

MIGUEL ANGEL GARCÍA DOMÍNGUEZ

**UM MÉTODO PARA A MONITORAÇÃO DA POSIÇÃO
PLANAR DE UNIDADES FLUTUANTES AMARRADAS.**

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

**São Paulo
1997**

MIGUEL ANGEL GARCÍA DOMÍNGUEZ

**UM MÉTODO PARA A MONITORAÇÃO DA POSIÇÃO
PLANAR DE UNIDADES FLUTUANTES AMARRADAS.**

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

Área de Concentração:
Engenharia Naval.

Orientador:
Prof. Dr. Carlos Alberto Nunes Dias

**São Paulo
1997**

DEDALUS - Acervo - EPMN



31600010111

Aos meus filhos, que têm sido a grande razão e incentivo de meus estudos para melhorar cada dia mais meu aperfeiçoamento técnico-científico. Desejo que meu esforço não seja em vão, sirva de estímulo e possa garantir um futuro melhor que o nosso.

A G R A D E C I M E N T O S

Agradeço de forma especial ao meu orientador Prof. Dr. Carlos Alberto Nunes Dias pelas diretrizes seguras, confiança, paciência, estímulo e dedicação que sempre teve para comigo.

A minha mulher e filhos, pela confiança e incansável compreensão, que tornaram possível controlar minhas saudades, apesar dos milhares de quilômetros de distância que nos separam.

À FAPESP- Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo suporte financeiro outorgado mediante a concessão de bolsa de estudos.

A todos os estudantes cubanos na USP, pela grande solidariedade, ajuda e orientação durante todo o desempenho de meus estudos de Mestrado e, especialmente, a meu grande amigo Regino González Rodríguez, pois sem sua cooperação não teria sido possível estar neste país.

A todos meus professores, das diferentes disciplinas cursadas, pelo nível dos conhecimentos oferecidos, graças aos quais pude conduzir a bom termo esta dissertação.

RESUMO.

Este trabalho aborda o problema do posicionamento de plataformas semi-submersíveis. De início, desenvolveu-se um método para a monitoração em tempo real da posição planar de unidades flutuantes amarradas, partindo das medições das tensões geradas no tópo das linhas componentes do sistema de amarração.

A monitoração da posição planar da unidade flutuante obtem-se através de um programa desenvolvido para esta finalidade. Com o objetivo de poder avaliar o método proposto, utiliza-se uma bancada de ensaio que se constitui de um modelo em escala reduzida da plataforma e de um sistema de sensores dinâmicos para a aquisição e análise das sinais. Finalmente, são apresentados e analisados os resultados de simulações de movimentos efetuados na bancada para avaliar o desempenho do sistema proposto.

ABSTRACT

This work studies semisubmersible platforms positioning problems. A method for real time monitoring of the moored floating units planar position was developed using the information obtained from the measuring of the generated tensions at the top of the mooring system component lines. The method was evaluated with a scale reduced model.

The monitoring of the floating unit planar position is obtained using a software specifically developed for this purpose. For evaluating the proposed method, a testing device composed by a reduced scale model of the platform and a dynamic sensors system to acquire and analyze the signals was used. The outputs obtained from the simulated movements induced in the model in order to evaluate the proposed system performance are presented and analyzed.

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA	i
AGRADECIMENTO	ii
RESUMO	iii
“ABSTRACT”	iv
INDICE	v
LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS	viii
LISTA DE FIGURAS	xii
LISTA DE TABELAS	xiv

INDICE

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 APRESENTAÇÃO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	1
1.2 HISTÓRICO BIBLIOGRÁFICO	6
1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO.....	9
1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.....	10
2. SENSORES E MEDIDORES DE POSIÇÃO	12
2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS	12
2.2 SENSORES ACÚSTICOS	13
2.2.1 SISTEMA LINHA BASE CURTA	14
2.2.2 SISTEMA LINHA BASE LONGA	16
2.3 OUTROS SISTEMAS DE REFERÊNCIA DE POSIÇÃO	17
2.3.1 SISTEMA DE CABO TENSIONADO	17
2.3.2 SISTEMA ACOPLADO À PERFURATRIZ	18
2.3.3 UNIDADE DE REFERÊNCIA INERCIAL	19
2.3.4 SATÉLITES, RÁDIO E MICRO-ONDAS	20

3. CONCEPÇÃO GERAL DO TENSÍOMETRO. CARACTERÍSTICAS GERAIS.....	22
3.1 ANÁLISE DA GEOMETRIA DO TENSÍOMETRO	23
3.2 ANÁLISE DAS FORÇAS NO TENSÍOMETRO.....	26
3.3 ANÁLISE ESTRUTURAL DA VIGA ELÁSTICA DO TENSÍOMETRO.....	27
3.4 DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO FINAL DO TENSÍOMETRO.....	29
3.5 CONCEPÇÃO DA PONTE DE WHEATSTONE PARA O TENSÍOMETRO ..	32
4. BANCADA DE ENSAIOS. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	33
4.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DAS TENSÕES NAS LINHAS DE AMARRAÇÃO	34
4.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL....	35
4.3 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE RESTAURAÇÃO DAS LINHAS DE AMARRAÇÃO.....	37
5. PROGRAMA PARA A DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO PLANAR DA UNIDADE.	46
5.1 PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA POSIÇÃO PLANAR	47
5.2 OBTENÇÃO DOS VALORES EXTREMOS DO ÂNGULO φ	51
5.3 MÉTODO PARA A OBTENÇÃO DO VALOR DE φ_{med}	54
5.4 PATOGENIA DO PROBLEMA GEOMÉTRICO.....	55
5.5 POSIÇÃO DO CENTRO DA GRAVIDADE DA UNIDADE.....	56
6. TESTES DO SISTEMA	59
6.1 TESTES PARA AVALIAR O COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DAS TENSÕES	59
6.2 TESTES PARA AVALIAR O PROGRAMA DESENVOLVIDO	62
6.3 TESTES REALIZADOS PARA AVALIAR O SISTEMA PROPOSTO.....	65
7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	70
7.1 CONCLUSÕES	70
7.2 RECOMENDAÇÕES	71

8. ANEXOS.....	72
ANEXO A. FUNDAMENTOS TEÓRICOS DA EXTENSÔMETRIA ELÉTRICA....	72
ANEXO B. CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DOS TENSÍOMETROS.....	77
ANEXO C. DETERMINAÇÃO DA INTERSECÇÃO DE DUAS CIRCUNFERÊNCIAS.....	88
ANEXO D. LISTAGEM DO PROGRAMA PRINCIPAL	91
ANEXO E. FOTOS DO TENSÍOMETRO E A BANCADA DE ENSAIOS	101
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	103

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS.

CAPÍTULO 1 ATÉ CAPÍTULO 3

- A - Coeficiente do termo quadrático da equação de 2º grau;
- a_1 - Distância entre o eixo do rolamento fixo esquerdo e o eixo do rolamento central;
- a_2 - Distância entre o eixo do rolamento fixo direito e o eixo do rolamento central;
- B - Coeficiente do termo linear da equação do 2º grau;
- b - Largura da seção transversal da viga elástica;
- C - Termo independente da equação do 2º grau;
- d - Diâmetro exterior dos rolamentos;
- E - Modulo de Young;
- F - Reação vertical aplicada sob o eixo que fixa o rolamento central à viga;
- $F_{\text{máx}}$ - Força vertical máxima permissível a ser aplicada no extremo livre da viga;
- FPS - Sistemas de Produção Flutuantes;
- H - Altura que ficam os eixos dos rolamentos fixos da superfície superior da cápsula onde esta engastada a viga elástica;
- h - Altura entre o eixo dos rolamentos fixos e o eixo do rolamento central;
- hr - Distância entre a linha neutra da viga elástica e a reação horizontal R_x ;
- I - Momento de inércia da viga elástica;
- L - Distância do engaste ao ponto de aplicação da reação vertical F;
- L_{RF} - Distância entre os rolamentos fixos do tensiômetro;
- PD - Posicionamento dinâmico;
- R - Força Resultante aplicada sob o eixo que fixa o rolamento central à viga;
- R_x - Reação horizontal aplicada sob o eixo que fixa o rolamento central à viga;
- R_1 - Valor da impedância da resistência 1 da ponte de Wheatstone;
- R_2 - Valor da impedância da resistência 2 da ponte de Wheatstone;
- R_3 - Valor da impedância da resistência 3 da ponte de Wheatstone;
- R_4 - Valor da impedância da resistência 4 da ponte de Wheatstone;
- R_g - Valor da impedância dos extensômetros da ponte de Wheatstone;
- SPD - Sistema de posicionamento dinâmico
- T - Força de tração no topo das linhas obtida pelos tensiômetros;

TWS - Sistema de cabo tensionado;

- t - Espessura da viga elástica;
- X_m - Valor donde a variável X da equação do 2º grau tem o valor mínimo;
- X_1 - Primeira raiz procurada na equação de 2º grau para obter o valor α_1 ;
- X_2 - Segunda raiz procurada na equação de 2º grau para obter o valor α_2 ;
- α_1 - Ângulo entre a horizontal e o cabo de aço no trecho do engaste;
- α_2 - Ângulo entre a horizontal e o cabo de aço no trecho oposto ao engaste;
- β - Ângulo entre a vertical e a força resultante R;
- Δ - Discriminante da equação do 2º grau;
- δ - Deslocamento vertical no extremo livre da viga elástica;
- ε - Deformação unitária junto ao engaste da viga elástica;
- $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ - Deformação unitária máxima junto ao engaste da viga elástica;
- ϕ - Diâmetro do cabo de aço;
- $\bar{\phi}$ - Soma do Diâmetro exterior do rolamento e o diâmetro do cabo de aço;
- σ - Tensão normal máxima de flexão na viga elástica do tensiômetro;
- σ_y - Tensão do escoamento do material da viga elástica do tensiômetro;

CAPÍTULO 4

- A - Altura do triângulo retângulo formado no trecho da linha do ponto de amarração até a poita;
- A/D - Conversor analógico digital;
- D - Distância entre o ponto de amarração o ponto de ancoragem;
- D_1 - Distância entre o ponto de ancoragem e a poita;
- D_2 - Distância entre o ponto de amarração e a poita;
- d - Raio de ancoragem;
- d_1 - Distância no plano horizontal do ponto de ancoragem até a poita;
- d_2 - Distância no plano horizontal da poita até o ponto de amarração;
- H - Componente da força de tração na direção horizontal no ponto de amarração;
- H(d) - Componente da força de tração na direção horizontal em função do raio de ancoragem;
- L_1 - Comprimento do trecho da linha do ponto de ancoragem até a poita;
- L_2 - Comprimento do trecho da linha do ponto de amarração até a poita;
- P - Peso da poita;

- T - Força de tração no ponto de amarração;
- T(d) - Força de tração no ponto de amarração em função do raio de ancoragem;
- T_1 - Força de tração no ponto de ancoragem;
- β - Ângulo formado entre os dois trechos da linha que ficam ambos lados da poita;
- θ_1 - Ângulo formado entre a horizontal e o trecho da linha do ponto de ancoragem até a poita;
- θ_2 - Ângulo formado entre a horizontal e o trecho da linha do ponto de amarração até a poita;

CAPÍTULO 5

- A/D - Conversor analógico digital;
- A(i) - Arestas do quadrilátero que define a forma da plataforma através dos correspondentes pontos de amarração;
- A(φ) - Função ADEFI que calcula a última aresta em função do ângulo φ ;
- A_{14} - Diagonal formada pelas aresta 1 e 4 do quadrilátero da unidade;
- D - Distância entre os centros das duas circunferência que se interceptam na função Inter Cir estabelecida no programa;
- DIST_{OFF} - Amplitude do vetor que define o "OFFSET" da unidade flutuante;
- D_{12} - Distância entre os pontos de ancoragem 1 e 2;
- D_{14} - Distância entre os pontos de ancoragem 1 e 4;
- D_{24} - Distância entre os ponto de ancoragem 2 e 4;
- d(i) - Raios de ancoragem correspondentes a cada ponto de amarração;
- f(φ) - Função que permite a extração das raízes quando a função ADEFI converge com o verdadeiro valor da última aresta A_4 ;
- Ra - Distância que fica o ponto de interseção **a** ao ponto de ancoragem (i+2);
- Rb - Distância que fica o ponto de interseção **b** ao ponto de ancoragem (i+2);
- Xa - Abcissa do ponto de interseção **a** entre as duas circunferências da função Inter Cir do programa;
- Xb - Abcissa do ponto de interseção **b** entre as duas circunferências da função Inter Cir do programa;
- X_G - Coordenada do centro de gravidade da unidade;
- $\bar{X}(i)$ - Abcissa dos pontos de amarração;

- $X(i)$ - Abcissa dos pontos de ancoragem;
- Y_a - Ordenada do ponto de interseção **a** entre as duas circunferências da função Inter Cir do programa;
- Y_{aw} - Ângulo entre a aresta A1 do quadrilátero que define a unidade e o eixo X;
- Y_b - Ordenada do ponto de interseção **b** entre as duas circunferências da função Inter Cir do programa;
- Y_G - Coordenada do centro de gravidade da unidade;
- $Y(i)$ - Ordenadas dos pontos de ancoragem;
- $\bar{Y}(i)$ - Ordenadas dos pontos de amarração;
- θ_{OFF} - Direção do vetor que define o "OFFSET" da unidade flutuante;
- φ - Ângulo entre o raio d_1 e o eixo X no plano dos deslocamentos da unidade;
- φ_{final} - Ângulo final que define o intervalo da função $f(\varphi)$ para obter o mínimo;
- φ_{inc} - Ângulo inicial que define o intervalo da função $f(\varphi)$ para obter o mínimo;
- φ_{med} - Ângulo onde se dá o valor mínimo da função $f(\varphi)$;
- φ_1 - Ângulo onde se dá o valor da primeira raiz da função $f(\varphi)$;
- φ_2 - Ângulo onde se dá o valor da segunda raiz da função $f(\varphi)$;

CAPÍTULO 6

- A/D - Conversor analógico digital;
- g - Aceleração da gravidade;
- L_p - Comprimento do cabo de aço do pêndulo simples;
- RAO - "Response Amplitude Operator";
- τ - Período da oscilações do pêndulo simples;

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Esquema das principais componentes do tensiômetro.....	22
Figura 3.2 Esquema da geometria geral do tensiômetro.....	23
Figura 3.3 Raiz procurada para a obtenção dos valores de α	26
Figura 3.4 Diagrama das forças aplicadas ao rolamento central.....	26
Figura 3.5 Esquema para o análise estrutural da viga elástica.....	28
Figura 3.6 Esquema da conexão da ponte completa do tensiômetro.....	32
Figura 4.1 Esquema geral da bancada de ensaios.....	33
Figura 4.2 Diagrama em blocos do funcionamento da placa CAD 12/32.....	36
Figura 4.3 Esquema geral para a análise da geometria e das forças atuantes na linha de amarração.....	37
Figura 4.4 Esquema geral do procedimento para o levantamento das curvas de restauração das linhas de amarração.....	39
Figura 4.5 Curva típica de restauração da linha No 1.....	44
Figura 4.6 Curva típica de restauração da linha No 2.....	44
Figura 4.7 Curva típica de restauração da linha No 3.....	45
Figura 5.1 Diagrama de blocos simplificado	46
Figura 5.2 Procedimento para a determinação da Posição da Plataforma	48
Figura 5.3 Cálculo das raízes da Função $A(\varphi)$	51
Figura 5.4 Esquema para obter os valores extremos do ângulo φ	53
Figura 5.5 Patogenia do Problema Geométrico.....	56
Figura 5.6 Tela dos resultados obtidos pelo programa na monitoração	58
Figura 6.1 Esquema da instalação para os testes do comportamento dinâmico do sistema.....	60
Figura A1 Ponte de Wheatstone. Circuito para o cálculo da impedância	72
Figura A2 Esquema da conexão da ponte completa do tensiômetro.....	75
Figura B1 Esquema geral da instalação para a calibração estática	80
Figura C1 Interseção de duas circunferências para a função Inter-Cir.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 Leituras obtidas para o arquivo da curva de restauração da linha No 1.....	41
Tabela 4.2 Leituras obtidas para o arquivo da curva de restauração da linha No 2.....	42
Tabela 4.3 Leituras obtidas para o arquivo da curva de restauração da linha No 3.....	43
Tabela 6.1 Valores obtidos na direção <i>X</i> para avaliar o sistema proposto....	67
Tabela 6.1 Valores obtidos na direção <i>Y</i> para avaliar o sistema proposto....	68
Tabela B1 Calibração estática do tensiômetro No 1.....	81
Tabela B2 Calibração estática do tensiômetro No 2.....	82
Tabela B3 Calibração estática do tensiômetro No 3.....	83
Tabela B4 Comportamento do tensiômetro No 1 depois da calibração estática.....	84
Tabela B5 Comportamento do tensiômetro No 2 depois da calibração estática.....	85
Tabela B6 Comportamento do tensiômetro No 3 depois da calibração estática.....	86
Tabela B7 Comportamento da estabilidade da medição dos tensiômetros....	87
Tabela B8 Características técnicas dos tensiômetros.....	87

1. INTRODUÇÃO.

1.1 APRESENTAÇÃO E DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.

No início dos anos 50 a prospecção e a produção do petróleo estenderam-se para a plataforma continental dos países. Dia a dia, a contínua necessidade de incremento da produção de petróleo, a nível mundial, incentivou as pesquisas em bacias oceânicas e a conseqüente descoberta de reservatórios de petróleo localizados no subsolo da plataforma continental, motivando as grandes companhias petrolíferas a tornarem viável a exploração destes campos.

Para pequenas profundidades, duas soluções foram adotadas com relativo sucesso: plataforma rigidamente fixa ao fundo marinho e plataforma flutuante com caráter itinerante ou temporário.

A segunda opção, conhecida como plataforma submersível, consiste em unidades flutuantes que, através de operações de lastro, são capazes de se apoiar no fundo do mar para a realização de algum tipo de operação, como também mudar de locação com auxílio de rebocadores.

No caso de operações de produção, que implicam numa permanência longa na locação, chegando a até 20 anos , as estruturas empregadas são normalmente as plataformas fixas, enquanto, para as operações temporárias de curta permanência, em geral não ultrapassando 1 ano, como é o caso das

operações de prospecção, pesquisa, perfuração e completção de poços, a plataforma submersível é a mais indicada.

Com o passar dos anos, e o advento de novas descobertas em lâminas d'água mais profundas, tornou-se necessária a utilização de plataformas flutuantes semi-submersíveis. A plataforma semi-submersível, uma derivação da plataforma submersível, diferencia-se desta pela filosofia empregada no que diz respeito à manutenção de sua posição na locação . Enquanto a plataforma submersível utiliza sua própria inércia como elemento de fixação, a plataforma semi-submersível tem que dispor de outros meios que viabilizem o seu posicionamento, garantindo a integridade dos dispositivos que unem a plataforma ao poço produtor [1].

Um corpo flutuando livremente no meio marinho tende a apresentar movimentos de translação e rotação, resultantes da ação de forças e momentos induzidos por ventos, ondas e correntes.

Por outro lado as operações realizadas no mar é comum a necessidade de se manter um veículo posicionado num determinado sítio, à despeito daqueles agentes ambientais.

Para se manter um veículo posicionado nas condições descritas acima, usou-se e usa-se ainda intensivamente o processo de **“amarração”**. Neste processo um veículo qualquer é mantido numa posição desejada por meio do uso de cabos de aço, que praticamente o ancoram ao fundo do mar.

Neste sentido, com o intuito de contrabalançar os esforços ambientais atuantes, duas alternativas podem ser empregadas, dependendo da atividade principal da unidade:

- a) sistema de posicionamento dinâmico (SPD) que consiste em **“thrusters”** azimutais com o objetivo de fornecer o empuxo necessário para minimizar o deslocamento da unidade e fazê-la retornar à posição desejada, e;
- b) sistemas de ancoragem por linhas em forma de catenária, unindo a plataforma ao fundo do mar que, através de mudança de configuração, fornecem as forças necessária para manter a unidade de produção na posição desejada.

Ambos sistemas podem garantir o posicionamento da unidade flutuante em condições ambientais normais e extremas, segundo previsão de projeto.

A primeira concepção, devido à sua grande flexibilidade operacional, adapta-se bem às atividades que possuem um caráter temporário, enquanto a segunda concepção aplica-se, principalmente, a sistemas permanentes, quando não se justifica o alto consumo de óleo diesel dos sistemas de posicionamento dinâmico.

Recentes descobertas de importantes bacias marítimas de petróleo em águas profundas, dentre as quais, no caso de Brasil, destaca-se o campo de Marlin e Albacora, localizados respectivamente a 1000 e 1500 m de profundidade, conduziram ao uso de Sistemas de Produção Flutuantes (FPS)

para tornar viável, tanto técnica como economicamente, a exploração em águas de até 2000 metros de profundidade [2].

Um dos fatores cruciais, para a viabilização destes sistemas de produção, é a manutenção do seu posicionamento que, de forma permanente, deve garantir a segurança das operações sob as ações ambientais de ondas, ventos e correntezas.

Nesse contexto, revestem-se de extrema relevância a análise e o cálculo do sistema de amarração, a empregar no posicionamento seguro e preciso da unidade flutuante, uma vez que vários dispositivos, unindo a plataforma aos equipamentos de subsuperfície, são de utilização delicada.

Os deslocamentos dos pontos da amarração na plataforma, imposto pelos movimentos desta, causam tensões médias e oscilatórias em cada uma das linhas que, a bem da segurança, devem estar sob limites considerados aceitáveis, quer seja em termos da resistência estática, quer seja sob a ótica da vida em fadiga de cabos e correntes.

Atualmente, diversos Centros de Pesquisas tem dedicado especial atenção ao desenvolvimento de sistemas de análise para prever o comportamento dinâmico do sistema de amarração; não somente em termos de previsão de forças de tração no topos das linhas, mas também em termos de verificação da resistência e vida útil dos diversos elementos que compõem esse sistema.

Nesse âmbito, a verificação experimental dos resultados teóricos pode ser executada através do registro em campo das cargas de tração atuantes no

topo das linhas componentes do sistemas, contabilizando-se seus valores máximos, médio e mínimo em um dado período de tempo, como função dos deslocamentos da Plataforma. Dessa forma, o desenvolvimento de um sistema computacional, que permita o registro em tempo real destas tensões dinâmicas com seus componentes de alta e baixa frequência, além de ser um grande avanço no sentido de obter-se dados experimentais que permitirão validar as normas aplicadas ao projeto de sistemas de amarração, poderá ser utilizado para estabelecer um processo de monitoração da posição planar da unidade flutuante em função das tensões médias obtidas no topo das linhas.

Assim, de posse de um sistema confiável para o registro das cargas atuantes nas linhas de amarração, pode-se desenvolver um sistema computacional que permita a monitoração do posicionamento da plataforma no plano da linha d'água, em relação a um referencial pré-determinado. Uma vez que, como procedimento usual de operação, é de grande importância verificar se a movimentação lateral da plataforma está dentro dos limites permissíveis dos equipamentos que fazem a ligação do poço submarino à unidade flutuante.

Atualmente, a monitoração do posicionamento de plataformas semi-submersíveis vem sendo feita pela PETROBRÁS, na grande maioria dos casos, mediante a utilização de um emissor acústico que, além do alto custo, tem erro da ordem de 1% da lâmina d'água de operação da unidade flutuante. Particularmente em águas profundas, tal erro de posicionamento, sobre alguns alvos específicos, pode ser considerado alto.

O desenvolvimento do presente trabalho visa, em primeira instância, o dimensionamento, a fabricação e o teste em laboratório de um modelo, em escala reduzida, para sensor extensiométrico que permita o registro das cargas dinâmicas atuantes nas linhas de amarração, possibilitando adicionalmente a monitoração da posição planar da unidade flutuante. Isto se faz mediante o uso de um programa de computador desenvolvido para este fim, tendo por base exclusivamente a configuração do sistema de amarração e as trações médias atuantes no topo das linhas. Opta-se, inicialmente, pelo projeto de um modelo em escala reduzida, constituído só de três sensores, tendo em vista a maior facilidade de verificação experimental em laboratório do correto funcionamento do sistema, sob os pontos de vista de precisão da aquisição e análise dos sinais.

1.2 HISTÓRICO BIBLIOGRÁFICO.

Os anos sessenta marcam o início do desenvolvimento de projetos objetivando a aplicação do “Sistemas de Posicionamento Dinâmico (SPD)”.

A pesquisa desenvolvida por McClure [3] para o projeto Mohole, trata pela primeira vez do problema de posicionamento dinâmico para uma plataforma semi-submersível. Embora o projeto não tenha sido implementado, atribui-se a ele o importante mérito de fazer avançar o estado-da-arte na época.

Posteriormente nos meados da década de sessenta, o sistema primitivo foi sofisticado pela inclusão de um controlador automático centralizado em um

computador instalado a bordo do veículo. Esta sofisticação aumentou a precisão do posicionamento e permitiu que o sistema operasse continuamente por longos períodos de tempo. Desta forma o posicionamento dinâmico automático tornou-se uma realidade e uma alternativa plausível ao sistema de amarras.

O sistema de controle digital substituiu com vantagens o analógico no comando das atividades de controle, principalmente devido à sua maior versatilidade e compacidade. O desenvolvimento dos microprocessadores com programas permanentes viabilizarão cada vez mais o SPD, principalmente no que se refere à redução de custos com o capital inicial.

Os trabalhos de Morgan [4], Triantafillou [5], English e Wise [6] e English e Haavie [7] são cronologicamente posteriores e também apresentam estudos detalhados para o posicionamento dinâmico (PD). Morgan apresenta as técnicas de controle para SPD, abordando o tópico referente ao controle moderno. Triantafillou em um trabalho bastante completo para sobre SPD para navio, resolve o problema de controle usando técnicas do domínio de frequências para sistemas multivariáveis ao igual que English e Wise [6] ; posteriormente o mesmo procedimento é aplicado por English e Haavie [7], para o controle de uma plataforma semi-submersível .

Existem, por outro lado trabalhos estritamente prático que apresentam resultados experimentais de aplicação de SPD em plataformas, porém pouco informam sobre as técnicas de controle por ele utilizadas. Este é o caso dos

trabalhos de Hammet [8], [9] e [10], Skinner [11], Harbonn [12] e Sjouke e Lagers [13].

Diversos trabalhos se concentram nas componentes do SPD; alguns são relativo ao uso dos sensores e medidores de posição e condições ambientais: Stockton [14], Neudoefer [15] e Roberts [16] abordam os sensores de referência acústica. Dennis [17] apresenta um procedimento para a determinação de posição pelo uso de radar e Buechler [18] estima a posição por meio de uma dupla integração da aceleração da plataforma através de um modelo matemático desenvolvido no domínio de frequência, onde as acelerações são fornecidas por acelerômetros convenientemente montados na plataforma.

No caso de sensores e medidores de posição a referência [19] apresenta os equipamentos mais freqüentes utilizados no (SPD), assim como o esboço matemático representativo da ação dos tipos mais importantes, para os medidores de tensões as referencias [20], [21], [22], apresentam o sistema de medição de tensões médias atuantes em linhas de amarração de plataformas semi-submersíveis desenvolvido pela empresa Martin & Decker . Tal sistema é utilizado para monitoração das tensões nas amarras da Plataforma PETROBRÁS P-XIII (SS20). Nestas referências encontram-se detalhadamente descritos o esquema de equipamento de medição, seu funcionamento, seu ajuste e calibração.

Para o caso de métodos, equipamentos, calibração estática e dinâmica de instrumentos de medição a referência [23] aborda claramente estes aspectos,

mostrando a metodologia a seguir para a calibração dos instrumentos, assim como, exemplos de algumas das possíveis soluções a ser utilizadas para a realização de medições mecânicas na engenharia.

1.3 OBJETIVOS DO TRABALHO.

Em decorrência do que se expôs, o trabalho teve como objetivos fundamentais:

- Desenvolvimento de um sensor extensométrico, denominado Tensiômetro, para a medição da tensão dinâmica em um cabo de amarração.
- Desenvolvimento e implantação de um sistema computacional de aquisição de sinais, a ser aplicado quando do registro temporal da variação da carga de tração e capaz de fornecer resultados em tempo real, a ser aplicado em conjunto com o tensiômetro na bancada de ensaios.
- Desenvolvimento de um programa de computação que permita o cálculo da posição planar da unidade flutuante, em função da variação das tensões médias no topo das linhas de amarração.
- Realização de ensaios experimentais que permitam a avaliação da confiabilidade do tensiômetro, como elemento principal do sistema de monitoração da unidade flutuante.
- Montagem de uma bancada de ensaios, em escala reduzida, que permita testar e avaliar o desempenho do método e do sistema proposto.

1.4 APRESENTAÇÃO DO TRABALHO.

Para sua apresentação, o trabalho foi subdividido em capítulos que abrangem os tópicos delineados a seguir.

No capítulo 2 é dedicado aos tipos de sensores e medidores da posição da plataforma. É apresentado, também uma breve descrição das características dos equipamentos mais freqüentemente usados no Sistema de Posicionamento Dinâmico, permitindo obter uma avaliação dos mesmos sob o ponto de vista da precisão e tempo de resposta, requisitos de extrema importância para o caso do aumento da lâmina de água.

No capítulo 3 são apresentadas a concepção geral do tensiômetro, e suas características fundamentais, cobrindo análise das forças atuantes, o dimensionamento final do mesmo e finalmente apresenta-se o circuito da ponte de Wheatstone utilizado para a medição da deformação da viga elástica engastada, pelo método da extensometria elétrica.

No capítulo 4 trata-se da concepção geral da bancada de ensaios, dos principais componentes da mesma, das hipóteses consideradas no modelo em escala reduzida, do sistema de aquisição e análise das tensões, descrevendo-se, descrevendo toda sua montagem e o procedimento utilizado para o levantamento das curvas de restauração das linhas de amarração.

No capítulo 5 trata-se da teoria necessária ao cálculo da posição planar da unidade flutuante, estabelecendo o sistema de equações derivado das relações geométricas segundo o procedimento desenvolvido para o

posicionamento, assim como, dos métodos numéricos implantados para a obtenção da solução dessas equações. Finalmente, mostram-se as características fundamentais e a tela com os resultados obtidos pelo programa para monitoração.

No capítulo 6, apresentam-se os testes realizados separadamente para o sistema de aquisição e análise das tensões e para o programa desenvolvido, sendo apresentados e analisados os resultados dos diversos testes efetuados.

Por último, através da bancada de ensaios, resultados numéricos e experimentais são confrontados de sorte a estabelecer-se uma avaliação de engenharia para o sistema proposto.

O sétimo e último capítulo é reservado para conclusões e recomendações do trabalho.

2. SENSORES E MEDIDORES DE POSIÇÃO.

2.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS.

Para que o posicionamento dinâmico (PD) possa ser monitorado em tempo real é preciso conhecer-se parâmetros ligados ao comportamento da plataforma e aos agentes ambientais que estão atuando sobre ela. Os equipamentos usados na atividade de medir e calcular tais parâmetros são aqui chamados sensores e medidores de posição.

Como as informações obtidas por tais equipamentos são diretamente utilizadas pelo sistema que será o encarregado de controlar o posicionamento da unidade, as figuras de mérito na escolha dos sensores e medidores são a precisão e a rapidez na geração dos dados.

Há muito tempo estes sensores e medidores vem sendo usados na navegação convencional, havendo apenas a necessidade de adaptá-los ou aperfeiçoá-los para as condições específicas do PD.

Para a obtenção de dados relativos as translações e parâmetros a ela associados empregam-se os seguintes equipamentos:

- sensores de referência acústica;
- sistema de cabo tensionado;
- sistema acoplado ao “riser”(tubulação de perfuração);
- satélites;

- radares e microondas.

Os dados relativos as rotações da plataforma, bem como a estimação das velocidades e acelerações angulares são basicamente efetuadas pelos giroscópios.

No aspecto da determinação do comportamento da plataforma a aplicação do sensor acústico é o mais utilizado, por seu custo relativo baixo, pela alta precisão e capacidade de fornecimento de dados continuamente. Outros equipamentos, de características não tão boas para o PD, são usados de modo a complementar ou suprir as falhas dos sistemas acústicos [19].

2.2 SISTEMAS ACÚSTICOS.

Basicamente efetua-se o sensoriamento por meio acústico através da medida da distância entre uma fonte sonora e vários dispositivos receptores, ou inversamente, de varias fontes sonoras e um dispositivo receptor. Para se fazer a medida a que se referiu, um pulso de alta frequência é emitido pela fonte sonora. Este pulso se propaga pela água sendo recebido num dispositivo dito "receptor". O tempo de viagem do sinal sonoro entre a fonte e o receptor é utilizado para a determinação da distância que os separa, e em última instancia determina o movimento de toda a plataforma relativamente a um ponto fixo no fundo do mar, geralmente a entrada do poço de petróleo.

Há fundamentalmente dois tipos de sistemas acústicos para o sensoriamento da posição: o de linha base curta("short baseline") [24] e o de

linha base longa (“long baseline”), existindo ainda variações e combinações que compõem diversas opções de monitoração de posição.

Duas distinções devem ainda ser feitas, dependendo se é conhecido ou não o instante de emissão do pulso acústico. Quando este instante é conhecido, aplicar-se-á a opção do “rastreamento esférico”(intersecção de superfícies esféricas). Em caso contrário há necessidade de usar-se o “hiperbólico” (intersecção de superfícies hiperbólicas).

2.2.1 SISTEMA ACÚSTICO DE LINHA BASE CURTA.

O sistema acústico de linha base curta requer menos equipamento e cuja operação é a mais simples, sendo possível construir-se um sistema “curto” com apenas um pulsador localizado no fundo do mar, um receptor no veículo, um controlador e uma unidade acionadora.

O sistema de linha base curta apresenta três variações, que requerem ferramental distinto:

- sistema pulsador ;
- sistema transdutor ;
- sistema comparador de fase [25].

O sistema pulsador constitui-se de um pulsador localizado no fundo do mar que emite pulsos acústicos em intervalos regulares. A captação dos pulsos é feita por um ou mais receptores geometricamente dispostos sob o casco do

veículo. Costuma-se usar três receptores (hidrofonos) para a captação do sinal sonoro, sendo que por medida de segurança um quarto poderá ser agregado ao conjunto. Também por segurança o elemento pulsador poderá ser duplicado.

A segunda variação do sistema “curto”, o sistema “transdutor”, possui basicamente os mesmos elementos do sistema anterior, à exceção do pulsador. Neste sistema o pulsador é substituído por um equipamento que apenas emite sinais quando interrogado pela unidade de bordo. Aqui, um pulso acústico é emitido de bordo vai até a unidade submarina, onde provoca a emissão de um outro pulso de frequência diferente, o qual volta ao veículo sendo captado pelo(s) hidrofone(s).

O terceiro e último dos sistemas “curtos”, o sistema comparador de fases, opera tanto com um pulsador quanto com um transdutor instalado no fundo do mar.

O que distingue este sistema dos dois anteriores é o equipamento de recepção, que ao invés de medir a diferença no tempo de chegada do impulso, mede a diferença de fases.

Uma importante qualidade do sistema comparador de fases é sua compacidade. Enquanto nos dois sistemas acústicos anteriormente apresentados a distância mínima recomendável entre hidrofonos é de 12 metros, no sistema comparador de fases ela pode ser reduzida apenas 70 cm. Desta forma é possível instalar-se todo o conjunto receptor num único

hidrofone com reflexos positivos sobre o custos, precisão e tempo de instalação. A calibração do hidrofone pode ser feita em laboratório, ao contrário dos sistemas anteriores que exigem calibração no campo.

2.2.2 SISTEMA DE LINHA BASE LONGA.

Recordando passagem anterior, o sistema de linha base longa determina a posição do veículo relativamente a uma grade de “transdutores” colocada no fundo do mar.

Esta técnica garante maior precisão em relação ao sistema “curto” quando os afastamentos da plataforma, em relação ao ponto de referência, são grandes.

Para a captação do impulso sonoro há necessidade de apenas um hidrofone a bordo, o qual estando bem colocado dispensará as correções devido aos movimentos angulares.

Na realidade são necessários apenas três transdutores, sendo que um quarto poderá ser agregado por precaução, garantindo redundância de medidas e automonitoração do sistema.

Para um bom funcionamento do sistema de linha base longa recomenda-se uma calibração acurada da grade de “transdutores”. A obtenção de dados sobre o posicionamento é controlado de bordo através da emissão de pulsos(interrogações) para os “transdutores”, mas ao contrario do sistema

“curto”, novos pulsos não poderão ser emitidos antes que a resposta de todos os elementos da grade seja conhecida. Em aplicações onde a profundidade é muito grande, isto pode representar um problema pelo intervalo muito grande entre informações. Por exemplo, para profundidade de 4000 metros as interrogações só poderão ocorrer a cada dez segundos [4], o que é um tempo muito alto para o PD.

Uma comparação com o sistema de linha base curta, o sistema longo apresenta vantagem no que se refere a precisão em águas profundas e desvantagens quanto ao aspecto de calibração, tempo da resposta, e instalação devido ao grande número de elementos a instalar.

2.3 OUTROS SISTEMAS DE REFERÊNCIA DE POSIÇÃO E MEDIÇÃO.

A geração de dados relativos à posição da plataforma pode, alternativamente aos sistemas acústicos, ser feita por sistemas eletromecânicos e eletromagnéticos.

Os sistemas eletromecânicos mais empregados em SPD são os de cabo tensionado, os aqui chamados “inclinômetros” (“inclinometers”) acoplados ao tubo de perfuração (“riser”).

2.3.1 SISTEMAS DE CABO TENSIONADO (TWS).

Este sistema eletromecânico também é conhecido como TWS (“taut wire system”). Basicamente, o sistema compõe-se de um cabo, mantido sob tensão

constante, a partir do qual se efetuam medidas de inclinação mecanicamente, transmitidas ao processador digital central eletricamente. O cabo de aço que liga a plataforma a âncora colocada no fundo do mar é mantido numa tensão constante por um dispositivo que fornece maiores extensões de cabo quando necessário e permite o recolhimento do mesmo em operação inversa. Portanto o cabo não influi nos movimentos da plataforma.

O sensor de ângulo do cabo está colocado a bordo, onde também estão arranjos dispositivos destinados a eliminar as influências do jogo e do caturro. O sensor de ângulos compõe-se de dois inclinômetros tipo pêndulo, ortogonalmente arranjos, a partir dos quais e de um potenciômetro enviam-se sinais elétricos ao SPD.

Normalmente emprega-se o TWS em combinação com o sistemas de referência acústica. A calibração do sistema de cabo tensionado é feita geralmente pelo sistema acústico, o que determina a existência de erros constantes ("bias errors") nas suas estimativas, características físicas do sistema de cabo.

2.3.2 SISTEMA ACOPLADO À PERFURATRIZ.

O sistema, que aqui se chama de "perfuratriz", é na realidade o duto flexível de grande diâmetro que contém a broca de perfuração e o líquido lubrificante usado para limpar as partes cortantes, lubrificar todo o conjunto e controlar a pressão do poço. Por questão de simplicidade, o referido conjunto

será aqui chamado de perfuratriz. Este sensor é conhecido também por MRS (“marine riser system”).

A perfuratriz é conectada a entrada do poço por meio de uma junta flexível chamada junta-bola (“ball joint”). Para a perfuração é muito importante conhecer-se o ângulo entre a referida junta e a perfuratriz. Por isso este ângulo é medido continuamente por um processo eletromecânico. O sensor usado para este fim é um inclinômetro de dois canais, semelhante ao usado no TWS.

Transmite-se o ângulo medido eletricamente para o sistema de bordo e, com o conhecimento da distância vertical entre a junta-bola e o ponto de entrada da perfuratriz no veículo, pode-se determinar a posição do veículo.

2.3.3 UNIDADE DE REFERÊNCIA INERCIAL.

Para profundidades superiores a 2000 metros os sensores acústicos e eletromecânicos apresentados na seção anterior tornam-se menos confiáveis, havendo necessidade inclusive de rejeição de dados gerados por estes sistemas.

A referência [18] apresenta uma solução para estes casos, que seria a unidade de referência inercial (inertial reference unit”), que proveria dados de posição temporariamente para SPD, quando os dados dos sistemas anteriormente fossem desqualificados.

O sistema inercial gera estimativas de posição a partir da integração sucessivas de acelerações e velocidades medidas. As constantes de integração que são a velocidade e a posição iniciais devem ser fornecidas ao sistema, sendo que as informações de acelerações são fornecidas por três acelerômetros montados num giroscópio.

A posição é estimada a partir dos dados dos acelerômetros, mediante um programa de estimação ótima implantado no computador digital de bordo calibra-se inicialmente o sistema inercial, calculando seus erros de estimativa de posição e velocidade da plataforma em relação aos dados fornecidos pelo sistemas acústicos e eletromecânicos apresentados anteriormente. Esta calibração pode ser feita em apenas 3 horas. Informações para a elaboração do referido programa de estimação são encontradas na referência [18].

2.3.4 SATÉLITES, RÁDIO E MICRO - ONDAS.

Os estimadores de posição apresentados nessa seção são tidos como secundários na geração de dados SPD, devido principalmente à precisão.

A referência por rádio utiliza três estações transmissoras em posições geográficas conhecidas, sendo uma delas considerada a matriz. Pela emissão contínua de pulsos acústicos, cria-se uma grade hiperbólica entre as referidas estações. Uma plataforma colocada no interior dessa grade pode ser localizada com certa precisão. A grade hiperbólica é classificada em três tipos, dependendo do raio de ação dos transmissores:

- pequeno alcance (até 50 km); é mais precisa e de maior potencial para aplicação no SPD;
- médio alcance (até 750 km);
- longo alcance (até 2000 km) que são excessivamente imprecisas para SPD.

A configuração de pequeno alcance consiste de dois transdutores montados num veículo auxiliar e de um terceiro na plataforma cuja posição se quer determinar.

A monitoração por satélite também é feita usando a propagação de ondas de rádio, e é similar ao sistema de rádio anteriormente descrito. Fundamentalmente a diferença está em que o satélite faz as vezes das três estações de rádio, pois descreve uma trajetória conhecida. A precisão do sistema é determinada pelo número de mensagens recebidas, havendo limitações para esse número impostas pela localização ou interferências.

Encontra-se na referência [17] os resultados do uso de satélites na estimativa de posição de veículos com vistas ao SPD.

3. CONCEPÇÃO GERAL DO TENSÍOMETRO. CARACTERÍSTICAS GERAIS.

Para satisfazer as características e requisitos técnicos da medição das tensões nas linhas de amarração das plataformas flutuantes, toma-se, como âmago do “*tensiômetro extensométrico*”, um dispositivo cujo elemento de deformação é uma viga elástica de aço inoxidável, engastada em um de seus extremos e submetida a um esforço de flexão. A medição das tensões é feita mediante o método da extensometria elétrica, através da ponte completa de Wheatstone, de modo a garantir “*a auto compensação térmica*”.

Na figura 3.1 mostra-se um esquema geral dos principais componentes do tensiômetro, tendo como objetivo a análise de seu elemento principal, a viga elástica 3.

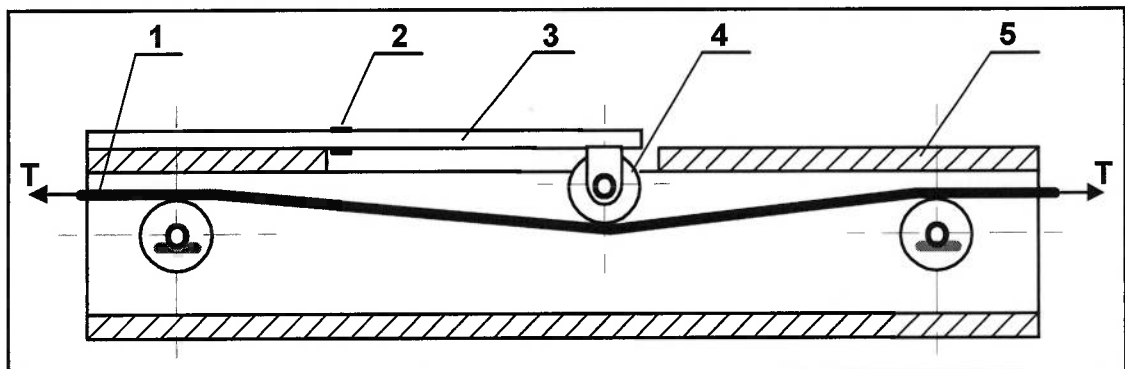


Figura 3.1 Esquema das principais componentes do tensiômetro.
1) cabo de aço; 2) extensômetros; 3) viga elástica;
4) rolamentos; 5) cápsula estrutural.

Da figura pode-se observar que o tensiômetro está concebido para que a linha de amarração possa ser incorporada sem necessidade de interrompe-la. No desenho final do protótipo proposto, existe uma tampa que pode ser desmontada da cápsula metálica 5 e, desta forma, ficam a descoberto os três

rolamentos 4 por onde passa a linha de amarração da qual pretende-se medir a tensão (T).

3.1 ANÁLISE DA GEOMETRIA DO TENSIOMETRO.

De sorte a estabelecer as equações que relacionam a deformação (ε) com a tração (T) da linha, na figura 3.2 mostra-se um esquema da geometria geral do tensiômetro, o qual nos permitirá definir as relações principais e obter as equações fundamentais para o dimensionamento do tensiômetro a partir do equilíbrio das forças atuantes.

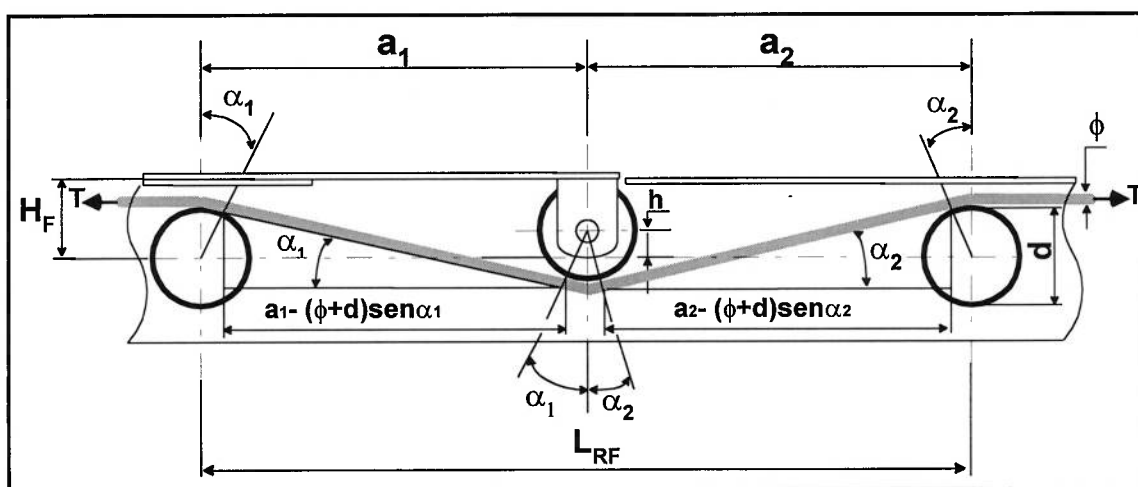


Figura 3.2 Esquema da geometria geral do tensiômetro.

Tomaremos para o análise o caso mais geral no qual as distâncias a_1 e a_2 , entre os rolamentos que compõem o tensiômetro, sejam desiguais, sendo d o diâmetro exterior do rolamento, ϕ o diâmetro do cabo de aço, H_F a distância que ficam os eixos dos rolamentos fixos da superfície superior da cápsula onde esta engastada a viga elástica e h é a distância entre o eixo dos rolamentos

fixos e o eixo do rolamento central. Note-se que uma variação no valor da tensão T provocará variação na distância h , portanto, produzir-se-á um deslocamento vertical δ no extremo livre da viga elástica.

Do esquema da figura 3.2, por razões geométricas temos :

$$\tan\alpha_1 = \frac{\frac{d}{2} \cos\alpha_1 + (\phi + \frac{d}{2}) \cos\alpha_1 - h}{a_1 - \frac{d}{2} \operatorname{sen}\alpha_1 - (\phi + \frac{d}{2}) \operatorname{sen}\alpha_1}$$

que simplificada fornece:

$$\tan\alpha_1 = \frac{(\phi + d) \cos\alpha_1 - h}{a_1 - (\phi + d) \operatorname{sen}\alpha_1} \quad (3.1.1)$$

e analogamente:

$$\tan\alpha_2 = \frac{(\phi + d) \cos\alpha_2 - h}{a_2 - (\phi + d) \operatorname{sen}\alpha_2} \quad (3.1.2)$$

donde, após transformações algébricas, obtêm-se as equações:

$$a_1 \operatorname{sen}\alpha_1 + h \cos\alpha_1 = \phi + d \quad (3.1.3)$$

$$a_2 \operatorname{sen}\alpha_2 + h \cos\alpha_2 = \phi + d \quad (3.1.4)$$

úteis ao cálculo de α_1 e α_2 .

A solução das equações (3.1.3) e (3.1.4), na forma genérica

$$a_i \operatorname{sen}\alpha_i + h \cos\alpha_i = \phi + d \quad \text{para } i=1,2. \quad (3.1.5)$$

parte das seguintes mudanças de variáveis

$$X = \operatorname{sen}\alpha_i \Rightarrow \alpha_i = \operatorname{arc} \operatorname{sen} X \quad (3.1.6)$$

$$\bar{\phi} = \phi + d \quad (3.1.7)$$

tal que

$$a_i X + h\sqrt{(1-X^2)} = \bar{\phi} \quad (3.1.8)$$

donde

$$(\bar{\phi} - a_i X)^2 = h^2 (1-X^2) \Rightarrow (a_i^2 + h^2)X^2 - 2a_i\bar{\phi} X + (\bar{\phi}^2 - h^2) = 0 \quad (3.1.9)$$

que posta em forma de equação de 2^{do} grau, resulta em:

$$A X^2 + B X + C = 0 \quad (3.1.10)$$

$$A = a_i^2 + h^2 > 0 \quad (3.1.11)$$

$$B = -2a_i\bar{\phi} \quad (3.1.12)$$

$$C = \bar{\phi}^2 - h^2 > 0 \quad (\text{Pois } h \leq \bar{\phi} + d) \quad (3.1.13)$$

Assim, considerados os padrões clássicos da solução de uma equação do 2º grau, como se vê na figura 3.3,

$$\Delta = B^2 - 4AC = 4h^2(a_i^2 - \bar{\phi}^2 + h^2) \geq 0 \quad (3.1.14)$$

$$X_m = \frac{-B}{2A} = \frac{a_i\bar{\phi}}{(a_i^2 + h^2)} > 0 \quad (3.1.15)$$

deve-se tomar a menor dentre as raízes possíveis:

$$\alpha_i = \arcsen \left[\frac{a_i(\bar{\phi} + d) - h\sqrt{a_i^2 + h^2 - (\bar{\phi} + d)^2}}{(a_i^2 + h^2)} \right]; \quad i = 1, 2 \quad (3.1.16)$$

Note-se que, para o caso limite (cabo reto), obtém-se

$$h = \bar{\phi} + d \Rightarrow \alpha_i = \frac{a_i h - h\sqrt{a_i^2}}{(a_i^2 + h^2)} = 0$$

comprovando-se o acerto do resultado encontrado, e justificando o uso da menor raiz dentre as duas possíveis.

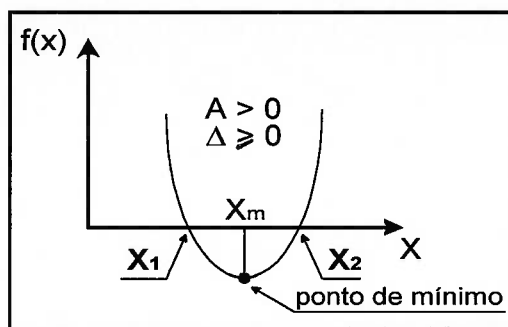


Figura 3.3 Raiz procurada para a obtenção dos valores de α .

3.2 ANÁLISE DAS FORÇAS NO TENSÍOMETRO.

Analisando o rolamento central, que tem contato com a viga elástica, segundo o esquema da figura 3.4 o equilíbrio de forças estabelece-se por :

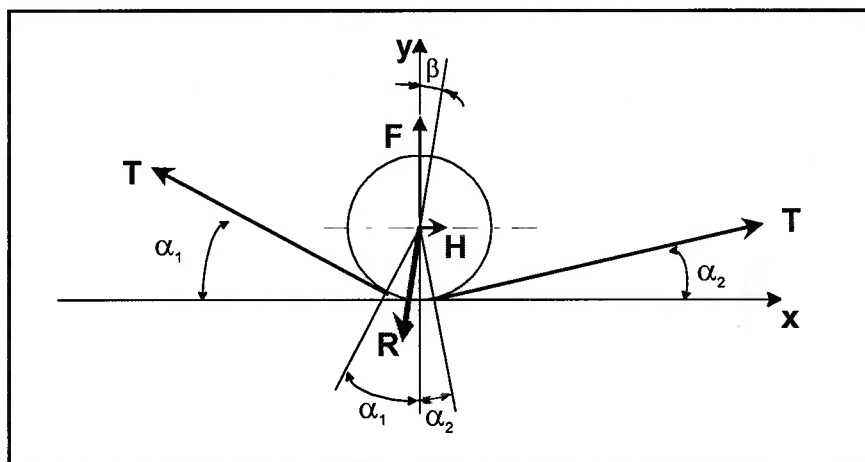


Figura 3.4 Diagrama das forças aplicadas ao rolamento central.

$$T (\cos \alpha_1 - \cos \alpha_2) = - R \operatorname{sen} \beta = H \tag{3.2.1}$$

$$T (\operatorname{sen} \alpha_1 + \operatorname{sen} \alpha_2) = R \operatorname{cos} \beta = F \tag{3.2.2}$$

sendo F e H as reações vertical e horizontal, respectivamente, sobre o eixo que fixa o rolamento à viga elástica.

Dividindo a equação (3.2.1) pela equação (3.2.2); vem:

$$\frac{(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2)}{(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2)} = -\tan\beta \quad (3.2.3)$$

segundo [26] sabe-se que:

$$(\cos\alpha_1 - \cos\alpha_2) = -2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \quad (3.2.4)$$

$$(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2) = 2 \operatorname{sen}\left(\frac{\alpha_1 + \alpha_2}{2}\right) \cos\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) \quad (3.2.5)$$

substituindo (3.2.4) e (3.2.5) em (3.2.3) teremos:

$$\tan\left(\frac{\alpha_1 - \alpha_2}{2}\right) = \tan\beta$$

donde

$$\beta = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)}{2} \quad (3.2.6)$$

Obtida a direção da força resultante sobre o rolamento (R), sua magnitude vem da equação (3.2.1) na forma:

$$R = T(\sin\alpha_1 + \sin\alpha_2) / \cos\beta \quad (3.2.7)$$

3.3 ANÁLISE ESTRUTURAL DA VIGA ELÁSTICA DO TENSÍMETRO.

O elemento principal do tensiômetro é uma viga de aço inoxidável, suposta engastada em um de seus extremos, como se vê na figura 3.5. Com o objetivo de eliminar a reação horizontal na análise estrutural da viga, toma-se como solução final, no projeto do protótipo, que as distâncias sejam iguais

($a_1=a_2$). Portanto, substituindo esta condição na equação 3.2.1 obtem-se que $H=0$, restando só a reação vertical F como carga sobre a viga elástica.

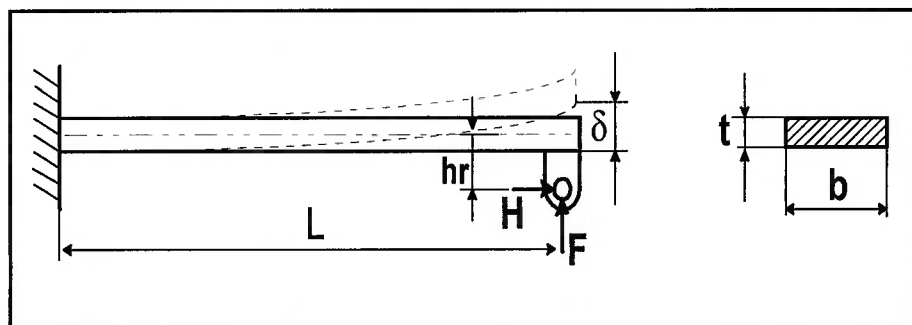


Figura 3.5 Esquema para o análise estrutural da viga elástica.

Como a viga deve trabalhar na zona elástica, segundo a Teoria Simples da Viga temos que:

$$F = \frac{3 E I \delta}{L^3} = \frac{E b t^3}{4 L^3} \delta \quad (3.3.1)$$

e, para a tensão máxima no engastamento,

$$\sigma = \frac{6 F L}{b t^2} = \frac{3 E t \delta}{2 L^2} \quad (3.3.2)$$

onde E é o módulo de elasticidade do material, I o momento de inércia da viga, t a altura ou espessura da viga, b a largura da viga, L a distância do engaste ao ponto de aplicação da força F , σ a tensão normal máxima de flexão e δ o deslocamento vertical do extremo livre da viga.

Por outro lado, tomando a Lei de Hooke temos :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (3.3.3)$$

donde, igualando-se as equações (3.3.2) e (3.3.3), tem-se:

$$\varepsilon = \frac{3 t \delta}{2 L^2} \quad (3.3.4)$$

A equação (3.3.4) é a relação, entre a deformação unitária máxima ε junto ao engaste e o deslocamento δ do extremo livre da viga, que permite a correta seleção do extensômetro elétrico em termos de estabelecer o nível adequado de deformação precisamente detectável.

3.4 DIMENSIONAMENTO DO PROTÓTIPO FINAL DO TENSÍMETRO.

Uma vez obtida a tensão do escoamento [27] do material escolhido para a viga elástica, aço inoxidável, tomaremos como valor admissível um terço dessa tensão de escoamento para manter o trabalho na zona elástica do material, evitando-se dificuldades com o efeito do histerese. Assim, poderemos obter as dimensões da viga de sorte a respeitar as condições anteriormente determinadas.

Usando-se a equação (3.3.3), a deformação unitária máxima permissível dada por:

$$\varepsilon_{\max} = \frac{\sigma_y}{E} = 1310 \times 10^{-6} \quad \begin{array}{l} \sigma_y = 825 \text{ [MPa]} \\ E = 2.1 \times 10^5 \text{ [MPa]} \end{array}$$

ou, em unidades usuais

$$\varepsilon_{\max} = 1310 \text{ } [\mu_s]$$

Agora, através da equação (3.3.4), e impondo a condição:

$$\varepsilon = \frac{3 t \delta}{2 L^2} \leq \varepsilon_{\text{máx}} \quad (3.4.1)$$

pode-se calcular o comprimento:

$$L \geq \sqrt{\frac{1.5 t d}{\varepsilon_{\text{máx}}}} \quad (3.4.2)$$

Por razões construtivas impusemos a altura da viga de aço inoxidável em $t = 1$ [mm], a largura em $b = 12$ [mm], $\delta_{\text{máx}} = 1$ [mm].

Substituindo tais valores na equação (3.4.1), vem:

$$L \geq 33.84 \text{ [mm]}.$$

Finalmente, arredondando o resultado acima, tomamos como comprimento efetivo da aplicação da força no extremo livre da viga o seguinte valor :

$$L = 34 \text{ [mm]}.$$

Lembrado que o Momento de Inércia da viga é:

$$I = \frac{bh^3}{12} = 1 \text{ [mm}^4\text{]}.$$

da equação (3.3.1), poderemos obter o valor da força vertical máxima que pode se aplicar no extremo livre da viga elástica:

$$F_{\text{máx}} = 16.0 \text{ [Newton]}.$$

Portanto, as dimensões e parâmetros finais do tensiômetro extensiométrico são as seguintes:

i) Para a viga de aço inoxidável:

altura $t=1$ [mm] ; largura $b = 12$ [mm]; comprimento $L= 34$ [mm].

ii) Para o tensiômetro em geral (reveja figura 3.2):

- distância entre os rolamentos fixos na cápsula $L_{RF} = 110$ [mm].
- diâmetro exterior dos rolamentos $d = 10$ [mm].
- altura entre o eixo dos rolamentos fixos e a superfície da cápsula onde esta engastada a viga elástica $H_f = 10$ [mm].
- distância entre os rolamentos fixos e o central $a_1= 55$ [mm] $a_2= 55$ [mm]

Com os valores definidos pode-se calcular, então, o valor máximo da tensão do cabo da amarra que satisfaz a condição do esforço admissível da viga.

Substituindo na equação (3.1.16), obtém-se os valores de:

$$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = 7.346 \text{ [graus]} \quad (\text{para a condição } \delta=0)$$

$$\alpha = \alpha_1 = \alpha_2 = 6.29 \text{ [graus]} \quad (\text{para a condição } \delta_{\text{máx}}=1\text{mm})$$

Finalmente, isolando T na equação (3.2.2) obtemos:

$$T \leq 73 \text{ [Newton]}.$$

Valor este perfeitamente aceitável para os propósitos dos ensaios em escala reduzida do presente trabalho, considerando-se, em especial, que não existe necessidade de similitude estática, dinâmica e geométrica entre modelo e protótipo.

3.5 CONCEPÇÃO DA PONTE DE WHEATSTONE PARA A VIGA DO TENSÍMETRO.

Na figura 3.6 mostra-se o esquema da conexão da ponte de Wheatstone para a viga elástica do tensiômetro, em configuração de ponte completa.

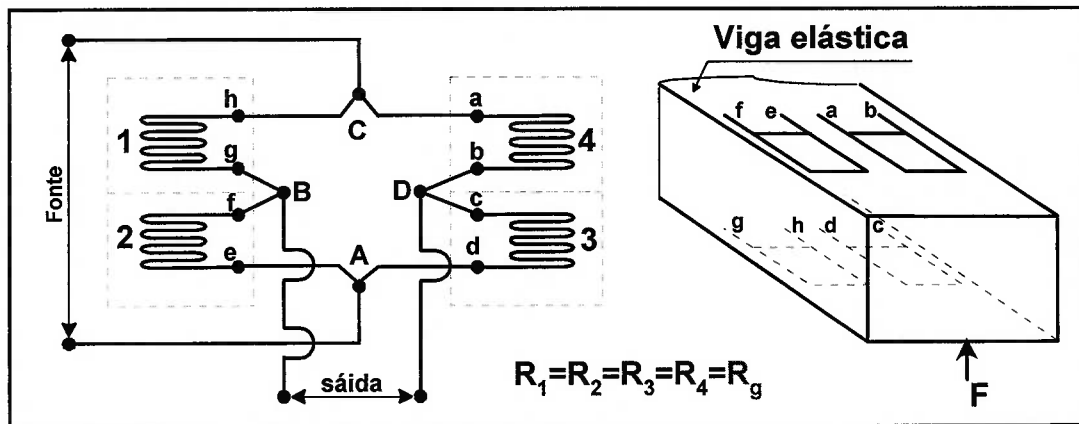


Figura 3.6 Esquema da conexão da ponte completa do tensiômetro.

No anexo A tem-se as características fundamentais do método da extensometria, destacando-se: a ponte de Wheatstone como circuito que permite produzir um sinal elétrico mensurável, o sistema de equações para o cálculo da impedância e da voltagem da saída da ponte e como eliminar o efeito da temperatura na medição mediante a utilização da configuração da ponte completa.

4. BANCADA DE ENSAIOS. CONSIDERAÇÕES GERAIS.

A bancada de ensaios (figura 4.1) mediante a qual pretende-se avaliar o método proposto, assim como, o comportamento de todo o sistema de aquisição e análise das tensões concebido para a realização dos testes no laboratório, é composta por um modelo em escala reduzida, aqui denominado **"plataforma"**, pelo sistema de amarração, aqui chamado **"amarras"**, e pelo o sistema de aquisição e análise das tensões.

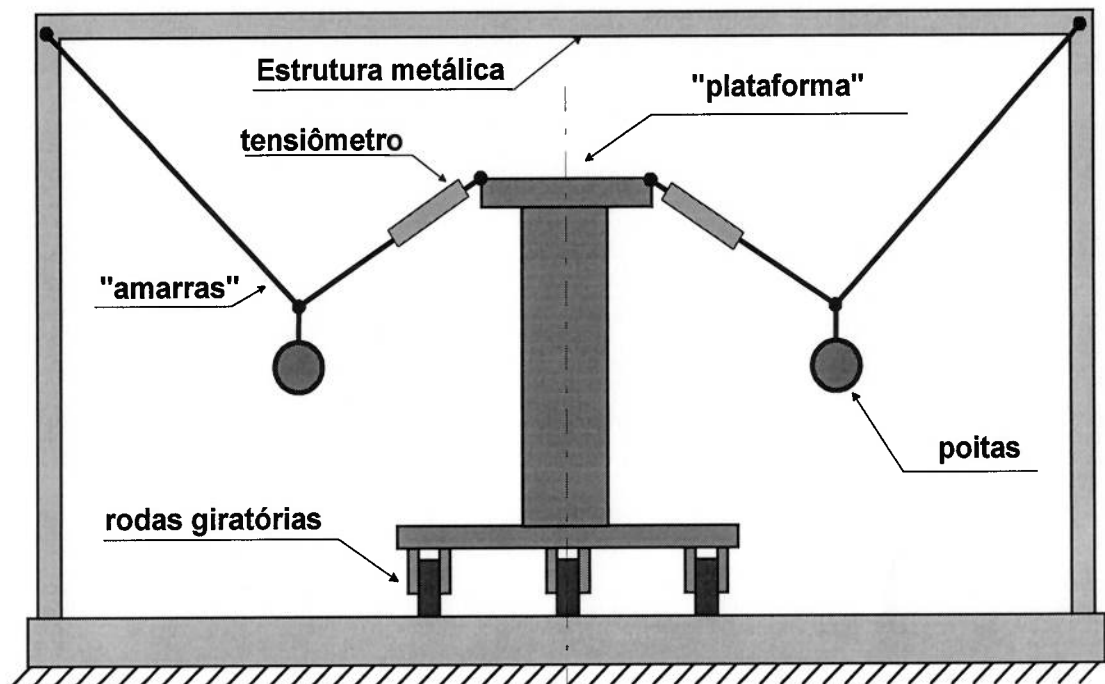


Figura 4.1 Esquema geral da bancada de ensaios .

A bancada proposta considera, essencialmente, os aspectos fundamentais que, a nosso critério, são importantes ter em conta na avaliação de todos as componentes do sistema que nos permitirá, finalmente, monitorar em tempo real o movimento da plataforma.

É importante destacar que a bancada não pretende simular a movimentação real de uma unidade flutuante, simplesmente deseja-se simular deslocamentos no plano horizontal que nos permitam, por sua simplicidade, obter uma primeira avaliação do método.

Os pontos de ancoragem são simulados através da estrutura metálica que permite a fixação das “**amarras**”, por seu extremo superior, a uma determinada altura dos extremos presos à “**plataforma**”. Esta solução, dada às linhas de amarração, ainda não satisfaz o comportamento de catenária, pois é impossível obtê-lo dado o tamanho reduzido do modelo.

O efeito catenária obtem-se pela utilização de pesos concentrados, chamados aqui de poitas, de forma tal que se pode ter tensões médias mensuráveis que variam com a mudança de posição da plataforma.

O modelo consta de quatro amarras, portanto, quatro pontos de amarração, distribuídos de sorte que se garanta forma retangular conhecida. Para a definição do problema basta trabalhar com apenas três raios de ancoragem na determinação da posição da plataforma, como será explicado com mais detalhe no item 5.1 do próximo capítulo.

4.1 SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DAS TENSÕES NAS LINHAS DE AMARRAÇÃO.

O sistema computacional, para a aquisição e análise da variação das tensões, é composto por três tensiômetros, pelo amplificador extensométrico tipo 2200 [28], por um conversor analógico digital CAD 12/32 da Linx [29], um

computador IBM PC/AT e por um programa que permite a obtenção e o tratamento dos valores das tensões em cada uma das três linhas de amarração. Na figura 4.4, pode-se observar um esquema do sistema aplicado.

4.2 CARACTERÍSTICAS GERAIS DO CONVERSOR ANALÓGICO DIGITAL.

O conversor analógico digital CAD 12/32 utilizado no sistema é uma placa de expansão para microcomputadores compatíveis com IBM - PC/XT/AT que possui as seguintes características técnicas [29]:

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

- Canais de entrada analógica: 32
- 32 entradas simples.
- 16 entradas diferenciais.
- faixas de entradas programáveis:
 - bipolares: ± 5.0 v.
 - ± 2.5 v.
 - ± 1.0 v.
 - ± 0.5 v.
 - Unipolares: 0 a 5.0 v.
 - 0 a 2.5 v.
 - 0 a 1.0 v.
 - 0 a 0.5 v.
- impedancia de entrada: 100 K Ω .

- resolução: 122 bits (4096 níveis).
- tipos de representação digital: complemento de dois e binário com Off-set.
- tempo de conversão: 32 μ s.
- número de entradas e saídas digitais: 16.
- contadores programáveis: 03.
- oscilador a cristal: 2 MHz.
- endereçamento ajustável: de 0300h a 0378h.
- espaço de endereçamento: 8 posições.
- Interrupções selecionáveis: IRQ2, IRQ3, IRQ4, e IRQ5.

Na figura 4.2 mostra-se o diagrama de blocos do funcionamento da placa. A placa foi ligada a um microcomputador IBM-PC/AT 486 - 60 MHz e, mediante a utilização do programa feito em Turbo pascal 5.0 desenvolvido a partir da programação básica da placa fornecida pela Linx, utiliza a sua **configuração padrão**.

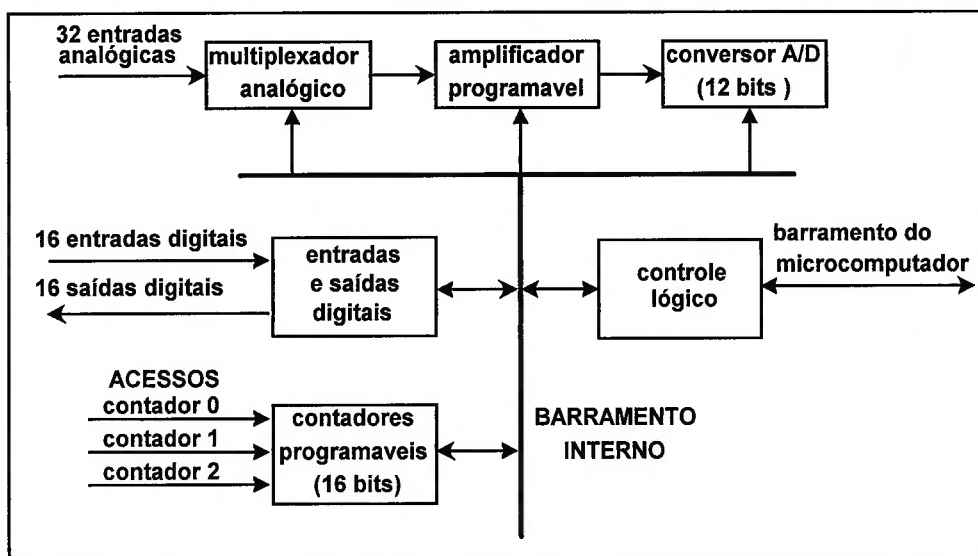


Figura 4.2 Diagrama em blocos do funcionamento da placa CAD12/32.

Mediante o uso deste sistema de aquisição de dados foi possível a calibração dos três tensiômetros utilizados, e a obtenção dos dados para as curvas de restauração das linhas de amarração na bancada de ensaios.

4.3 LEVANTAMENTO DAS CURVAS DE RESTAURAÇÃO DA LINHAS.

O cálculo dos cabos que simulam as linhas de amarração está baseado no fato de os fios serem suficientemente leves e inextensíveis. O efeito catenária obtêm-se pela utilização de pesos concentrados, conforme se mostra na figura 4.3, que nos permite a análise da geometria e das forças atuantes.

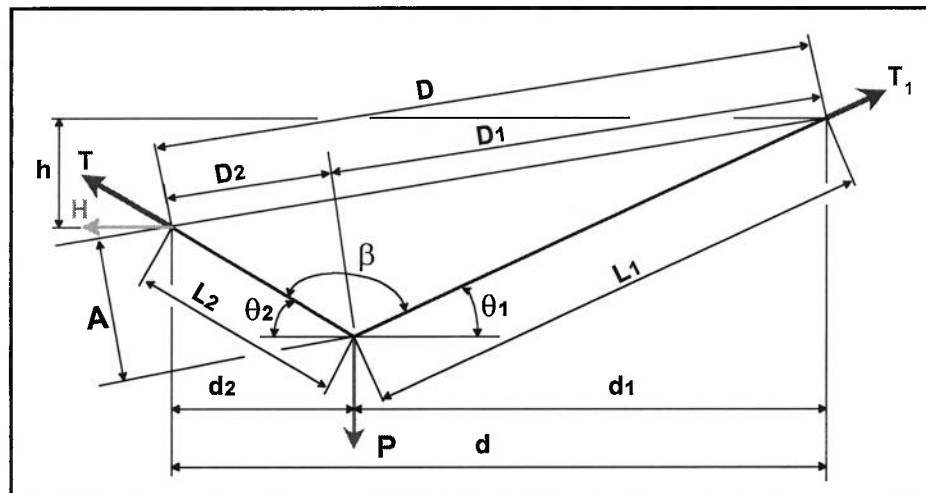


Figura 4.3 Esquema geral para a análise da geometria e das forças atuantes na linha de amarração.

Pela utilização da Lei dos Cossenos [26], temos:

$$\cos (\theta_1 + \theta_2) = \frac{(h^2 + d^2 - L_1^2 - L_2^2)}{2 L_1 L_2} \quad (4.3.1)$$

tal que, lembrando que $\text{sen}^2(\theta_1 + \theta_2) = 1 - \text{cos}^2(\theta_1 + \theta_2)$, obtemos:

$$C = \text{sen}(\theta_1 + \theta_2) = \sqrt{\frac{1 - (h^2 + d^2 - L_1^2 - L_2^2)^2}{4 L_1^2 L_2^2}} \quad (4.3.2)$$

como parâmetro que adiante utilizaremos.

Continuando a análise da geometria, temos:

$$D = \sqrt{(h^2 + d^2)} \quad (4.3.3)$$

$$D = D_1 + D_2 \Rightarrow D_1 = D - D_2 \quad (4.3.4)$$

$$L_2 = D_2^2 + A ; L_1 = D_1^2 + A \Rightarrow L_2 - D_2^2 = L_1 - D_1^2 \quad (4.3.5)$$

substituindo(4.3.4) em (4.3.5) e isolando D_2 temos:

$$D_2 = 0.5(D + \frac{L_2^2 - L_1^2}{D}) \quad (4.3.6)$$

$$A = \sqrt{L_2^2 - D_2^2} \quad (4.3.7)$$

$$d_2 = \frac{d D_2 + h A}{D} \quad (4.3.8)$$

$$d_1 = d - d_2 \quad (4.3.9)$$

donde ficam definidos, por retrosubstituição, os seguintes valores úteis:

$$\text{cos}\theta_1 = \frac{d_1}{L_1} \quad (4.3.10)$$

$$\text{cos}\theta_2 = \frac{d_2}{L_2} \quad (4.3.11)$$

Do equilíbrio das forças atuantes, temos:

$$T_1 \text{cos}\theta_1 - T \text{cos}\theta_2 = 0 \quad (4.3.12)$$

$$T_1 \text{sen}\theta_1 + T \text{sen}\theta_2 = P \quad (4.3.13)$$

tal que isolando T dessas duas equações, pela eliminação de T_1 , vem:

$$T = \frac{P \cos \theta_1}{\text{sen} \theta_2 \cos \theta_1 + \text{sen} \theta_1 \cos \theta_2} = \frac{P \cos \theta_1}{\text{sen}(\theta_1 + \theta_2)} \quad (4.3.14)$$

Assim, finalmente, a curva de restauração é obtida por:

$$H(d) = \frac{P \cos \theta_2 \cos \theta_1}{C} \quad (4.3.15)$$

que, em termos de tração no trecho da linha que vai receber o tensiômetro, pode ser escrita como:

$$T(d) = \frac{P \cos \theta_1}{C} \quad (4.3.16)$$

Na figura 4.4 mostra-se o esquema geral do procedimento e dos equipamentos utilizados para o levantamento das curvas de restauração.

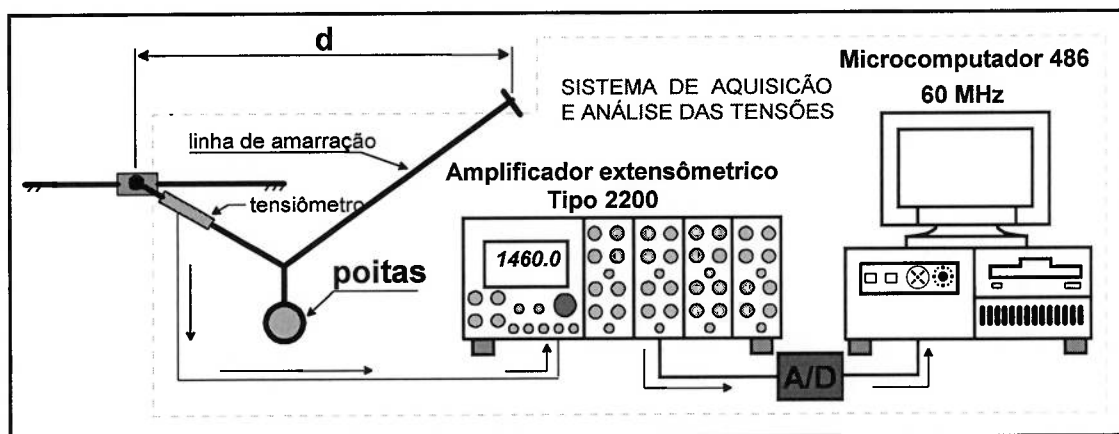


Figura 4.4 Esquema geral do procedimento para o levantamento das curvas de restauração das linhas de amarração.

O amplificador extensométrico tipo 2200 [30] está equipado de filtros passa baixo, portanto, nos sinais obtidos pelos tensiômetros, pode-se efetuar a

filtragem dos esforços de alta frequência relativos aos movimentos de 1ª ordem produzidos pelas ondas numa plataforma real.

Nas tabelas 4.1 até 4.3, apresentadas a seguir, mostram-se os valores médios das medições de tensão, em função do raio de ancoragem [d], para cada uma das linhas de amarração. Estes valores foram fornecidos para o arquivo das curvas de restauração de cada uma das linhas da bancada de ensaios, para sua utilização posterior no programa que calcula a posição planar da unidade flutuante.

Na figura 4.5 até 4.7 observa-se a configuração típica obtida para as curvas de restauração de cada linha, em tudo semelhante ao que se conhece para uma linha em forma real de catenária.

Tabela 4.1 Leituras obtidas para o arquivo da curva de restauração da linha No 1.

LEITURAS REALIZADAS PARA O ARQUIVO DA CURVA DE RESTAURAÇÃO DA LINHA No 1 [em milivolts]											Distancia d [em cm]	
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio		
792	792	791	792	792	793	791	792	793	792	792	792	76,70
835	836	836	835	836	836	836	837	836	837	836	836	77,50
883	883	884	884	884	883	883	882	882	882	882	883	78,40
934	934	933	933	932	932	934	934	932	932	932	933	79,20
980	980	981	980	980	980	980	979	979	981	980	980	80,00
1030	1030	1029	1029	1031	1031	1031	1030	1030	1029	1030	1030	80,90
1086	1085	1086	1086	1086	1085	1085	1087	1087	1087	1086	1086	81,70
1157	1157	1158	1156	1156	1154	1154	1156	1156	1156	1156	1156	82,60
1220	1220	1220	1218	1218	1221	1222	1221	1221	1219	1220	1220	83,40
1287	1287	1285	1286	1287	1287	1288	1289	1288	1286	1287	1287	84,30
1341	1341	1342	1342	1340	1340	1339	1341	1342	1342	1341	1341	85,20
1410	1410	1412	1412	1413	1413	1412	1412	1414	1412	1412	1412	86,00
1512	1512	1513	1511	1511	1512	1512	1512	1513	1512	1512	1512	86,90
1594	1594	1593	1593	1595	1595	1594	1594	1594	1594	1594	1594	87,80
1688	1688	1689	1689	1690	1691	1688	1689	1689	1689	1689	1689	88,60
1778	1778	1779	1779	1778	1780	1780	1780	1780	1778	1779	1779	89,50
1890	1890	1891	1891	1892	1892	1892	1891	1891	1890	1891	1891	90,40
2090	2090	2094	2094	2094	2094	2094	2093	2093	2094	2093	2093	91,30

Tabela 4.2 Leituras obtidas para o arquivo da curva de restauração da linha No 2.

LEITURAS REALIZADAS PARA O ARQUIVO DA CURVA DE RESTAURAÇÃO DA LINHA No 2 [em millivolts]											Distancia d [em cm]
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio	
792	818	816	816	816	818	815	815	816	818	814	76,70
862	862	861	861	860	860	860	860	861	861	861	77,50
905	905	904	904	904	903	903	904	903	905	904	78,40
955	953	953	954	955	953	953	955	955	954	954	79,20
1000	1000	999	999	998	1001	1002	1002	999	1000	1000	80,00
1056	1055	1055	1056	1054	1055	1057	1058	1056	1058	1056	80,90
1110	1110	1109	1109	1109	1109	1108	1108	1109	1109	1109	81,70
1181	1181	1180	1181	1181	1179	1180	1180	1178	1179	1180	82,60
1238	1238	1236	1236	1236	1236	1234	1237	1234	1235	1236	83,40
1300	1300	1299	1299	1298	1298	1302	1303	1301	1300	1300	84,30
1368	1368	1368	1367	1367	1369	1368	1369	1369	1367	1368	85,20
1440	1440	1440	1440	1438	1438	1438	1442	1442	1442	1440	86,00
1538	1538	1538	1540	1540	1542	1542	1541	1540	1541	1540	86,90
1632	1630	1630	1630	1629	1629	1627	1628	1627	1628	1629	87,80
1730	1730	1730	1729	1728	1728	1729	1730	1727	1729	1729	88,60
1846	1846	1845	1845	1846	1848	1846	1845	1848	1845	1846	89,50
1974	1974	1974	1976	1976	1976	1974	1975	1975	1976	1975	90,40
2120	2120	2120	2122	2122	2120	2118	2123	2123	2122	2121	91,30

Tabela 4.3 Leituras obtidas para o arquivo da curva de restauração da linha No 3.

LEITURAS REALIZADAS PARA O ARQUIVO DA CURVA DE RESTAURAÇÃO DA LINHA No 3 [em milivolts]											Distancia d [em cm]
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio	
792	818	816	816	816	818	815	815	816	818	814	76,70
862	862	861	861	860	860	860	862	861	861	861	77,50
905	905	904	904	904	903	903	904	903	905	904	78,40
955	953	953	954	955	953	953	955	955	954	954	79,20
1000	1000	999	999	998	1001	1002	1002	999	1000	1000	80,00
1056	1055	1055	1056	1054	1055	1057	1058	1056	1058	1056	80,90
1110	1110	1109	1109	1109	1109	1108	1108	1109	1109	1109	81,70
1181	1181	1180	1181	1181	1179	1180	1180	1178	1179	1180	82,60
1238	1238	1236	1236	1236	1236	1234	1237	1234	1235	1236	83,40
1300	1300	1299	1299	1298	1298	1302	1303	1301	1300	1300	84,30
1368	1368	1368	1367	1367	1369	1368	1369	1369	1367	1368	85,20
1440	1440	1440	1440	1438	1438	1438	1442	1442	1442	1440	86,00
1538	1538	1538	1540	1540	1542	1542	1541	1540	1541	1540	86,90
1632	1630	1630	1630	1629	1629	1627	1628	1627	1628	1629	87,80
1730	1730	1730	1729	1728	1728	1729	1730	1727	1729	1729	88,60
1846	1846	1845	1845	1846	1848	1846	1845	1848	1845	1846	89,50
1974	1974	1974	1976	1976	1976	1974	1975	1975	1976	1975	90,40
2120	2120	2120	2122	2122	2120	2118	2123	2123	2122	2121	91,30

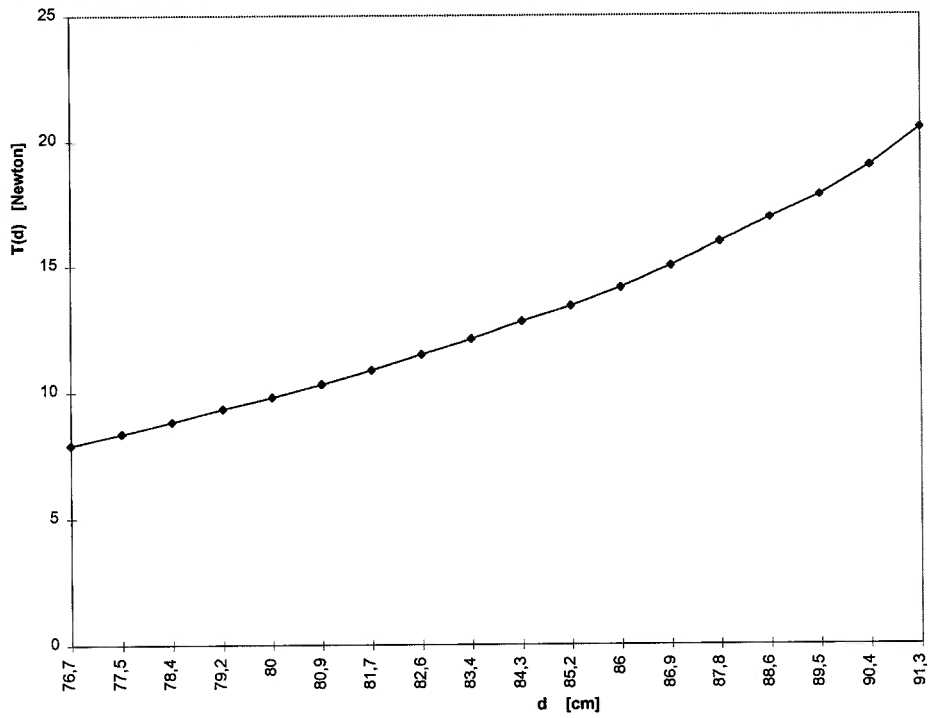


Figura 4.5 Curva típica de restauração da linha No 1

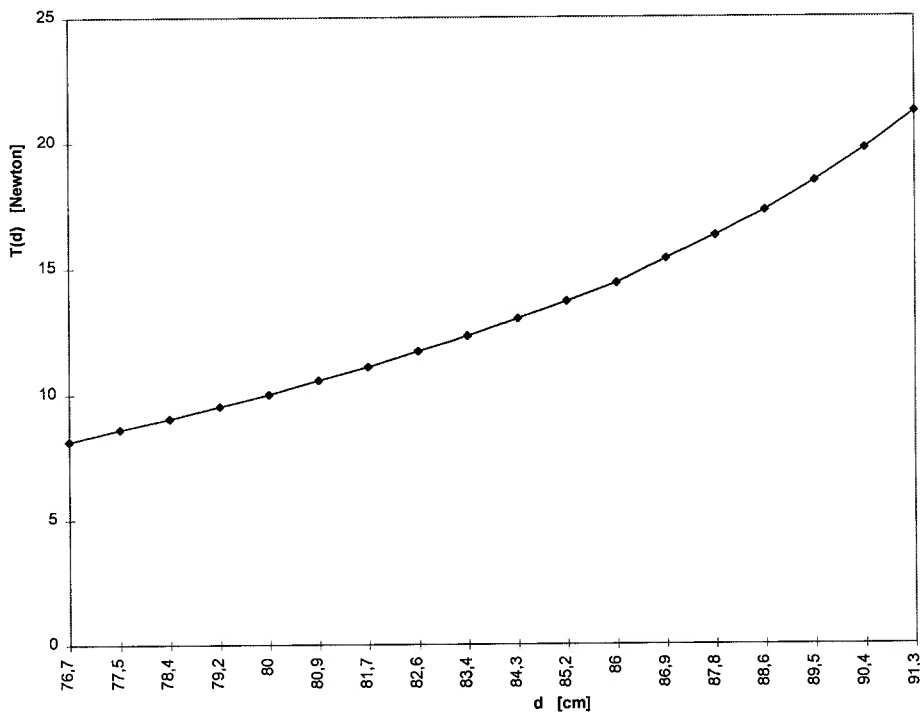


Figura 4.6 Curva típica de restauração da linha No 2.

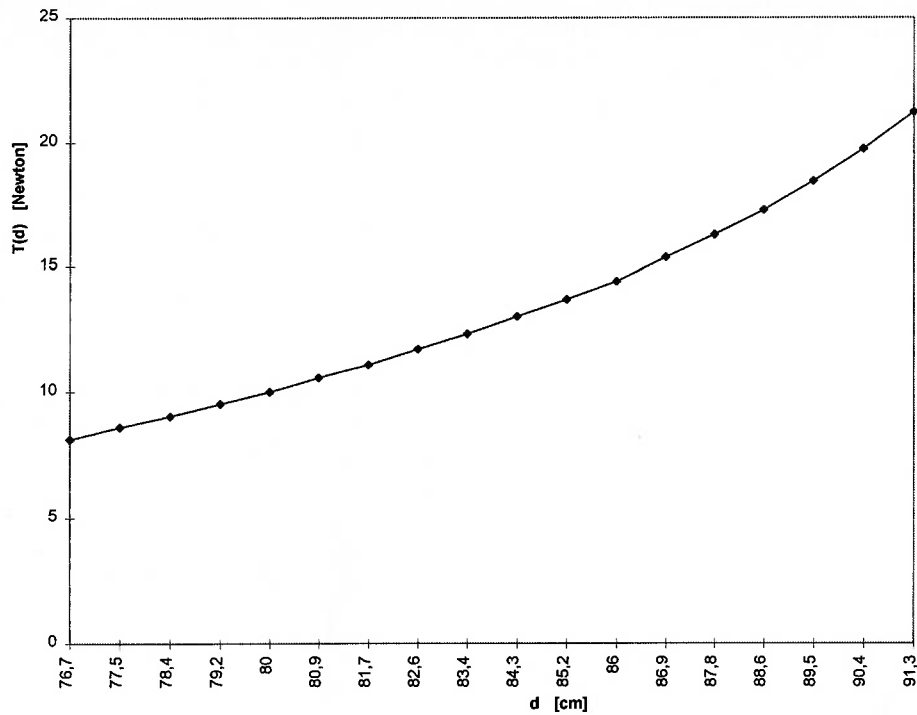


Figura 4.7 Curva típica de restauração da linha No 3.

Uma vez obtidos os dados para o arquivo das curvas de restauração das linhas de amarração, e feita a instalação do sistema de aquisição e análise das tensões na bancada, é necessária a implantação do programa para a obtenção da posição planar da unidade flutuante em função das variações das tensões em cada uma das linhas.

5. DETERMINAÇÃO DA POSIÇÃO PLANAR DA UNIDADE FLUTUANTE .

Para a obtenção da posição planar da unidade flutuante mediante a utilização das variações das tensões no topo nas linhas de amarração, foi desenvolvido um programa em Turbo Pascal [31], que utiliza todo o sistema de aquisição e análise das tensões já explicado anteriormente, e calcula a posição do centro de gravidade da unidade flutuante utilizando o procedimento, que será exposto nos próximos itens, segundo o diagrama de blocos simplificado mostrado na figura 5.1.

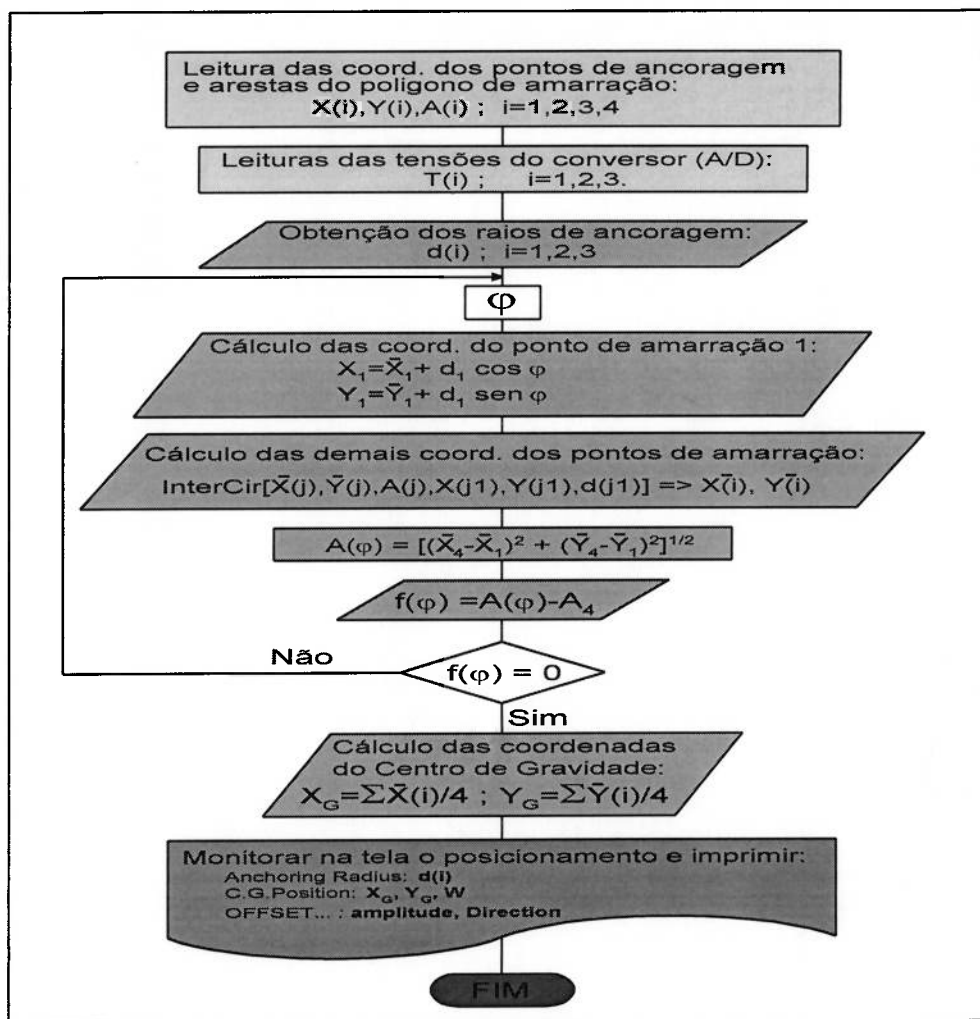


Figura 5.1 Diagrama de blocos simplificado.

5.1 PROCEDIMENTO PARA O CÁLCULO DA POSIÇÃO PLANAR .

Do sistema de aquisição de dados obtêm-se, em tempo real a cada nova posição, as distâncias entre pontos de amarração e de ancoragem, conhecidas como raios de ancoragem e aqui denotadas por: $d(i)$; $i= 1,2,3$. Por outro lado, também são conhecidas, como dados fixos do problema, as dimensões das arestas do quadrilátero que define a forma da plataforma através dos pontos de amarração, aqui denotadas por: $A(i)$; $i=1,2,3,4$.

Assim, conhecidos os $d(i)$ e $A(i)$, trata-se de resolver um problema geométrico decorrente do cálculo sucessivo de intersecções de circunferências, para o qual adota-se a seguinte hipótese ***“A unidade flutuante, definida pelos pontos de amarração, estará sempre circunscrita à região definida pelas intersecções entre as circunferências dos raios de ancoragem (linhas contínuas cor preto) e as circunferências dos raios das arestas (linhas tracejadas cor vermelho) do polígono de amarração”***. (veja figura 5.2).

Neste contexto, arbitra-se uma posição angular inicial relativa (φ), da primeira linha de amarração, para a partir disso como adiante viremos, obter a distância (**A**) entre o último e o primeiro pontos de amarração (veja figura 5.2).

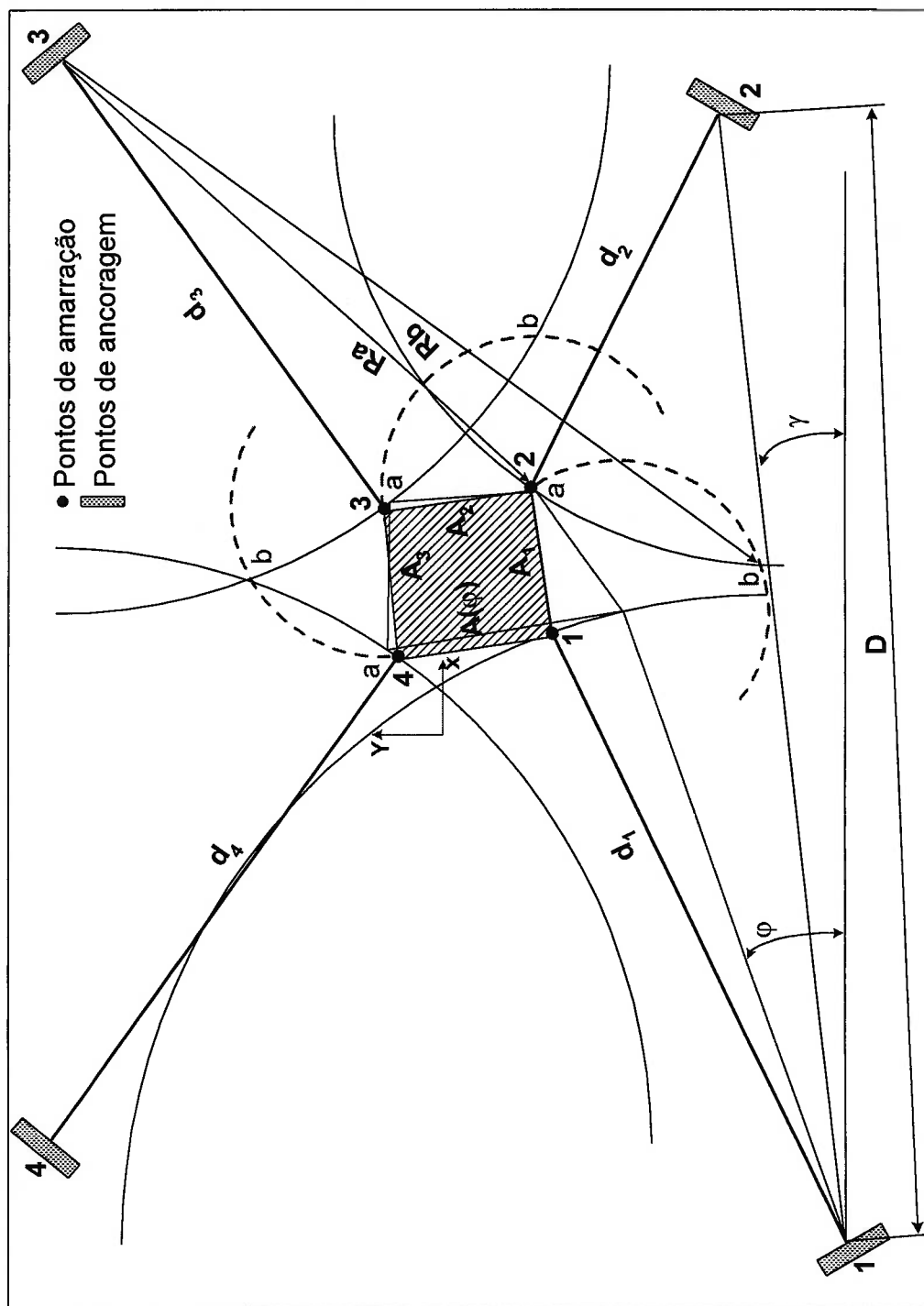


Figura 5.2 Procedimento para a determinação da Posição da Plataforma.

Desse modo, dados:

$X(i), Y(i)$ = coordenadas dos pontos de ancoragem, para $i=1,2,3,4$;

$d(i)$ = raios de ancoragem obtidos em função das tensões nas linhas de amarração, para $i= 1,2,3$;

$A(i)$ = dimensões das aresta do quadrilátero que define a plataforma, para $i=1,2,3,4$.

estabelece-se o seguinte procedimento para o cálculo de $A(\varphi)$:

i) Cálculo das coordenadas do primeiro ponto de amarração:

$$\bar{X}(1) = X(1) + d(1) \cdot \cos \varphi \quad (5.1.1)$$

$$\bar{Y}(1) = y(1) + d(1) \cdot \text{sen } \varphi \quad (5.1.2)$$

ii) Cálculo das demais coordenadas de pontos de amarração:

para $j = 1,2,3$; $j_1 = j+1$ e $j_2 = j+2$

Inter Cir [$\bar{X}(j), \bar{Y}(j), A(j), X(j_1), Y(j_1), d(j_1)$] $\Rightarrow X_a, Y_a, X_b, Y_b$

se $J_2 > 4$ então $j_2 = 1$

$$R_a = \sqrt{[X_a - X(j_2)]^2 + [Y_a - Y(j_2)]^2} \quad (5.1.3)$$

$$R_b = \sqrt{[X_b - X(j_2)]^2 + [Y_b - Y(j_2)]^2} \quad (5.1.4)$$

Dos dois possíveis pontos de intersecção (a e b), entre ambas as circunferências, toma-se aquele que fica mais perto do ponto de ancoragem com coordenadas $X(j+2), Y(j+2)$. Reveja figura 5.2.

A função "Inter Cir", acima citada, trata do cálculo das intersecções entre duas circunferências, a primeira de raio $A(j)$ centrada no ponto de amarração em $\bar{X}(j), \bar{Y}(j)$ e a segunda de raio $d(j+1)$ centrada no ponto de ancoragem em $X(j+1), Y(j+1)$.

O sistema de equações para o algoritmo da função “Inter Cir” apresenta-se no Anexo C, deixou-se de incluir aqui, objetivando não estender demasiado este tópico e o leitor possa perder a seqüência do procedimento que esta sendo exposto.

iii) Nos cálculos anteriores, estabelece-se a função $A(\varphi)$ como:

$$A(\varphi) = \sqrt{(\bar{X}_4 - \bar{X}_1)^2 + (\bar{Y}_4 - \bar{Y}_1)^2} \quad (5.1.6)$$

Quando a distância $A(\varphi)$ obtida pela equação 5.1.6 for igual ao tamanho da última aresta, fica, então, determinada a posição da plataforma. Nesse contexto, estabelece-se o problema matemático de extração das raízes da função definida por:

$$f(\varphi) = A(\varphi) - A_4 \quad (5.1.7)$$

Onde A_4 é o valor da última aresta do quadrilátero. Note-se que, para a definição do problema assim formulado, basta, eventualmente, trabalhar com apenas três raios de ancoragem, quando se admite forma retangular conhecida para a plataforma. Neste caso a distância d_4 é redundante.

Na figura 5.3 ilustra-se o comportamento da função $f(\varphi)$ de (5.1.7), da qual se deseja obter as raízes, para tanto, desenvolveu-se o Método da Secante [32] para ambos lados do ponto de mínimo observado.

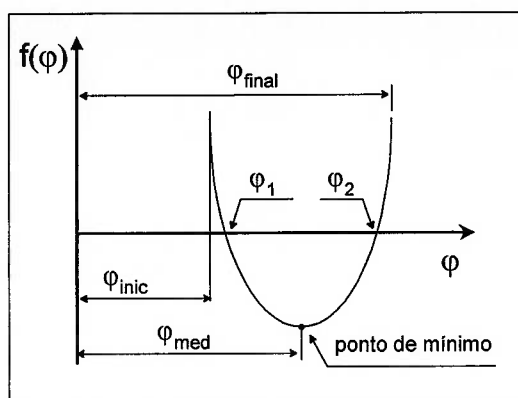


Figura 5.3 Cálculo das raízes da Função $A(\varphi)$.

Fora da faixa estabelecida pelos valores φ_{inic} e φ_{final} , por razões do cálculo geométrico, a função não tem valor definido, já que o problema fica sem solução. Uma vez conhecido o valor de φ_{med} , torna-se bastante simples aplicar o Método da Secante para obtenção das raízes φ_1 e φ_2 .

5.2 OBTENÇÃO DOS VALORES EXTREMOS DO ANGULO φ .

Os valores extremos do angulo φ , para definir o intervalo da função onde estará o valor mínimo e as raízes, dependem das posições limites que pode ter a unidade flutuante em função da geometria definida pelos pontos de amarração e os raios de ancoragem d_2 e d_4 , pois tais posições ficam definidas pela intersecção das circunferências desses raios de ancoragem, somando-lhes a aresta A_4 , com a circunferência de raio d_1 .

Conhecidos os raios de ancoragem d_1 , d_2 e d_3 , o maior ângulo possível de alcançar (φ_{final}), onde pode ficar o ponto de amarração 1, é aquele em que interceptam-se as circunferências de raio de ancoragem d_1 , e de raio igual a

(d_2+A_4) pois, para que exista outro maior que esse, teria-se que aumentar o valor de d_2 ou A_4 , o que é impossível.

Para o caso da determinação do menor ângulo possível (φ_{inic}), ocorre situação similar definida pela intersecção das circunferências de raio (d_4+A_4) e de raio d_1 .

Por outro lado, precisa-se calcular o valor para o raio d_4 , que nos permita obter o valor de φ_{inic} , pois d_4 não é lido inicialmente, tal como já foi explicado anteriormente (resulta redundante para o caso de geometria retangular). Opta-se por arbitrar um valor fictício para d_4 em função do valor lido para d_2 e da distância D_{24} (que separa aos pontos de ancoragem 2 e 4 respectivamente), considerando que a maior separação que pode existir entre o raio de ancoragem d_2 , e o raio de ancoragem d_4 , é a diagonal formada pelas arestas A_4 e A_1 , ou seja:

$$D_{24} = \sqrt{(X_4 - X_2)^2 + (Y_4 - Y_2)^2} \quad (5.1.8)$$

$$A_{14} = \sqrt{(A_1)^2 + (A_4)^2} \quad (5.1.9)$$

então:

$$d_4 = D_{24} - (d_2 + A_{14}) \quad (5.1.10)$$

Na figura 5.4 mostram-se os parâmetros geométricos, que permitem definir os valores extremos de φ , que, por suas vezes, definem o intervalo aonde a função $f(\varphi)$ tem seu valor mínimo.

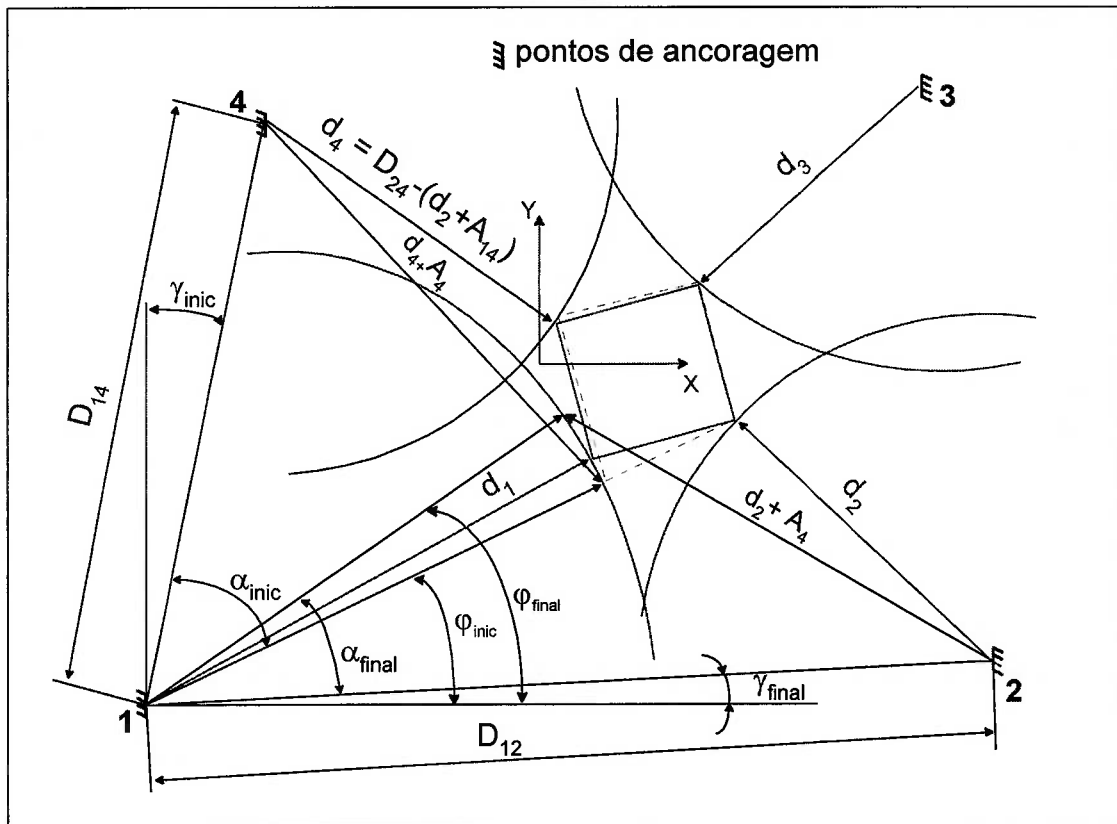


Figura 5.4 Esquema para obter os valores extremos do ângulo ϕ .

Da análise da geometria, tem-se:

$$D_{12} = \sqrt{(X_2 - X_1)^2 + (Y_2 - Y_1)^2} \quad (5.1.11)$$

$$D_{14} = \sqrt{(X_4 - X_1)^2 + (Y_4 - Y_1)^2} \quad (5.1.12)$$

que são as distâncias que existem entre os pontos de ancoragem 1 e os pontos 2 e 4, respectivamente. Assim, aplicando-se a lei dos cossenos [26], os ângulos α_{inic} e α_{final} , da figura 5.4, são obtidos por:

$$\alpha_{inic} = \arccos\left(\frac{d_1^2 + D_{14}^2 - (d_4 + A_4)^2}{2 \cdot d_1 \cdot D_{14}}\right) \quad (5.1.13)$$

$$\alpha_{\text{final}} = \arccos\left(\frac{d_1^2 + D_{12}^2 - (d_2 + A_4)^2}{2 \cdot d_1 \cdot D_{12}}\right) \quad (5.1.14)$$

Por outro lado, o mesmo para o ângulo γ facilmente se obtêm por:

$$\gamma_{\text{inic}} = \arcsen\left(\frac{X_1 - X_4}{D_{14}}\right) \quad (5.1.15)$$

$$\gamma_{\text{final}} = \arcsen\left(\frac{Y_2 - Y_1}{D_{12}}\right) \quad (5.1.16)$$

donde, finalmente, vem:

$$\varphi_{\text{min}} = \pi/2 + \gamma_{\text{inic}} - \alpha_{\text{inic}} \quad (5.1.17)$$

$$\varphi_{\text{máx}} = \alpha_{\text{final}} + \gamma_{\text{final}} \quad (5.1.18)$$

5.3 MÉTODO PARA A OBTENÇÃO DO VALOR DE φ_{med} .

Para a obtenção do valor de φ_{med} , onde se dá o valor mínimo da função $f(\varphi)$, utiliza-se o método de busca do valor mínimo [33], cujo condição necessária e suficiente é ter certeza que exista um valor mínimo no intervalo (a,c) , que precisamente são as condições de nosso problema, pois temos os valores extremos do intervalo e se conhece que existem duas raízes na solução do problema proposto.

Portanto, conhecidos φ_{inic} e φ_{final} do angulo φ , utiliza-se o algoritmo segundo a referência [33] para estabelecer a função **“Gold”** que trata da obtenção do valor de φ_{med} onde se dá o valor mínimo da função $f(\varphi)$.

Uma vez obtido o valor φ_{med} , então são calculadas as duas raízes pelo Método da Secante como já foi indicado anteriormente. As duas raízes, de

modo geral presentes, representam, de fato, duas possíveis soluções do problema geométrico, distintas uma de outra, via de regra, apenas pela posição angular da plataforma.

5.4 PATOGENIA DO PROBLEMA GEOMÉTRICO.

Como já foi comentado anteriormente, existem duas possíveis soluções do problema geométrico, como se ilustra no caso patogênico simples da figura 5.5. De modo geral, para qualquer conjunto de raios de ancoragem $d(i)$ sempre haverá duas possíveis soluções que se distinguem, basicamente, pelo valor diferenciado do ângulo de Y_{aw} .

Assim, a decisão sobre qual das raízes tomar, de forma a conduzir à real posição angular da plataforma, deve ser respaldada em informação adicional, não relacionada aos parâmetros geométricos já definidos. Como solução, optamos por impor o monitoramento do ângulo de " y_{aw} " de sorte a tomar aquele que, dentre os dois geometricamente possíveis a cada nova posição da plataforma, seja compatível com o histórico passado do movimento da plataforma.

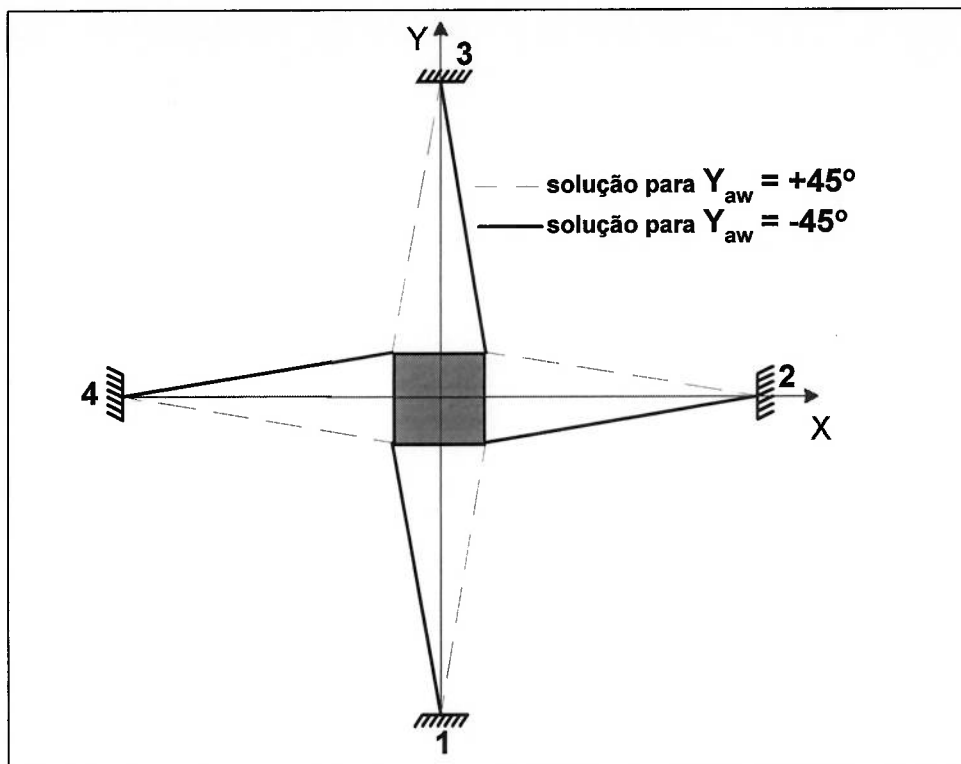


Figura 5.5 Patogenia do Problema Geométrico

5.5 POSIÇÃO DO CENTRO DA GRAVIDADE DA UNIDADE.

Finalmente, as coordenadas do centro de gravidade da unidade flutuante ficam determinadas pela seguintes equações:

$$X_G = \frac{\sum \bar{X}(i)}{4} \tag{5.1.19}$$

$$Y_G = \frac{\sum \bar{Y}(i)}{4} \tag{5.1.20}$$

Obtidas as coordenadas do centro de gravidade da unidade, podemos calcular a magnitude e direção do vetor que caracteriza o “**OFFSET**”, para cada nova posição adotada pela unidade flutuante durante sua movimentação.

Assim, para a amplitude, temos:

$$\text{DIST}_{\text{OFF}} = \sqrt{X_G^2 + Y_G^2} \quad (5.1.21)$$

e para a direção:

$$\theta_{\text{OFF}} = \arctan\left(\frac{Y_G}{X_G}\right) \quad (5.1.22)$$

O programa desenvolvido, além do cálculo em tempo real das coordenadas do centro de gravidade da unidade flutuante, mostra na tela do computador a monitoração da posição da unidade, os raios de ancoragem obtidos, na amplitude e direção do “**offset**” calculado, assim como o estágio de funcionamento do programa, seja leitura da placa ou cálculo. No caso que o cálculo obtido esteja fora da tolerância imposta, então é indicado um sinal de alarme e mostra-se na tela o aviso “**PRECISION LACK**”. Se, por acaso, a unidade estiver, fora do “**Offset limite**” é indicado novo sinal de alarme.

Na figura 5.6 mostra-se a tela apresentada pelo programa para a monitoração da unidade e no anexo C tem-se a listagem do programa principal desenvolvido.

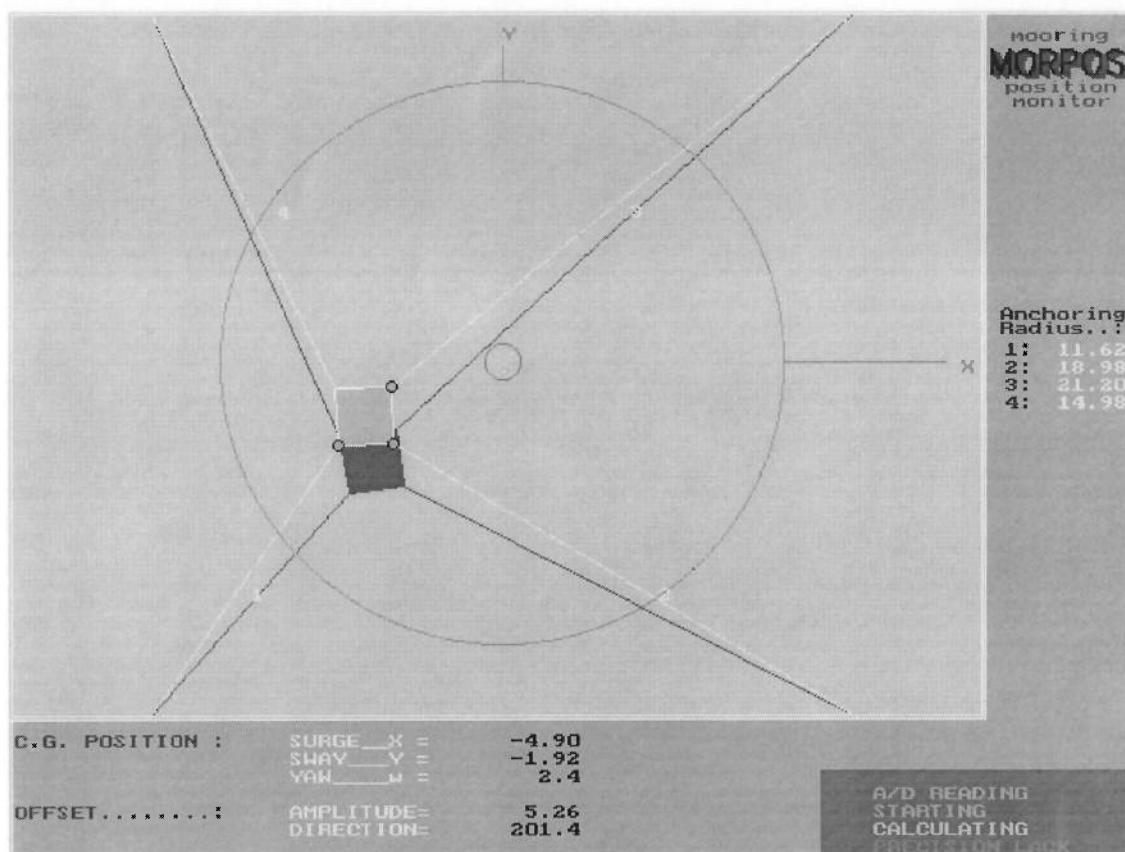


Figura 5.6 Tela dos resultados obtidos pelo programa na monitoração.

Depois de explicado todo o procedimento para a obtenção da posição da unidade flutuante ("**plataforma**") é preciso a realização dos testes para poder avaliar todo o sistema desenvolvido no trabalho, considerando a possibilidade de aplicação de monitoração em tempo real.

6. TESTES DO SISTEMA.

Como já foi exposto anteriormente, para poder avaliar o método proposto foi desenvolvida uma bancada de ensaios que inclui dois componentes fundamentais: o sistema de aquisição e análise das tensões e o programa desenvolvido para a monitoração da posição da unidade. Opta-se, em primeira instância, por testar separadamente cada uma delas, para poder obter sua avaliação no cumprimento dos requisitos necessários.

Finalmente, neste capítulo são apresentados os testes realizados ao sistema completo, mediante a utilização da bancada de ensaios, mostrando-se os resultados obtidos que permitem obter uma avaliação do sistema e do método desenvolvido no trabalho.

6.1 TESTES PARA AVALIAR O COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE AQUISIÇÃO E ANÁLISE DAS TENSÕES.

Depois de realizada a calibração estática dos três tensiômetros que permitiram, conjuntamente com o conversor A/D, a aquisição e análise das tensões no topo da linhas, é preciso ter o comportamento dinâmico dos mesmos, pois o objetivo fundamental do trabalho é obter leituras em tempo real. Portanto, precisa-se que a resposta dinâmica dos tensiômetros seja superior à resposta da unidade flutuante devido à ação das condições ambientais das ondas. As funções de transferências da unidade "**Response Amplitude Operator**" (RAO) apresentadas na referência [1], necessárias para o cálculo dos movimentos de 1ª ordem não ultrapassa o valor de 2.4 [rad/s] de

freqüência, ou seja, que o período não é inferior a 2.5 [s], o qual nos permite estabelecer como requisito básico uma resposta dinâmica de 4.2 [rad/s] a ser cumprido no sistema proposto, que representa um período de aproximadamente 1.5 [s], com o qual, garanta-se que os cálculos realizados pelo programa sejam obtidos com tempo suficiente para garantir a monitoração em tempo real.

Para a realização dos testes, foi utilizado um gerador de funções [34], com o qual se fornece ao conversor A/D um sinal padrão com o valor de amplitude, igual à correspondente dos três tensiômetros que serão testados, e freqüência variável, com objetivo de comprovar o comportamento deles com a sinal padrão, tendo como hipóteses as do pêndulo simples, segundo o esquema da figura 6.1.

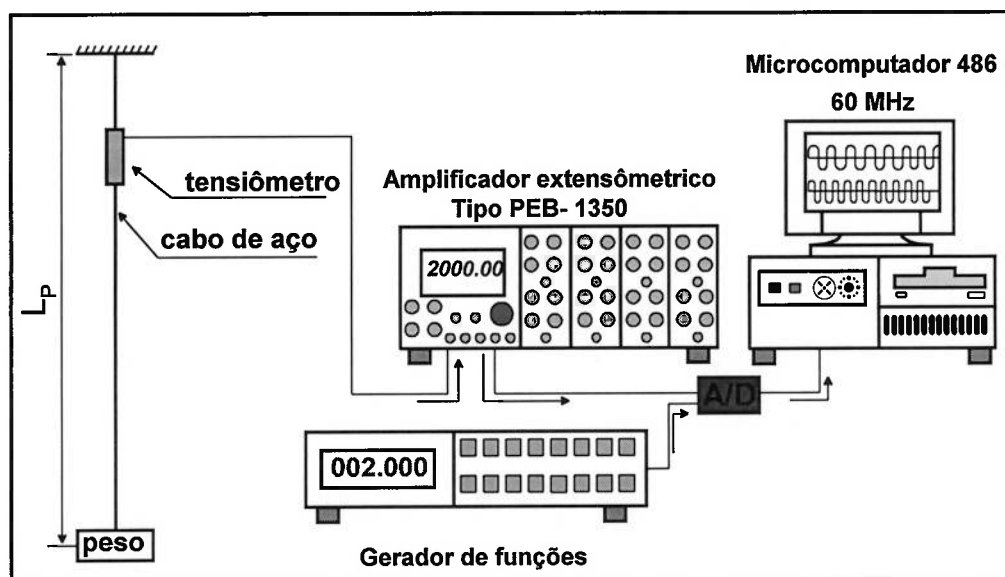


Figura 6.1 Esquema da instalação para os testes do comportamento dinâmico do sistema.

Posicionou-se um peso no extremo dos cabos dos três tensiômetros garantindo o valor de amplitude fornecido pelo gerador de funções. Foi calculado o comprimento L_p dos cabos de aço utilizados para que o período das oscilações dos pêndulos fossem aproximadamente 1.5 [s], tal como foi estabelecido anteriormente, portanto, segundo a equação para o cálculo aproximado do período da oscilação do pêndulo simples [27], temos:

$$\tau = 2\pi \sqrt{\frac{L_p}{g}} \quad (6.1)$$

onde τ é o período da oscilação em [s], g a aceleração da gravidade em [m/s²] e L_p o comprimento do cabo de aço do pêndulo simples em [m].

Isolando L_p na equação 6.1 acima e substituindo os valores, obtém-se:

$$L_p \approx \tau^2 \frac{g}{4\pi^2} \approx 0.559 \text{ [m]}.$$

que é o valor do comprimento que garanta um período de oscilação aproximadamente de 1.5 [s].

Partindo do programa padrão fornecido pela Linx [29], desenvolveu-se o programa que permite monitorar simultaneamente na tela do computador os quatro sinais, três dos tensiômetros e uma do gerador de funções. Desta forma, comprovou-se que a frequência e o valor da amplitude dos tensiômetros mostrados na tela do computador correspondem aos valores teóricos calculados para a realização do teste e a trajetória descrita foi uma sinusóide perfeita como era de esperar. Posteriormente, foi aumentando-se o valor da frequência da sinal padrão do gerador de funções, com o objetivo de avaliar

qual o maior valor de resposta de frequência admissível de nosso sistema, sem que os sinais obtidos fossem distorcidos em seus valores de amplitude ou na forma de suas trajetórias. Até o valor de 8[Hz] o comportamento dos quatro sinais foram corretos. A partir dos valores de frequência superiores a 9[Hz] começou a obter-se a distorção na trajetória da sinal, deixando de ser uma senoide perfeita.

Deste modo pode-se estabelecer o valor de 8 [Hz] como o valor máximo de resposta dinâmica do sistema de aquisição e análise das tensões que será utilizado na bancada de ensaios.

6.2 TESTES PARA A AVALIAÇÃO DO PROGRAMA DESENVOLVIDO.

O programa desenvolvido em turbo Pascal, foi instalado num Computador 486 - 60 MHz, com a finalidade de avaliar a robustez do mesmo e comprovar a confiabilidade dos cálculos realizados, mediante a utilização de arquivos de dados que simulem as leituras do conversor A/D. Estes arquivos subministram ao programa trajetórias conhecidas do movimento do centro de gravidade da plataforma.

Opta-se por este tipo de teste, para ter uma primeira avaliação se o procedimento desenvolvido para o cálculo das coordenadas do centro de gravidade é válido, e se os métodos numéricos utilizados no programa, para obter o valor mínimo da função e os valores das raízes que permitem

finalmente obter a monitoração na tela do computador, tem a rapidez e eficácia necessários para ser utilizados em tempo real.

Na realidade o que é lido pelo o conversor A/D é um número n de valores de tensão em cada amarra, ao qual, calcula-se o valor médio da mostra n selecionada, estes valores tem uma determinada dispersão do valor exato, então pode-se obter uma semelhança com a realidade, aplicando-lhe aos valores exatos dos dados dos arquivos que simulam trajetórias conhecidas, uma porcentagem de erro aleatório, em função da tolerância selecionada para o cálculo, desta forma, obtem-se a simulação das leituras do conversor A/D tal como se fora feita na realidade.

Forem subministrados dois tipos de trajetórias diferentes para testar o programa, a primeira descrevendo uma circunferência de raio constante, a segunda de raio variável descrevendo uma trajetória em forma de um numero oito horizontal (∞) em ambos casos, o movimento da unidade nunca excede o valor do “**offset**” limite subministrado nos dados iniciais do programa. Por último, a trajetória de raio variável aplica-se um valor de raio que alcance valores superiores ao valor do “**offset**” limite, para poder avaliar essa condição, prevista, com a emissão de uma sinal de alarme no programa desenvolvido.

Estes três testes foram realizados por mais de 30 horas de funcionamento contínuo para poder ter uma correta avaliação da robustez do programa, tendo em conta, que em tempo real o programa em todo momento tem que funcionar corretamente, durante todas as horas de duração comprovou-se o correto

funcionamento do programa desenvolvido, pois obteve-se a monitoração correspondente com a trajetória do arquivo de dados subministrado e com uma resposta dinâmica na monitoração muito superior à requerida na realidade.

Outra comprovação que realizou-se durante a monitoração foi o correto funcionamento da solução dada ao programa para a seleção de uma das duas raízes possíveis na solução do problema geométrico como já foi comentado no trabalho, comprovou-se as três possibilidades brindadas pelo programa, a primeira monitorar a trajetória para a condição de $y_{aw} = +45^\circ$, a segunda tomando $y_{aw} = -45^\circ$ e por último as duas soluções simultaneamente durante a monitoração da unidade, obteve-se em todos os casos os resultados esperados.

Após testes, avaliou-se o correto funcionamento do programa desenvolvido, apresentando precisão, rapidez, eficácia e robustez nos cálculos obtidos para a monitoração. O método proposto para o cálculo das coordenadas do centro de gravidade da unidade e os métodos utilizados no algoritmo do programa para obter o valor mínimo da função e suas raízes, são válidos para o propósito estabelecido inicialmente no programa da monitoração em tempo real.

6.3 TESTES REALIZADOS PARA AVALIAR O SISTEMA PROPOSTO MEDIANTE A BANCADA DE ENSAIOS.

Para a avaliação do sistema proposto mediante a bancada de ensaios já exposta no capítulo 4, realizaram-se dois tipos de ensaios, o primeiro consiste

em impor deslocamentos retilíneos discretos no eixo “X”, no eixo “Y” e o segundo em deslocamento contínuos no plano horizontal.

O objetivo fundamental deste primeiro teste é obter uma avaliação quantitativa dos resultados obtidos pelo programa, comparando os resultados experimentais obtidos na tela do computador durante a monitoração em tempo real com resultados teóricos calculados pela geometria da bancada em função dos deslocamento discretos segundo a direção do eixo selecionado.

Para garantir deslocamento na direção “X” e “Y”, o modelo da plataforma da bancada foi montado em guias retilíneas que só permitem deslocamento na direção que se quer testar. Mediante o paquímetro acoplado nas guias controla-se os deslocamentos impostos na direção do eixo selecionado, sendo possível impor deslocamentos até o valor máximo de 150 milímetros, portanto, toma-se para a realização deste teste o valor fixo de 10 mm para deslocar o modelo da plataforma da bancada discretamente em ambos sentidos do origem do sistema de coordenadas relativo assumido no programa até completar o deslocamento máximo de 150 mm do paquímetro.

Realizaram-se um total de 10 medições durante os oito dias de duração dos ensaios, para poder obter uma melhor avaliação dos resultados e observar a estabilidade das medições.

É importante destacar que neste tipo de ensaio também foi possível obter testes de movimentos contínuos retilíneos e observar a correta monitoração em tempo real na tela do computador, pois além da obtenção dos diferentes valores para sua avaliação posterior com respeito aos cálculos teóricos, pode-

se comprovar durante mais de dez dias a correta monitoração destes deslocamento na direção do eixo “x” e “y”, aproveitando-se a instalação que já estava feita para este tipo de ensaio.

Na tabela 6.1 e 6.2 mostram-se os resultados obtidos em uma das dez medições feitas nos testes realizados no eixo “x” e “y” respectivamente, incluem-se nas tabelas os valores teóricos aqui chamados de “real” calculados mediante os dados da geometria da bancada, que permitem a comparação dos valores dos parâmetros calculados pelo programa, que são mostrados na tela do computador.

Da análise dos resultados da tabela 6.1 é importante destacar que nos 150 mm de deslocamento da “plataforma” no eixo “x”, tem-se um deslocamento de 1.5 mm no eixo Y, essa é a razão da variação na coordenada Y_G durante os deslocamento impostos durante os teste realizados.

Analisando os valores obtidos durante este ensaio, pode-se observar que o erro cometido no deslocamento total de 150 mm não excede o 0.5%, entanto, o erro no cálculo da coordenada X_G e Y_G fora dos valores perto de zero não excedem 1.0%. Portanto segundo estos resultados, as hipóteses desenvolvidas e os cálculos obtidos através do programa e o sistema apresentado satisfazem os requisitos para o qual foi concebido.

Tabela 6.1 Valores obtidos no teste para a avaliação do Sistema Proposto.

[mm]	COORDENADAS DO CENTRO DE GRAVIDADE [mm]						" OFFSET "								
	X G			Δ X			Y G			Amplitude [mm]			Direção [graus]		
	Na tela	real	% do erro	Na tela	real	% do erro	Na tela	real	% do erro	Na tela	real	% do erro	Na tela	real	
Desloc.	-88,70	-89,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,80	88,70	89,00	0,33	179,5	180,00	180,00		
0,00	-78,60	-79,00	0,51	10,10	10,00	1,00	0,70	78,60	79,00	0,50	179,5	180,00	180,00		
10,00	-68,70	-69,00	0,43	9,90	10,00	1,00	0,80	68,70	69,00	0,43	179,4	180,00	180,00		
20,00	-58,70	-59,00	0,51	10,00	10,00	0,00	0,50	58,70	59,00	0,50	179,6	180,00	180,00		
30,00	-48,80	-49,00	0,41	9,90	10,00	1,00	0,40	48,80	49,00	0,40	179,6	180,00	180,00		
40,00	-38,90	-39,00	0,26	9,90	10,00	1,00	0,30	38,90	39,00	0,25	179,6	180,00	180,00		
50,00	-28,75	-29,00	0,86	10,15	10,00	1,50	-0,18	28,75	29,00	0,86	180,3	180,00	180,00		
60,00	-18,82	-19,00	0,95	9,93	10,00	0,70	-0,17	18,82	19,00	0,94	180,5	180,00	180,00		
70,00	-8,74	-9,00	2,89	10,08	10,00	0,80	-0,20	8,74	9,00	2,86	181,2	180,00	180,00		
80,00	0,98	1,00	2,00	9,72	10,00	2,80	-0,20	1,00	1,00	0,02	349,5	360,00	360,00		
90,00	10,78	11,00	2,00	9,80	10,00	2,00	-0,25	10,78	11,00	1,97	358,8	360,00	360,00		
100,00	20,90	21,00	0,48	10,12	10,00	1,20	-0,24	20,90	21,00	0,47	359,4	360,00	360,00		
110,00	31,05	31,00	0,16	10,15	10,00	1,50	-0,22	31,05	31,00	0,16	359,6	360,00	360,00		
120,00	41,21	41,00	0,51	10,16	10,00	1,60	-0,20	41,21	41,00	0,51	359,7	360,00	360,00		
130,00	51,15	51,00	0,29	9,94	10,00	0,60	-0,23	51,15	51,00	0,30	359,8	360,00	360,00		
140,00	60,95	61,00	0,08	9,80	10,00	2,00	-0,25	60,95	61,00	0,08	359,8	360,00	360,00		
150,00			Σ	149,65	150,00	0,23									

Depois de observar os resultados dos testes realizados com deslocamentos discretos e comprovar que, os resultados obtidos para este tipo de ensaio realizado correspondiam aos deslocamentos impostos para ambos sentidos do origem de coordenadas e que o erro cometido entre os valores obtidos pelo programa e os cálculos reais efetuados está dentro da faixa admissível na engenharia, foram realizados o resto dos ensaios com a utilização do modelo da plataforma que permite obter movimentos no plano mediante as rodas da base inferior do modelo.

Mediante este ensaio foram impostos deslocamentos no plano, que além dos movimentos retilíneos já comprovados pode-se impor giros e comprovar que a monitoração na tela do computador correspondiam com os deslocamentos impostos nos testes, é importante aclarar que o objetivo deste tipo de teste é observar o comportamento dinâmico da monitoração e a comprovação qualitativa dos deslocamentos, pois é impossível obter algum sistema de medição confiável que permite-se comprovar qualitativamente os resultados obtidos na tela do computador, na concepção prevista do desenho inicial da bancada de ensaio.

Para as condições do modelo utilizado e os objetivos previstos inicialmente no trabalho, os resultados obtidos nos testes permitiram obter uma avaliação do desempenho do sistema e o método proposto para a obtenção da monitoração em tempo real de unidades amarradas, pois os resultados obtidos em cada teste realizado às componentes do sistema e ao sistema através da bancada de ensaio comprovam a validade do método e a robustez do programa

7. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.

O objetivo deste capítulo é fazer uma apreciação crítica do trabalho realizado, apontando as conclusões obtidas e, por outro lado, apresentar sugestões para a continuação da pesquisa.

7.1 CONCLUSÕES.

Os ensaios realizados, para avaliar o sistema proposto, permitiram obter as seguintes conclusões.

1. O sensor dinâmico para medir as tensões no topo das linhas de amarração aqui denominado "*tensiômetro*" tem uma estabilidade da medição de $\pm 1\%$, o desvio nas leituras não excede o 1.5% do valor real e tem um bom comportamento até 8Hz. de resposta dinâmica .
2. O sistema de aquisição e análise das tensões composto pelos tensiômetros, por o conversor analógico digital A/D, o programa partindo do padrão fornecido pela linx e o computador, satisfaz as condições necessárias e suficientes para a obtenção das leituras das tensões em tempo real que permitem o cálculo da monitoração da unidade.
3. O programa, que utiliza como procedimento o método desenvolvido para o cálculo das coordenadas do centro de gravidade da unidade amarrada partindo das tensões médias no topo das linhas, tem precisão, robustez, e resposta dinâmica suficiente para o ser aplicado em tempo real.

-
4. O método desenvolvido que permite a monitoração em tempo real da unidade na tela do computador, só precisa de um sistema profissional para o registro das cargas atuantes nas linhas do sistema de amarração da unidade flutuante amarrada, que garanta a estabilidade das medições depois de sua instalação.

7.2 RECOMENDAÇÕES.

Propõem-se, para ter uma melhor avaliação do sistema proposto, principalmente no comportamento dinâmico, que o sistema possa ser avaliado em uma mesa "XY" de controle numérico, ou por aplicação na bancada de um dispositivo com mecanismos que permitam movimentos de trajetórias conhecidas. Estas, velocidades dentro da faixa da resposta do sistema, permitiriam avaliar com melhor precisão a verdadeira resposta dinâmica.

ANEXO A

Neste anexo são apresentados os aspectos mais importantes do “**método da extensometria elétrica**”, referente a ponte de Wheatstone, características e equações fundamentais e o esquema e conexão da ponte selecionada para medir as deformações da viga elástica do tensiômetro.

PONTE DE WHEATSTONE. CARACTERÍSTICAS FUNDAMENTAIS.

As mudanças de resistência que são produzidas em um extensômetro são muito pequenas, de sorte que apenas um circuito elétrico especial pode ser capaz de processá-las para produzir um sinal elétrico mensurável. Um método, que permite processar com precisão essas mudanças, muito utilizado por profissionais de medição extensométrica, é a ponte de Wheatstone, na figura A.1 mostra-se a ponte de Wheatstone básica.

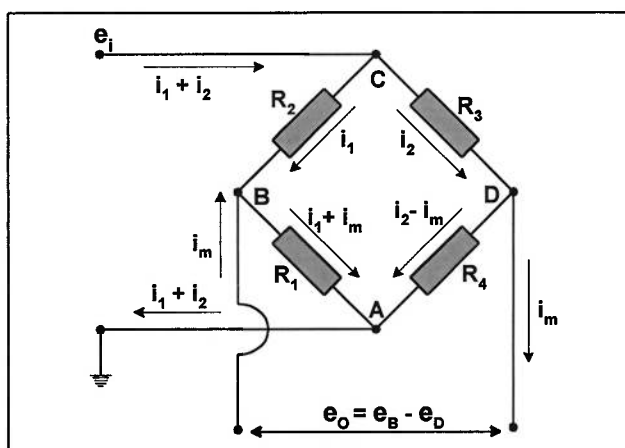


Figura A.1 Ponte de Wheatstone. Circuito para o cálculo da impedância da saída.

Neste circuito assume-se que uma corrente i_m entra ao circuito procedente de qualquer outro sistema acoplado ao mesmo, exemplo, o circuito de medição e despreza-se a resistência interna da fonte de alimentação. Se ha assumido que “**entra**” pelo ponto B de maior potencial que o ponto D. Então, resolvendo o sistema de equações obteremos:

$$e_i - i_1 R_2 = e_B ; e_i - i_2 R_3 = e_D ; e_B = (i_1 + i_m)R_1 ; e_D = (i_2 - i_m)R_4 \quad (A.1)$$

Resolvendo, obteremos:

$$e_o = e_i \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} + i_m \left(\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \right) \quad (A.2)$$

Para que não haja efeito de carga no circuito, a resistência R_m do instrumento de medição tem que ser pelo menos 20 vezes maior que a impedância da saída da ponte (R_{sp}) dada pela seguinte equação (para $i_m = 0$) [23]:

$$R_{sp} = \frac{\partial e_o}{\partial i_m} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + \frac{R_3 R_4}{R_3 + R_4} \quad (A.3)$$

Então, nas condições dadas, o potencial da saída depende do voltagem e_i da alimentação e do valor das resistências da ponte segundo:

$$e_o = e_i \frac{(R_1 R_3 - R_2 R_4)}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} \quad (A.4)$$

Observa-se que se $R_1R_3=R_2R_4$ a ponte está **“balanceada”** e não haverá voltagem de saída. Assim, qualquer mudança no valor de alguma resistência **“desbalancia”** a ponte, ocasionando uma voltagem na saída.

Na equação (A.4) observa-se um comportamento não linear de e_o em relação aos valores das resistências, Em termos matemáticos :

$$e_o = f(R_1; R_2; R_3; R_4)$$

tal que, para pequenas mudanças nos valores iniciais das resistências:

$$\Delta e_o = \frac{\partial e_o}{\partial R_1} \Delta R_1 + \frac{\partial e_o}{\partial R_2} \Delta R_2 + \frac{\partial e_o}{\partial R_3} \Delta R_3 + \frac{\partial e_o}{\partial R_4} \Delta R_4 \quad (\text{A.5})$$

onde, por cálculo de derivadas,

$$\frac{\partial e_o}{\partial R_1} = e_i \frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} ; \quad \frac{\partial e_o}{\partial R_2} = -e_i \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2}$$

$$\frac{\partial e_o}{\partial R_3} = e_i \frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2} ; \quad \frac{\partial e_o}{\partial R_4} = -e_i \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2}$$

logo, substituindo:

$$\Delta e_o = e_i \left(\frac{R_2}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_1 - \frac{R_1}{(R_1 + R_2)^2} \Delta R_2 + \frac{R_4}{(R_3 + R_4)^2} \Delta R_3 - \frac{R_3}{(R_3 + R_4)^2} \Delta R_4 \right) \dots\dots\dots (\text{A.6})$$

Na maioria dos casos práticos de medições extensométricas, as mudanças relativas de resistência são tão pequenas que a equação (A.6) é extraordinariamente linear [28].

Uma vez obtidas as expressões fundamentais que descrevem o comportamento da ponte de Wheatstone, é possível estudar sua aplicação nas medições extensométricas da viga elástica do tensiômetro.

CONCEPÇÃO DA PONTE DE WHEATSTONE PARA O TENSIOÛMETRO.

Na figura A.2 mostra-se o esquema da conexão da ponte de Wheatstone para a viga elástica do tensiômetro extensométrico, em configuração de ponte completa.

Como se pode observar na figura A.2 e da equação (A.6), as resistências R_3 e R_1 tem mudanças positivas de mesmo valor que as mudanças negativas das resistências R_2 e R_4 . Então, para o caso da flexão em ponte completa, da equação (A.6) vem:

$$\Delta e_o = e_i \frac{R_g}{(R_g + R_g)^2} [\Delta R_g - (-\Delta R_g) + \Delta R_g - (-\Delta R_g)] \quad (\text{A.7})$$

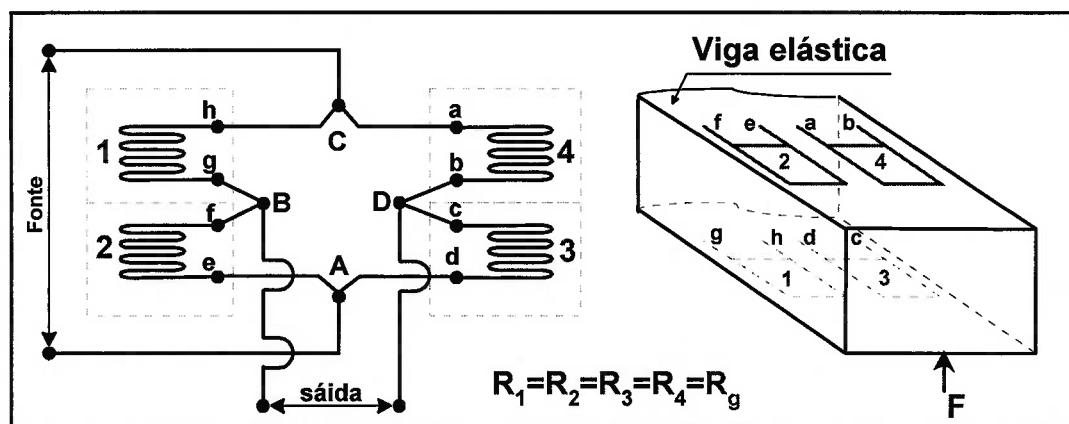


Figura A.2 Esquema da conexão da ponte completa do tensiômetro.

donde, após simplificação,

$$e_o = e_i \frac{\Delta R_g}{R_g} \quad (\text{A.8})$$

Se consideramos a equação que tem na consideração o coeficiente K_g segundo [23], então:

$$e_o = e_i \cdot K_g \cdot \varepsilon \quad (\text{A.9})$$

relacionando a deformação específica da viga elástica (ε) com a variação de voltagem na saída da ponte (e_o), através do coeficiente constante do extensômetro (K_g) e da voltagem de alimentação da ponte (e_i).

Quando, no entanto, se use comprimentos iguais nos conetores da configuração completa da ponte de Wheatstone segundo figura A.2, deformações uniformes por todo a peça, como a que ocorre na viga elástica do tensiômetro sob efeito de variação de temperatura, são automaticamente não contabilizadas porque se auto cancelam como demonstra a equação A.7.

ANEXO B

Neste anexo são apresentados os aspectos fundamentais do procedimento utilizado para a calibração dos tensiômetros que formarem parte da bancada de ensaios do trabalho.

Deixou-se de incluir aqui uma análise detalhada de todo o processo, objetivando não estender demasiadamente este tópico e por não considerá-lo essencial ao desenvolvimento do trabalho. Ao leitor interessado recomenda-se a referência [23] que trata o problema cuidadosamente nas páginas 23 até 36 .

CONSIDERAÇÕES GERAIS.

A calibração estática de um instrumento de medição é feita, com o objetivo de obter os parâmetros mais importantes que definem as características técnicas do instrumento, dentro das quais podem-se mencionar, a tolerância (erro aleatório ou imprecisão), a faixa, a sensibilidade estática, a linearidade e a estabilidade da medição. Em função dos valores obtidos destes parâmetros se poderá avaliar finalmente se o instrumento proposto cumpre o não os requisitos técnicos para o qual ele foi desenhado ou selecionado.

CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DOS TENSIÔMETROS.

Como já foi mencionado na introdução do trabalho, inicialmente opta-se por a fabricação de três tensiômetros segundo o protótipo proposto nos itens anteriores, que é o menor número de tensões necessárias a obter do sistema

de amarração proposto do modelo em escala reduzida da bancada de ensaios, que permite a possível monitoração de sua posição planar.

Utilizando o método dos mínimos quadrados para o ajuste da linha reta da calibração estática de cada tensiômetro, que minimiza a soma dos quadrados dos desvios verticais dos dados com respeito à linha reta ajustada segundo procedimento da referência [23].

A equação da linha reta é:

$$y = m x + b \quad (\text{B.1})$$

Na equação (B.1), x representa a entrada ou variável independente (para nosso caso os pesos padrões); y representa a saída ou variável dependente (leitura indicada), m é a inclinação da linha reta ajustada ou coeficiente de regressão linear e b seu intercepto sobre o eixo vertical. Os valores numéricos de m e b obtêm-se de:

$$m = \frac{N \sum xy - (\sum x)(\sum y)}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{B.2})$$

$$b = \frac{(\sum y)(\sum x^2) - (\sum xy)(\sum x)}{N \sum x^2 - (\sum x)^2} \quad (\text{B.3})$$

Nas expressões (B.2) e (B.3), N representa o número total de pontos da gráfica, ou seja, o número de pares de dados da amostra considerada.

O erro aleatório das medições que nos permite definir a tolerância do tensiômetro, o obteremos assumindo uma distribuição normal para um

intervalo de confiança de um 99,7% da estimativa do desvio padrão da amostra da população considerada na calibração, ou seja:

$$\text{tol} = \pm 3 \sigma_x \quad (\text{B.5})$$

donde o desvio padrão σ_x vem:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{N} \sum \left[\left(\frac{y-b}{m} \right) - x \right]^2 \quad (\text{B.6})$$

O parâmetro que nos permite avaliar qual é a maior ou menor tendência de que os pontos da população tomada como amostra se agrupem segundo uma linha reta é o denominado coeficiente de correlação linear de Pearson [35], definido por:

$$\gamma = \frac{\text{cov}(x,y)}{\sigma_x \sigma_y} \quad (\text{B.7})$$

Na equação (B.7) acima, o término $\text{cov}(x,y)$ é a covariância, permite uma medida do grau e do sinal da correlação linear, entanto σ_x e σ_y são os desvios padrão das variáveis x e y na amostra.

Para a calibração dos tensiômetros, o valor dos pesos padrões utilizados no processo foi de 200 ± 0.1 [gramas]. A calibração, foi feita segundo o esquema da figura B.1, utilizando-se como parte das componentes do sistema, o conjunto de pesos padrões, o amplificador extensométrico Tipo PEB-1350 [30], o conversor analógico digital CAD 12/32 [29], o programa para a aquisição e análises de sinais desenvolvido partindo do programa padrão da LINX e um microcomputador 486 - 60 MHz.

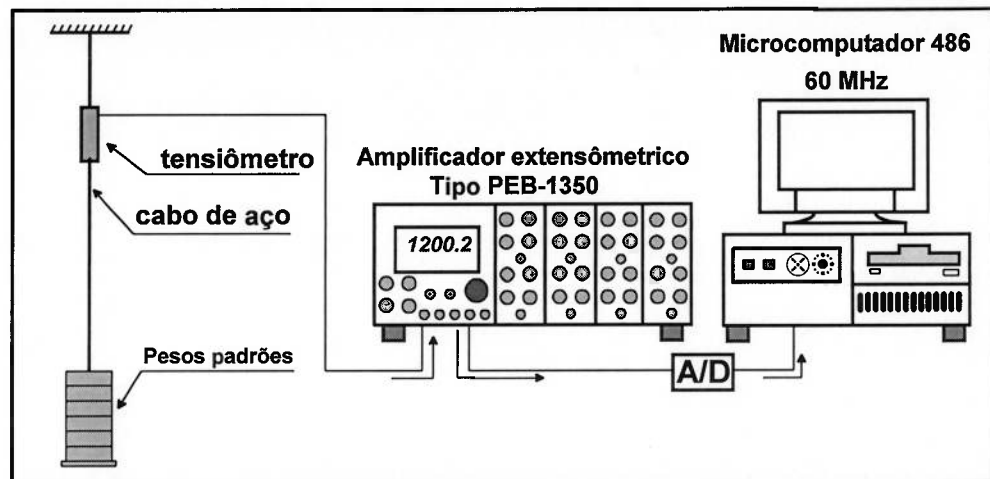


Figura B.1 Esquema geral da instalação para a calibração estática.

Forem obtidas 10 leituras para cada uma das medições feitas na calibração, primeiro no sentido crescente (carregando) e depois decrescente (descarregando) para cada tensiômetro calibrado. A faixa definida para a calibração foi de 7 até 20 [Newton], que corresponde com os valores limites de operação possível alcançar-se segundo os deslocamentos previsto no modelo em escala reduzida da bancada de ensaios.

Nas tabelas B.1 até B.3 mostram-se as leituras e os valores dos parâmetros obtidos para a calibração de cada tensiômetro e nas tabelas B.4 até B.6 tem-se o comportamento dos tensiômetros depois de calibrados.

Tabela B1. Calibração estática do tensiômetro No 1.

LEITURAS REALIZADAS PARA A CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO TENSIOÔMETRO No 1											
LEITURAS DURANTE O CARREGAMENTO DO TENSIOÔMETRO [em gramas]											
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio	Peso padrão
653	654	650	652	654	653	653	654	653	654	653	600
858	856	857	857	857	855	858	858	858	856	857	800
1061	1060	1060	1062	1062	1060	1058	1058	1059	1060	1060	1000
1261	1262	1260	1263	1260	1261	1259	1261	1262	1261	1261	1200
1457	1455	1455	1456	1457	1456	1456	1456	1455	1457	1456	1400
1645	1647	1644	1643	1648	1647	1646	1646	1647	1647	1646	1600
1831	1831	1833	1832	1833	1832	1830	1828	1831	1829	1831	1800
2010	2011	2011	2010	2012	2012	2013	2010	2010	2011	2011	2000
LEITURAS DURANTE O DESCARREGAMENTO DO TENSIOÔMETRO [em gramas]											
653	654	653	652	652	653	654	653	654	652	653	600
854	854	853	852	854	854	853	851	852	853	853	800
1063	1064	1060	1062	1063	1063	1062	1064	1065	1064	1063	1000
1262	1263	1265	1265	1264	1264	1264	1264	1264	1265	1264	1200
1456	1458	1458	1458	1457	1457	1456	1456	1456	1458	1457	1400
1646	1647	1646	1647	1647	1648	1647	1647	1647	1648	1647	1600
1831	1831	1832	1831	1831	1828	1830	1831	1833	1832	1831	1800
2010	2010	2010	2007	2007	2010	2009	2011	2008	2008	2009	2000
VALOR DA INCLINAÇÃO DA LINHA RETA AJUSTADA $m =$ 0,972											
INTERCEPÇÃO DA LINHA AJUSTADA COM O EIXO VERTICAL $b =$ 83,524											
DESVIO PADRÃO $\sigma_x =$ 11,212											
COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR $\gamma =$ 0,9997											

Tabela B2. Calibração estática do tensiômetro No 2.

LEITURAS REALIZADAS PARA A CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO TENSIOMETRO No 2										
LEITURAS DURANTE O CARREGAMENTO DO TENSIOMETRO [em gramas]										
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio
661	662	662	662	661	663	663	663	663	660	662
872	870	870	869	867	869	867	868	869	869	869
1074	1074	1075	1075	1075	1073	1073	1072	1075	1074	1074
1273	1272	1271	1271	1273	1275	1275	1274	1273	1273	1273
1467	1467	1467	1465	1466	1465	1468	1468	1469	1468	1467
1655	1655	1654	1654	1656	1656	1657	1653	1655	1655	1655
1840	1842	1842	1838	1838	1840	1840	1838	1841	1841	1840
2022	2021	2023	2023	2024	2025	2024	2021	2024	2023	2023
LEITURAS DURANTE O DESCARREGAMENTO DO TENSIOMETRO [em gramas]										
655	655	657	657	658	658	657	657	658	658	657
864	863	863	864	864	865	863	865	865	864	864
1065	1065	1067	1067	1068	1069	1069	1065	1067	1068	1067
1267	1266	1266	1267	1267	1268	1268	1268	1268	1265	1267
1464	1464	1465	1465	1463	1462	1463	1466	1464	1464	1464
1652	1652	1650	1651	1653	1654	1651	1653	1652	1652	1652
1839	1839	1840	1840	1837	1839	1840	1839	1838	1839	1839
2023	2021	2023	2021	2021	2024	2022	2021	2022	2022	2022
VALOR DA INCLINAÇÃO DA LINHA RETA AJUSTADA										m =
INTERCEPÇÃO DA LINHA AJUSTADA COM O EIXO VERTICAL										b =
DESVIO PADRÃO										$\sigma_x =$
COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR										$\gamma =$
										0,9732
										90,7202
										10,6354
										0,9997

Tabela B3. Calibração estática do tensiômetro No 3.

LEITURAS REALIZADAS PARA A CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO TENSÍMETRO No 3												
LEITURAS DURANTE O CARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio	Peso padrão	
627	627	627	628	628	628	629	629	628	629	628	628	600
825	825	826	826	825	825	827	827	827	827	827	826	800
1025	1025	1024	1026	1024	1025	1026	1025	1026	1024	1025	1025	1000
1221	1221	1222	1221	1222	1221	1220	1222	1220	1220	1221	1221	1200
1418	1416	1416	1416	1417	1418	1415	1418	1418	1418	1417	1417	1400
1618	1617	1616	1619	1617	1619	1619	1618	1619	1618	1618	1618	1600
1814	1813	1813	1813	1812	1812	1815	1812	1813	1813	1813	1813	1800
2006	2006	2006	2005	2006	2008	2010	2008	2007	2008	2007	2007	2000
LEITURAS DURANTE O DESCARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
630	629	629	632	632	631	632	631	632	632	631	631	600
827	827	830	830	829	832	832	830	831	832	830	830	800
1025	1025	1024	1024	1023	1026	1026	1027	1025	1025	1025	1025	1000
1225	1224	1224	1226	1226	1226	1225	1223	1226	1225	1225	1225	1200
1419	1420	1418	1417	1418	1417	1420	1421	1422	1418	1419	1419	1400
1620	1620	1618	1618	1620	1622	1622	1621	1620	1619	1620	1620	1600
1816	1816	1817	1816	1818	1817	1814	1814	1815	1817	1816	1816	1800
2009	2009	2008	2007	2010	2009	2010	2010	2010	2008	2009	2009	2000
VALOR DA INCLINAÇÃO DA LINHA RETA AJUSTADA $m = 0,9857$ INTERCEPÇÃO DA LINHA AJUSTADA COM O EIXO VERTICAL $b = 39,2738$ DESVIO PADRÃO $\sigma_x = 2,0978$ COEFICIENTE DE CORRELAÇÃO LINEAR $\gamma = 1,0000$												

Tabela B4. Comportamento do tensiômetro No 1 depois da calibração estática.

LEITURAS REALIZADAS DEPOIS DA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO TENSÍMETRO No 1												
LEITURAS DURANTE O CARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio	Peso padrão	% do erro
587	587	586	587	586	589	589	587	586	586	587	600	2,167
796	796	795	795	797	798	797	795	796	795	796	800	0,500
1005	1005	1004	1003	1002	1006	1007	1005	1007	1006	1005	1000	0,500
1211	1211	1211	1209	1209	1215	1213	1214	1213	1214	1212	1200	1,000
1412	1412	1412	1413	1414	1413	1415	1409	1410	1410	1412	1400	0,857
1607	1607	1605	1605	1608	1608	1609	1607	1607	1607	1607	1600	0,438
1798	1798	1799	1799	1796	1798	1796	1797	1798	1799	1797,8	1800	0,122
1984	1984	1983	1983	1985	1985	1986	1982	1985	1983	1984	2000	0,800
LEITURAS DURANTE O DESCARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
586	586	587	587	585	585	586	586	588	584	586	600	2,333
792	792	790	790	791	793	795	796	795	796	793	800	0,875
1008	1008	1006	1006	1009	1009	1010	1009	1008	1007	1008	1000	0,800
1214	1214	1212	1212	1213	1216	1216	1213	1215	1215	1214	1200	1,167
1413	1413	1413	1415	1415	1416	1415	1415	1412	1413	1414	1400	1,000
1609	1609	1608	1607	1609	1610	1610	1608	1610	1610	1609	1600	0,563
1798	1798	1796	1795	1800	1799	1799	1799	1800	1796	1798	1800	0,111
1981	1980	1980	1980	1985	1984	1983	1985	1980	1982	1982	2000	0,900
INCLINAÇÃO DA LINHA RETA AJUSTADA $m = 0,9997$												
INTERCEPÇÃO DA LINHA AJUSTADA COM O EIXO VERTICAL $b = 0,6369$												
IMPRECISÃO $3 \sigma_x = 33,6300$												

Tabela B5. Comportamento do tensiômetro No 2 depois da calibração estática.

LEITURAS REALIZADAS DEPOIS DA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO TENSÍMETRO No 2												
LEITURAS DURANTE O CARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio	Peso padrão	% do erro
585	584	584	582	582	583	586	587	589	588	585	600	2,500
800	803	803	803	802	802	800	798	800	799	801	800	0,125
1011	1012	1012	1013	1009	1009	1008	1012	1012	1012	1011	1000	1,100
1213	1214	1208	1214	1213	1214	1215	1214	1212	1213	1213	1200	1,083
1416	1416	1415	1416	1418	1415	1415	1415	1416	1418	1416	1400	1,143
1608	1608	1608	1610	1610	1609	1609	1606	1607	1605	1608	1600	0,500
1798	1798	1799	1799	1796	1798	1796	1797	1800	1799	1798	1800	0,111
1986	1986	1988	1988	1988	1985	1985	1983	1984	1987	1986	2000	0,700
LEITURAS DURANTE O DESCARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
586	586	587	587	585	585	586	586	588	584	586	600	2,333
796	792	796	796	792	796	795	796	795	796	795	800	0,625
1004	1003	1005	1004	1004	1004	1006	1005	1008	1007	1005	1000	0,500
1208	1208	1208	1204	1204	1206	1208	1206	1211	1207	1207	1200	0,583
1413	1410	1410	1412	1409	1409	1408	1414	1412	1413	1411	1400	0,786
1605	1606	1606	1607	1604	1608	1604	1605	1607	1608	1606	1600	0,375
1798	1798	1796	1795	1800	1799	1799	1799	1800	1796	1798	1800	0,111
1981	1986	1985	1987	1985	1984	1987	1985	1985	1985	1985	2000	0,750
INCLINAÇÃO DA LINHA RETA AJUSTADA $m =$ 1,00003												
INTERCEPÇÃO DA LINHA AJUSTADA COM O EIXO VERTICAL $b =$ 0,64881												
IMPRECISÃO $3 \sigma_x =$ 31,9062												

Tabela B6. Comportamento do tensiômetro No 3 depois da calibração estática.

LEITURAS REALIZADAS DEPOIS DA CALIBRAÇÃO ESTÁTICA DO TENSÍMETRO No 3												
LEITURAS DURANTE O CARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
No 1	No 2	No 3	No 4	No 5	No 6	No 7	No 8	No 9	No 10	Valor médio	Peso padrão	% do erro
598	598	598	597	596	598	599	600	600	596	598	600	0,333
796	796	795	798	800	800	804	797	796	798	798	800	0,250
1000	1000	1000	998	1000	1004	1005	1006	1004	1003	1002	1000	0,200
1198	1198	1197	1196	1195	1199	1200	1200	1200	1197	1198	1200	0,167
1402	1402	1400	1400	1404	1404	1403	1400	1403	1402	1402	1400	0,143
1600	1600	1608	1605	1605	1604	1601	1606	1606	1605	1604	1600	0,250
1806	1800	1802	1807	1807	1805	1805	1807	1806	1805	1805	1800	0,278
1998	1998	1996	1996	2000	2000	2000	1998	1996	1998	1998	2000	0,100
LEITURAS DURANTE O DESCARREGAMENTO DO TENSÍMETRO [em gramas]												
600	600	604	604	600	602	598	598	602	602	601	600	0,167
804	804	800	800	806	806	805	804	807	804	804	800	0,500
998	998	1000	1000	1002	999	998	1000	998	997	999	1000	0,100
1204	1204	1200	1200	1205	1206	1207	1206	1204	1204	1204	1200	0,333
1403	1403	1400	1400	1406	1406	1402	1405	1402	1403	1403	1400	0,214
1605	1606	1606	1607	1604	1608	1604	1605	1607	1608	1606	1600	0,375
1806	1802	1802	1802	1807	1809	1809	1806	1808	1809	1806	1800	0,333
2000	2000	2004	2004	2006	1998	2000	2002	2003	2003	2002	2000	0,100
INCLINAÇÃO DA LINHA AJUSTADA $m =$ 1,0024												
INTERCEPÇÃO DA LINHA AJUSTADA COM O EIXO VERTICAL $b =$ -1,2976												
IMPRECISÃO $3 \sigma_x =$ 6,2934												

AVALIAÇÃO DOS TENSIÔMETROS DEPOIS DA CALIBRAÇÃO.

Depois de realizado todo o processo de calibração estática dos tensiômetros foram realizadas novas leituras para avaliar o comportamento dos mesmos, nas tabelas B.4 até B.6 tem-se os valores das leituras obtidas, analisando os valores obtidos, a dispersão dos valores das leituras para o caso do carregamento e o descarregamento na faixa de trabalho dos tensiômetros, o erro não excede 1.2% do valor padrão, valor que pode-se considerar admissível para os requisitos necessários propostos no trabalho. Analisando os valores da tabela B.7 que mostra o teste feito para avaliar a estabilidade da medição dos tensiômetros, considera-se ótima pois foram testados por mais de 400 horas contínuas e o error nas leituras no excede 0.5 % .

Tabela B7. Estabilidade da medição dos tensiômetros

ESTABILIDADE DA MEDIÇÃO [em milivolts]								
Tensiômetro	"ZERO"		CARGA MÁX. 20 [Newton]					
	Inicial	72 hrs	inicial	72 hrs	% do erro	01/02/97	10/03/97	% do erro
No 1	6,40	8,38	2000,0	2006,00	0,300	1602,0	1594,8	0,45
No 2	8,38	11,20	2000,0	2009,50	0,475	1350,0	1356,0	0,44
No 3	7,25	9,45	2000,0	2010,00	0,500	959,3	963,9	0,48

Finalmente, as características técnicas obtidas para cada tensiômetro calibrado mostram-se a continuação na tabela B.8.

Tabela B.8 Características Técnicas dos Tensiômetros.

Tensiômetro	[Newton]		[milivolt/Newton]
	Faixa de Medição	Tolerância	Sensibilidade Estática
No 1	7 até 20	± 0.33	0.999
No 2	7 até 20	± 0.32	1.000
No 3	7 até 20	± 0.30	1.002

ANEXO C

DETERMINAÇÃO DA INTERSECÇÃO DE DUAS CIRCUNFERÊNCIAS.

Na figura C1 mostra-se a intersecção de duas circunferências mediante as quais pode-se obter o sistema de equações do algoritmo da função "Inter Cir", para ser implementada no programa, que permitirá finalmente a obtenção das coordenadas do centro de gravidade da unidade flutuante.

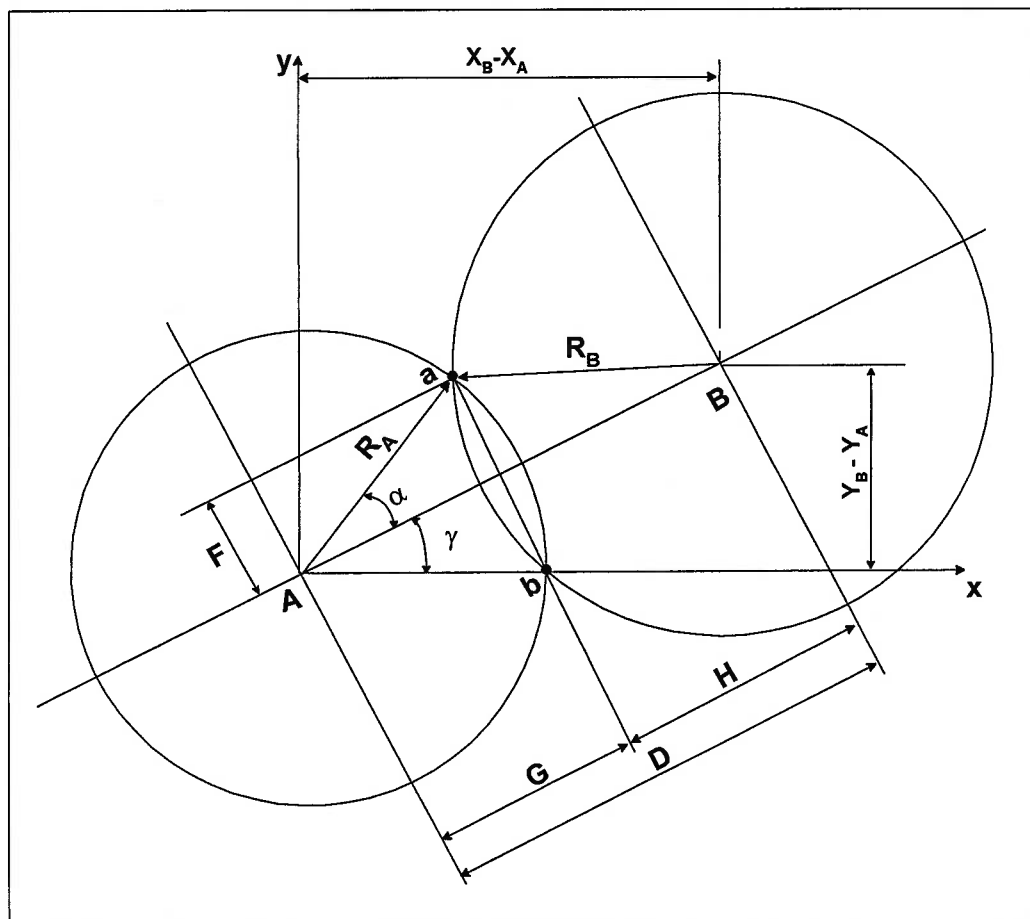


Figura C1. Intersecção de duas circunferências para a função Inter-Cir.

Da análise geométrica tem-se:

$$D = \sqrt{(X_B - X_A)^2 + (Y_B - Y_A)^2} \quad (\text{C.1})$$

$$H = D - G \quad (\text{C.2})$$

$$R_A^2 = G^2 + F^2 \quad (\text{C.3})$$

$$H^2 = R_B^2 - F^2 \quad (\text{C.4})$$

Somando (C.3) com (C.4) tem-se:

$$G^2 - H^2 = R_A^2 - R_B^2 \quad (\text{C.5})$$

Substituindo (C.2) em (C.5), resolvendo e isolando G tem-se:

$$G = \frac{(R_A^2 + D^2 - R_B^2)}{2D} \quad (\text{C.6})$$

As coordenadas dos pontos de intersecção na circunferências são:

$$X = X_A + R_A \cos(\gamma \pm \alpha) \quad (\text{C.7})$$

$$Y = Y_A + R_A \sin(\gamma \pm \alpha) \quad (\text{C.8})$$

lembrando [33]:

$$\cos(\gamma \pm \alpha) = \cos \gamma \cdot \cos \alpha \pm \sin \gamma \cdot \sin \alpha \quad (\text{C.9})$$

$$\sin(\gamma \pm \alpha) = \sin \gamma \cdot \cos \alpha \pm \cos \gamma \cdot \sin \alpha \quad (\text{C.10})$$

$$\sin \gamma = \frac{(Y_B - Y_A)}{D} \quad (\text{C.11})$$

Isolando F na equação (C.3) tem-se:

$$\sin \alpha = \frac{F}{R_A} \quad (\text{C.12})$$

$$\cos \gamma = \frac{(X_B - X_A)}{D} \quad (\text{C.13})$$

$$\cos \alpha = \frac{G}{R_A} = \frac{R_A^2 + D^2 - R_B^2}{2 D R_A} \quad (\text{C.14})$$

Finalmente substituindo nas equações acima em (C.7) e (C.8) tem-se:

$$X = X_A + \frac{G(X_B - X_A) \pm F(Y_B - Y_A)}{D} \quad (\text{C.15})$$

$$Y = Y_A + \frac{G(Y_B - Y_A) \pm F(X_B - X_A)}{D} \quad (\text{C.16})$$

ANEXO D

LISTAGEM DO PROGRAMA PRINCIPAL "MORPOS .PAS"

```

{$F+,O+,N+}
{$M 65520,0,655360}
{$R+}          {range checking not allowed, must be in all units}
{$S-}

PROGRAM MORPOS;
{!*****!
! System : Turbo Pascal !
! From : MORPOS !
! Program : MORPOS !
! Purpose : MONITOR DE POSIÇÃO PARA FPP !
! Author : Carlos A. Nunes Dias ; Miguel Angel García Domínguez. !
!*****!}

{ ----- Memoria utilizada -----
      Data: 62634
      Stack: 2200      (maximo 65536)
      Heap: 655360    (maximo 'Default')}

USES
  Overlay, Overinc, ACOS, ASIN, TANG, TRIGER, GOLD,
  ENTRADA, DEVARI, CIRCUF, ADEFI, DESEN, LINX32,
  dos, graph, crt, bgidriv, bgifont ;

LABEL LBA, LBB, LBC, LBT, LBI;
TYPE
  STRING12 = string[12];

VAR
  GAM, GAM4, DXY, DXY2, AF1, AF2, FIIN, FIFI, tdl,
  DFI, DDFI, FI, FIE, FID, AIN, AIN0, AIF, VERRO,
  FI1E, FI2E, AA1E, AA2E, AAE, AA1, AA0,
  FI1D, FI2D, AA1D, AA2D, AAD, FIMED, FIMD,
  XP, YP, TETA, TETAA, TETAB, TETAC, DPOS, DIST,
  FIESC, OFFDIST, OFFTETA          :REAL;

  MM, drv, grd, NV, I, J, GRAF, SALARM, charh, charw  :INTEGER;
  STRG          :STRING12;
  CHS           :CHAR;

PROCEDURE Máximos;
VAR
  I :INTEGER;
  cafX, cafY :REAL;
begin
  xmax:=0.0;
  FOR I:= 1 TO NUMAR DO
  BEGIN
    IF X[I]>xmax THEN xmax:=X[I];
  END;
  ymax:=0.0;
  FOR I:= 1 TO NUMAR DO

```

```

BEGIN
  IF Y[I]>ymax THEN ymax:=Y[I];
END;
cafX:=0.5*xmag/xmax;
cafY:=0.5*yimag/ymax;
IF cafX>cafY THEN caf:=cafY
  ELSE caf:=cafX;
end;
procedure Abort(Msg : string);
begin
  Writeln(Msg, ': ', GraphErrorMsg(GraphResult));
  Halt(1);
end;

PROCEDURE Inicializa_Grafico(Var Driv:Integer);
Var
  Modo
    : Integer;
Begin
  Driv:=Detect;
  if RegisterBGIDriver(@CGADriverProc) < 0 then
    Abort('CGA');
  if RegisterBGIDriver(@EGAVGADriverProc) < 0 then
    Abort('EGA/VGA');
  if RegisterBGIFont(@GothicFontProc) < 0 then
    Abort('Gothic');
  if RegisterBGIFont(@SansSerifFontProc) < 0 then
    Abort('SansSerif');
  InitGraph(Driv,Modo,"");
  setbkcolor(1);
  ClearDevice;
  xmag:=getmaxX;
  ymag:=getmaxY;
  setcolor(15);
  rectangle(0,0,xmag,ymag);
  rectangle(2,2,xmag-2,ymag-2);
  xmag:=xmag-80;
  ymag:=ymag-80;

  SetFillStyle(SolidFill,LightGray);
  FloodFill(getmaxX-3,getmaxY-3,15);
  SetTextStyle(SansSerifFont , HorizDir,2);

  setcolor(8);
  OutTextXY(getmaxX-79,17,'MORPOS');
  OutTextXY(getmaxX-80,17,'MORPOS');
  OutTextXY(getmaxX-81,16,'MORPOS');
  OutTextXY(getmaxX-82,16,'MORPOS');

  setcolor(4);
  OutTextXY(getmaxX-83,15,'MORPOS');
  OutTextXY(getmaxX-84,15,'MORPOS');
  SetTextStyle(SmallFont , HorizDir,1);

  setcolor(9);
  OutTextXY(getmaxX-83,40,' position ');
  OutTextXY(getmaxX-80,11,' mooring ');
  OutTextXY(getmaxX-79,48,' monitor ');

```

```

setcolor(3);
rectangle(getmaxX-180,getmaxY-50,getmaxX-2,getmaxY-2);
SetFillStyle(SolidFill,Cyan);
FloodFill(getmaxX-90,getmaxY-15,3);
setcolor(8);
SetTextStyle(SmallFont , HorizDir,2);
OutTextXY(4 ,getmaxY-70,'C.G. POSITION : ');
OutTextXY(4 ,getmaxY-30,'OFFSET.....: ');
setcolor(14);
SetTextStyle(SmallFont , HorizDir,2);
OutTextXY(xmag div 2 - 120,getmaxY-70,'SURGE__X =');
OutTextXY(xmag div 2 - 120,getmaxY-60,'SWAY__Y =');
OutTextXY(xmag div 2 - 120,getmaxY-50,'YAW___w =');
OutTextXY(xmag div 2 - 120,getmaxY-30,'AMPLITUDE=');
OutTextXY(xmag div 2 - 120,getmaxY-20,'DIRECTION=');
setcolor(5);
SetTextStyle(SmallFont , HorizDir,1);
OutTextXY(getmaxX-78,getmaxY-310,'Anchoring');
OutTextXY(getmaxX-78,getmaxY-302,'Radius...');
FOR I:=1 TO NUMAR DO
BEGIN
  STR(I:2,STRG);
  STRG:=STRG+'!';
  OutTextXY(getmaxX-83,getmaxY-300+I*10,STRG);
END;
charh:=16;{TextHeight('T');}
charw:= TextWidth ('T');
xcs:=1;
ycs:=1;
xci:=xmag div charw;
yci:=ymag div charh+1;
window(xcs,ycs,xci,yci);
xcs:=(xcs-1)*charw;
ycs:=(ycs-1)*charh;
xci:=xci*charw;
yci:=yci*charh;
End;

PROCEDURE Le_Restaura;
LABEL LB1;
VAR
  I,J,JP :INTEGER;
begin
ASSIGN(res,'MORPOS.res');
{$I-}RESET(res);{$I+}
LB1:
  READLN(res,NLIN,JPONT[NLIN],FATOR[NLIN]);
IF NLIN>0 THEN
BEGIN
  JP:=JPONT[NLIN]-1;
  FOR J:=1 TO JP DO READ(res,DD[NLIN,J]);
  READLN(res,DD[NLIN,JP+1]);
  FOR J:=1 TO JPONT[NLIN] DO READ(res,TT[NLIN,J]);
  GOTO LB1;
END;
CLOSE(res);
END;

```

```
PROCEDURE Inter_Distan;
```

```
VAR
```

```
  I,J,J1,JP  :INTEGER;
```

```
BEGIN
```

```
  FOR I:=1 TO NUCAN DO
```

```
  BEGIN
```

```
    JP:= JPONT[I];
```

```
    DELT:=(TT[I,JP]-TT[I,1])/(JP-1);
```

```
    IF (T[I]>=TT[I,1]) AND (T[I]<=TT[I,JP]) THEN
```

```
    BEGIN
```

```
      J:=TRUNC((T[I]-TT[I,1])/DELT)+1;
```

```
      WHILE T[I]>TT[I,J] DO J:=J+1;
```

```
      WHILE T[I]<TT[I,J] DO J:=J-1;
```

```
      J1:=J+1;
```

```
      DELT:=TT[I,J1]-TT[I,J];
```

```
      D[I]:=DD[I,J]+(DD[I,J1]-DD[I,J])*(T[I]-TT[I,J])/DELT;
```

```
    END
```

```
  ELSE
```

```
    IF (T[I]<TT[I,1]) THEN
```

```
      D[I]:=DD[I,1]+(DD[I,1]-DD[I,2])*(T[I]-TT[I,1])/(TT[I,1]-TT[I,2]);
```

```
    IF (T[I]>TT[I,JP]) THEN
```

```
      D[I]:=DD[I,JP]+(DD[I,JP-1]-DD[I,JP])*(T[I]-TT[I,JP])/(TT[I,JP-1]-TT[I,JP]);
```

```
  END;
```

```
END;
```

```
{PROGRAMA PRINCIPAL}
```

```
BEGIN
```

```
  GetTime(hor0,min0,seg0,dse0);
```

```
  GRAF:=1;
```

```
{PARA GRAF=1 O PROGRAMA FAZ MONITORAÇÃO DA POSIÇÃO DA UNIDADE  
PARA GRAF=0 FAZ GRÁFICO DE OBTENÇÃO DAS RAÍZES PELO MÉTODO DA SECANTE}
```

```
  entrada_de_dados;
```

```
  Le_Restaura;
```

```
  closegraph;
```

```
  grd:=detect;
```

```
  Inicializa_Grafico(drv);
```

```
  maximos;
```

```
  NLEI:=0;
```

```
  i:=0;
```

```
  IF FlagSim<>0 THEN PLinx_32(i);
```

```
MM:=NUCAN;
```

```
TOL:=TOLERANCIA*A[MM];
```

```
GAM:=PI/2.;
```

```
IF X[2]<>X[1] THEN
```

```
  BEGIN
```

```
    GAM=ARCTAN((Y[2]-Y[1])/(X[2]-X[1]));
```

```
    GAM4=ARCTAN((X[1]-X[4])/(Y[1]-Y[4]));
```

```
  END;
```

```
DXY:=SQRT(SQR(X[2]-X[1])+SQR(Y[2]-Y[1]));
```

```
DXY2:=DXY*DXY;
```

```
  CHS:='+';
```

```
  TOLR:=TOLREADING;
```

```

ASSIGN(lnx,'MORPOS.lnx');
LBT:
{$I-}RESET(tab);{$I+}
FOR I:=1 TO 7 DO READLN(tab);
{$I-}REwrite(lnx);{$I+}
  writeln(lnx,'Arquivo de Leituras');

LBI:
repeat
  NLEI:=NLEI+1;
  setcolor(7);
  OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-10,'PRECISION LACK');
  OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-20,'CALCULATING');
  OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-30,'STARTING');
  setcolor(14);
  OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-40,'A/D READING');

  i:=1;
  IF FlagSim<>0 THEN
    BEGIN
      PLinx_32(i);
      IF FlagSim=2 THEN READLN(tab,AVetor[1],AVetor[2],AVetor[3],AVetor[4]);
      VERRO:=1.;
      END
    ELSE
      BEGIN
        READLN(tab,AVetor[1],AVetor[2],AVetor[3],AVetor[4]);
        RandSeed:=dse;
      END;

    setcolor(7);
    OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-40,'A/D READING');

    FOR I:=1 TO NUMAR DO
      BEGIN
        IF FlagSim=0 THEN
          VERRO:=2.*TOLR*Random(1000)/1000.+(1-TOLR);
          T[I]:=FATOR[I]*AVetor[I]*VERRO;
        END;

        setcolor(8);
        OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-30,'STARTING');

        IF T[1]=0 THEN GOTO LBT;

        Inter_Distan;
        AF1:=ARCCOS((-SQR( A[4]+D[2])+SQR(D[1])+DXY2)/(2*DXY*D[1]));
        AF2:=0.0;

        IF DXY<(D[1]+D[2]) THEN
          AF2:=ARCCOS((-SQR( D[2])+SQR(D[1])+DXY2)/(2*DXY*D[1]));
          FIIN:=(PI/2)+GAM4-AF2);
          FIFI:=GAM+AF1;
          DFI:=(FIFI-FIIN)/500;
          GOLDEN(FIIN,FIFI,FIMED);
          FIMD:=FIMED;

```

```

NV:=0;
FI1E:=FIIN;
AA1E:=A_DE_FI(FI1E)-D[MM];
WHILE (AA1E<0) DO
BEGIN
FI1E:=FI1E-DFI;
AA1E:=A_DE_FI(FI1E)-D[MM];
END;
FI2E:=FIMED;
AA2E:=A_DE_FI(FI2E)-D[MM];
I:=0;
FI1D:=0.;
DDFI:=10.*DFI;
WHILE (FI1D<=FIMED) AND (I<2) DO
BEGIN
I:=I+1;
FI1D:=FIFI;
DDFI:=DDFI/10.;
AA1D:=A_DE_FI(FI1D)-D[MM];
WHILE (AA1D<0) DO
BEGIN
FI1D:=FI1D-DDFI;
AA1D:=A_DE_FI(FI1D)-D[MM];
END;
END;
FI2D:=FIMED;
AA2D:=AA2E;

IF GRAF=0 THEN
BEGIN
WINDOW(1,1,80,40);
setbkcolor(3);
setcolor(4);

CLRSCR;
MOVETO(0,(ymag DIV 2));
LINETO(xmag,(ymag DIV 2));
MOVETO(0,(ymag DIV 2));
FI:=-DFI;
FIESC:=PI/2;

WHILE FI<=(FIESC-DFI) DO
BEGIN
setcolor(14);
IF (FI<FI1E) OR (FI>FI1D) THEN setcolor(15);
FI:=FI+DFI;
AAE:=A_DE_FI(FI)-D[MM];
LINETO(TRUNC(FI*xmag/FIESC),TRUNC((ymag DIV 2)-(ymag DIV 2)*AAE/YMAX));
END;

setcolor(4);
MOVETO(TRUNC(FI1E*xmag/(PI/2)),TRUNC((ymag DIV 2)-(ymag DIV 2)*AA1E/YMAX));
LINETO(TRUNC(FI2E*xmag/(PI/2)),TRUNC((ymag DIV 2)-(ymag DIV 2)*AA2E/YMAX));
MOVETO(TRUNC(FI1D*xmag/(PI/2)),TRUNC((ymag DIV 2)-(ymag DIV 2)*AA1D/YMAX));
LINETO(TRUNC(FI2D*xmag/(PI/2)),TRUNC((ymag DIV 2)-(ymag DIV 2)*AA2D/YMAX));
READLN;

END;

```

```

setcolor(7);
OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-40,'A/D READING');
setcolor(7);
OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-30,'STARTING');
setcolor(0);
OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-20,'CALCULATING');
LBA:
NOSOUND;
NV:=NV+1;
IF (NV>100) OR (AA1E=AA2E) OR (AA1D=AA2D)
    OR (AA2E>tol ) OR (AA2D>tol ) THEN
BEGIN
SOUND(400);
setcolor(4);
OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-10,'PRECISION LACK');
setcolor(12);
Circle(xmag div 2,ymag div 2,10);
SetFillStyle(SolidFill,Red);
FloodFill(xmag div 2,ymag div 2,12);
setcolor(12);
Circle(xmag div 2,ymag div 2,10);
SetFillStyle(WideDotFill,Yellow);
FloodFill(xmag div 2,ymag div 2,12);
OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-10,'PRECISION LACK');
tdl:=3.;
trigger(tdl);
nosound;
FIE:=FIMED;
FID:=FIMED;
GOTO LBB;
END;

FIE:=(AA2E*FI1E-AA1E*FI2E)/(AA2E-AA1E);
AAE:=A_DE_FI(FIE)-D[MM];
FID:=(AA2D*FI1D-AA1D*FI2D)/(AA2D-AA1D);
AAD:=A_DE_FI(FID)-D[MM];
IF (FIE<FIIN) OR (FIE>FIFI) OR (FID<FIIN) OR (FID>FIFI)THEN
BEGIN
SOUND(500);
setcolor(4);
OutTextXY(getmaxX-150,getmaxY-10,'PRECISION LACK');
setcolor(10);
SetFillStyle(SolidFill,LightRed);
Ellipse(xmag div 2,ymag div 2 , 0, 360,10,10);
FloodFill(xmag div 2,ymag div 2,10);
tdl:=3.;
trigger(tdl);
nosound;
GOTO LBC;
END;

IF GRAF=0 THEN
BEGIN
MOVETO(TRUNC(FI1E*xmag/(PI/2)),TRUNC((ymag DIV 2)-(ymag DIV 2)*AA1E/YMAX));
LINETO(TRUNC(FI2E*xmag/(PI/2)),TRUNC((ymag DIV 2)-(ymag DIV 2)*AA2E/YMAX));
{READLN;}
END;

```



```

IF (ABS(AAE)<=TOL) AND
  (ABS(AAD)<=TOL) AND
  (ABS(FIE-FI2E)<=TOLERANCIA*FI2E) AND
  (ABS(FID-FI2D)<=TOLERANCIA*FI2D) THEN GOTO LBB;
IF (AAE*AA2E>0.0) THEN
  BEGIN
  AA2E:=AAE;
  FI2E:=FIE;
  END
  ELSE
  BEGIN
  AA1E:=AAE;
  FI1E:=FIE;
  END;

IF (AAD*AA2D>0.0) THEN
  BEGIN
  AA2D:=AAD;
  FI2D:=FID;
  END
  ELSE
  BEGIN
  AA1D:=AAD;
  FI1D:=FID;
  END;

GOTO LBA;
LBB:
  IF GRAF=0 THEN
  BEGIN
  READLN;
  CLRSCR;
  END;
  SETCOLOR(7);
  STR(XP:5:2,STRG);
  OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-70,STRG);
  STR(YP:5:2,STRG);
  OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-60,STRG);
  STR(TETA:5:1,STRG);
  OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-50,STRG);
  STR(OFFDIST:5:2,STRG);
  OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-30,STRG);
  STR(OFFTETA:5:1,STRG);
  OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-20,STRG);
  FOR I:=1 TO NUMAR DO
  BEGIN
  STR(D0[I]:5:2,STRG);
  OutTextXY(getmaxX-45,getmaxY-300+I*10,STRG);
  END;

  IF (CHS='+') THEN
  BEGIN
  TETAC:=+(2.*TETAB-TETAA);
  AAЕ:=A_DE_FI(FIE)-D[MM];
  XP:=(XB[1]+XB[2]+XB[3]+XB[4])/4.;
  YP:=(YB[1]+YB[2]+YB[3]+YB[4])/4.;
  TETA:=90.;

```

```

IF XB[1]<>XB[2] THEN
TETA:=ARCTAN((YB[2]-YB[1])/(XB[2]-XB[1]))*180./PI;

IF (TETA*TETAC<0) THEN
BEGIN
AAD:=A_DE_FI(FID)-D[MM];
XP:=(XB[1]+XB[2]+XB[3]+XB[4])/4.;
YP:=(YB[1]+YB[2]+YB[3]+YB[4])/4.;
TETA:=90.;
IF XB[1]<>XB[2] THEN
TETA:=ARCTAN((YB[2]-YB[1])/(XB[2]-XB[1]))*180./PI;
END;
END;

IF (CHS='-') THEN
BEGIN
TETAC:=-2.*TETAB-TETAA);
AAD:=A_DE_FI(FID)-D[MM];
XP:=(XB[1]+XB[2]+XB[3]+XB[4])/4.;
YP:=(YB[1]+YB[2]+YB[3]+YB[4])/4.;
TETA:=90.;
IF XB[1]<>XB[2] THEN
TETA:=ARCTAN((YB[2]-YB[1])/(XB[2]-XB[1]))*180./PI;

IF (TETA*TETAC<0) THEN
BEGIN
AAE:=A_DE_FI(FIE)-D[MM];
XP:=(XB[1]+XB[2]+XB[3]+XB[4])/4.;
YP:=(YB[1]+YB[2]+YB[3]+YB[4])/4.;
TETA:=90.;
IF XB[1]<>XB[2] THEN
TETA:=ARCTAN((YB[2]-YB[1])/(XB[2]-XB[1]))*180./PI;
END;

END;

TETAA:=TETAB;
TETAB:=TETA;
DPOS:=0;

FOR I:=1 TO NUMAR DO
BEGIN
DIST:=SQRT(SQR(XB[I])+SQR(YB[I]));
IF DIST>DPOS THEN DPOS:=DIST;
END;

SETCOLOR(4);
STR(XP:5:2,STRG);
OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-70,STRG);
STR(YP:5:2,STRG);
OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-60,STRG);
STR(TETA:5:1,STRG);
OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-50,STRG);
OFFDIST:=SQRT(SQR(XP)+SQR(YP));
STR(OFFDIST:5:2,STRG);
OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-30,STRG);

```

```
OFFTETA:=0.;
IF (XP=0.0) AND (YP<>0.0) THEN OFFTETA:=90.*ABS(YP)/YP;
IF XP>0.0 THEN OFFTETA:=ARCTAN(YP/XP)*180./PI;
IF XP<0.0 THEN OFFTETA:=ARCTAN(YP/XP)*180./PI + 180.;
IF OFFTETA<0 THEN OFFTETA:=OFFTETA+360.;
STR(OFFTETA:5:1,STRG);
OutTextXY(xmag div 2 +5,getmaxY-20,STRG);
SETCOLOR(14);
FOR I:=1 TO NUMAR DO
BEGIN
DIST:=SQRT(SQR(XB[I]-X[I])+SQR(YB[I]-Y[I]));
STR(DIST:5:2,STRG);
OutTextXY(getmaxX-45,getmaxY-300+I*10,STRG);
D0[I]:=DIST;
END;

IF DPOS>MAXDES THEN SOUND(700);
Desenha(drv);
IF GRAF=0 THEN READLN;
IF DPOS<=MAXDES THEN NOSOUND;

LBC:
until KeyPressed;
CHS:=ReadKey;
if (CHS='+') OR (CHS='-') THEN GOTO LBI;
nosound;
clrscr;
closegraph;
CLOSE(lnx);
HALT;
END.
```

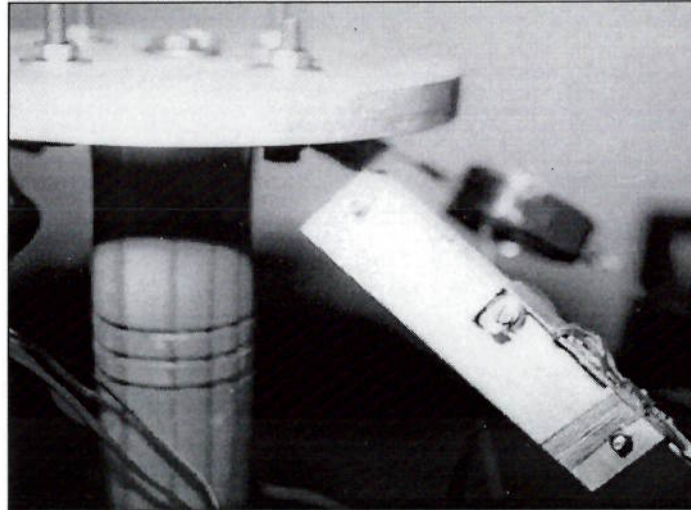


FOTO 1. Protótipo do tensiômetro desenvolvido.

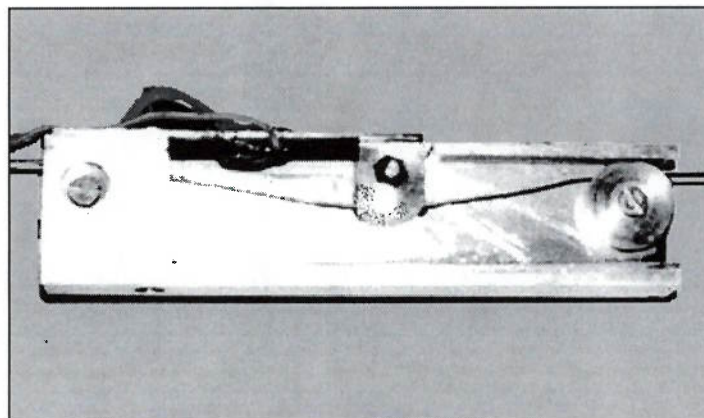


FOTO 2. Vista dos componentes do Tensiômetro.

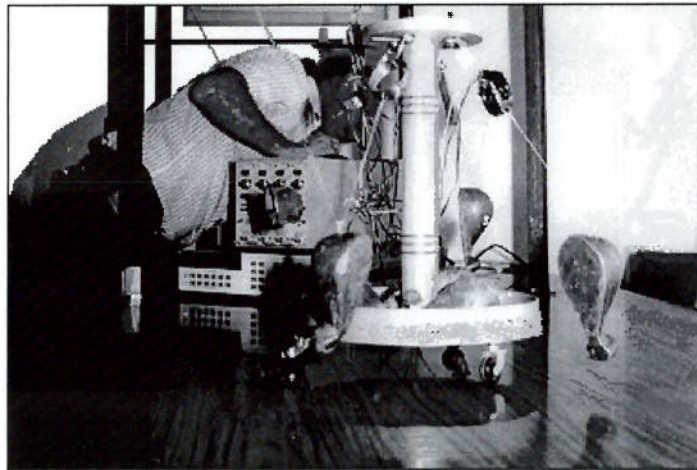


FOTO 3. Bancada de ensaios. Modelo da plataforma.

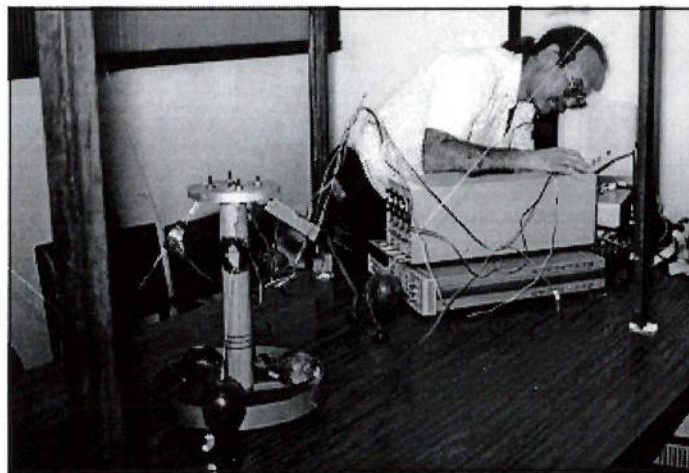


FOTO 4. Bancada de Ensaio e equipes utilizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS:

- [1] MARTINS, R.M. **Procedimento de síntese de sistemas "Taut-Leg" para ancoragem de unidades flutuantes.** São Paulo, 1996. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [2] ANDRADE, B.L.R. ; BRINATI H.L. ; MORISHITA H.M ; FERRARI J.A.F. Jr. **Sistema de Ancoragem e Posicionamento.** São Paulo 1995, v.1, curso de especialização - Convênio PETROBRÁS/USP, junho 1995.
- [3] McClure, A.C. **Development of project mohole drilling platform.** Transactions SNAME, v.73, 1965. USA.
- [4] MORGAN, M.J. **Dynamic positioning offshore vessels.** The petroleum Publishing Co. Oklahoma, 1978 . USA.
- [5] TRIANTAFYLLOU, M. **Design of the dynamic positioning system of a drilling vessel.** MIT Press, 1970. USA.
- [6] ENGLISH, J.W. ; WISE, D.A. **Hydrodynamics aspect of dynamic positioning.** NECIES Transactions, v. 92, 1967. London England.
- [7] ENGLISH, J.W. ; HAAVIE, T.O. **Design of a special purpose north sea support vessel.** NECIES Transactions, v.94, n.4, March 1978. London England.
- [8] HAMMET, D.S. **The first dynamically stationed semisubmersible SEDCO 709.** OTC (2972), 1972. USA.
- [9] HAMMET, D.S. **SEDCO 445 dynamic stationed drill-ship.** OTC, v.2, 1972. USA.
- [10] HAMMET, D.S. **Deepwater drilling without anchors - Dynamic stationing.** Transactions RINA, nov. 1974. London England.
- [11] SKINNER, D.J. **Drilling without anchors in 2000 fts plus water depth.** OCT (2151), v.1, 1975. USA.
- [12] HARBONN, J. **The TEREBEL dynamic positioning system - Results of 5 years of field work and experiments.** OTC (1499), v.2, 1971. USA.
- [13] SJOUKE, J. ; LAGERS, G. **Development of dynamics positioning for IHC drill-ship.** OTC (1498), 1971. USA.
- [14] STOCKTON, L. **Acoustic positioning measurement, an overview.** OCT (2172), v.1, 1975. USA.
- [15] NEUDOEFER, J.L. **An acoustic positioning reference system integrating long and short baseline operation.** OCT (3553), 1979. USA.

-
- [16] ROBERTS, D. **An advanced acoustic positioning reference system.** OCT (2173), v.1, 1975. USA.
- [17] DENNIS, R.C. **Satellite positioning and navigation for offshore applications: Past, present and future.** OCT (2170), v.1, 1975. USA.
- [18] BUECHLER, D. L. ; HANNA, J.T. **Inertially-aided dynamic positioning.** in OCT (2417), v.3, 1975. USA.
- [19] DONHA, D.C. **Estudo do posicionamento dinâmico para plataforma semi-submersível.** São Paulo, 1983. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.
- [20] MARTIN & DECKER **DINA-LINE Tensiômeter.** Catálogo de equipamento, Belletin M-64D.
- [21] MARTIN & DECKER **Potentiometer transducer technical manual.** Manual Técnico TW-600, Março 1980.
- [22] STUAR, V.R. **Evolution of Anchor Measurements.** Petroleum Engineer, Maio 1973.
- [23] ARGUELLES, J.A. **Mediciones de eventos mecánicos dinámicos.** 1.ed. Cuba, Editorial Pueblo y Educación, Habana, 1987.Cuba.
- [24] SCHNEIDERS, G. C. ; PRONK, C. **Performance of thurster.** OCT (2230), v.1, 1975. USA.
- [25] DOSTERVELD, M. ; OORTERMERSEN, G. **Thruster system for improving maneuverability and position keeping capability of floating objects.** OCT, 1972. USA.
- [26] Spiegel, M.R. **Manual de fórmulas e tabelas matemáticas.** Mc.Graw- Hill ,1980.
- [27] Pisarenko, G.S.; Yákovlev, A.P. ; Matvéev, V.V. **Manual de resistencia de materiales.** Editorial Mir Moscú, e.1, Moscú,1979. URSS.
- [28] Measurements Group, Inc. **Signal Conditioning System.** Instruction Manual Model 2200. North Carolina, 1985, USA.
- [29] Lynx, Tecnologia Eletrônica. Ltda. **Conversor analógico digital CAD 12/36.** Manual do Usuário e Referencia, São Paulo, 1990. Brasil.
- [30] Sodmex Industria e Comercio de materiais de Extensômetria LTDA. **Ponte de extensômetria PEB-1350.** Manual de instruções. São Paulo,1990.
- [31] Stephen O'Brien. **Turbo Pascal Completo e Total.** Editora McGraw - Hill Ltda. São Paulo, 1993. Brasil.

-
- [32] Bathe, K.J. ; Wilson, E.L. **Numerical Methods in Finite Element Analysis**. Prentice Hall. Inc. New Jersey, 1976.
- [33] William, H.P. ; Brian, P.F. ; Saul, A.T.; William, T.V. **Numerical Recipes in C**. v.2. Cambridge University Press. New York . Port Chester, 1988.
- [34] Hewlett-Packard Company. **HP 3245A Universal Source**. Operating and Programming Manual. California, 1988.
- [35] Costa Neto, P.L.O. **Estatística**. Editora Edgar Blücher Ltda. 1977, p.179-178.
- [36] Kiowa. **Strain gage instrumentation**. Instruction Manual. Tokio. 1985.
- [37] Bronshtein, I.; Semendiaev, K. **“Manual de Matemáticas para Ingenieros**. Editorial Mir Moscú, 1971, p.206-219.