqrt[3]{P} \text{ [m]}$$

$$b = 0.000025 \sqrt[3]{P} \text{ [m]}$$

• Cálculo de P

Através da equação (3) foi obtido seguinte valor de P :

$$P = 443 \text{ [N]}$$

3.3. Cálculo da Força de Pré-carga na Interface (F)

$$F = P \cdot 2 \cos\alpha$$

Logo,

$$F = 831.6 \text{ [N]}$$

3.4. Projeto Mecânico da Mesa de Acoplamento Cinemático

Com a obtenção dos valores acima, foi possível o dimensionamento do demais componentes do conjunto. Por se tratar de metodologia bastante conhecida, julgou-se desnecessária a abordagem teórica da mesma. Desta forma, o desenho de conjunto e o respectivo detalhamento são apresentados no Anexo A.

Capítulo 4

4. Fabricação do Sistema Mecânico

Conforme o desenho de conjunto da mesa de acoplamento cinemático, pode-se observar que esta é constituída dos seguintes componentes:

- uma base superior
- uma base inferior
- 3 esferas de interface $\phi 26$ mm
- 6 roletes de interface $\phi 13 \times 14$ mm
- 3 prisioneiros de pré-carga
- 3 grampos de pré-carga,
- 3 calços para pré-carga
- 3 roletes de pré-carga $\phi 14 \times 15$ mm
- 3 esferas de pré-carga $\phi 14$ mm.
- 3 porcas ABNT M16x 2
- 3 arruelas para parafuso M16
- 3 parafusos ABNT com cabeça cilíndrica e sextavado interno M5x0.8x25 mm

4.1. Usinagem das peças

A seguir será apresentado um breve resumo sobre o processo de manufatura dos componentes do conjunto, cuja fabricação foi desenvolvida no Laboratório de Protótipos do IPT. O resumo ora apresentado, contém apenas informações quanto aos equipamentos empregados na execução do projeto, sem no entanto constituir-se em um roteiro de fabricação, razão pela qual não foram apresentados parâmetros tecnológicos do processo.

A base inferior, foi construída em aço ABNT 1020, sendo inicialmente usinado um disco de $\phi 380 \times 30$ mm em torno mecânico; em seguida, feita a traçagem das abas de fixação dos prisioneiros e calços, e o excesso de material, nos intervalos das abas, retirado na operação de corte com serra de fita. A usinagem complementar da peça foi feita com auxílio de uma fresadora CNC. A opção de usinagem em máquina CNC deveu-se à disponibilidade desta máquina, embora seja operação que poderia ser executada em uma fresadora convencional, sem dificuldades.

A base superior foi construída em aço ABNT 1020. A exemplo da base inferior, esta peça também foi usinada em duas etapas. Na primeira fase, foi usinado um disco de $\phi 260 \times 30$ mm em torno mecânico e na segunda fase, a usinagem complementar da peça foi feita com auxílio de uma fresadora CNC.

Os grampos e os calços foram construídos em aço ABNT 4340. Estas peças foram usinadas em duas etapas. A etapa inicial foi feita em uma fresadora universal e a etapa complementar, em uma retificadora plana universal em função do grau de acabamento superficial ou das tolerâncias dimensionais especificadas.

Os prisioneiros foram confeccionados em aço ABNT 1045 e sua usinagem feita em torno mecânico.

As esferas, roletes, porcas e parafusos por se tratarem de componentes padronizados, foram adquiridos junto ao mercado, mediante seleção dos mesmos através de catálogos dos fabricantes.

4.2. Montagem do Conjunto

A montagem do conjunto pode ser dividida em três etapas: a montagem da base superior, da base inferior e dos grampos de pré-carga. Estas etapas serão detalhadas a seguir .

4.2.1. Montagem da Base Superior

Na base superior são montadas as três esferas de interface e as três de pré-carga, conforme desenho do conjunto. A montagem foi efetuada como segue :

Foram utilizadas esferas iguais às empregadas no conjunto para fazer uma pequena deformação esférica nas cavidades cônicas. Esta deformação tem por finalidade corrigir eventuais imperfeições geradas na usinagem, garantindo a uniformidade na área de contato.

Foi aplicada a carga de 30kN sobre as esferas, separadamente à cada cavidade com o

auxílio de uma prensa hidráulica. Esta amplitude de força corresponde a 2 vezes a força máxima de trabalho projetada para o conjunto e foi suficiente para provocar o embutimento de aproximadamente 0.2 mm na esfera de 26 mm e de aproximadamente 0.6 mm na esfera de 14 mm..

Para garantir a posição das esferas de interface durante a utilização da mesa, elas foram aderidas à base superior com o auxílio de resina epoxi. A base superior foi então apoiada sobre uma bancada de desempenho com a face inferior voltada para cima. Em seguida as cavidades de $\phi 26$ mm x 90° passaram por uma limpeza criteriosa. Inicialmente, a limpeza foi feita com algodão embebido em benzina e posteriormente, com tecido umedecido em acetona. Nas cavidades foram depositadas as esferas e sobre cada uma delas foram apoiadas placas de alumínio de aproximadamente 30 x 30 x 3 mm, usadas para proteção das superfícies. Na seqüência foram apoiadas uma placa de aço SAE 1020 com dimensões aproximadas $\phi 300$ x 50 mm e uma série de massas que completaram a carga de 1,2 kN . Esta montagem pode ser observada nas fig.4.1. e fig.4.2.

Nestas condições, as partes expostas das cavidades foram preenchidas com resina epoxi e permaneceram por 24 horas aguardando a cura da resina.

Fig. 4.2. Detalhe da colagem das esteras de interface



Fig. 4.1. Detalhe da colagem das esteras de interface



4.2.2. Montagem da Base Inferior

A montagem da base inferior foi feita basicamente através do encaixe e colagem dos roletes. Os roletes de interface foram encaixados nas ranhuras retangulares existentes na base inferior através de ajuste interferente de aproximadamente 0.02 mm. Os roletes foram alinhados em posição conveniente e instalados nas respectivas ranhuras, com o auxílio de uma prensa hidráulica. Após totalmente encaixados, os roletes foram submetidos a uma carga semelhante à aplicada nas esferas de interface, isto é, cada par de rolete recebeu o carregamento de 30 kN, para uma melhor acomodação dos mesmos.

Na fase seguinte foi realizada a colagem, preenchendo as faces expostas da ranhura com resina epoxi, em processo semelhante ao citado na colagem das esferas da base superior, como mostram as fig.4.3. e fig.4.4. Embora os roletes estivessem encaixados sob ajuste interferente, a colagem foi feita por medida segurança.



Fig. 4.3. Detalhe da colagem dos roletes de interface

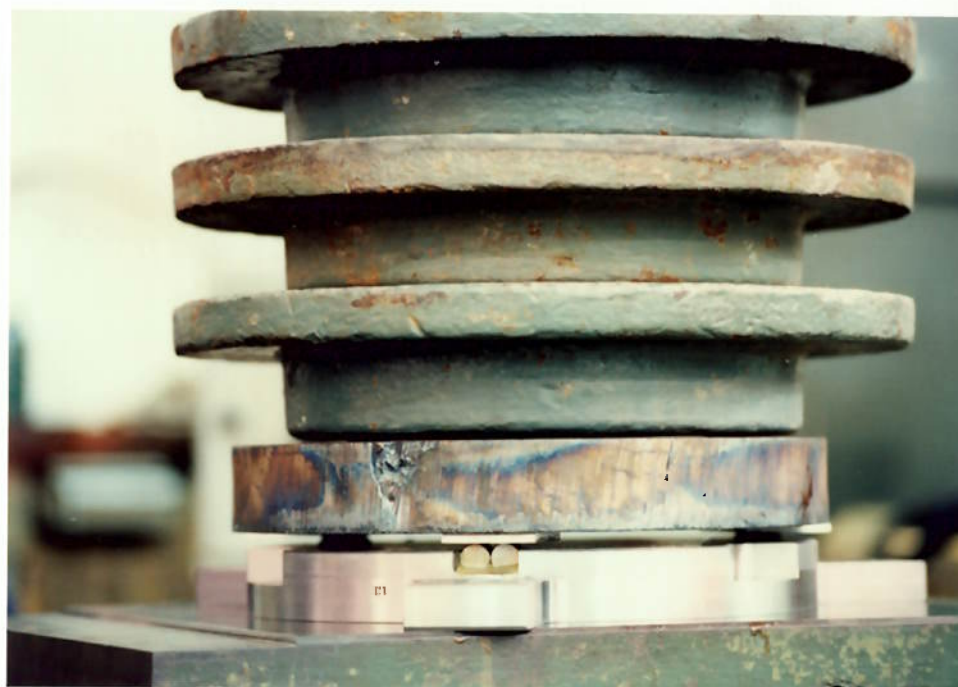


Fig. 4.4. Detalhe da colagem dos roletes de interface

4.2.3. Montagem das Células de Carga

As condições de pré-carga foram controladas independentemente em cada uma das interfaces através de 3 células de carga, utilizando extensômetros elétricos (*strain gages*) colados aos prisioneiros de pré-carga.

4.2.3.1. Os sensores

Foram utilizados três conjuntos de sensores, compostos por 4 sensores, sendo dois longitudinais e dois transversais, interligados entre si na configuração de “**ponte de Wheatstone completa**” conforme mostra o esquema da fig.4.6.. Foram utilizados extensômetros da marca Kyowa, com resistência de 120Ω , fator de *gage* de 2.14 e compensação de temperatura para aço (11 ppm/°C).

4.2.3.2. Montagem dos Extensômetros Elétricos nos Prisioneiros de pré-carga

Na região intermediária da superfície lisa do prisioneiro de pré-carga foram colados quatro extensômetros elétricos. A fig. 4.5. mostra de forma esquemática esta instalação.

A operação de montagem dos elementos consistiu da preparação da superfície, deixando-a com rugosidade superficial entre 0.4 e 0.8 μm no parâmetro de rugosidade Ra (rugosidade média), da limpeza da superfície, da colagem dos sensores com os respectivos terminais e da soldagem dos fios, conforme ilustrado na fig.4.6.

Por fim, os prisioneiros foram instalados no local adequado, conforme desenho de conjunto.

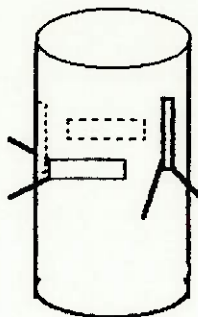


Fig.4.5. Posição de montagem dos extensômetros elétricos

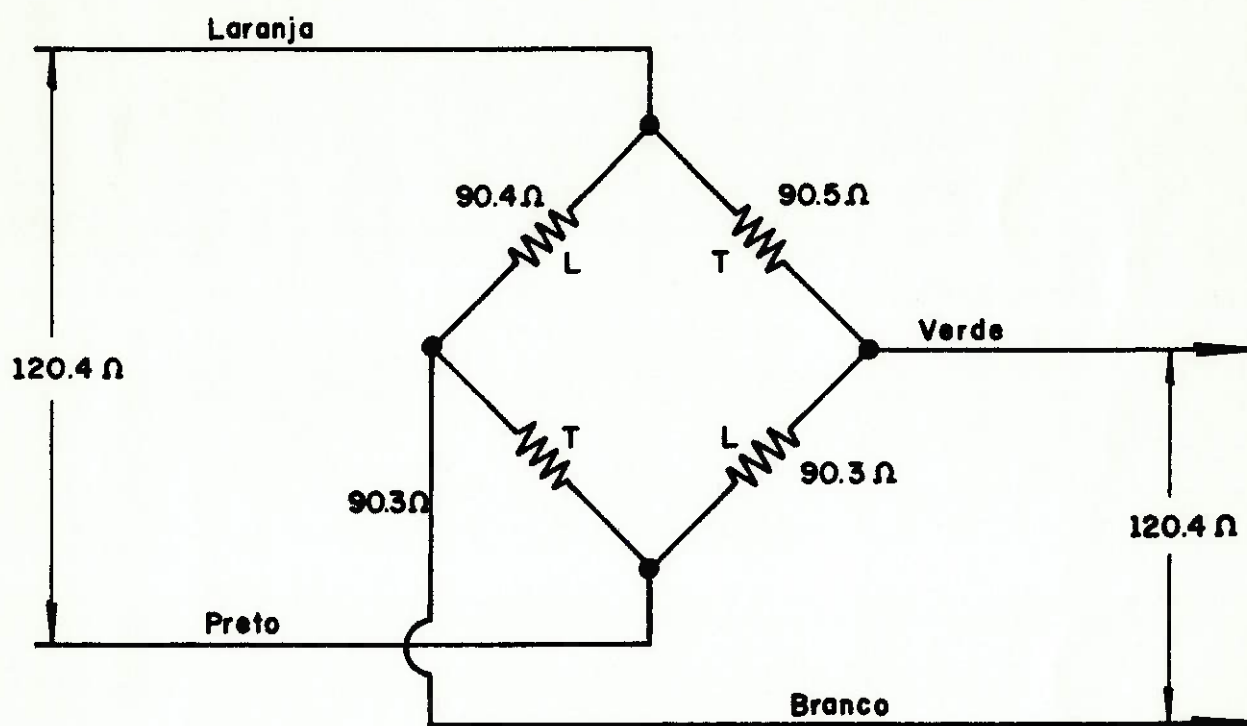


Fig.4.6. Esquema da ligação da ponte de Wheatstone

4.2.4. Colagem dos roletes de pré-carga nos grampos de pré-carga.

Em operação semelhante às anteriormente descritas, os roletes de pré-carga foram aderidos aos respectivos grampos.

Após a preparação das superfícies, os grampos foram posicionados sobre a mesa de desempenho à aproximadamente 120° entre si. Os roletes foram posicionados de forma conveniente, e sobre estes, as placas de alumínio para proteção das superfícies. Foi efetuada a aplicação da carga de 1.2 kN e as partes expostas da ranhura foram preenchidas com resina epoxi. Os grampos permaneceram nestas condições por 24 horas, aguardando a cura da resina.

4.3.3. Montagem da mesa

Ao fim das operações anteriormente descritas, a mesa de acoplamento cinemático pôde ser montada, conforme desenho de conjunto, pela sobreposição da base superior em relação à inferior e a respectiva instalação dos grampos de pré-carga.

Capítulo 5

5 Ensaio de Desempenho do Acoplamento Cinemático

Os ensaios efetuados tiveram como finalidade principal, a investigação do grau de repetibilidade de posicionamento atingido pelo dispositivo em estudo, quando da remoção da base superior em relação à inferior, e posterior reposicionamento entre as mesmas. Esta operação será chamada de **ciclo de acoplamento**.

5.1. Seleção da peça padrão para os testes de desempenho

A peça padrão foi construída com o intuito de cumprir uma função auxiliar nos ensaios de posicionamento..

Como pode ser observado na fig.5.1. trata-se de uma peça de geometria simples, sendo constituída basicamente de dois cilindros sobrepostos e concêntricos, cujas tolerâncias de forma e posição foram aferidas. a fim de garantir que tais características não interferissem significativamente nos resultados obtidos.

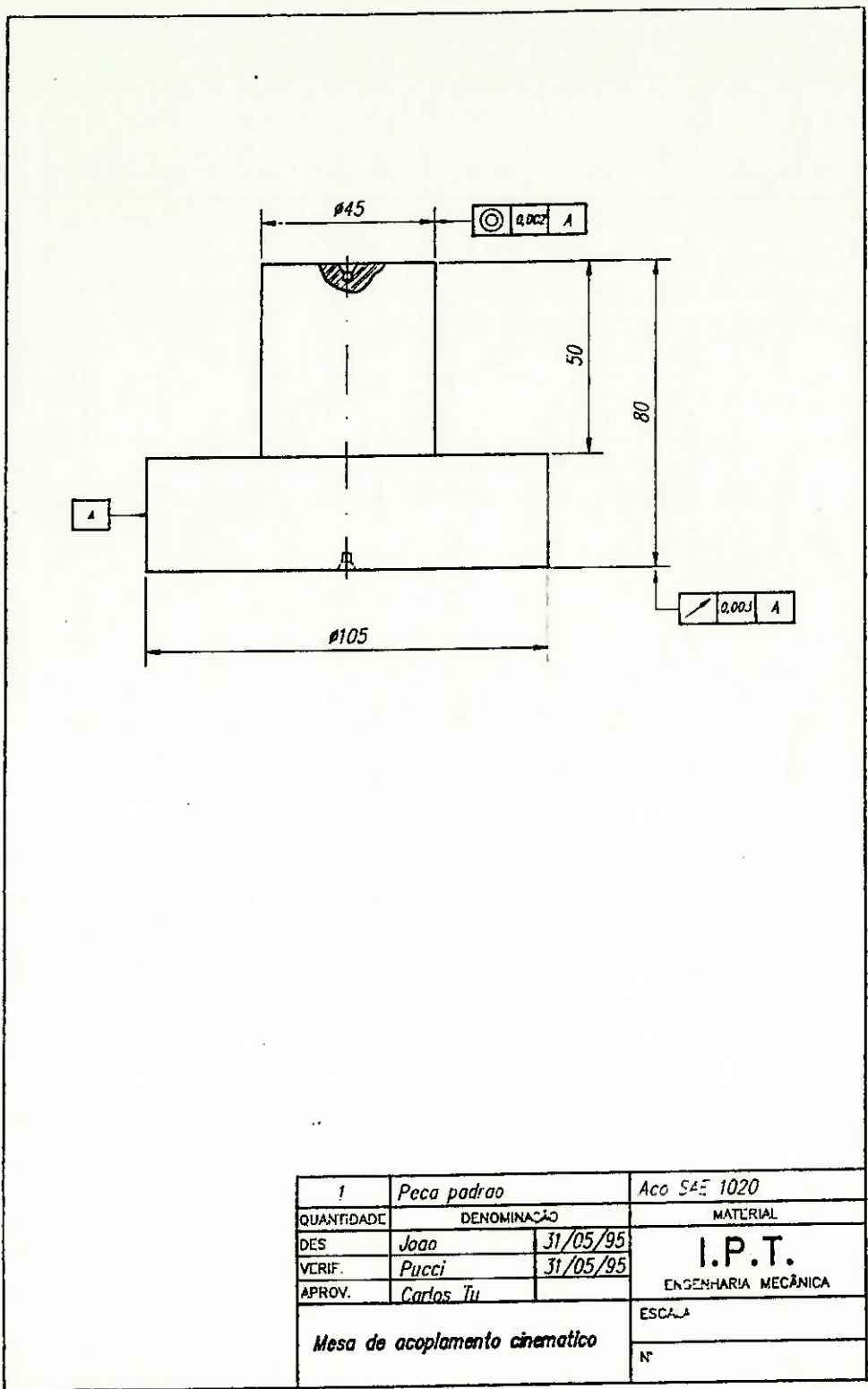


Fig. 5.1 Peça Padrão

Assim, para possibilitar a compensação dos erros sistemáticos atribuídos às distorções na geometria da peça padrão, foi efetuada a aferição. Os resultados obtidos serão apresentados no Apêndice 1.

5.2. Seleção dos Instrumentos Empregados

Para os ensaios realizados na mesa de acoplamento cinemático, foram selecionados alguns instrumentos de medida. O critério de escolha destes equipamentos foi baseado na amplitude dos erros estimados. Assim, serão apresentados a seguir informações sobre os equipamentos empregados.

5.2.1. Máquina Tridimensional de Medida

Os ensaios de posicionamento foram desenvolvidos em uma Máquina Tridimensional de Medida, marca Mitutoyo, modelo B231, com faixa nominal 800x600x500 mm, dotada de indicador com resolução de 1 μm para os eixos X, Y e Z. O equipamento está ligado a um microcomputador compatível com IBM-PC, dotado do *software* GEO-PAK. Conforme mostra a fig.5.2.



Fig. 5.2. Máquina Tridimensional de Medida



Fig. 5.3. Apalpador Eletrônico

5.2.2. Apalpador Eletrônico

As apalpações para medição da peça padrão foram efetuadas com o auxílio de um apalpador eletrônico marca Renishaw, modelo TPII, conectado ao indicador da máquina tridimensional, permitindo a aquisição de dados. Este equipamento pode ser observado na fig. 5.3.

5.2.3. Máquina para medição de Circularidade e Cilindricidade

Este equipamento foi utilizado para fazer o levantamento dos erros geométricos da peça padrão, bem como a medição do erro de forma das esferas e roletes de interface (Apêndice2).

Trata-se do modelo Talycenta, fabricado pela Rank Taylor Hobson, cuja menor divisão de leitura é da ordem de $0.1\mu\text{m}$. As fig 5.4. e fig.5.5. mostram este equipamento durante a aferição da peça padrão.

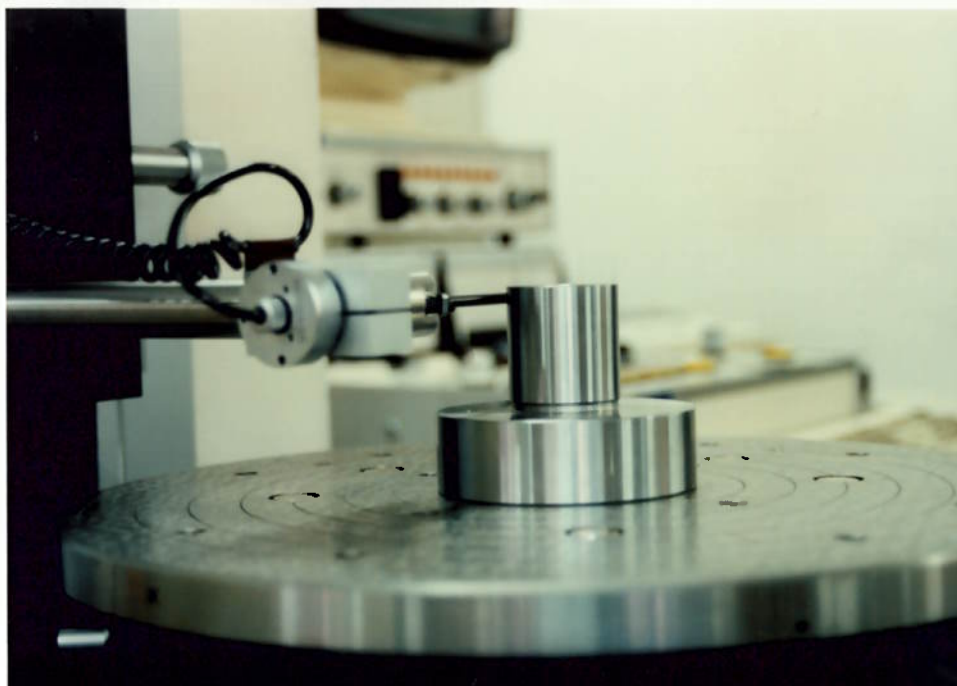


Fig.5.4.Máquina para a medição de circularidade e cilindridade



Fig.5.5.Máquina para a medição de circularidade e cilindridade

5.2.4. Medidores de Força

As forças de pré-carga foram medidas pelas deformações axiais e circunferenciais dos prisioneiros de pré-carga.

As leituras de deformação foram efetuadas com o auxílio de uma caixa seletora de 24 canais, marca Kyowa, modelo SS-24R e um indicador analógico de deformações, marca Kyowa, modelo SM-60C, conforme mostra a fig.5.6.



Fig.5.6. Indicador de deformações e caixa seletora

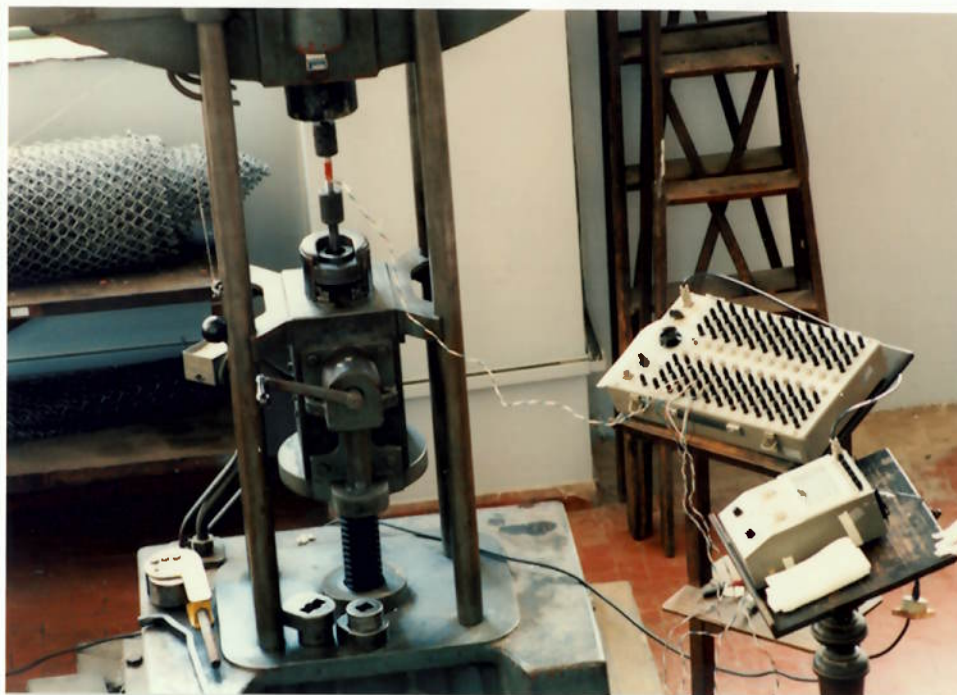


Fig.5.7. Máquina Universal de Ensaios

O indicador de deformações foi previamente calibrado, com o auxílio de um *Strain Indicator Calibrator*, marca Vishay, modelo 1550A.

5.2.5 Máquina Universal de Ensaio.

Após o processo de colagem dos sensores, os prisioneiros foram submetidos a esforços de tração, onde foram calibrados os pontos correspondentes às pré-cargas. A fig.5.7. mostra

este procedimento, sendo executado em uma Máquina Universal de Ensaios, marca Amsler com a escala de 50kN.

Os resultados da calibração dos sensores encontram-se no Apêndice 3

5.3 Metodologia para a medição do erro de repetibilidade

5.3.1. O Erro de Repetibilidade

O erro de repetibilidade é um índice, expresso por um número que representa a capacidade de um determinado processo se reproduzir ao longo de um intervalo de tempo, quando feito segundo a mesma metodologia [WAENY .(1980),].

Neste trabalho, o erro de repetibilidade será a diferença entre o valor medido e a média aritmética dos valores individuais. Tal valor pode ser expresso por:

$$r_i = x_m - x_i$$

onde:

r_i = repetibilidade no *i*ésimo ciclo de acoplamento

x_m = média aritmética de todos os valores de x_i

x_i = medidas da posição no *i*ésimo ciclo de acoplamento

5.3.2. Número de medições (n)

Para que se pudesse atribuir aos resultados um grau de confiança de 99%, foi calculado, utilizando-se da expressão abaixo, o número mínimo necessário de repetição das medições, considerando-se que o desvio padrão da repetibilidade de posicionamento não é conhecido [Costa Neto(1980), WAENY(1979) e DUDEWICZ(1988),]:

$$n = \left(\frac{t_{n-1, \alpha/2} \cdot S}{e} \right)^2$$

onde :

n = número mínimo de medições

$t_{n-1, \alpha/2}$ = Valor da distribuição *t* de Student

S = Desvio padrão estimado para um conjunto preliminar de medições

e = intervalo de erro estimado preliminarmente

Para verificar o número de repetições mínimo necessário, com grau de confiança de 99% foram tomados inicialmente 5 valores de medição para uma estimativa do desvio padrão (S), do processo, obtendo-se o seguinte resultado:

| x (mm) | y(mm) |
|--------|--------|
| 38.501 | 39.668 |
| 38.500 | 39.668 |
| 38.501 | 39.667 |
| 38502 | 39.666 |
| 38.501 | 69.668 |

A partir dos valores acima foram calculadas as respectivas médias:

$$X_m = 38.501$$

$$Y_m = 39.667$$

A partir dos valores das médias acima calculados, obtém-se os seguintes valores de repetibilidade:

| r_x (mm) | r_y (mm) |
|------------|------------|
| 0.000 | 0.001 |
| -0.001 | 0.001 |
| 0.000 | 0.000 |
| 0.001 | -0.001 |
| 0.000 | 0.001 |

A partir dos valores de repetibilidade acima, pode-se calcular os respectivos desvios padrão:

$$S_x = 0.0007$$

$$S_y = 0.0009$$

Da tabela de distribuição t de Student toma-se o valor de t para $(n-1)=4$ e $\alpha/2= 0.0005$, assim

$$t_{(n-1); \alpha/2} = 4.604$$

Adotamos o erro do processo (e) em 0.002 mm. Assim foi possível calcular o número mínimo de repetições necessárias.

$$n = (4.604 \times 0.0009)^2 / 0.002$$

Logo, $n= 4,2$, e portanto considera-se $n=5$

5.3.2.1.Repetição das medições

Para os ensaios de repetibilidade do acoplamento, foi considerada como um ciclo de medida, a medição da posição do eixo da peça padrão com relação à face da base superior efetuada após um ciclo de acoplamento.

5.3.3. As Medições de Posicionamento

À cada ciclo de acoplamento foi medida a posição do eixo da peça padrão em relação ao sistema de coordenadas de uma máquina tridimensional de medida. Esta metodologia foi empregada para a determinação do erro de repetibilidade nas seguintes condições:

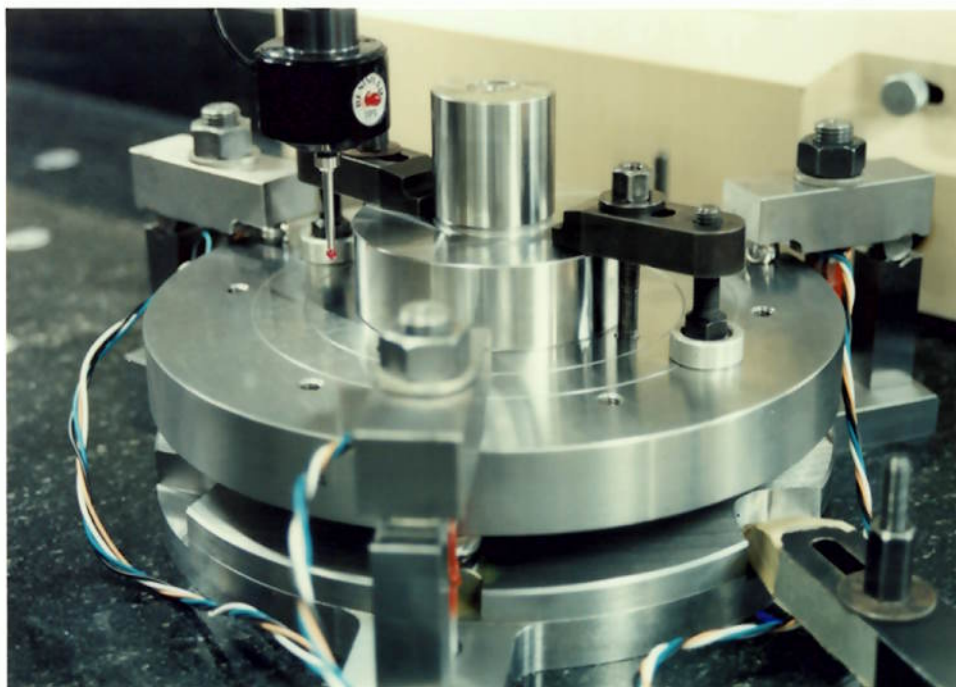
- Base superior apoiada pelo peso próprio
- Pré carga de 15kN

- Pré carga de 30kN

5.3.3.1. Metodologia para a medição da posição da peça padrão

A fim de quantificar os possíveis desvios no posicionamento relativo entre as bases, a peça padrão foi fixada na região central da base superior, conforme mostra a fig.5.8.

As medições da posição do centro foram efetuadas através de cinco apalpações sobre a superfície do cilindro considerado na peça padrão, em posições distribuídas ao redor do diâmetro considerado. Através destas posições foi possível determinar 5 pontos que com ao auxílio do *software* GEO-PAK, que permite conhecer as coordenadas do centro.



5.8. Fixação da peça padrão

5.3.3.2. Determinação do erro de Inclinação do eixo em função da aplicação de esforços

Foram realizadas leituras para a medição da posição do centro da peça padrão em duas secções transversais, sendo uma a 20 mm em relação à superfície da base superior e a outra a 70 mm da mesma base. Passando-se uma reta por estes dois pontos, podemos determinar a posição do eixo da peça padrão em relação ao sistema de coordenadas. Repetindo-se esta operação e fazendo-se a comparação entre a posição média relativa, é possível avaliar o erro de inclinação, em função dos diferentes esforços aplicados à interface do acoplamento. Foi medida a inclinação do eixo para uma serie de 10 ciclos de acoplamento a cada condição de carga.

5.3.3.3. Medições para a determinação do erro de repetibilidade de posicionamento

Através das medições de posicionamento da peça padrão, realizadas a altura de 20mm com relação à face da base superior, foi possível avaliar a repetibilidade de posicionamento do conjunto. O mesmo procedimento se repetiu para as condições de carregamento previamente estabelecidas.

Assim, foram realizados 20 ciclos de medida para cada tipo de carregamento aplicado na interface do acoplamento.

Capítulo 6

6. Resultados

O trabalho experimental foi realizado, com o objetivo de avaliar o desempenho da mesa de acoplamento cinemático sob as condições de funcionamento previamente estabelecidas. Assim, estudamos o comportamento do sistema obtendo os dados necessários para a avaliação do erro de repetibilidade.

Nas páginas que seguem serão apresentados os resultados obtidos nos ensaios do dispositivo, através de tabelas e gráficos organizados da seguinte forma:

- Tabela com os dados colhidos para a avaliação quanto a repetibilidade.
- Tabela com o cálculo dos valores de repetibilidade.
- Gráficos referente aos valores da repetibilidade.
- Tabela com dados de colhidos para a avaliação quanto a inclinação do eixo sobre a condição de pre-carga.
- Gráficos de inclinação

Tabela 6.1-Medição da Posição do Centro da Peça Padrão**Condição de carga: Peso próprio da base superior**

| Ciclo | X (mm) | Y (mm) |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 38.501 | 39.668 |
| 2 | 38.500 | 39.668 |
| 3 | 38.501 | 39.667 |
| 4 | 38.502 | 39.666 |
| 5 | 38.501 | 39.668 |
| 6 | 38.500 | 39.669 |
| 7 | 38.500 | 39.667 |
| 8 | 38.499 | 39.669 |
| 9 | 38.499 | 39.669 |
| 10 | 38.500 | 39.669 |
| 11 | 38.499 | 39.669 |
| 12 | 38.499 | 39.669 |
| 13 | 38.499 | 39.666 |
| 14 | 38.501 | 39.669 |
| 15 | 38.500 | 39.669 |
| 16 | 38.498 | 39.669 |
| 17 | 38.500 | 39.669 |
| 18 | 38.500 | 39.667 |
| 19 | 38.499 | 39.667 |
| 20 | 38.499 | 39.669 |
| 21 | 38.498 | 39.667 |

Tabela 6.2-Erro de repetibilidade**Condição de carga: Peso próprio da base superior**

| Ciclo | r_x (mm) | r_y (mm) |
|-------|---------------|---------------|
| 1 | -0.0013 | 0.0001 |
| 2 | -0.0003 | 0.0001 |
| 3 | -0.0013 | 0.0011 |
| 4 | -0.0023 | 0.0021 |
| 5 | -0.0013 | 0.0001 |
| 6 | -0.0003 | -0.0009 |
| 7 | -0.0003 | 0.0011 |
| 8 | 0.0007 | -0.0009 |
| 9 | 0.0007 | -0.0009 |
| 10 | -0.0003 | -0.0009 |
| 11 | 0.0007 | -0.0009 |
| 12 | 0.0007 | 0.0001 |
| 13 | 0.0007 | -0.0009 |
| 14 | -0.0013 | 0.0021 |
| 15 | 0.0007 | -0.0009 |
| 16 | -0.0003 | -0.0009 |
| 17 | 0.0017 | -0.0009 |
| 18 | -0.0003 | -0.0009 |
| 19 | -0.0003 | 0.0011 |
| 20 | 0.0007 | 0.0011 |
| 21 | 0.0007 | -0.0009 |

**Tabela 6.3-Medição da Posição do Centro em função do
Ciclo de Acoplamento através do Par de Coordenadas X-Y.**

Condição de carga: 15 kN

| Ciclo | X (mm) | Y (mm) |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 38.528 | 39.670 |
| 2 | 38.531 | 39.672 |
| 3 | 38.530 | 39.672 |
| 4 | 38.530 | 39.669 |
| 5 | 38.530 | 39.670 |
| 6 | 38.528 | 39.670 |
| 7 | 38.531 | 39.670 |
| 8 | 38.530 | 39.671 |
| 9 | 38.530 | 39.670 |
| 10 | 38.530 | 39.671 |
| 11 | 38.528 | 39.668 |
| 12 | 38.528 | 39.671 |
| 13 | 38.530 | 39.670 |
| 14 | 38.531 | 39.669 |
| 15 | 38.529 | 39.669 |
| 16 | 38.531 | 39.668 |
| 17 | 38.529 | 39.668 |
| 18 | 38.530 | 39.669 |
| 19 | 38.529 | 39.671 |
| 20 | 38.529 | 39.668 |
| 21 | 38.528 | 39.669 |

Tabela 6 4-Erro de repetibilidade**Condição de carga: 15 kN**

| Ciclo | r_x (mm) | r_y (mm) |
|-------|---------------|---------------|
| 1 | 0.0015 | -0.0001 |
| 2 | -0.0015 | -0.0021 |
| 3 | -0.0005 | -0.0021 |
| 4 | -0.0005 | 0.0009 |
| 5 | -0.0005 | -0.0001 |
| 6 | 0.0015 | -0.0001 |
| 7 | -0.0015 | -0.0001 |
| 8 | -0.0005 | -0.0011 |
| 9 | -0.0005 | -0.0001 |
| 10 | -0.0005 | -0.0011 |
| 11 | 0.0015 | 0.0019 |
| 12 | 0.0015 | -0.0011 |
| 13 | -0.0005 | -0.0001 |
| 14 | -0.0015 | 0.0009 |
| 15 | 0.0005 | 0.0009 |
| 16 | -0.0015 | 0.0019 |
| 17 | 0.0005 | 0.0019 |
| 18 | -0.0005 | 0.0009 |
| 19 | 0.0005 | -0.0011 |
| 20 | 0.0005 | 0.0019 |
| 21 | 0.0015 | 0.0009 |

Tabela 6. 5-Medição da Posição do Centro em função do Ciclo de Acoplamento através do Par de Coordenadas X-Y.

Condição de carga: 30 kN

| Ciclo | X (mm) | Y (mm) |
|--------------|-------------------|-------------------|
| 1 | 38.528 | 39.672 |
| 2 | 38.528 | 39.671 |
| 3 | 38.526 | 39.675 |
| 4 | 38.525 | 39.675 |
| 5 | 38.529 | 39.672 |
| 6 | 38.528 | 39.674 |
| 7 | 38.528 | 39.672 |
| 8 | 38.528 | 39.672 |
| 9 | 38.529 | 39.670 |
| 10 | 38.527 | 39.670 |
| 11 | 38.526 | 39.672 |
| 12 | 38.526 | 39.673 |
| 13 | 38.527 | 39.672 |
| 14 | 38.526 | 39.670 |
| 15 | 38.530 | 39.669 |
| 16 | 38.530 | 39.672 |
| 17 | 38.532 | 39.670 |
| 18 | 38.526 | 39.672 |
| 19 | 38.528 | 39.670 |
| 20 | 38.527 | 39.669 |
| 21 | 38.527 | 39.672 |

Tabela 6.6-Erro de repetibilidade**Condição de carga: 30 kN**

| Ciclo | r_x (mm) | r_y (mm) |
|--------------|----------------------------------|----------------------------------|
| 1 | -0.0002 | -0.0003 |
| 2 | -0.0002 | 0.0007 |
| 3 | 0.0018 | -0.0033 |
| 4 | 0.0028 | -0.0033 |
| 5 | -0.0012 | -0.0003 |
| 6 | -0.0002 | -0.0023 |
| 7 | -0.0002 | -0.0003 |
| 8 | -0.0002 | -0.0003 |
| 9 | -0.0012 | 0.0017 |
| 10 | 0.0008 | 0.0017 |
| 11 | 0.0018 | -0.0003 |
| 12 | 0.0018 | -0.0013 |
| 13 | 0.0008 | -0.0003 |
| 14 | 0.0018 | 0.0017 |
| 15 | -0.0022 | 0.0027 |
| 16 | -0.0022 | -0.0003 |
| 17 | -0.0042 | 0.0017 |
| 18 | 0.0018 | -0.0003 |
| 19 | -0.0002 | 0.0017 |
| 20 | 0.0008 | 0.0027 |
| 21 | 0.0008 | -0.0003 |

Tabela 6.7-Medição Erro de Inclinação**Condição de carga: 15 kN**

| Ciclo | X₁ (mm) | Y₁ (mm) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 38.512 | 39.668 |
| 2 | 38.510 | 39.670 |
| 3 | 38.510 | 39.662 |
| 4 | 38.514 | 39.662 |
| 5 | 38.511 | 39.668 |
| 6 | 38.511 | 39.665 |
| 7 | 38.512 | 39.667 |
| 8 | 38.514 | 39.661 |
| 9 | 38.510 | 39.667 |
| 10 | 38.510 | 39.667 |

X₁ e Y₁ medidos a 20mm da base superfície da base superior

| Ciclo | X₂ (mm) | Y₂ (mm) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 38.510 | 39.662 |
| 2 | 38.511 | 39.661 |
| 3 | 38.509 | 39.662 |
| 4 | 38.513 | 39.657 |
| 5 | 38.509 | 39.664 |
| 6 | 38.510 | 39.663 |
| 7 | 38.511 | 39.664 |
| 8 | 38.513 | 39.660 |
| 9 | 38.509 | 39.663 |
| 10 | 38.511 | 39.664 |

X₂ e Y₂ medidos a 70mm da base superfície da base superior

Tabela 6.8-Erro de Inclinação**Condição de carga: 15 kN**

| Ciclo | r_x (mm) | r_y (mm) |
|-------|---------------|---------------|
| 1 | -0.0004 | -0.0027 |
| 2 | -0.0004 | -0.0007 |
| 3 | 0.0016 | 0.0033 |
| 4 | -0.0024 | 0.0033 |
| 5 | 0.0006 | -0.0027 |
| 6 | 0.0006 | 0.0003 |
| 7 | -0.0004 | -0.0017 |
| 8 | -0.0024 | 0.0043 |
| 9 | 0.0016 | -0.0017 |
| 10 | 0.0016 | -0.0017 |

 X_1 e Y_1 medidos a 20mm da base superfície da base superior

| Ciclo | r_{x2} (mm) | r_{y2} (mm) |
|-------|------------------|------------------|
| 1 | 0.0006 | -0.0002 |
| 2 | -0.0004 | 0.0008 |
| 3 | 0.0016 | -0.0002 |
| 4 | -0.0024 | 0.0048 |
| 5 | 0.0016 | -0.0022 |
| 6 | 0.0006 | -0.0012 |
| 7 | -0.0004 | -0.0022 |
| 8 | -0.0024 | 0.0038 |
| 9 | 0.0016 | -0.0012 |
| 10 | -0.0004 | -0.0022 |

 X_2 e Y_2 medidos a 70mm da base superfície da base superior

Tabela 6.9-Inclinação do Eixo**Condição de carga: 15 kN**

| Ciclo | Delta _{x1} (seg) | Delta _{y1} (seg) |
|-------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 4 | 10 |
| 2 | 0 | 6 |
| 3 | 0 | -14 |
| 4 | | 6 |
| 5 | 4 | 2 |
| 6 | 0 | -6 |
| 7 | 0 | -2 |
| 8 | 0 | -2 |
| 9 | 0 | 4 |
| 10 | 0 | -2 |

Delta_{x1} Diferença entre as posições do centro X_1 e X_2 , para a pré-carga de 15 kN

Delta_{y1} Diferença entre as posições do centro Y_1 e Y_2 , para a pré-carga de 15 kN

Tabela 6.10-Medição Erro de Inclinação**Condição de carga: 30 kN**

| Ciclo | X₁ (mm) | Y₁ (mm) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 38.598 | 38.901 |
| 2 | 38.597 | 38.900 |
| 3 | 38.598 | 38.901 |
| 4 | 38.598 | 38.899 |
| 5 | 38.600 | 38.898 |
| 6 | 38.593 | 38.901 |
| 7 | 38.593 | 38.899 |
| 8 | 38.594 | 38.902 |
| 9 | 38.598 | 38.899 |
| 10 | 38.598 | 38.899 |

X₁ e Y₁ medidos a 20mm da base superfície da base superior

| Ciclo | X₂ (mm) | Y₂ (mm) |
|--------------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1 | 38.591 | 38.899 |
| 2 | 38.594 | 38.899 |
| 3 | 38.594 | 38.898 |
| 4 | 38.594 | 38.896 |
| 5 | 38.594 | 38.894 |
| 6 | 38.591 | 38.897 |
| 7 | 38.590 | 38.896 |
| 8 | 38.590 | 38.901 |
| 9 | 38.590 | 38.898 |
| 10 | 38.594 | 38.900 |

X₂ e Y₂ medidos a 70mm da base superfície da base superior

Tabela 6.11-Erro de Inclinação**Condição de carga: 30 kN**

| Ciclo | r_x (mm) | r_y (mm) |
|-------|---------------|---------------|
| 1 | -0.0013 | -0.0009 |
| 2 | -0.0003 | 0.0001 |
| 3 | -0.0013 | -0.0009 |
| 4 | -0.0013 | 0.0011 |
| 5 | -0.0033 | 0.0021 |
| 6 | 0.0037 | -0.0009 |
| 7 | 0.0037 | 0.0011 |
| 8 | 0.0027 | -0.0019 |
| 9 | -0.0013 | 0.0011 |
| 10 | -0.0013 | 0.0011 |

 X_1 e Y_1 medidos a 20mm da base superfície da base superior

| Ciclo | r_{x2} (mm) | r_{y2} (mm) |
|-------|------------------|------------------|
| 1 | -0.0004 | -0.0012 |
| 2 | -0.0034 | -0.0012 |
| 3 | -0.0034 | -0.0002 |
| 4 | -0.0034 | 0.0018 |
| 5 | -0.0034 | 0.0038 |
| 6 | -0.0004 | 0.0008 |
| 7 | 0.0006 | 0.0018 |
| 8 | 0.0006 | -0.0032 |
| 9 | 0.0006 | -0.0002 |
| 10 | -0.0034 | -0.0022 |

 X_2 e Y_2 medidos a 70mm da base superfície da base superior

Tabela 6.12-Inclinação do Eixo**Condição de carga: 30 kN**

| Ciclo | Delta _{x2} (seg) | Delta _{y2} (seg] |
|-------|------------------------------|------------------------------|
| 1 | 4 | -1 |
| 2 | -12 | -5 |
| 3 | -8 | 3 |
| 4 | -8 | 3 |
| 5 | -0 | 5 |
| 6 | -16 | 7 |
| 7 | -12 | 3 |
| 8 | -7 | -5 |
| 9 | 7 | -5 |
| 10 | -8 | -12 |

Delta_{x2} Diferença entre as posições do centro X_1 e X_2 , para a pré-carga de 30 kN

Delta_{y2} Diferença entre as posições do centro Y_1 e Y_2 , para a pré-carga de 30 kN

Fig. 6.1. Erro de repetibilidade em relação a X. Condição de carga: peso próprio da base superior

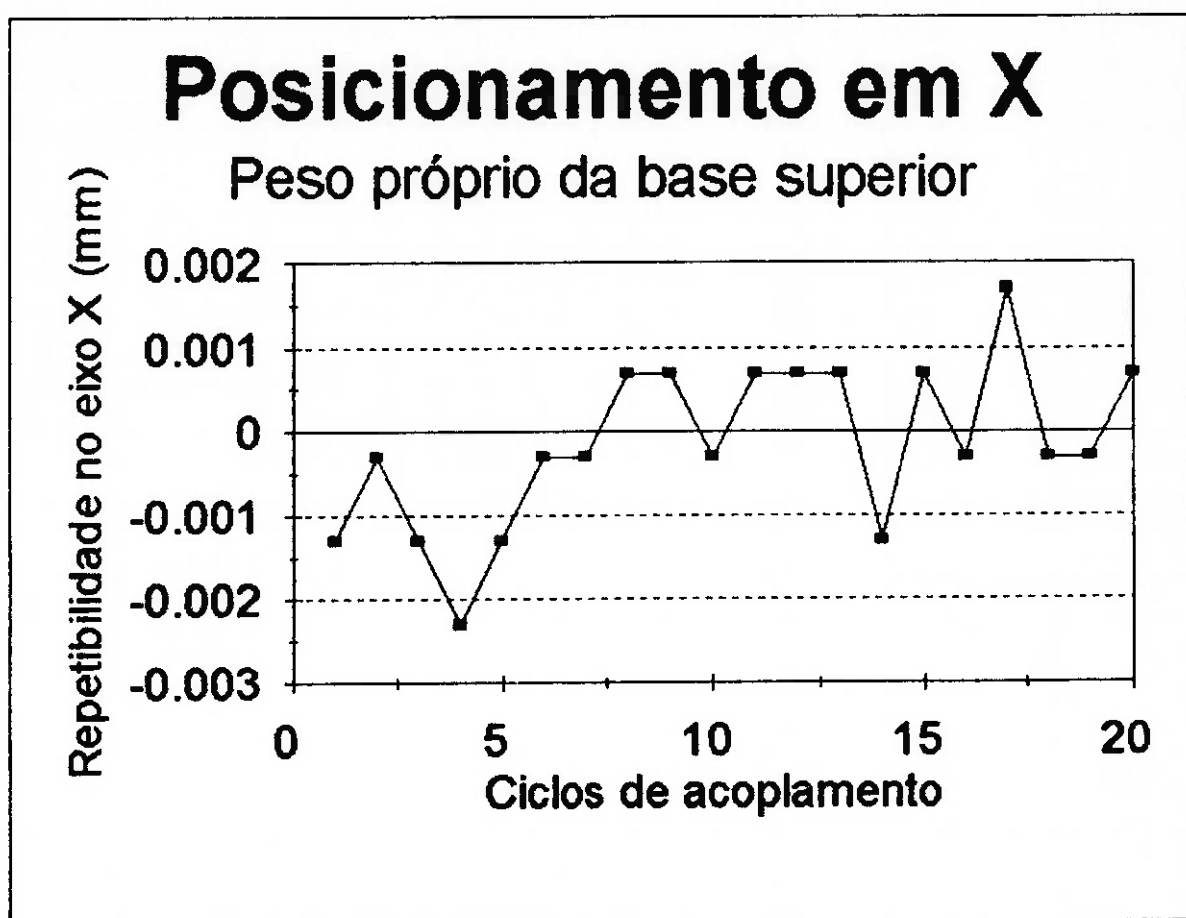


Fig. 6.2 Erro de repetibilidade em relação a Y. Condição de carga: peso próprio da base superior

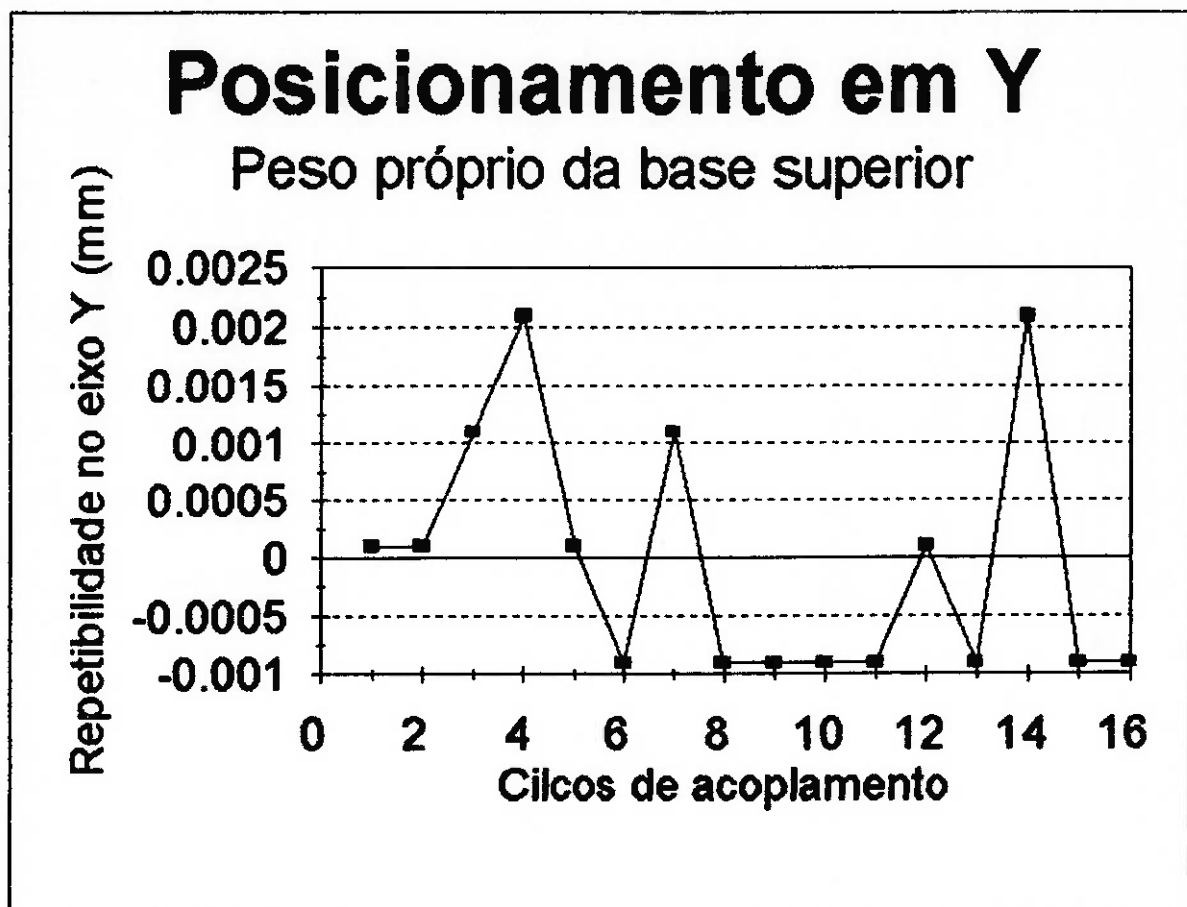


Fig. 6.3. Erro de repetibilidade em relação a X. Condição de carga: pré-carga 15kN

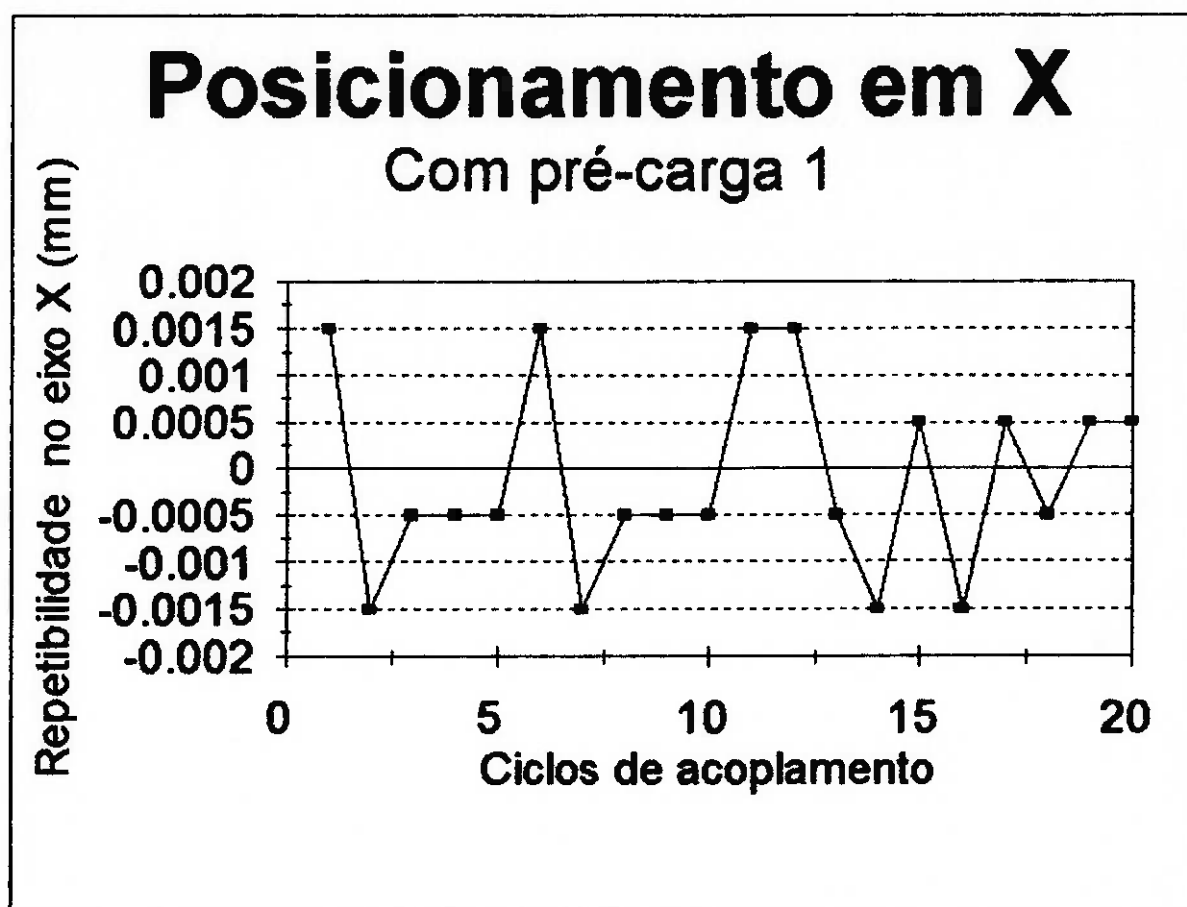


Fig. 6.4. Erro de repetibilidade em relação a Y. Condição de carga: 15kN

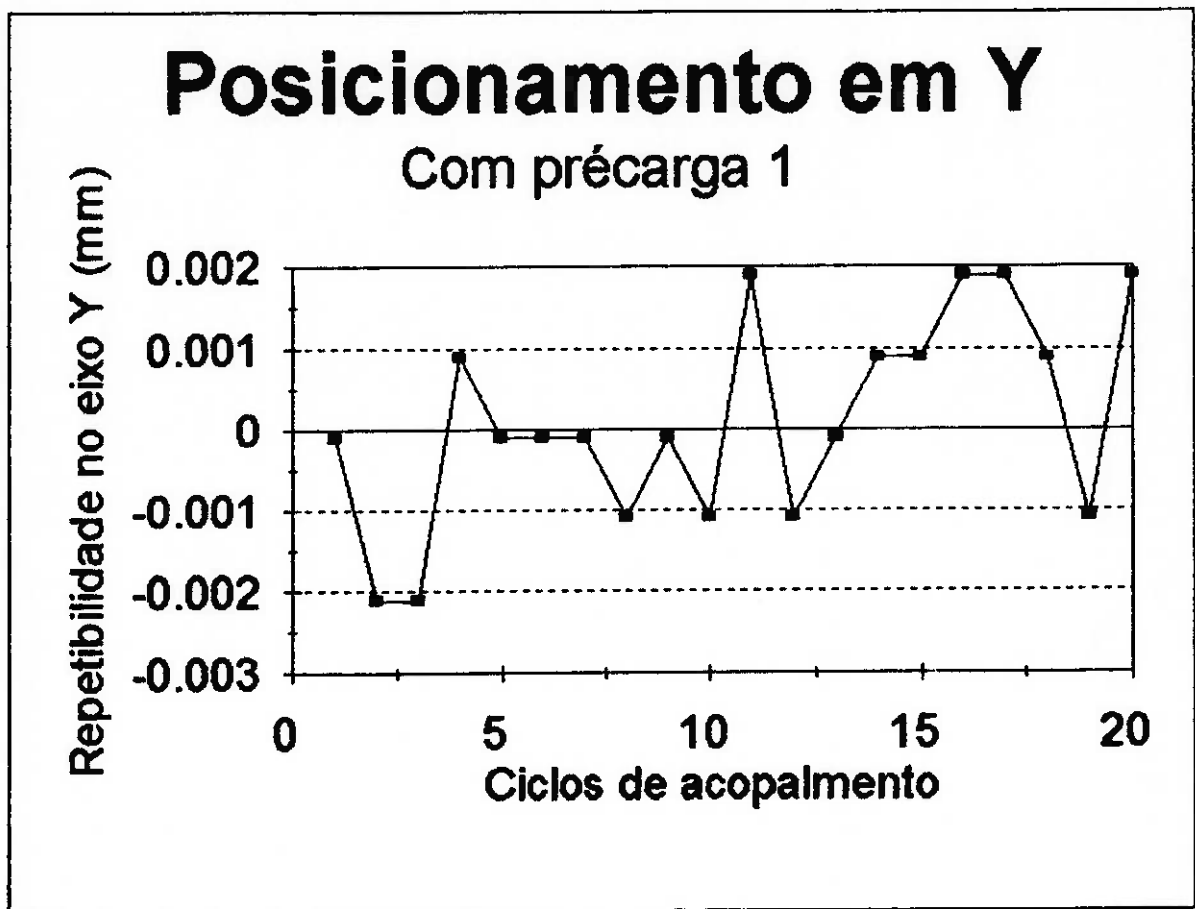


Fig. 6.5. Erro de repetibilidade em relação a X. Condição de carga: 30kN

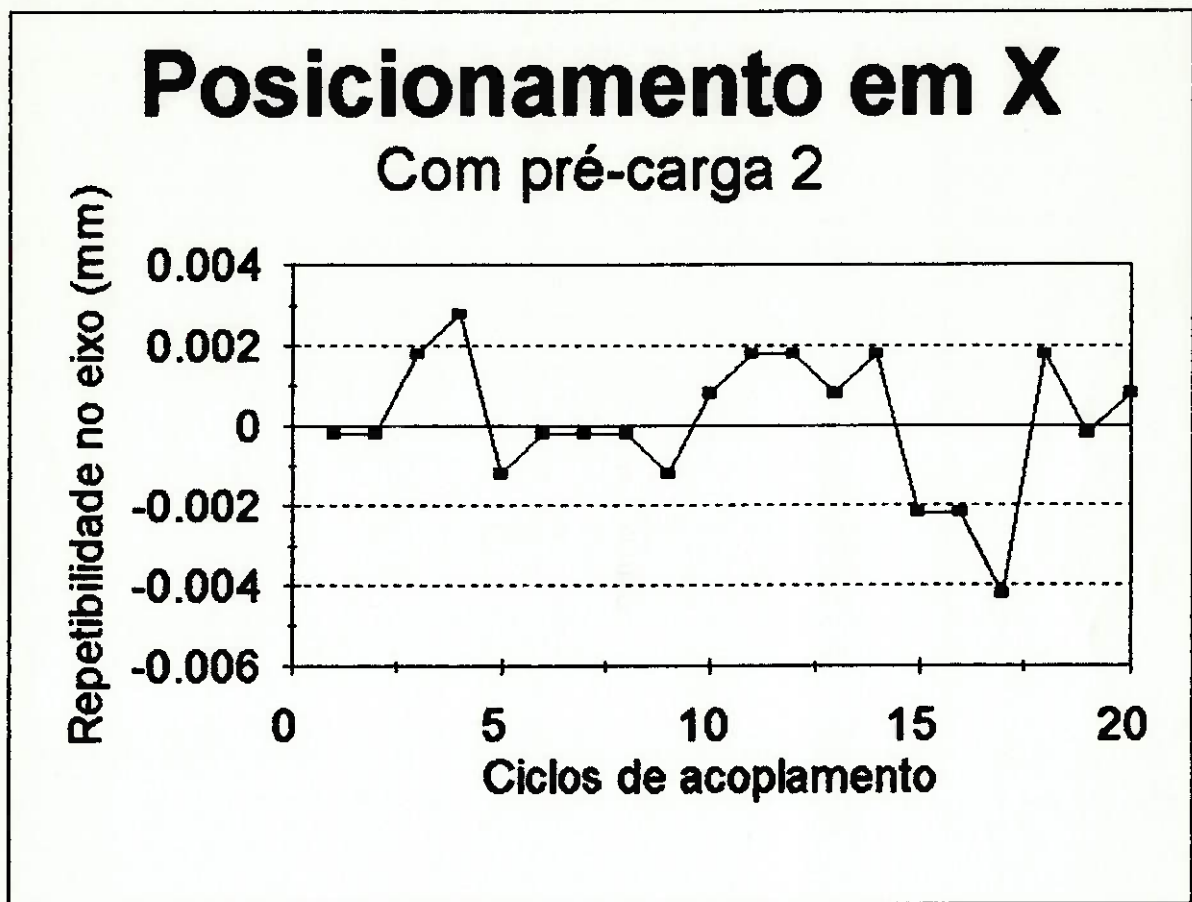


Fig. 6.6. Erro de repetibilidade em relação a Y. Condição de carga: 30kN

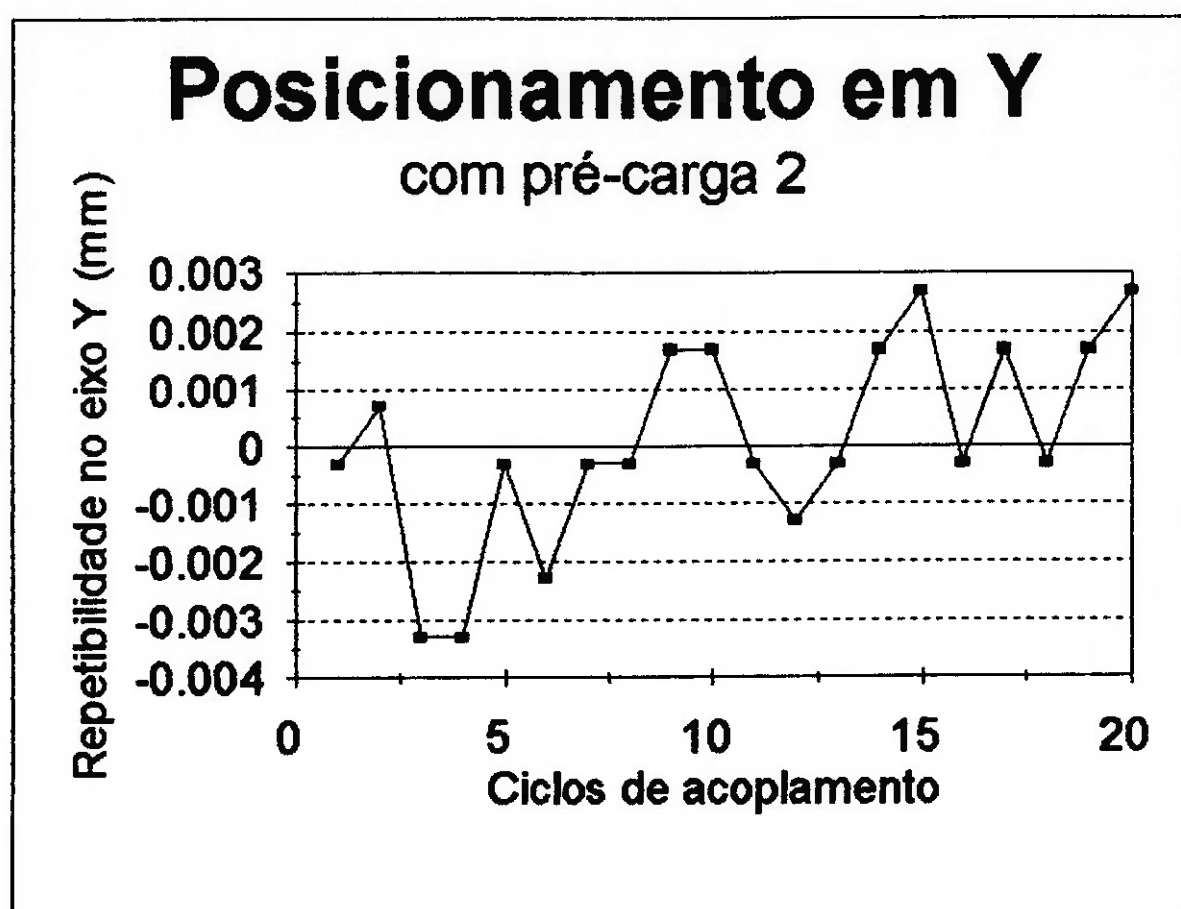


Fig. 6.7. Erro de Inclinação em relação a X. Condição de carga: 15kN

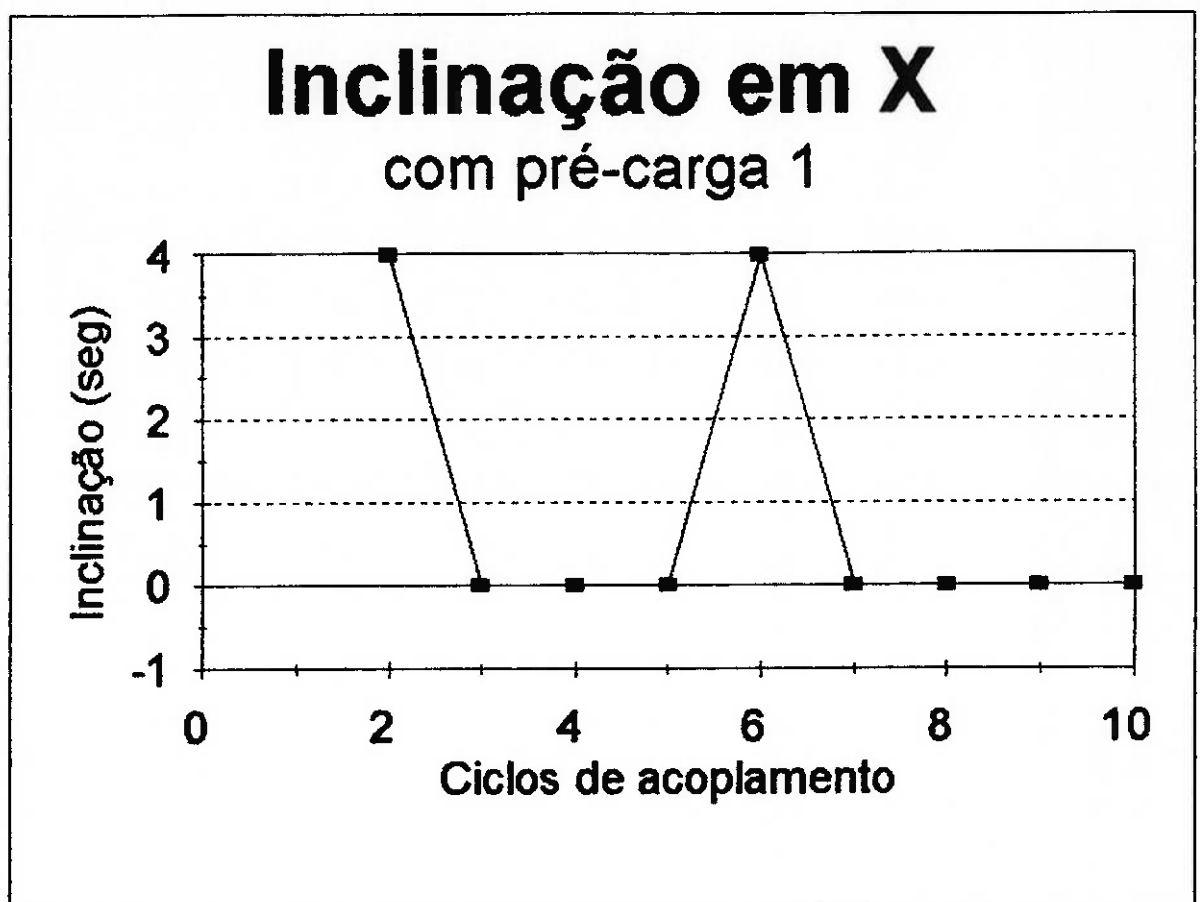


Fig. 6.8. Erro de Inclinação em relação a Y. Condição de carga: 15kN

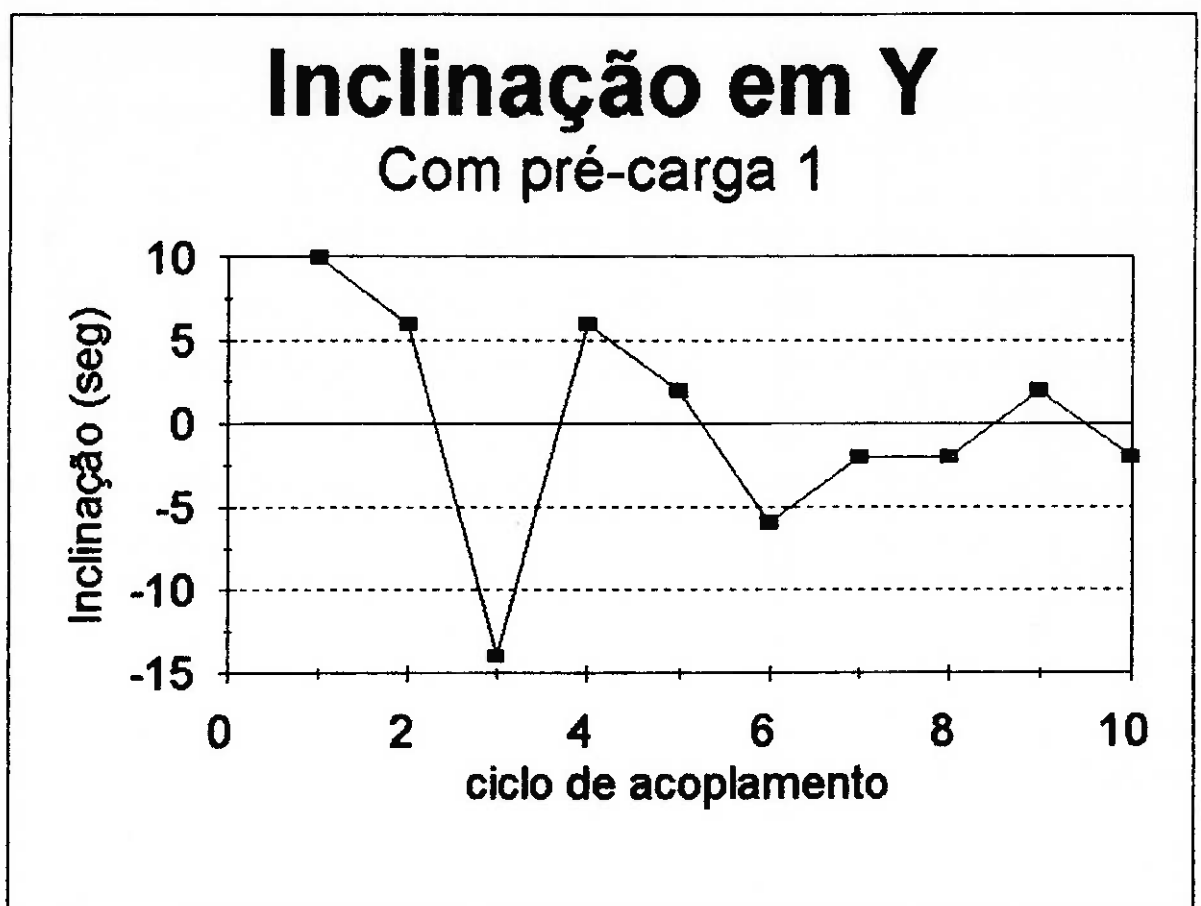


Fig. 6.9. Erro de Inclinação em relação a X. Condição de carga: 30kN

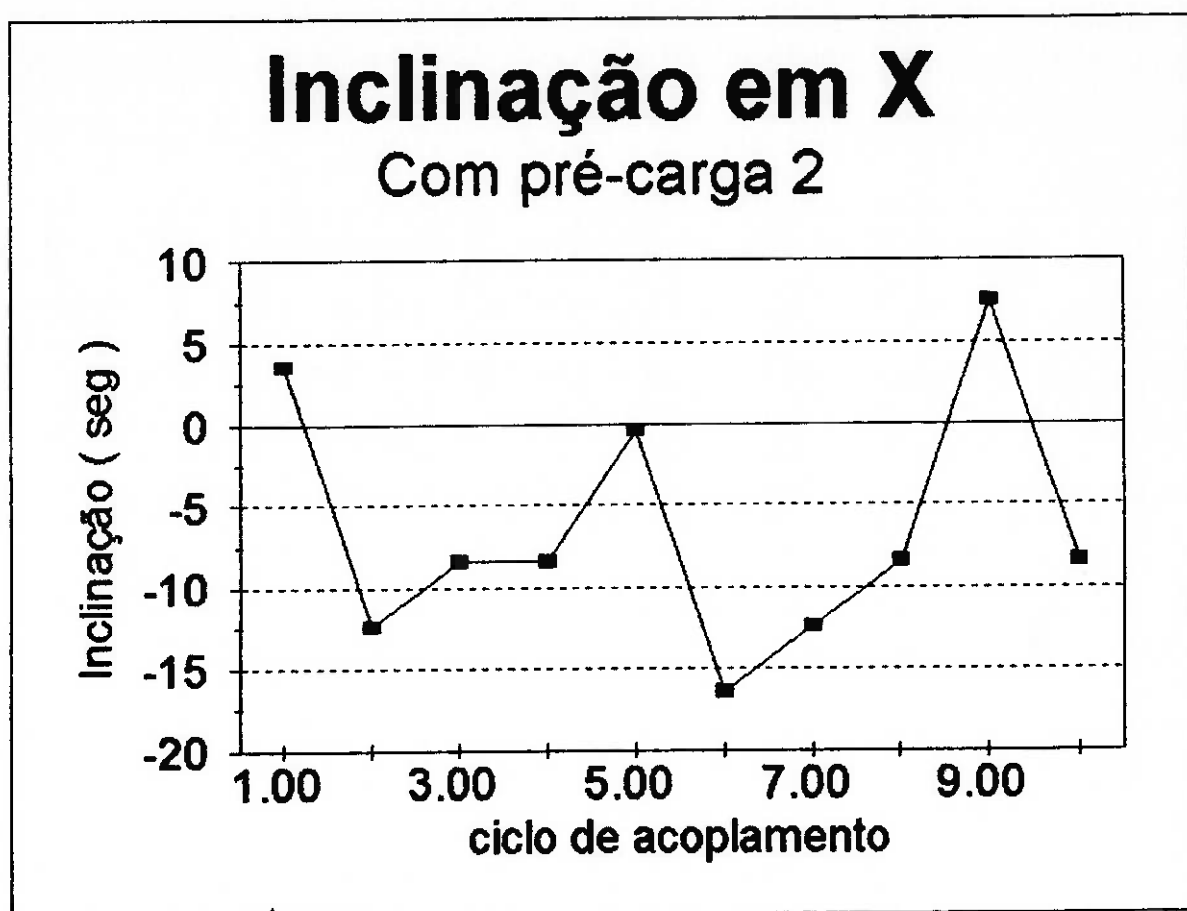
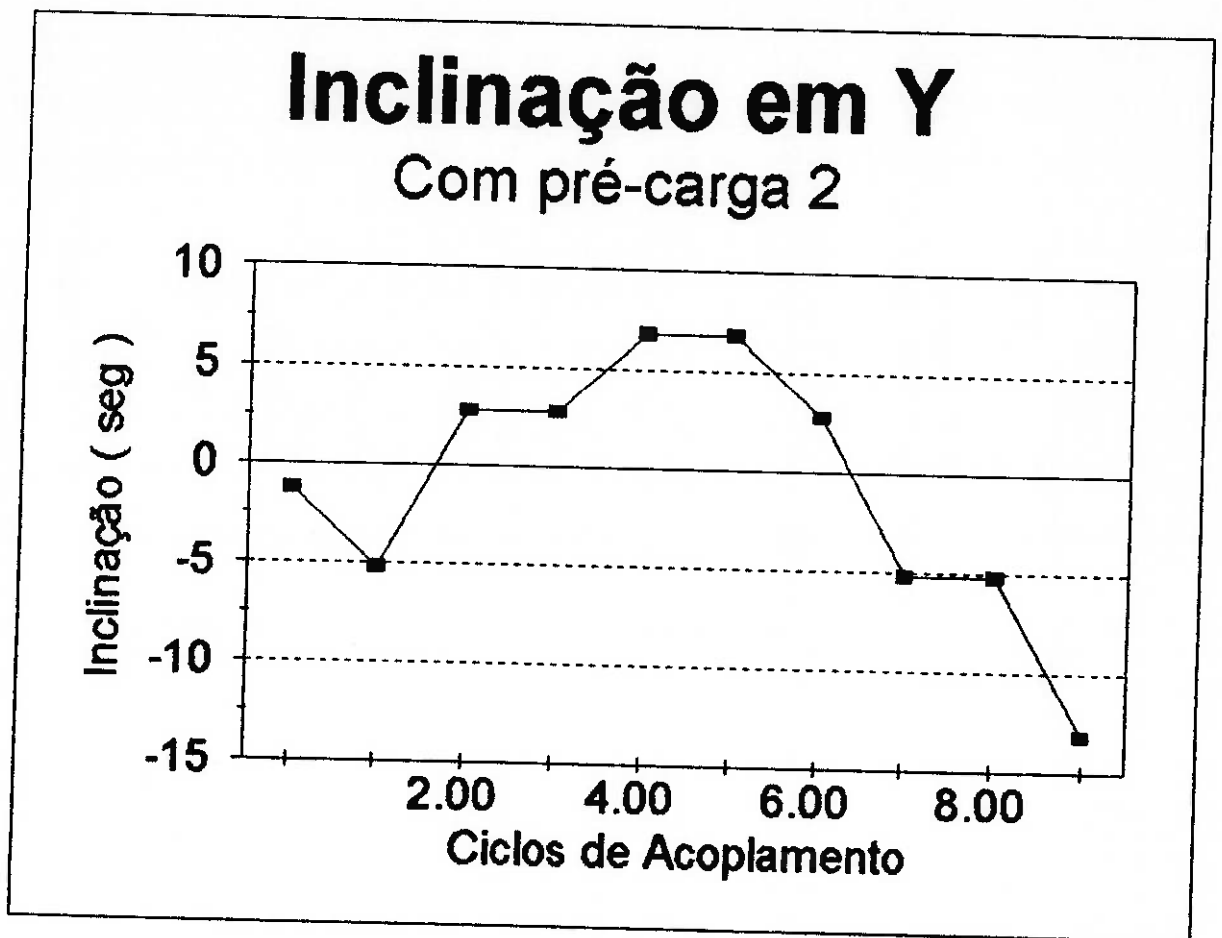


Fig. 6.10. Erro de Inclinação em relação aY. Condição de carga: 30kN



Capítulo 7

7. Conclusões e Recomendações

Neste capítulo serão discutidos os principais resultados do estudo realizado com uma mesa de acoplamento cinemático, projetada, construída e testada segundo a metodologia apresentada nos capítulos iniciais deste trabalho, com o objetivo principal de obter repetibilidade de posicionamento da ordem de $1\mu\text{m}$.

7.1. Considerações sobre o projeto

O projeto de uma mesa de acoplamento cinemático, que permita a remoção entre as bases com posterior recolocação, foi desenvolvido levando-se em conta que este equipamento seria utilizado em ferramentaria de precisão, onde a praticidade para a montagem e desmontagem e possíveis manutenções são fundamentais. Assim, o projeto experimental peca quanto à utilização de células de carga para a aplicação da pré-carga. Isto porém foi aplicado somente para os ensaios, pois ainda eram desconhecidos os efeitos da variação da pré-carga nas interfaces, quanto à repetibilidade. Para o uso prático entretanto, foi prevista a aplicação de molas de flexão em forma de disco calibradas[KÖHLER.(1979)]. Contudo,

esta configuração exige a utilização de limitadores mecânicos, para limitar a flexão das molas em uma faixa de aplicação de força compatível com o projeto. Assim, jogos de molas de flexão calibradas, permitiriam a aplicação da pré-carga com diferentes faixas de amplitude.

Os grampos de pré-carga foram construídos baseados na publicação de BARKMAN (1982), onde os esforços de pré-carga são aplicados entre esferas, minimizando assim, os efeitos da aplicação de pré-carga sobre a base superior. O ponto de contato entre o plano do grampo e a esfera de pré-carga evita, dessa forma, que forças ou momentos gerados na aplicação da pré-carga tenham interferência no posicionamento do acoplamento.

7.2. Considerações sobre a Fabricação

Baseado nos objetivos deste trabalho, a fabricação da mesa de acoplamento cinemático se desenvolveu pelos processos convencionais, à exceção de algumas operações efetuadas nas bases superior e inferior, que foram parcialmente usinadas em fresadora CNC. O emprego de tal equipamento não deve ser atribuído ao grau de dificuldade na fabricação do dispositivo, e sim à disponibilidade do equipamento e à conseqüente diminuição do tempo de fabricação, em função das facilidades que estes equipamentos oferecem.

Assim, o objetivo de construir um dispositivo de baixo custo e de fabricação simples foi plenamente atingido, através do processo de fabricação empregado.

7.3. Considerações sobre os Ensaios Realizados

Os ensaios realizados na mesa de acoplamento cinemático estudada foram baseados na repetição de medidas e no cálculo da dispersão dos valores medidos, em relação à média aritmética do conjunto de valores considerados. Embora o cálculo do número mínimo de repetições necessárias tenha apontado que 5 repetições seriam suficientes para definir a repetibilidade do processo, foram adotadas 20 repetições para o cálculo da repetibilidade de posicionamento, e duas series de 10 medições, para o cálculo da inclinação da mesa na condição de carga.

Os resultados foram divididos basicamente em duas etapas a saber:

- os ensaios sem a aplicação da pré-carga
- os ensaios com aplicação da pré-carga

Os ensaios sem a aplicação de pré-carga demonstraram que o acoplamento comportou-se de acordo com o esperado, com os valores de repetibilidade da ordem de $1\mu\text{m}$, conforme o proposto nos objetivos deste estudo. Os valores encontrados foram semelhantes aos já referidos por outros autores [SLOCUM; DONMEZ, (1988b) e SHERRINGTON; SMITH (1993)]

Foram aplicados dois tipos de carregamento, sendo um de 1.5 kN e outro com 3 kN.

Com a aplicação de 1.5 kN, observou -se uma alteração dos resultados de repetibilidade que assumiu valores próximos a ordem de $\pm 2\mu\text{m}$. Nos ensaios de repetibilidade com a

aplicação de 3kN obteve-se repetibilidade da ordem de $\pm 3\mu$ m. A princípio, tentou-se justificar o aumento do erro de repetibilidade em função do atrito de contato entre as esferas e os roletes, ou ainda, algum momento agindo na base superior devido ao sistema de aplicação de pré-carga.

Na tentativa de se buscar o motivo que levou à essa alteração não esperada nos resultados, verificou-se, no exame do acoplamento, que houve uma ligeira alteração na coloração da superfície do rolete de interface. Contudo, não era perceptível ao tato, qualquer irregularidade na superfície. Dada as alterações observadas nestes resultados, estabeleceu-se uma revisão criteriosa nos cálculos de dimensionamento. Desta forma, observou-se que um erro na determinação da força de pré-carga (q_0) resultou em uma sobrecarga nos elementos de interface. Embora a sobrecarga tenha sido da ordem de 10 vezes o valor máximo permitido, conseguiu-se resultados viáveis. Certamente a pré-carga correta, que é da ordem de 830 N em cada prisioneiro de pré-carga, serão obtidos valores de repetibilidade da ordem de 1μ , que era o um dos objetivos deste trabalho.

7.4. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos nos ensaios realizados, conclui-se que o projeto e construção de um acoplamento cinemático de três ranhuras, de baixo custo de produção, mostrou-se eficiente quanto a repetibilidade de posicionamento.

Desta forma sua aplicação pode ser útil em operações de acabamento que envolvam alta precisão de posicionamento, cujas solicitações sejam compatíveis com os esforços admissíveis para a interface.

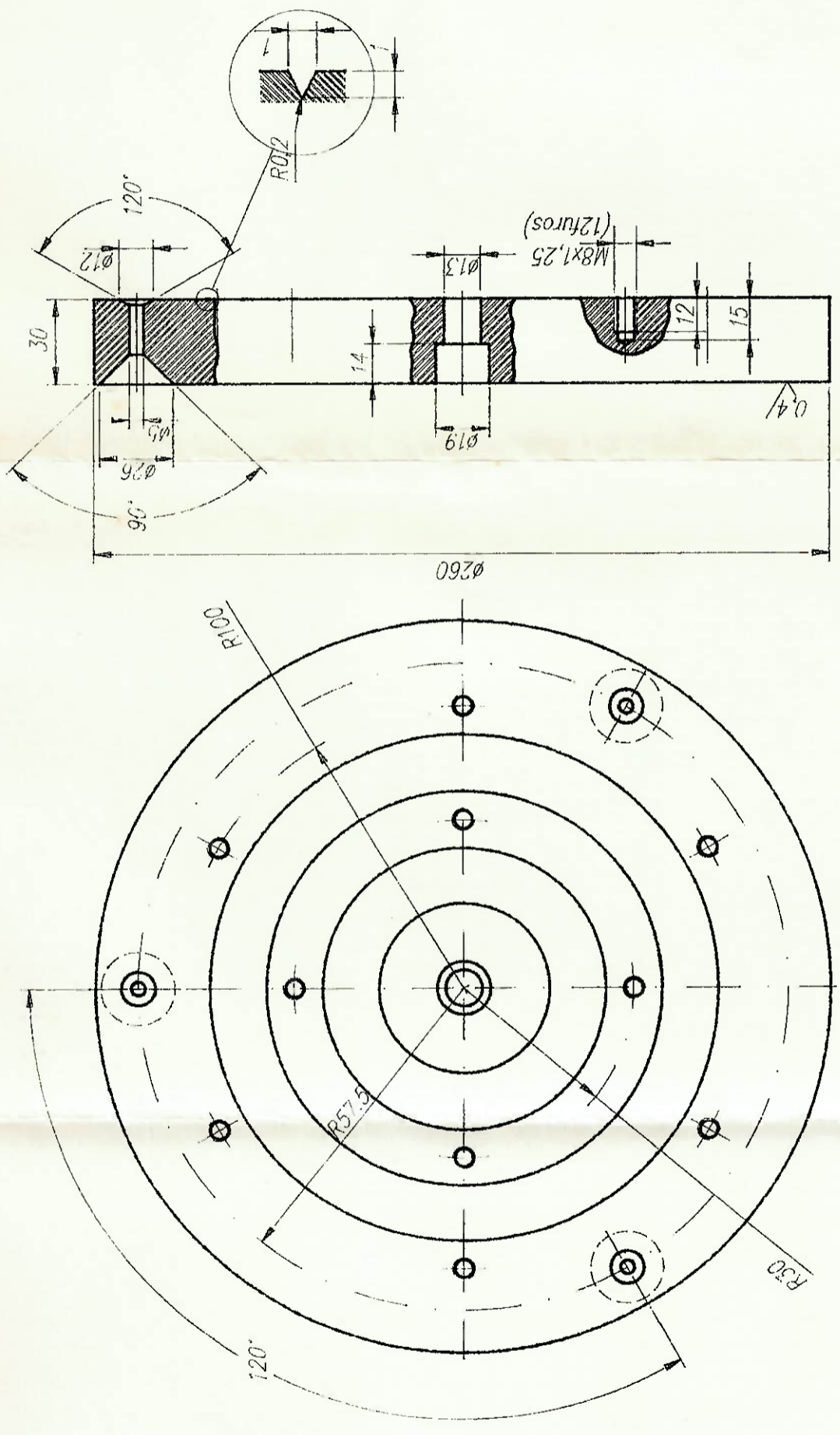
Vale ressaltar que os acoplamentos cinemáticos de três ranhuras, com esferas e roletes como elementos de interface são sensíveis às sobrecargas, ou seja, podem ter seu desempenho significativamente comprometido por menores que sejam as deformações dos elementos de contato.

Conclui-se portanto, que os acoplamentos cinemáticos desta natureza devam ser construídos com os maiores raios de esferas e roletes possíveis. Isto implicará em um aumento da força de pré-carga, que permitirá submetê-lo a esforços de maior amplitude, sem contudo alterar o desempenho do sistema.

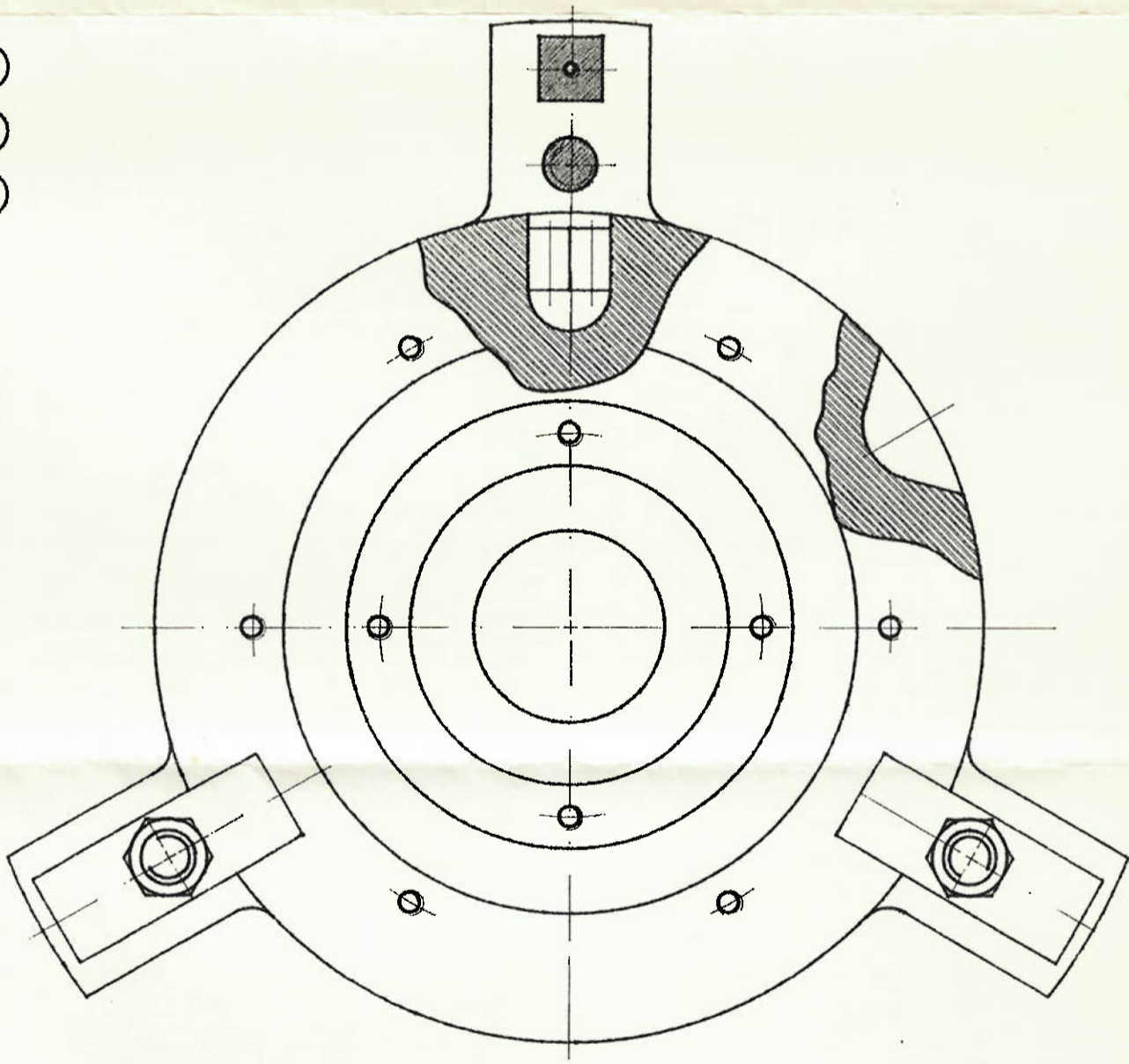
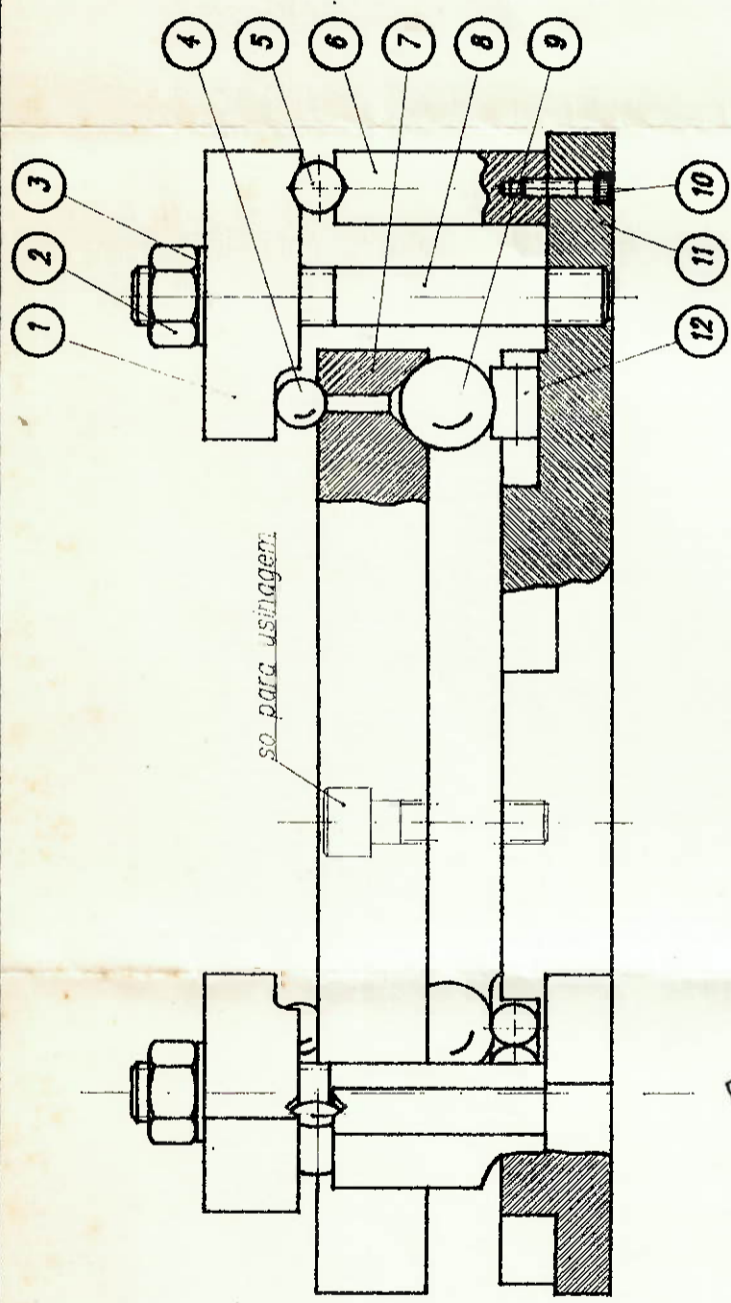
ANEXO A

Projeto Mecânico

7



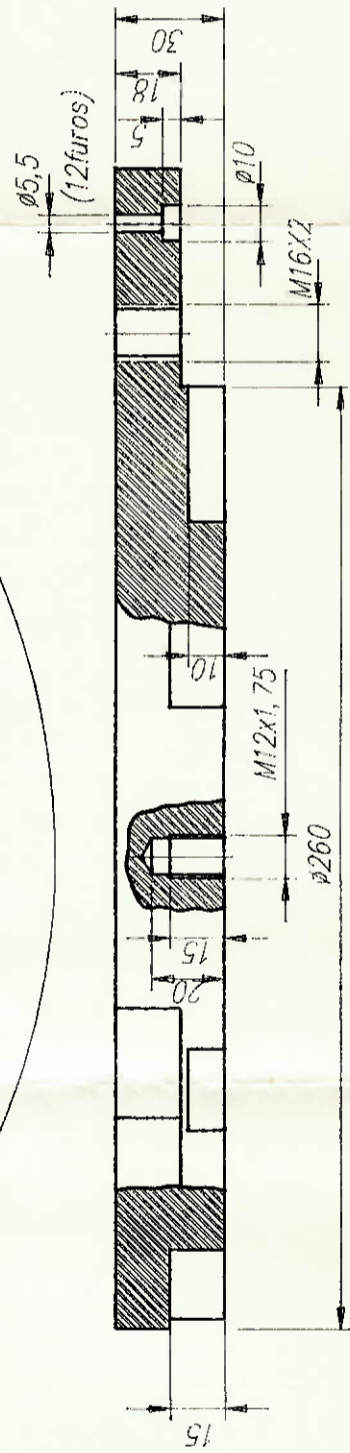
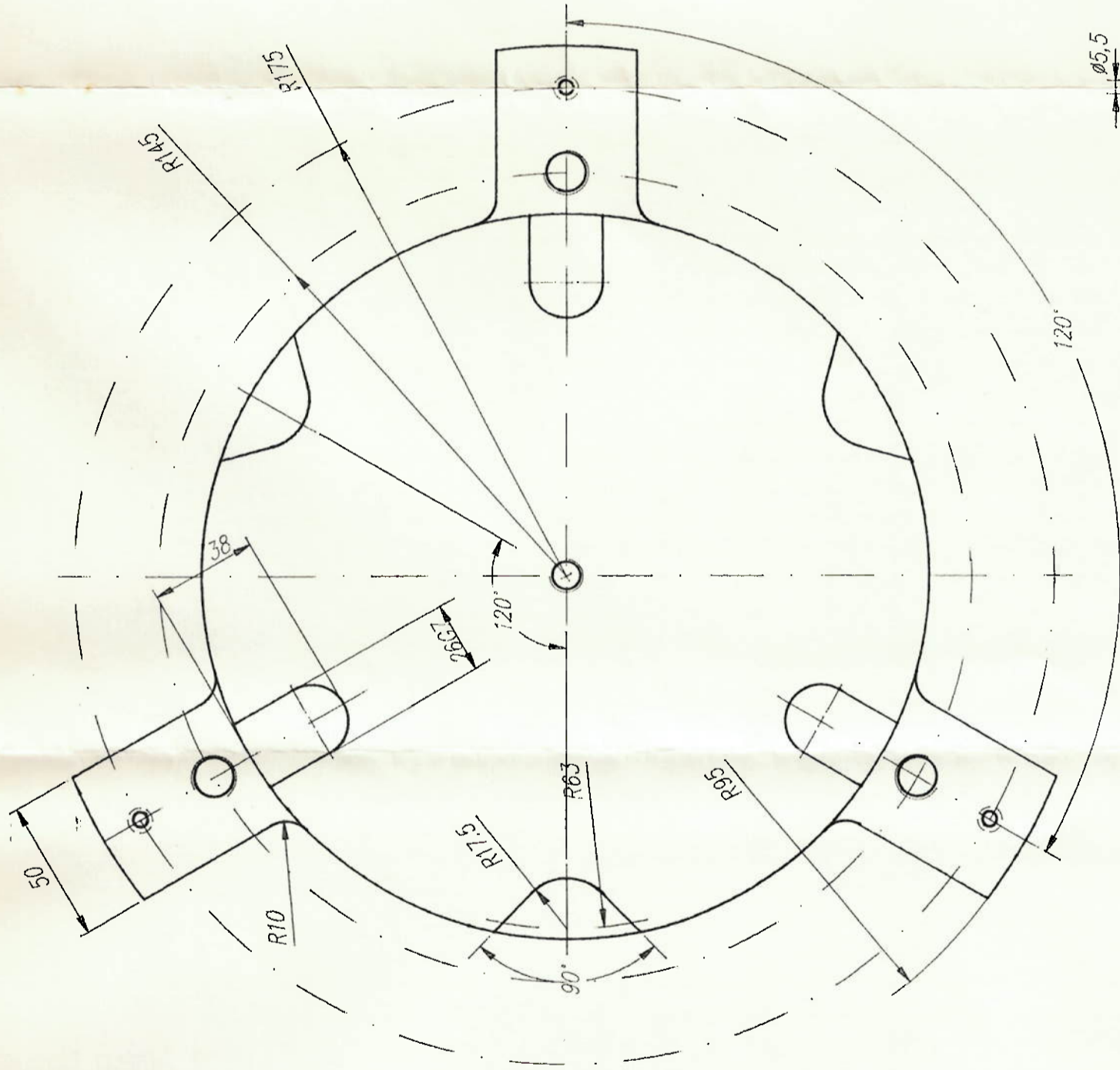
| | | |
|---------------------------------------|---------------|--------------|
| 1 | Base superior | Aco SAE 1020 |
| QUANTIDADE | DENOMINAÇÃO | MATERIAL |
| DES. João | 30/05/95 | |
| VERIF. Pucci | 30/05/95 | |
| APROV. Carlos Tu | | |
| I.P.T. ENGENHARIA MECÂNICA | | |
| | | ESCALA 1:2 |
| | | Nº 1 |
| Mesa de acoplamento cinemático | | |



| | | | |
|---------------------------------------|-------------------------------|----------|--------------------|
| 12 | Rolete de interface | 6 | Ø13x14mm |
| 11 | Base inferior | 3 | Aco SAE 1020 |
| 10 | Paraf.c/cab.cilind.e sext.int | 3 | M5x0,8x25mm - ABNT |
| 9 | Esfera de interface Ø26 | 3 | Aco SAE 52100 |
| 8 | Prisioneiro de pre-carga | 3 | M16x2 |
| 7 | Base superior | 1 | Aco SAE 1020 |
| 6 | Calco para pre-carga | 3 | Aco SAE 4340 |
| 5 | Rolete de pre-carga Ø14x15 | 3 | Aco SAE 52100 |
| 4 | Esfera de pre-carga Ø14 | 3 | Aco SAE 52100 |
| 3 | Arruela lisa | 3 | Para parafuso M16 |
| 2 | Porca sextavada | 3 | M16x2 |
| 1 | Grampo de pre-carga | 3 | Aco SAE 1020 |
| Pos | Denominacao | Qtd | Material |
| DES. | Joga | 30/05/95 | |
| VERIF. | Pucci | 30/05/95 | |
| APROV. | Carlos Tu | | |
| Mesa de acoplamento cinemático | | | |
| | | | ESCALA 1:2 |
| | | | Nº 1 |

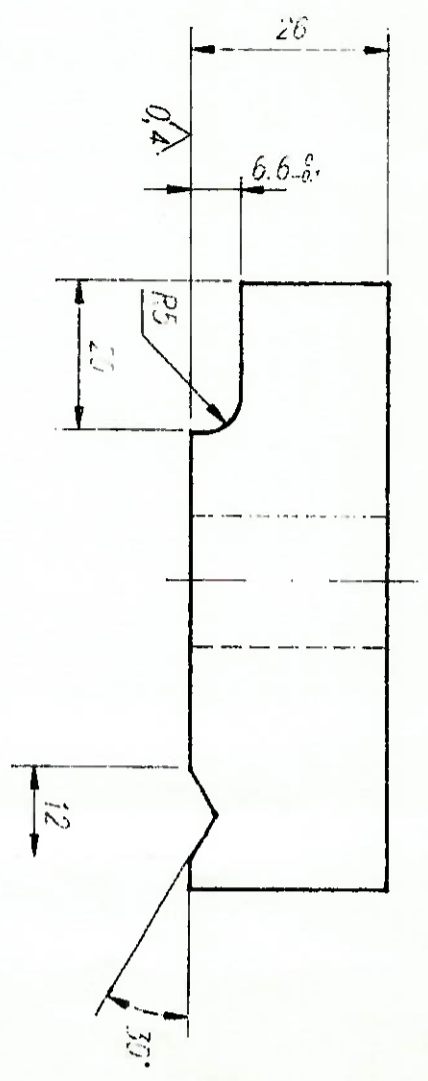
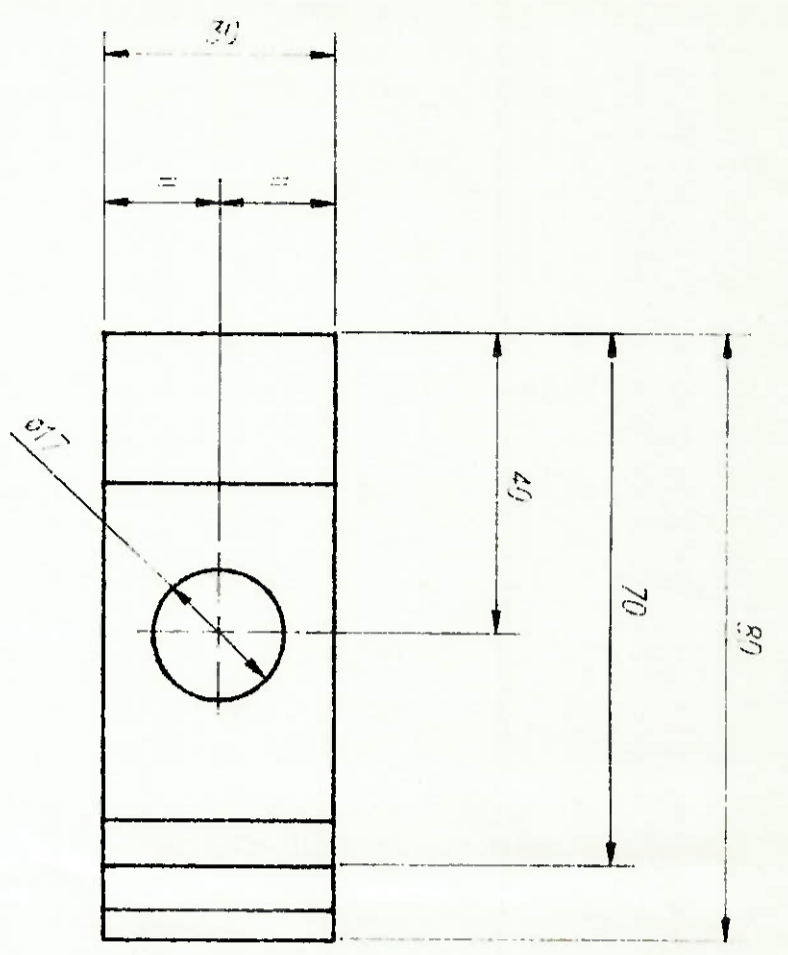
I.P.T.

ENGENHARIA MECÂNICA



| | | |
|---------------------------------------|---------------|--------------|
| 1 | Base inferior | Aço SAE 1020 |
| QUANTIDADE | DENOMINAÇÃO | MATERIAL |
| DES. João | 30/05/95 | |
| VERIF. Pucc. | 30/05/95 | |
| APROV. Carlos III | | |
| Mesa de acoplamento cinemático | | ESCALA 1:2 |
| | | Nº 1 |

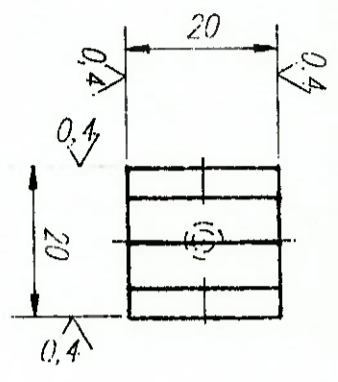
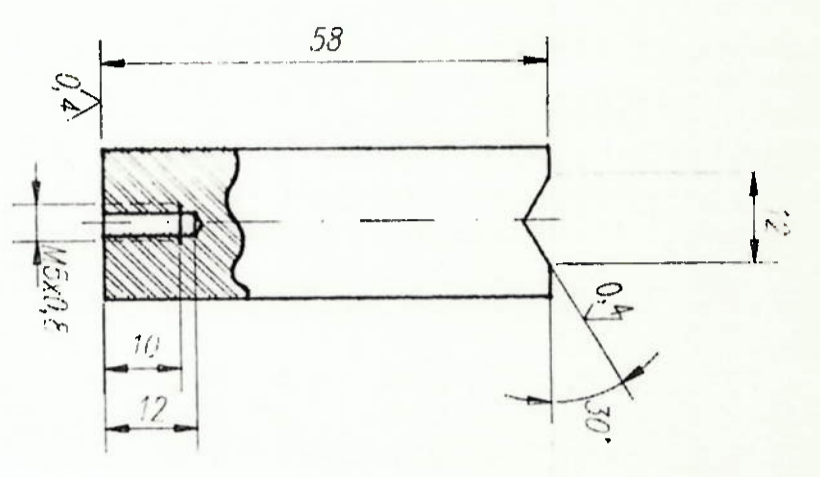
I.P.T.
ENGENHARIA MECÂNICA



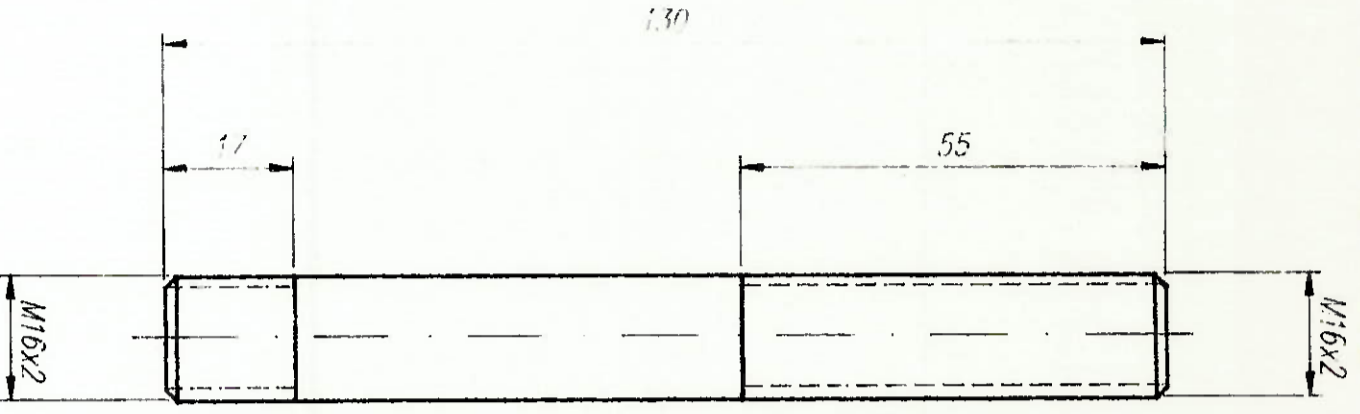
| | | | |
|--------------------------------|-----------|--------------------|--------------|
| QUANTIDADE | 3 | Grupo de pre-carga | A.0 SAE 434C |
| DENOMINACAO | | | MATERIAL |
| DES. | J000 | 30/05/95 | |
| VERIF. | Pucci | 30/05/95 | |
| APROV. | Carlos Tu | | |
| Mesa de acoplamento cinemático | | | ESCALA 1:1 |
| | | | Nº 1 |

I.P.T.

ENGENHARIA MECANICA



| | | | |
|---------------------------------------|-----------|----------------------|---------------------|
| QUANTIDADE | 3 | Calço para pre-carga | ACO SAE 4340 |
| DES. | Jogo | DETERMINAÇÃO | MATERIAL |
| VERIF. | Pucci | 30/05/95 | I.P.T. |
| APROV. | Carlos Tu | 30/05/95 | ENGENHARIA MECÂNICA |
| Mesa de acoplamento cinemático | | | ESCALA 1:1 |
| | | | N° 1 |



| | | |
|--------------------------------------|--------------------------|-----------|
| 3 | Prisioneiro de pre-carga | Aço pr313 |
| QUANTIDADE | DENOMINAÇÃO | MATERIAL |
| DES. | Joga | 30/05/35 |
| VERIF. | Pucci | 30/05/35 |
| APROV. | Carlos Tu | |
| Mesa de acoplamento chamafico | | |
| ESCALA 1:1 | | |
| N° | | |

I.P.T.
ENGENHARIA MECÂNICA

Referências Bibliográficas

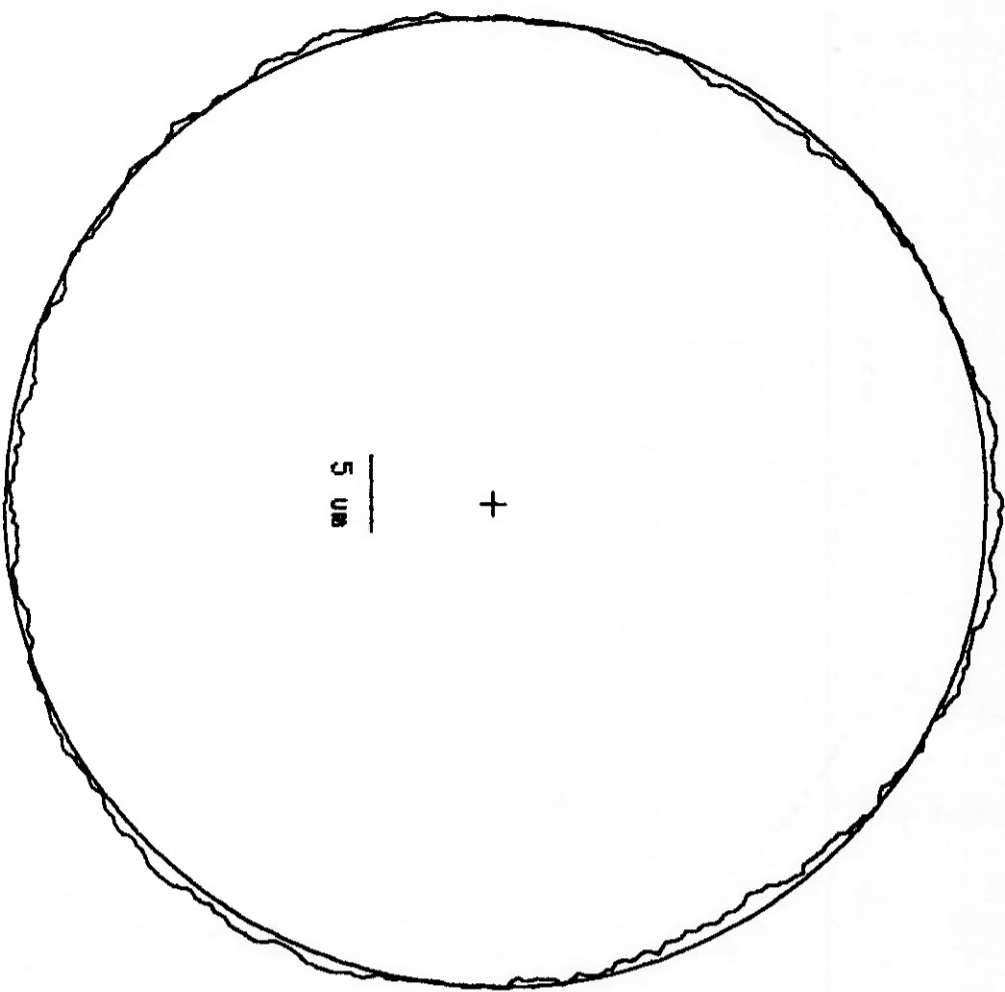
1. BARKMAN, W.E. Workpiece fixturing for precision machining. *Precision Engineering*, v.4, n. 2, p.101-105, 1982.
2. COSTA NETO, P.L.O. *Estatística*. São Paulo, Edgard Blucher, 1980.
3. DUDEWICZ, E.J. Basic statistical methods. In: Juran's, J.M.; Gryna, F.M. *Juran's Quality Control Handbook* McGraw-Hill Book Company, 1988. p.23.1-121.
4. KÖHLER, G. Junções elásticas. In: *Dubbel Manual do Engenheiro Mecânico*. Ed.Hermus. -da 13ª edição alemã. v.3, 1979, p.698-712.
5. POLLARD, A.F.C. Kinematic design in engineering. *Proc I Mech E*, v.125, p.143-195, 1933.
6. SCARR, A.J.T. Instrument and machine design. In: *Scarr, A.J.T. Lecturer, the college of Aeronautics Cranfield*. McGraw-Hill Publishing Company Limited, 1967. p.37-39.
7. SHERRINGTON, I.; SMITH, E.H. Design and performance assessment of a Kelvin clamp for use in relocation analysis of surface topography. *Precision Engineering*, v.15, n.2, p.77-85, 1993.

8. SLOCUM, A.H. Kinematic couplings for precision fixturing-Part I: Formulation design parameters. *Precision Engineering*, v. 10, n. 2, p. 85-91, 1988a.
9. SLOCUM, A.H. Design of three-groove kinematic couplings. *Precision Engineering*, v. 14, n. 2, p. 67-73, 1992a.
10. SLOCUM, A.H. Kinematic Coupling design. In: Slocum, A.H. *Precision Machine Design*. Prentice Hall Englewood Cliffs, 1992b p. 401-412.
11. SLOCUM, A.H.; DONMEZ, A. Kinematic couplings for precision fixturing-Part 2: Experimental determination of repeatability and stiffness. *Precision Engineering*, v. 10, n. 3, p. 115-122, 1988b.
12. SPOTTS, M.F. Ball Bearings-Contact Stress. In: Spotts, M.F. *Mechanical Design Analysis*. Prentice Hall Englewood Cliffs, 1964. p. 163-171.
13. TIMOSHENKO, S.P.; GOODIER, J.N. *Theory of Elasticity*. 3 ed. New York, McGraw-Hill, 1970.
14. WAENY, J.C.C. Distribuição Normal Programa de Aferição Metrológica Interna São Paulo: IPT, da ACM-12, n. 4, p. 1-18, 1979.

15. WAENTY, J.C.C. Repetitividade e Reprodutividade. Programa de Aferição Metroológica
Interna. São Paulo: IPT, da ACM-18, n.5, p.1-18, 1980.

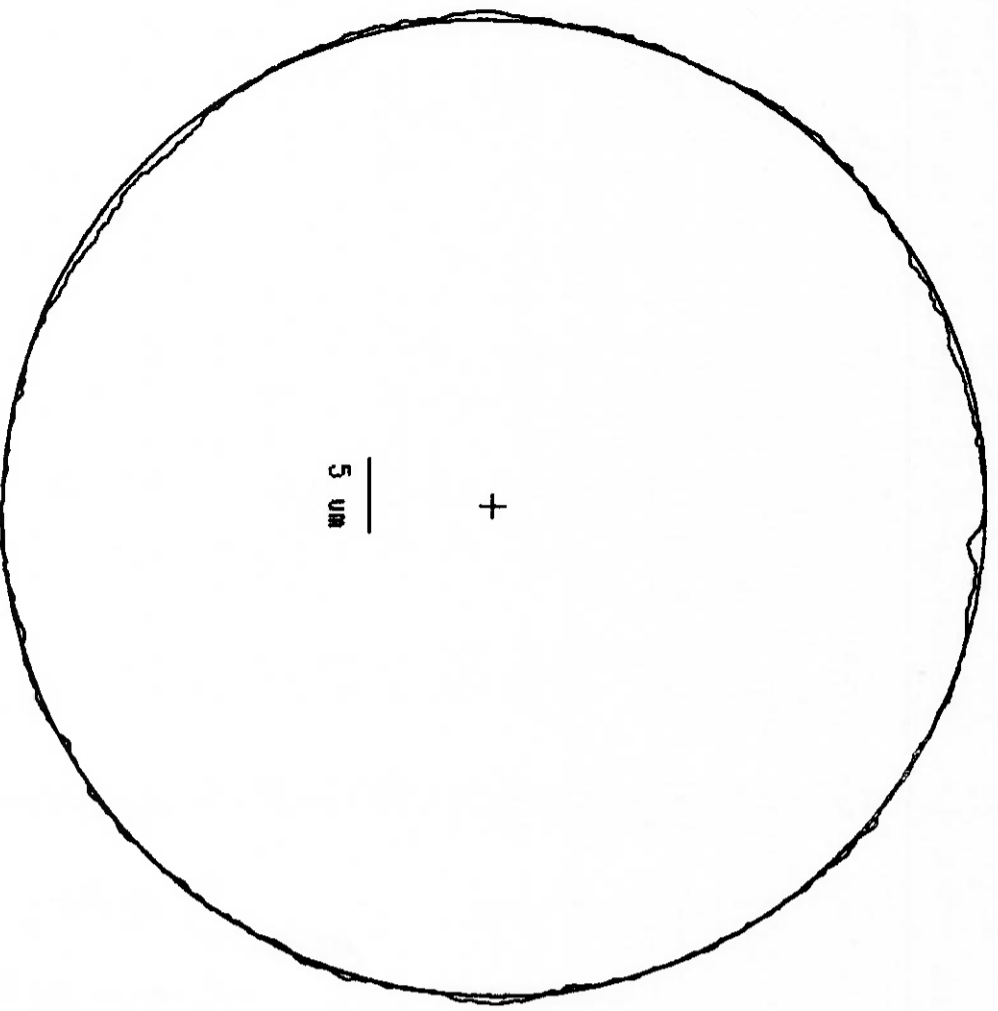
APÊNDICE A

Resultados da aferição geométrica da peça padrão



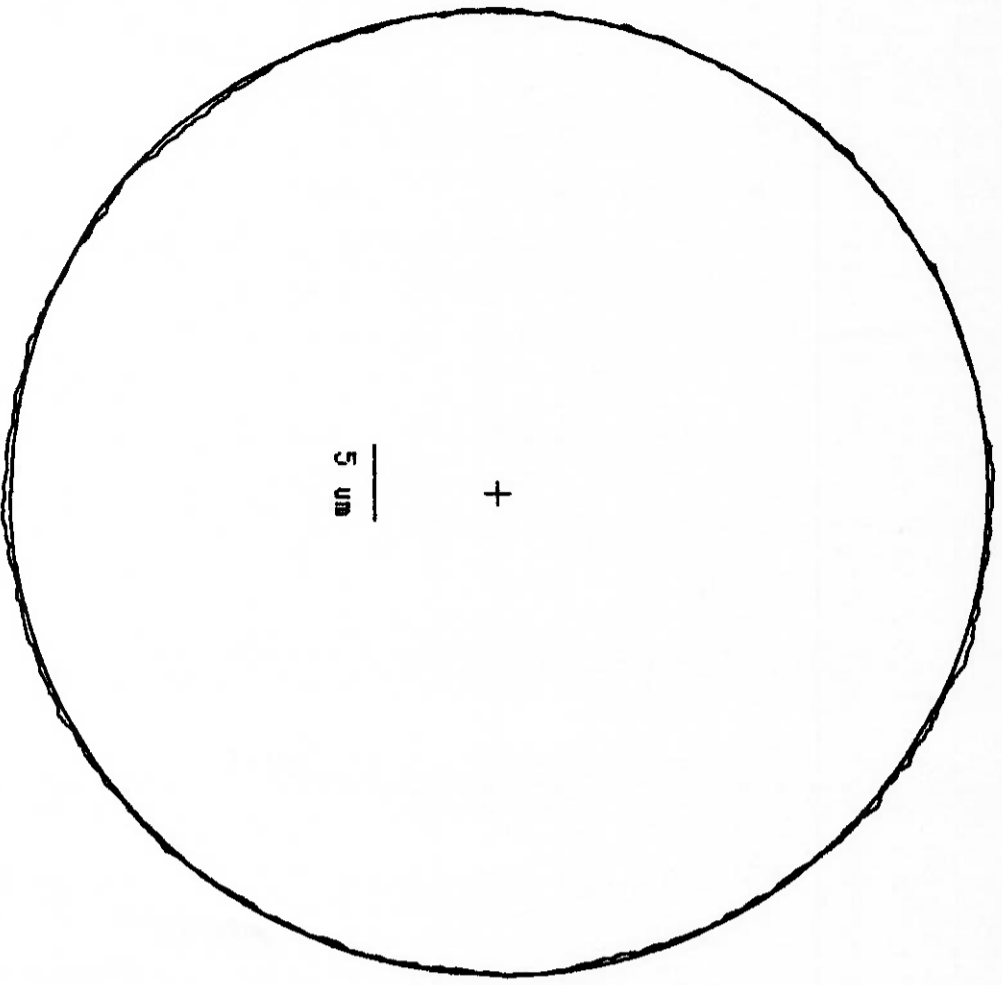
ID : *Peqra Radura*

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| Z height | : | 20.0 mm |
| Measurement mas. | : | x 2000 |
| Display mas. | : | x 2000 |
| Measurement mode | : | Radial (external) |
| Analysis mode | : | Roundness |
| Reference | : | LS |
| Delta radius | : | 3.27 um |
| Peak to valley | : | 2.37 um |
| Eccentricity | : | 1.04 um |
| Eccentricity angle | : | 340 degrees |
| Concentricity | : | 2.08 um |
| Runout | : | 3.94 um |
| Filter | : | Unfiltered |



ID : Peça Padrão

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| Z height | : | 48.0 mm |
| Measurement mag. | : | x 2000 |
| Display mag. | : | x 2000 |
| Measurement mode | : | Radial (external) |
| Analysis mode | : | Roundness |
| Reference | : | LS |
| Delta radius | : | 0.34 um |
| Peak to valley | : | 1.75 um |
| Eccentricity | : | 1.05 um [* |
| Eccentricity angle | : | 170 degrees |
| Concentricity | : | 2.09 um [* |
| Runout | : | 2.99 um [* |
| Filter | : | Unfiltered |



ID : Pez Padro

| | | |
|--------------------|---|-------------------|
| Z height | : | 70.0 mm |
| Measurement mas. | : | x 2000 |
| Display mas. | : | x 2000 |
| Measurement mode | : | Radial (external) |
| Analysis mode | : | Roundness |
| Reference | : | LS |
| Delta radius | : | -6.58 um |
| Peak to valley | : | 1.12 um |
| Eccentricity | : | 1.13 um (*) |
| Eccentricity angle | : | 154 degrees |
| Concentricity | : | 2.27 um (*) |
| Runout | : | 2.82 um (*) |
| Filter | : | Unfiltered |

| | | | | | | | |
|----|------|-------|------|---|------|------|------|
| [* | 40.0 | 3.46 | 0.00 | 0 | 1.75 | 1.77 | 0.00 |
| [| 50.0 | 1.43 | 0.00 | 0 | 1.12 | 1.19 | 0.00 |
| [| 60.0 | -0.81 | 0.00 | 0 | 1.40 | 1.39 | 0.00 |
| [* | 70.0 | -3.46 | 0.00 | 0 | 1.12 | 1.16 | 0.00 |

Z (mm) ∇ (um) Δ (um) \square (um) \angle (deg) \circ (um) \otimes (um)

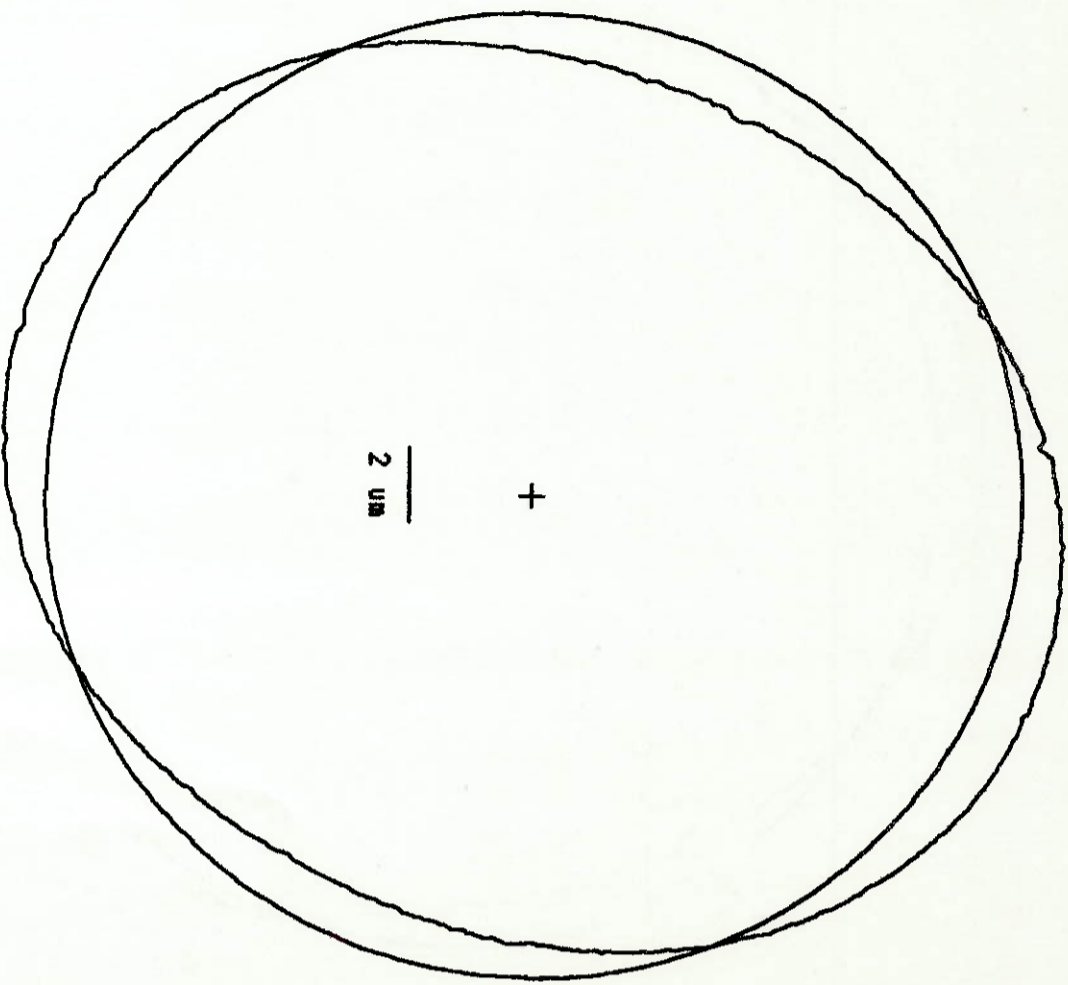
ALL PLANES

ID : Rega Padrao

RESULTS TABLE

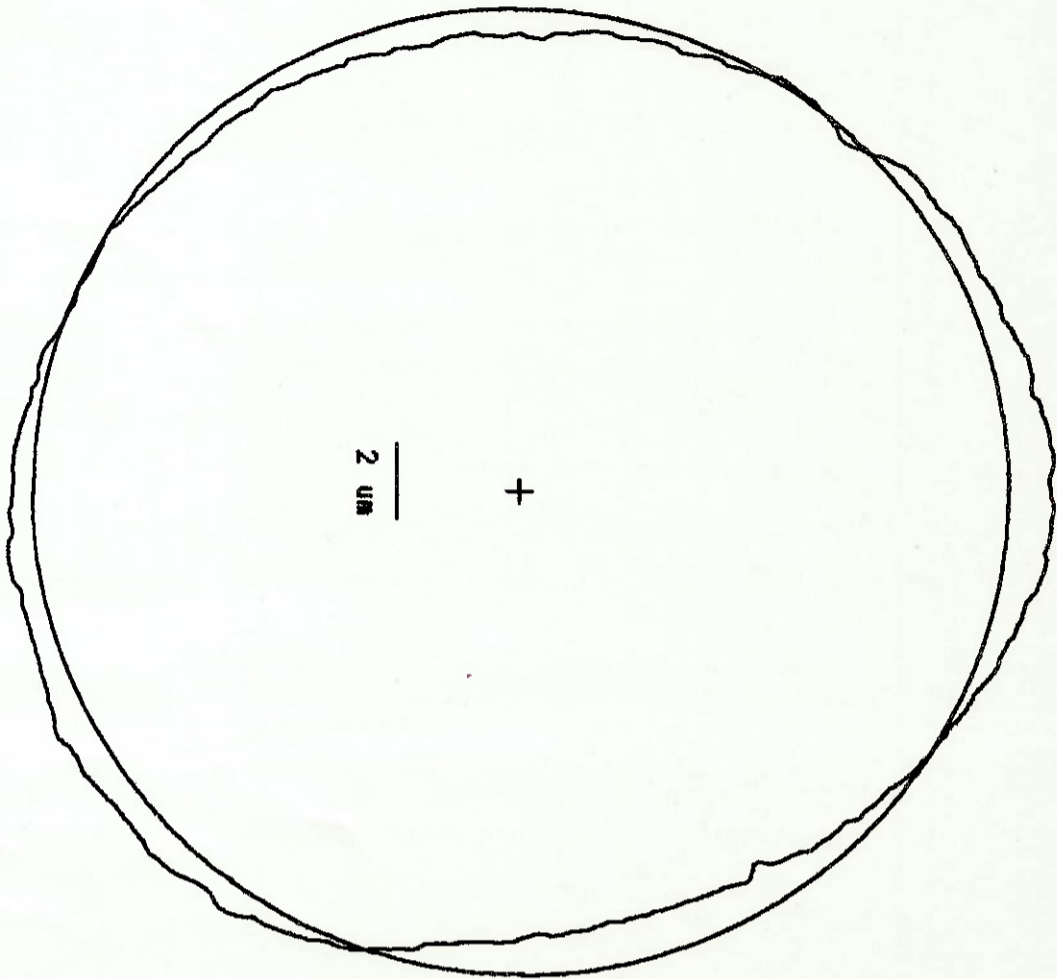
APÊNDICE B

Resultados da medição da circularidade dos roletes e esfera de Interface



ID : Estera de interface

| | |
|--------------------|---------------------|
| Z height | : Not set |
| Measurement mag. | : x 5000 |
| Display mag. | : x 5000 |
| Measurement mode | : Radial (external) |
| Analysis mode | : Roundness |
| Reference | : LS |
| Delta radius | : 0.05 um |
| Peak to valley | : 2.87 um |
| Eccentricity | : 0.62 um |
| Eccentricity angle | : 319 degrees |
| Concentricity | : 1.24 um |
| Runout | : 3.71 um |
| Filter | : Unfiltered |



ID : Bolete de interface

| | |
|--------------------|---------------------|
| Z height | : Not set |
| Measurement mag. | : x 5000 |
| Display mag. | : x 5000 |
| Measurement mode | : Radial (external) |
| Analysis mode | : Roundness |
| Reference | : LS |
| Delta radius | : 0.09 um |
| Peak to valley | : 2.34 um |
| Eccentricity | : 0.20 um |
| Eccentricity angle | : 32 degrees |
| Concentricity | : 0.40 um |
| Runout | : 2.26 um |
| Filter | : Unfiltered |

APÊNDICE C

Resultados da calibração das células de carga

A calibração efetuada nos prisioneiros de pré-carga consistiu em verificar qual a deformação dos prisioneiros para os seguintes esforços de tração: 5kN, 10kN e 15kN. Foram efetuadas 5 séries de medidas e os resultados médios obtidos, encontram-se a seguir:

i) Prisioneiro de pré-carga n° 1:

| Força aplicada (N) | Deformação (μ S) |
|--------------------|-----------------------|
| 5000 | 310 |
| 10000 | 660 |
| 15000 | 960 |

ii) Prisioneiro de pré-carga n° 2:

| Força aplicada (N) | Deformação (μ S) |
|--------------------|-----------------------|
| 5000 | 295 |
| 10000 | 630 |
| 15000 | 930 |

iii) Prisioneiro de pré-carga n° 3:

| Força aplicada (N) | Deformação (μ S) |
|--------------------|-----------------------|
| 5000 | 305 |
| 10000 | 620 |
| 15000 | 930 |

A incerteza dos esforços aplicados foi de ± 100 N
A repetibilidade de leitura dos extensômetros foi de 10μ S