

XXII - COPINAVAL – IPIN

Buenos Aires, 27 a 30 de setembro de 2011

Testes com modelos de ancoragem em centrífugas, com utilização de Sensores Sem Fio Inteligentes em Redes

Toshi-ichi Tachibana*, Rubens Ramires Sobrinho**,

Tsugukyo Hirayama***, Marcelo Grinberg**

*Universidade de São Paulo, ** Instituto de Pesquisas Tecnológicas, *** Yokohama National University

Resumo

O presente trabalho descreve testes realizados com modelos reduzidos em centrífugas, utilizadas como ferramenta especial para análise e projeto de elementos de ancoragem aplicados em estruturas "offshore". Através do uso de tecnologia de sensores sem fio inteligentes nos testes com modelagem física em de centrífugas, melhorias significativas na determinação de parâmetros serão possíveis pela primeira vez no Brasil.

A modelagem em centrífugas tem sido utilizada para resolução de problemas de ordem geotécnica na área de engenharia "offshore", de forma a evitar má interpretação de resultados comumente observada em testes com modelos reduzidos. Aqui também é apresentado um exemplo com modelo de um tipo especial de âncora. Uma série de testes em escala convencional foi feitos com âncoras tipo "tartaruga".

Abstract

The present paper describes tests performed with models inside centrifuge apparatus as a special tool for analysis and design of foundation elements applied in offshore structures. By using wireless smart sensors technology in physical model test inside centrifuges, significant improvements in the parameters determination will be possible for first time in Brazil. The centrifuge modeling has been used to address geotechnical problems in offshore engineering area, in order to avoid misinterpreting results commonly observed in reduced model tests. Herein it is also presented a modeling example of a special type of anchor known as "*turtle anchor*". Which has already been used in real cases? A comprehensive series of tests in conventional scale has been performed on turtle anchors.

1. INTRODUÇÃO

Até há pouco tempo, com o propósito de realizar testes em modelo ou protótipo, havia muitas opções de sistemas elétricos e sensores disponíveis. Estes sistemas são ainda dependentes do cabo, conseqüentemente, demandam maior tempo de instalação e cabos de comprimentos maiores na planta de testes, aumentando assim o custo total de instalação. Historicamente, a comunicação entre os elementos sensores e o sistema de aquisição de dados e controle (DAQC) tem sido limitada e dependente de fios e cabos. Esta limitação também ocorre porque a comunicação é realizada através de protocolos do fabricante, o que implica em custos elevados. Agora, esses sistemas estão despertando interesse, devido à diminuição ou até mesmo a eliminação do uso de cabos, minimizando assim o custo.

O progresso é mais significativo quando o acesso às redes de medição ocorre por meio da tecnologia sem fio, permitindo uma leitura mais rápida das variáveis do processo ou o monitoramento das condições de ensaio. A evolução atual permite

Criação de redes sem fio de sensores inteligentes para ser usado em diversas aplicações.

Contempla atividades, tais como testes com modelo em escala reduzida dentro de centrífugas. Duas obras que utilizaram os sensores inteligentes de redes sem fio (WSSN) dentro de centrífugas podem ser destacados (Cheekiralla, 2004; Wilson et al, 2004), embora a conclusão dos trabalhos de Cheekiralla indica falhas na sua utilização. O teste com modelo em escala reduzida dentro de centrífugas foi realizado pelo na

unidade de centrifugação do IPT através da utilização de tecnologia de instrumentação convencional, tais como dados do sistema de aquisição e controle (DAQC) e cabos para transferência de dados. Em alguns casos, os resultados obtidos são difíceis de interpretar e entender, e repetições de testes são eventualmente exigidos. As estimativas anteriores obtidas por modelagem numérica não são comparáveis aos resultados dos testes. Em muitos casos, foi necessário o desenvolvimento de dispositivos auxiliares para reduzir os efeitos de instrumentação durante a evolução do estudo.

O emprego da tecnologia de redes de sensores sem fios (WSSN) se dá pela busca de métodos e procedimentos que permitam a simplificação das operações na instalação dos instrumentos nos ensaios de modelos físicos reduzidos. Com isto, a interpretação dos dados torna-se mais fácil, atendendo com agilidade e qualidade à demanda extensa de programas de pesquisa na área de exploração em campos petrolíferos e de gás natural, que requer também o emprego de tecnologias e procedimentos operacionais específicos em campo.

Uma das alternativas de fixação de estruturas oceânicas é a chamada âncora 'tartaruga', que se caracteriza por ser um elemento de fácil penetração no solo e elevada capacidade de resistência a esforços verticais. O comportamento destas âncoras vem sendo estudado por meio de modelos numéricos e por ensaios em modelos físicos reduzidos convencionais, conforme Figuras 1.1e 1.2.



Figura 1.1 –
Ensaios em âncoras
'tartaruga'



Figura 1.2 – Tanque de
ensaios para âncoras.

Os resultados mostraram a necessidade de reproduzir os níveis de tensão atingidos no campo, fator este de extrema relevância para a avaliação do comportamento das ancoragens.

Assim, tendo em vista o estado atual de conhecimento destes elementos, com emprego da centrífuga, torna-se possível reproduzir os efeitos das tensões atuantes no contato solo-âncora, bem como os efeitos resultantes da ação de espessas lâminas d'água sobre os elementos.

Quando se trata de modelagem física em centrífuga é necessário tomar vários cuidados para representar os fenômenos físicos envolvidos na escala do protótipo. Na modelagem física em centrífugas a instrumentação é uma parte muito importante, pois é quem fornece os valores dos fenômenos físicos envolvidos. Se existirem interferências durante as simulações nos ensaios, a instrumentação passa a não ser uma solução de monitoramento, e sim, mais um problema não previsto durante a concepção dos experimentos.

Por se tratarem de modelos físicos reduzidos, os valores observados nos ensaios são calculados para a escala do protótipo.

Os resultados podem ser falseados quando erros forem associados à interferência da instrumentação, comprometendo o entendimento sobre os fenômenos físicos medidos, o que significaria dúvidas na interpretação ou sua aceitação de forma equivocada.

Em se tratando de WSSN que são redes abertas, os dados dos sensores podem sofrer diversas ameaças que vão desde as invasões propositalis ou não propositalis e perdas acidentais de dados, interferências da própria rede e interferência ambiental.

Segurança é um termo de ordem geral em sistemas de redes de computadores, e proteção quer dizer mecanismos específicos para designar a salvaguarda dos dados dos sistemas (TANENBAUM, 1996). Este conceito se estende às WSSN. Do ponto de vista da segurança em sistemas computacionais, deve haver confiabilidade nos dados (mantendo-os secretos de alguma maneira), integridade dos mesmos (apenas dispositivos ou pessoas autorizadas podem ter acesso aos dados) e disponibilidade do sistema (o qual não pode sofrer perturbações internas e/ou externas que possam deixar os dados inutilizáveis) (NIU; VARSHNEY; CHENG, 2005).

Em se tratando de invasores, os mesmos podem agir de duas maneiras diferentes. Os *invasores passivos*: querem apenas ter acesso aos dados sem ter a autorização para tal e os *invasores ativos*: são aqueles mais nocivos porque querem, além de ter acesso, alterar os dados disponíveis (TANENBAUM, 1996).

Numa rede de sensores sem fios, os sensores podem sofrer inúmeras interferências da rede ou do próprio sensor, destacando-se falta de energia, falta de visada direta com o

outro nó sensor ou nó *gateway* da rede, ou até mesmo por algum dano físico.

As redes de sensores geralmente são projetadas para operarem em locais inóspitos. Podem ser listados como principais exemplos: no interior de grandes maquinarias, no fundo do oceano, dentro de furacões, tempestades, na superfície do oceano, em um campo contaminado biológica ou quimicamente, em uma casa ou edifício, em armazéns, junto a animais e a veículos em movimento. A partir destas condições, pode-se projetar o que uma rede de sensores tem por enfrentar. Operando nos ambientes mais inóspitos, sujeita a ruído, ao calor ou frio extremo.

Uma das maiores preocupações na engenharia da computação e informática é manter as informações que trafegam na sua rede com a máxima segurança possível. Baseado nesse pensamento, dúvidas sobre a segurança em redes sem fios levam muitos pesquisadores a evitá-las em determinadas áreas de atuação, apesar das vantagens que possam trazer.

Isso explica o fato de que em redes com cabos é conhecido o caminho da informação de forma mais precisa, sendo mais difícil alguém conseguir intervir no meio físico para se apossar de uma informação que não lhe pertença. Enquanto que em redes sem fios, o meio sendo o ar, torna muito mais fácil o acesso a essas informações e muito mais difícil a percepção do ataque.

O consumo de energia numa rede de sensores sem fios é outro fator fundamental em um projeto. Por serem escassas as fontes de energia e muitas vezes não substituíveis,

métodos de economia de energia deverão ser analisados com cuidado.

Em se tratando de sensores inteligentes sem fios, uma necessidade muito importante a ser atendida é que as funções de sensoriamento, atuação, condicionamento de sinais, amplificação, conversão A/D e D/A, micro controlador, memória, transmissão RF, energia, gerenciamento de energia e inteligência, estejam embutidas num único encapsulamento para que este dispositivo satisfaça todas as necessidades das mais diversas aplicações.

A tecnologia sem fios vem sendo comumente utilizada no meio da informática para designar as tecnologias que permitem comunicação sem conexão física direta entre os equipamentos. A primeira idéia que se tem é a utilização de rádio para comunicação, que é realmente o meio mais popular.

2. CONSIDERAÇÕES BÁSICAS DE MODELAGEM

O estudo dos fenômenos associados com o comportamento dos elementos de fundação tem sido muitas vezes prejudicado pela dificuldade de realizar uma série de testes de campo, devido ao seu alto custo e complexidade.

O uso de modelos físicos é uma prática antiga na área de engenharia e que foi melhorada através do desenvolvimento de sensores eletro-eletrônicos, permitindo a medição precisa de estresse e tensões.

Assim, nos últimos anos, a quantidade e a qualidade das informações obtidas a partir desses testes em modelos aumentou

consideravelmente, como resultado da melhoria da instrumentação e sistemas de processamento de dados.

Os modelos são uma representação física, em escala reduzida, que são testados e analisados, usando as leis de semelhança utilizada para interpretar os resultados.

Particularmente para o estudo dos problemas geotécnicos, o modelo físico representa um instrumento importante, porque, dada a sua menor dimensão, é possível considerar a homogeneidade do solo e as forças de massa. Também é possível considerar as características do modelo que podem influenciar o seu comportamento.

Na prática, observa-se que a utilização de escalas muito pequenas apresentam dificuldades na fabricação e instrumentação.

Os modelos maiores são mais fáceis de construir, mas, em geral, exigem equipamentos maiores e mais sofisticados, em especial aqueles utilizados para cargas.

Os modelos podem ser empregados para estudar as teorias e suas generalizações para vários casos, através de simulações em escala tridimensional. A precisão dos resultados pode ser afetada por muitos fatores, tais como propriedades de materiais, fabricação do modelo, controle de tolerância na fabricação, técnicas de carregamento, métodos de medição e interpretação dos resultados.

Os modelos devem ser concebidos e analisados de acordo com as leis de semelhança entre eles e os seus protótipos.

As leis de semelhança são baseadas na teoria de modelos e elas são derivadas a partir da análise dimensional dos fenômenos físicos envolvidos.

Fatores de escala para os parâmetros independentes são escolhidos e o mesmo fator deve ser considerado para outros parâmetros.

A fim de assegurar que os fenômenos observados em modelos estão imitando o comportamento do protótipo, é necessário atender aos requisitos de similaridade. Similaridade geométrica é fácil de ser alcançada, mas a similaridade completa é muito difícil de alcançar. Neste caso, é necessário justificar as diferenças, verificando suas influências sobre os parâmetros e resultados.

Em geral, problemas geotécnicos envolvem fluxo de água (dissipação de pressão de poros, neste caso), que afeta a pressões e tensões da interface solo-elemento, em um nível inferior ao de protótipos. Unidade de escala de estresse, utilizando os mesmos materiais, só podem ser alcançados usando centrifugas. A escolha dos materiais do modelo deve considerar os limites de estresse, a rigidez, os mecanismos de ruptura, a influência da temperatura e umidade, o efeito da velocidade de carregamento, bem como o tamanho e forma.

O sucesso dos resultados experimentais depende da precisão e confiabilidade das medições. Para atingir a mesma precisão dos testes do protótipo, os resultados devem contemplar, pelo menos, o fator de escala aplicado a instrumentos nas simulações do modelo. Os testes com os modelos podem ser melhorados com o uso de análise estatística na interpretação dos dados e instrumentação adequada.

Instrumentação do modelo inclui a identificação de valores a serem medidos, a seleção de sensores de medição e sua instalação e processo de calibração.

A Tabela 2.1 apresenta a lista dos principais quantidades físicas envolvidas no processo de modelagem.

Os fatores de escala entre modelo e protótipo, para uma redução da escala de 1: N é apresentado na Tabela 2.2 (Portugal, 1999).

No caso do fluxo de água, pode ser demonstrado que o fator de escala de tempo é N^{-1} . Ao adotar N^{-1} , a condição de similaridade é obtida, mas a lei de modelagem para a velocidade do fluido não pode ser cumprida ou é violada. Seria necessário, portanto, usar um líquido com viscosidade dinâmica diferente, a fim de evitar a violação desta lei (Portugal, 1999).

O estudo das fundações para offshore em escala real exigiria muitos recursos materiais, além de um espaço de dimensão adequada e com características geológico-geotécnicas semelhantes. Assim, o uso de modelos reduzidos é uma importante ferramenta para avaliar o fenômeno relacionado com o processo de instalação, que pode ser reproduzido em escala menor e em condições mais próximas à homogeneidade em termos de parâmetros de solo. Os testes em modelos reduzidos, especialmente aqueles que lidam com capacidade de carga da fundação, tem sido realizados principalmente para fins acadêmicos. Custos e as dificuldades inerentes à modelagem são empecilhos à sua utilização em maior escala. Quando a medição das pressões de poros são necessários, cuidados com a instrumentação

devem orientar os testes, uma vez que qualquer instrumentação de tamanho significativo, imersa na massa de solo terreno, pode se comportar como elemento de reforço. Além disso, os efeitos de escala são importantes se violarem algumas leis de modelagem e quando os testes com modelos forem superados em função da análise do comportamento do protótipo. A fim de avaliar os resultados, os estudos sobre a influência do efeito de escala podem ser realizados através da realização de uma série de testes sobre os fenômenos em diferentes escalas. Isso é conhecido como modelagem dos modelos.

Tabela 2.1: Quantidades físicas

Quantidade	Unidade
Comprimento	L
Força	F
Tempo	T
Massa	$F L^{-1} T^2$
Estresse	$F L^{-2}$
Tensão	--
Aceleração	$L T^{-2}$
Deslocamento Linear	L
Módulo de Elasticidade	$F L^{-2}$

Tabela 2. 2: Fatores de escala no modelo físico (Portugal, 1999).

Quantidade	Fator de Escala
Comprimento	N^{-1}
Tempo	$N^{-1/2}$
Velocidade	$N^{-1/2}$
Aceleração	1
Massa	N^{-3}
Força	N^{-3}
Estresse, Pressão	N^{-1}

Em um estudo da capacidade de carga da fundação, usando modelos físicos reduzidos, alguns fatores merecem uma atenção

especial: as dimensões e geometria de um modelo, o nível de estresse no modelo e no chão. Ao analisar a dissipação de pressão dos poros, efeitos de escala de tempo devem ser considerados. Do mesmo modo, para reproduzir o mesmo nível de estresse existente no campo usando uma centrífuga, o equipamento especial permite a simulação de casos reais com acelerações de gravidade maiores, e aparece como uma alternativa. Poucas são as centrífugas disponíveis no Brasil (IPT, o Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo tem uma, desenvolvida em parceria com a FAPESP) e seu uso ainda é centrado na investigação acadêmica. É sem dúvida uma ferramenta promissora para inovações tecnológicas na área de geotecnia.

3. Física da Modelagem

De acordo com a análise dimensional apresentada por Candeias (1999), na modelagem física existem dois sistemas geométricos idênticos, onde os parâmetros indicados por '*' implicam na relação entre modelo e protótipo:

$$x_{im} = l^* x_{ip} \quad (i=1,2,3) \quad (1)$$

$$t_m = t^* t_p \quad (2)$$

No modelo, o vetor velocidade de um dado ponto é:

$$v_{im} = \frac{dx_{im}}{dt_m} \quad (i=1,2,3) \quad (3)$$

Assim:

$$v_{im} = \frac{l^* dx_{ip}}{t^* dt_p} \quad (i=1,2,3) \quad (4)$$

Ou:

$$v_{im} = \frac{l^*}{t^*} v_{ip} \quad (i=1,2,3) \quad (5)$$

Assim, o fator de escala de velocidade é:

$$v^* = \frac{l^*}{t^*} \quad (6)$$

No modelo, o vetor de aceleração de um dado ponto é expresso por:

$$a_{im} = \frac{dv_{im}}{dt_m} \quad (i=1,2,3) \quad (7)$$

A partir das equações (2) e (5):

$$a_{im} = \frac{l^*}{(t^*)^2} a_{ip} \quad (i=1,2,3) \quad (8)$$

Então:

$$a^* = \frac{l^*}{(t^*)^2} \quad (9)$$

As distribuições de massa serão também semelhantes se:

$$m_m = m^* m_p \quad (10)$$

Onde m_m e m_p representam a massa de peças homólogas, no sistema do modelo e do protótipo, respectivamente, e m^* é o fator de escala. Aplicando a Segunda Lei de Newton, obtemos:

$$F_{im} = m_m a_{ip} \quad (i=1,2,3) \quad (11)$$

Substituindo os termos, obtemos:

$$F^* = m^* \frac{l^*}{(t^*)^2} \quad (12)$$

Onde F^* representa o fator de escala das forças.

$$F^* = \frac{1}{N^2} \quad (15)$$

Na modelagem física, o comportamento dos materiais pode ser representado por duas maneiras distintas: modelagem física convencional e modelagem física em centrífugas.

Se escolhermos a $* = N$ e as equações (6), (9), e (10), obtemos:

$$v^* = 1 \quad (16)$$

$$a^* = N \quad (17)$$

$$\sigma^* = 1 \quad (18)$$

$$t^* = \frac{1}{N} \quad (18)$$

- Na modelagem física convencional os modelos são testados sob campo gravitacional normal.
- Na modelagem física em centrífugas, de forma a testar os modelos sob ação de forças gravitacionais artificiais.

Candeias (1999) descreve que é possível submeter o modelo a um campo gravitacional mais intenso e atingir o campo de tensão no modelo que apresente semelhança mecânica e completa com o protótipo.

Niyama (1992) mencionou em sua tese de que Galileu foi o primeiro que utilizou a análise de escala moderna e empregou a noção de tensão crítica $\sigma_{cr}^* = l^* \gamma^*$, onde l é o comprimento, γ o peso específico, resultando na seguinte expressão:

$$\sigma^* = \rho^* g^* l^* \quad (19)$$

3.1 Modelagem Física em Centrífuga

Considerando que (i) a técnica e processos de modelagem física em centrífuga são iguais a modelagem física convencional, (ii) redução do fator de escala geométrica é imposta e (iii) os ensaios com o modelo são realizadas sob ação do campo de aceleração artificial N vezes maior do que campo de aceleração normal da gravidade, onde $N (\geq 1)$ é o fator de redução geométrica, obtemos:

$$g^* = N \quad (13)$$

Se os materiais empregados no modelo são idênticos aos do protótipo, $\rho^* = 1$, então:

$$m^* = \frac{1}{N^3} \quad (14)$$

Força como resultado de gravidade aumentada:

Onde ρ é a massa específica, g é a aceleração da gravidade terrestre. Esta expressão representa a condição física para o protótipo e seu modelo em escala reduzida.

Niyama (1992) indica que, em meio contínuo, as equações de equilíbrio são validadas se a expressão acima é levada em consideração.

A tese de Candeias (1999) apresenta a equação de equilíbrio de um contínuo:

$$\sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho \left(g_i - \frac{\partial^2 \delta_i}{\partial t^2} \right) = 0 \quad (i, j = 1, 2, 3) \quad (20)$$

σ_{ij} , os componentes do tensor de tensão total;

g_i , os componentes do vetor de força (massa);

δ_i , os componentes do vetor deslocamento;

ρ , Massa volumétrica do material constituído.

A equação (19) é apresentada na forma dimensional e pode ser transformada na forma adimensional:

$$\sigma_{ij} = f(\delta_i, x_j, \rho, g_i, t) \quad (i, j=1, 2, 3) \quad (21)$$

$$\phi\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_1}, \frac{\sigma_3}{\sigma_1}, \frac{\delta_i}{x_1}, \frac{x_2}{x_1}, \frac{x_3}{x_1}, \frac{\rho}{x_1^{-2}t^2\sigma_1}, \frac{g_i}{x_1t^{-2}}\right) = 0 \quad (i=1, 2, 3) \quad (22)$$

As variáveis x_1 , σ_1 e t representam dimensões fundamentais, onde σ_i é o principal componente do tensor de tensão total ($i = 1, 2, 3$).

Formulação de equilíbrio dimensional com 11 componentes constantes dimensionais permite aplicar lei de modelagem ao modelo, e em conformidade com os requisitos de similaridade com o protótipo.

Se o modelo e o protótipo são geometricamente semelhantes e os valores iguais dos produtos no modelo e no protótipo são aplicáveis, obtemos:

$$\sigma^* = \sigma_i^* \quad (i=1, 2, 3) \quad (22)$$

$$\delta^* = \delta_i^* = l^* \quad (i=1, 2, 3) \quad (23)$$

$$l^* = x_i^* \quad (i=1, 2, 3) \quad (24)$$

$$\rho^* = (l^*)^{-2} (t^*)^2 \sigma^* \quad (25)$$

$$g_i^* = g_i^* = l^* (t^*)^{-2} \quad (i=1, 2, 3) \quad (26)$$

Da equação (26), obtemos:

$$(t^*)^2 = l^*/g_i^* \quad (27)$$

Da equação (27) e (25), obtemos a equação (28):

$$\sigma^* = \rho^* \cdot g_i^* \cdot l^* \quad (28)$$

Esta é a lei fundamental de modelagem aplicada para problemas de equilíbrio estático.

No solo, modelo pode ser constituído pelos mesmos materiais empregados nos protótipos, onde $\rho^* = 1$. Teste é desejável no mesmo nível de tensão onde $\sigma^* = 1$. Da equação (1) e (13):

$$g_i^* \cdot l^* = 1 \quad (29)$$

O principal objetivo de testar em centrífuga é aumentar a aceleração na mesma escala linear N . Assim, a fim de obter os campos de tensão no nível do modelo semelhante ao do protótipo, o papel da centrífuga é aumentar o campo gravitacional artificial.

4. IMPLANTAÇÃO DE UMA REDE DE SENSORES SEM FIOS NA CENTRÍFUGA IPT

Uma das configurações mais comuns pode ser vista na Figura 4.1, os sinais dos sensores são conectados aos condicionadores de sinais e, logo após, são enviados para o meio externo por meio de um *slip ring*. Os sinais analógicos são enviados para um computador para digitalização e posterior tratamento matemático (ZORNBERG; FRIEDRICHSEN; AVANZI, 2005).

Esta configuração é utilizada na centrífuga do IPT, denominada de instrumentação convencional (NIYAMA, 1994).

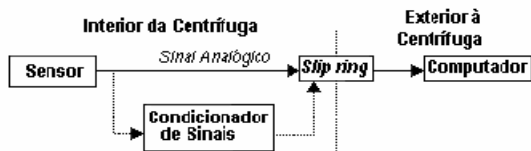


Figura 4.1 – Configuração de instrumentação em centrífugas, adaptada de (ZORNBERG; FRIEDRICHSEN; AVANZI, 2005).

Na Figura 4.2, é apresentada uma configuração baseada em sensores conectados aos condicionadores de sinais e a um sistema de aquisição de dados para digitalização, o armazenamento dos dados é feito no interior da centrífuga. Após a realização do ensaio, os dados são capturados pelo operador para posterior tratamento. Neste tipo de configuração consegue-se eliminar o problema de ruído na transmissão como ocorre no caso da configuração anterior quando da utilização de *slip ring*.

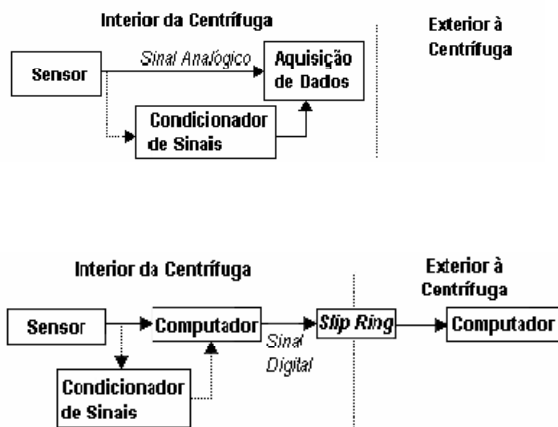


Figura 4.2 – Configuração da instrumentação de algumas centrífugas, adaptado de (ZORNBERG; FRIEDRICHSEN; AVANZI, 2005).

A rede de sensores sem fios foi desenvolvida para monitorar a simulação de terremotos em maciços de solos a uma aceleração centrípeta

de 100 g. Foram usados somente sensores do tipo poro-pressão e acelerômetros (todos com tecnologia MEMS) nas redes de sensores sem fios, perfazendo um total de 48 sensores conforme a Figura 4.3.

A topologia adotada neste trabalho apresenta um nó *gateway* e três nós sensores concentrados numa região próxima ao cesto da centrífuga. São suficientes para atender os propósitos dos trabalhos com as âncoras “tartaruga” e da maioria dos trabalhos com a centrífuga do IPT, podendo ampliar para até 16 nós sensores. Foi adquirido um sistema de fabricação da *Chipcon AS*, subsidiária da *Texas Instruments* na Noruega.

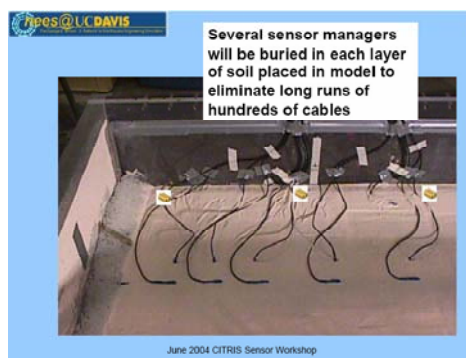


Figura 4.3 – Disposição dos sensores sem fios no modelo e cesto da centrífuga, (WILSON et al., 2004).

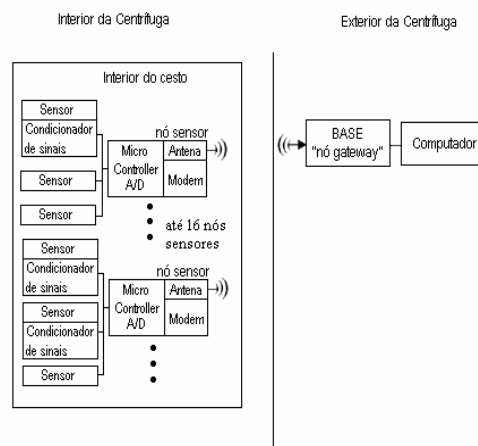


Figura 4.4 – Arquitetura de redes de sensores sem fios proposta para a centrífuga do IPT

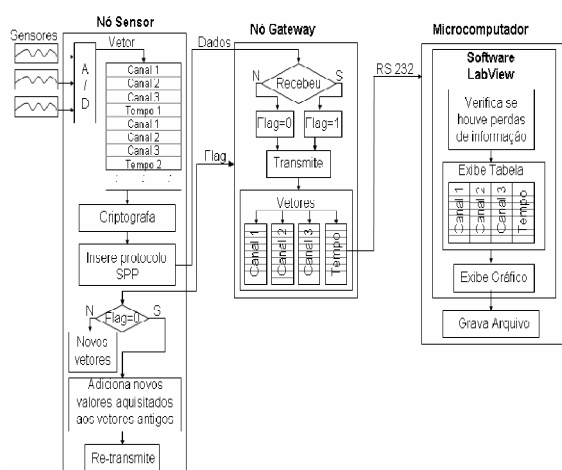


Figura 4.5 – Diagrama de blocos da metodologia desenvolvida

O programa desenvolvido na plataforma *LabVIEW* para o gerenciamento dos dados obtidos pelo sistema sem fios foi baseado na tecnologia de instrumentação virtual bastante empregada no meio acadêmico-científico e industrial. É atualmente uma tecnologia de ponta que permite avanços significativos na automação e instrumentação em diversas áreas de atuação da sociedade. Esta tecnologia disponibiliza diversos recursos automáticos com implementações das normas e padrões IEEE – 1451.

5. DESCRIÇÃO DA CENTRÍFUGA

As principais características dos equipamentos são:

Diâmetro nominal: 1500 mm;

Aceleração: 200 g (g: aceleração da gravidade);

Rotação: 451 rpm (rotações por minuto).

O braço da centrífuga (Figura 5.1) é simétrico em relação ao eixo de rotação (sentido vertical). A estrutura de aço é suspensa 38 centímetros acima do solo e fixada ao solo por escoras metálicas. Placas de neoprene são usadas para isolar o aparelho de vibrações externas.

As paredes laterais da centrífuga são feitas de aço e preenchidas com areia para evitar regiões vazias. Sob condições normais de ensaio, a centrífuga gira perfeitamente equilibrada, com o modelo colocado em um container e o contrapeso no outro container. Os recipientes são feitos de aço, medindo 250 x 300 x 130 mm.

A Figura 5.2 mostra todos os sistemas da centrífuga, e a Figura 5.3 mostra uma imagem de centrífuga do IPT.

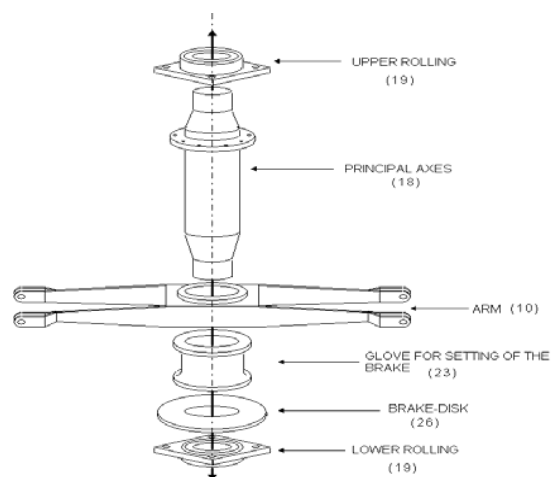


Figura 5.1: Montagem do braço - Centrífuga IPT/FAPESP

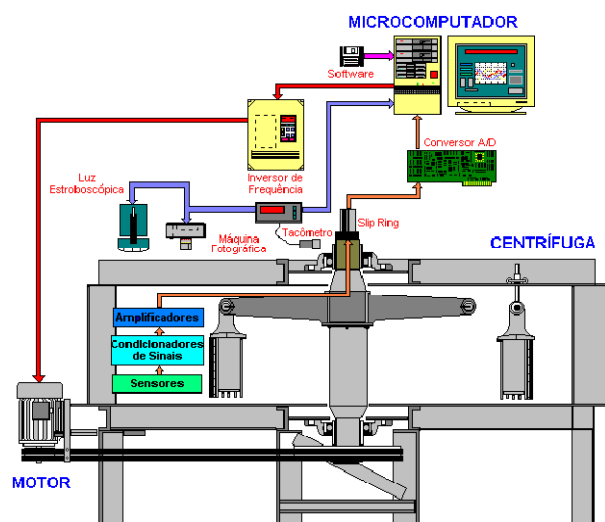


Figura 5.2: Sistemas da centrífuga do IPT/FAPESP



Figura 5.3: Foto da centrífuga do IPT/FAPESP

6- TESTES DE FUNCIONAMENTO DO SISTEMA ADOTADO

Os testes realizados no IPT com *software* apontaram que o nó sensor funciona satisfatoriamente a uma distância de 100 metros com visada direta (sem obstáculos), com atrasos da ordem de 20 ms a 30 ms, mesmo tempo que ocorre quando o nó sensor está próximo do nó *gateway* (BASE).

Esse tempo de atraso é provocado pelos comandos do próprio *software*. Testes de velocidade do A/D foram realizados com o mesmo *software*, neutralizando algumas linhas de comando, melhorando o desempenho do sistema, verificando-se uma leitura com intervalos de 3 a 5 ms (utilizando a função *single-conversion mode*) para a aquisição de dados dos nós sensor e *gateway*.

Com a presença de obstáculos, como paredes de alvenaria (três paredes), divisórias de madeira até o teto (duas paredes) e portas fechadas (três portas), o nó sensor foi capaz de ser detectado em até 20 metros de distância do nó *gateway* sem mudanças de tempo de atraso, acima desta distância (20 e 60 metros) ocorreram atrasos superiores a 100ms, com falhas de comunicação intermitentes.

Tabela 6.1. – Testes comparativos entre os parâmetros de tempo de amostragem e tempo de atraso

Tempo de amostragem (ms)	Tempo de atraso (ms)	Total de pacotes	Pacotes perdidos	Número de linhas de pacote		Número de testes
				Número	%	
3	10	9049	0	12	0,00	4
5	12	8422	0	11	0,00	3
8	16	9692	27	9	0,28	3
13	20	8880	18	7	0,20	3
18	29	10183	55	6	0,54	4
23	34	10513	15	5	0,14	4
28	37	8772	59	5	0,67	4
33	39	8316	276	5	3,32	3
43	56	9642	0	4	0,00	3
50	61	7685	0	4	0,00	3
70	78	6243	0	4	0,00	4

Tabela 6.2 – Comparação das medidas realizadas com as instrumentações sem fios e o convencional

Tipo de Instrumentação (SAD)	Aceleração Referência (g)	Aceleração Média (g)	Aceleração Máxima (g)	Aceleração Mínima (g)	Desvio Padrão
Sem Fios	50	48,40	50,2584	46,7520	0,5629
Convencional		50,17	51,9693	48,8133	0,5208
Sem Fios	75	75,10	76,3782	71,7525	0,4670
Convencional		75,14	77,6225	72,7802	1,2313
Sem Fios	100	100,25	101,0796	98,9152	0,2262
Convencional		100,65	103,3037	98,6697	1,2431

7- ENSAIOS COM MODELOS DE ÂNCORAS 'TARTARUGA'

Os ensaios com modelos reduzidos de âncoras 'tartaruga' foram submetidos a uma aceleração da gravidade artificial de (150 g) para reproduzir as condições encontradas no campo. Os ensaios foram realizados, primeiramente, com a instrumentação convencional e, depois com a instrumentação sem fios, a fim de obter os parâmetros físicos envolvidos e comparar ambas as instrumentações, avaliar os seus desempenhos, principalmente, da instrumentação sem fios com a metodologia incorporada.

O solo empregado nos ensaios possui características semelhantes aos do Campo de Marlin. O estudo do comportamento das âncoras 'tartaruga' com diferentes geometrias na fase de instalação no solo marinho e quando submetidas a esforços de arraste horizontal. Dentre os principais parâmetros intervenientes no comportamento, destaca-se a geometria.

A Figura 7.1 apresenta a disposição dos modelos de âncoras,

os sensores e atuadores para a realização dos ensaios.

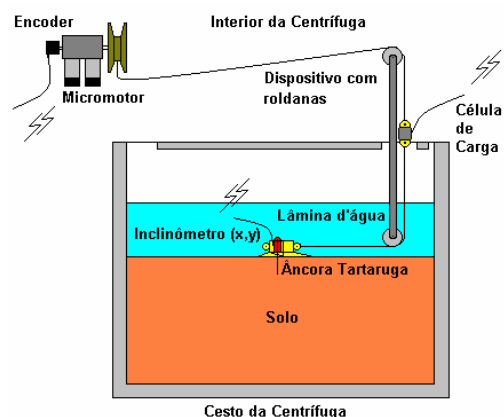


Figura 7.1. – Montagem do modelo de âncora, sensores e atuadores.

7.1- Características do modelo físico das âncoras 'tartaruga'

Foram construídos três modelos em material de latão. As características dos modelos confeccionados, em comparação aos dos protótipos, são apresentadas na Tabela 7.1.

Destaca-se que as dimensões dos modelos resultaram da consideração de uma aceleração correspondente a 150 vezes à da gravidade.

Tabela 7.1. – Características geométricas âncoras 'tartaruga'

Âncora	Característica	Protótipo (m)	Modelo (m)
1	Largura frente	3,00	$2,00 \times 10^{-2}$
	Largura traseira	6,95	$4,63 \times 10^{-2}$
	Comprimento	5,50	$3,67 \times 10^{-2}$
	Altura	1,60	$0,11 \times 10^{-2}$
2	Largura frente	3,00	$2,00 \times 10^{-2}$
	Largura traseira	6,95	$4,63 \times 10^{-2}$
	Comprimento	5,50	$3,67 \times 10^{-2}$
	Altura	1,60	$0,11 \times 10^{-2}$
3	Largura frente	3,00	$2,00 \times 10^{-2}$
	Largura traseira	6,95	$4,63 \times 10^{-2}$
	Comprimento	5,50	$3,67 \times 10^{-2}$
	Altura	1,60	$0,11 \times 10^{-2}$

Nas Figuras 7.2, 7.3 e 7.4 são ilustrados os modelos utilizados nos ensaios, já com as dimensões reduzidas e formas geométricas semelhantes às do protótipo.



Figura 7.1. – 1ª âncora 'tartaruga'



Figura 7.2. – 2ª âncora 'tartaruga'

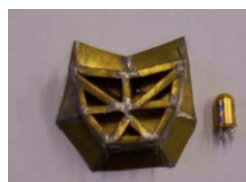


Figura 7.3. – 3ª âncora 'tartaruga'

Na Tabela 7.2 são apresentadas as forças peso de cada modelo de âncora 'tartaruga' e a correspondência com o protótipo.

Tabela 7.2 – Força peso das âncoras 'tartaruga'

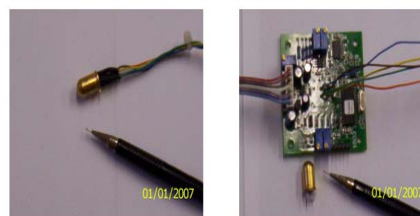
ÂNCORA	MODELO (N)	PROTÓTIPO (MN)
1	0,397	0,013
2	0,356	0,012
3	0,386	0,013

(*) Empregou-se o produto da força peso do modelo por N3.

8-INSTRUMENTAÇÕES UTILIZADAS

Os ensaios nos modelos de âncoras 'tartaruga' em centrífuga foram monitorados por instrumentos constituídos de sensor de inclinação (*tilt sensor*) (ver Figura 8.1 a e b), célula de carga, micro motor e *encoder*, descritos a seguir. Os ajustes desses condicionadores de

sinais (Figura 8.2 a) dependeram da calibração do conjunto e da fonte (Figura 8.3 b), sendo: excitação de 5 VDC; ganho de 1000; e Filtro passa baixa de 10 Hz.



a) Detalhe do sensor de inclinação

b) Detalhe do conjunto

Figura 8.1. - Sensor de Inclinação (*Tilt sensor*)



a) Vista dos condicionadores

b) Vista das fontes de alimentação

Figura 8.2. – Condicionadores de sinais e fonte de alimentação



Figura 8.3 – Etapa de calibração do sensor de inclinação



a) Elemento elástico

b) Construção final

Figura 8.4 – Célula de carga

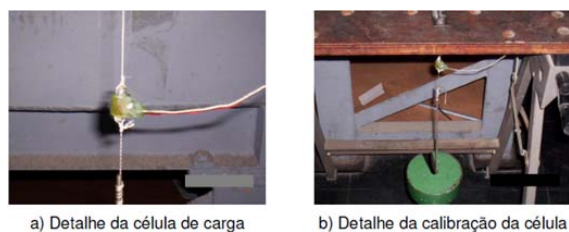


Figura 8.5 – Calibração da célula de carga

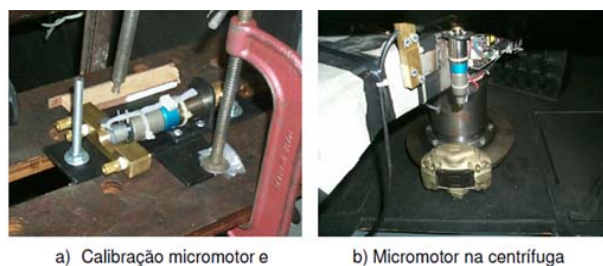


Figura 8.6 – Micromotor e *encoder*



Figura 8.7 – Calibração do conjunto do sistema sem fios



Figure 8.8 – Módulo de Avaliação (Chipcon, 2003).

9- RESULTADOS DOS ENSAIOS COM AS ÂNCORAS MODELO

Na Tabela 9.1 apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios com os modelos de âncora ‘tartaruga’ utilizando a instrumentação

convencional e sem fios para comparação.



Figura 8.9 – Preparação do conjunto e ensaios realizados

- Os resultados também são apresentados em forma de gráficos dos ensaios, para cada modelo de âncora, com os dois tipos de instrumentação nas Figuras 9.1 a 9.3.
- **Âncora 1** não é estável quando submetida a forças horizontais. Ela penetra alguns centímetros de massa de solo, mas apenas a parte traseira do modelo foi submersa no solo. Esta âncora, provavelmente sofreu uma forte influência das massas dos

sensores e cabos, instalados próximos à sua parte traseira;

- Âncora 2 também apresentou comportamento instável durante a retirada, o que foi confirmado no "voo final", evidenciado pela posição de âncora do modelo na caixa,
- Âncora 3 provou ser aquela com o melhor comportamento. No ângulo de penetração de 56° do modelo durante o ensaio, a âncora 3 apresentou maior resistência ao arrasto. Uma situação estável foi observada no final dos testes, mostrando que a geometria da âncora 3 é adequada para situações em que as forças horizontais atuam sobre âncoras.

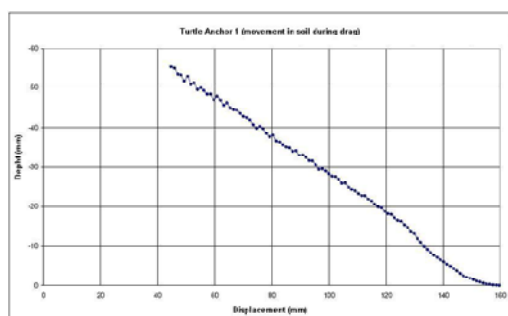


Figura 9.1 – Deslocamento da âncora 1 no solo

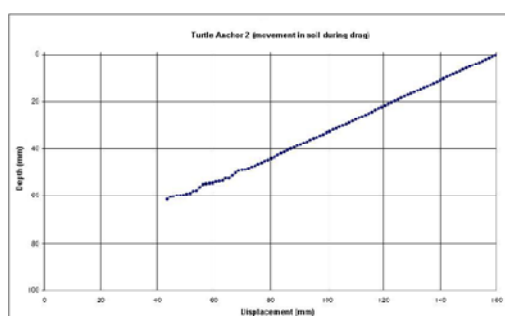


Figura 9.2 – Deslocamento da âncora 2 no solo

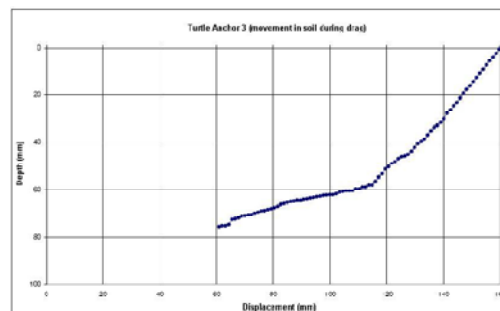


Figura 9.3 – Deslocamento da âncora 3 no solo

Tabela 9.1 – Resultados dos ensaios com modelos de âncora 'tartaruga'

Âncora	Grandeza Física	Instrumentação Convencional		Instrumentação Sem Fios	
		Valores Máximos	Desvio Padrão	Valores Máximos	Desvio Padrão
		1	Força (N)	4,28	1,061
	Eixo X (graus)	-25,61	0,418	-25,78	0,271
	Eixo Y (graus)	17,37	0,530	0,05	0,033
	Deslocamento (mm)	106,16	-	125,70	-
2	Força (N)	33,64	1,956	29,78	0,067
	Eixo X (graus)	32,59	0,711	28,97	0,299
	Eixo Y (graus)	25,70	0,5759	23,45	0,093
	Deslocamento (mm)	105,21	-	116,52	-
3	Força (N)	125,71	1,4367	124,82	0,352
	Eixo X (graus)	55,05	0,651	56,70	0,143
	Eixo Y (graus)	-3,87	0,066	1,38	0,014
	Deslocamento (mm)	102,16	-	99,19	-

Na Tabela 9.2 apresentam-se os valores que correspondem às grandezas físicas no protótipo a partir dos dados obtidos dos ensaios de modelos físicos das âncoras 'tartaruga'.

Tabela 9.2– Valores correspondentes à escala do protótipo

Âncora	Instrumentação	Força (MN)	Eixo X (graus)	Eixo Y (graus)	Deslocamento (m)
1	Sem Fios	0,09	-25,78	0,05	18,86
	Convencional	0,10	-25,61	17,37	15,92
2	Sem Fios	0,67	28,97	23,45	17,48
	Convencional	0,76	32,59	25,70	15,78
3	Sem Fios	2,81	56,70	1,38	14,88
	Convencional	2,83	55,05	-3,87	15,32

À grandeza física força foi aplicado o fator de escala para ensaios em centrífuga de N^2 , o deslocamento de N , os ângulos de inclinação de 1.

10-TESTES COMPARATIVOS ENTRE OS DOIS SISTEMAS

Observando-se os dados adquiridos nos testes comparativos que estão apresentados na Tabela 10.1 a 10.3, verificou-se que os dois sistemas apresentaram valores semelhantes dos estabelecidos pela calibração da centrífuga realizada em 2001, nos pontos de referência.

Os testes foram iniciados com o derramamento do solo em um recipiente de centrifugação e conseqüente aglutinação. Este solo não drenado apresentava coesão de 15 kPa, teor de água de 33,4% e penetrabilidade do cone de 7 mm, a nível de laboratório. Grãos do solo e água foram misturados, a fim de atingir os parâmetros mencionados acima. A massa de solo foi descartada no recipiente em camadas de 4 cm cada.

Os testes foram realizados para cada camada, a fim de revelar o conteúdo de água e penetração de cone. Este procedimento teve como objetivo impedir a entrada de ar no solo, conseqüentemente, assegurar a homogeneidade de massa do solo.

Quando o solo alcançou 13 cm de altura dentro do recipiente, 10 cm de água foi derramada sobre a massa de solo, simulando o nível de água do mar. Então, uma âncora do modelo e todo o aparato foram instalados antes de iniciar o teste.

Sensores de monitoramento compostos por um sensor de inclinação, uma célula de carga, um pequeno motor, e um codificador, utilizaram um sistema sem fio, desenvolvido por Ramires (2007).

Forças de arrasto e arrancamento foram simuladas utilizando células de carga com 350 Ω de resistência de extensômetro

elétrico em um arranjo de ponte completa. Forças de até 600 N podem ser medidas com este dispositivo.

O motor tinha um sistema de “encoder” com 15.000 pontos de resolução e capaz de simular velocidade de 1,15 milímetros/segundo, o que corresponde a 4,14 mm/segundo no protótipo.

Polias especiais foram empregadas no recipiente, a fim de assegurar que as forças horizontais sobre âncora do modelo fossem reproduzidas em conformidade com o protótipo.

Duas diferentes aplicações de software foram desenvolvidas para registrar os dados dos testes. O primeiro foi baseado na linguagem C, e o segundo foi baseado no pacote LabVIEW. Estas duas aplicações de software foram executadas simultaneamente, a fim de evitar ruídos de comunicação.

11- CONCLUSÃO

A inserção da tecnologia de redes de sensores sem fios nas atividades de ensaios de modelos físicos reduzidos permitiu a capacitação técnica, tornando possível, com a experiência adquirida, empregar esta tecnologia em outras aplicações, adequando-as para cada propósito.

Pelo ineditismo, foram encontrados problemas relacionados às perdas significativas de dados no processo de transmissão de um dispositivo para outro. Ressalta-se que a perda destes dados resulta na falta de informações em eventos de interesse.

Nos ensaios de modelos físicos, todos os instantes são importantes para avaliação do comportamento dos elementos em estudo. Sem estas informações não é possível ter idéia de

como o mecanismo físico ocorre e, com isto, não se obtém uma análise completa do problema.

Com a criação e a implantação do método para proteção dos dados contra falhas de comunicação nas redes de sensores inteligentes sem fios, diversas aplicações podem vir a ser beneficiadas, dispensando o uso de sensores redundantes, fazendo com que sejam formadas topologias 'otimizadas' para a monitoração dos fenômenos físicos de interesse, reduzindo os custos de instalação e de manutenção.

Além da formação de redes otimizadas, elas passam a ser confiáveis, mesmo que um dos dispositivos falhe na comunicação, esses dados serão recuperados em um instante futuro.

Para aplicações que dependam de respostas em tempo real, o *hardware* utilizado nesta tese pode não atender satisfatoriamente. Em aplicações que envolvam eventos com inércia superior a 10 ms, o *hardware* atual, adotado neste trabalho, dá o suporte necessário.

Com o desenvolvimento de novos dispositivos, com maiores velocidades de processamento, a magnitude de tempo pode ser reduzida, permitindo que este método passe a atender o maior número de aplicações possível.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo pelo apoio aos testes realizados, com o apoio financeiro da FAPESP. Ainda as Universidades de São Paulo e Yokohama National University pelo incentivo as pesquisas em centrífugas. E ao assistente aluno da

FATEC- Jaú Jefferson Luis Vianna, que nos auxiliou na formatação do trabalho.

Tabela 10.1 – Parâmetros estatísticos dos sistemas empregados na centrífuga do IPT durante os ensaios com a âncora 1.

Parâmetro Estatístico	Grandezas		
	Físicas	Sistema	
		Convencional	Sem Fios
Média	Força (N)	3,24	3,97
	Eixo X (°)	-24,73	-25,29
	Eixo Y (°)	10,95	-0,09
Mediana	Força (N)	3,60	3,99
	Eixo X (°)	-24,77	-25,28
	Eixo Y (°)	11,16	-0,10
Variância da amostra	Força (N)	1,13	0,00
	Eixo X (°)	0,17	0,07
	Eixo Y (°)	0,28	0,00
Erro padrão	Força (N)	0,16	0,01
	Eixo X (°)	0,05	0,03
	Eixo Y (°)	0,08	0,00
Amplitude (valor máximo – valor mínimo)	Força (N)	3,27	0,26
	Eixo X (°)	2,06	1,06
	Eixo Y (°)	2,35	0,15
Tamanho da amostra	Força (N)	42	71
	Eixo X (°)	42	71
	Eixo Y (°)	42	71
Erro máximo da estimativa, com 95% de confiança	Força (N)	0,33	0,01
	Eixo X (°)	0,11	0,06
	Eixo Y (°)	0,17	0,01

Tabela 10.2 – Parâmetros estatísticos dos sistemas empregados na centrífuga do IPT durante os ensaios com a âncora 2.

Parâmetro Estatístico	Grandezas		
	Físicas	Sistema	
		Convencional	Sem Fios
Média	Força (N)	30,99	29,64
	Eixo X (°)	29,26	28,81
	Eixo Y (°)	-0,08	0,67
Mediana	Força (N)	31,44	29,63
	Eixo X (°)	29,37	28,81
	Eixo Y (°)	-0,37	0,17
Variância da amostra	Força (N)	3,83	0,01
	Eixo X (°)	0,51	0,00
	Eixo Y (°)	0,33	0,09
Erro padrão	Força (N)	0,22	0,01
	Eixo X (°)	0,08	0,01
	Eixo Y (°)	0,07	0,04
Amplitude (valor máximo – valor mínimo)	Força (N)	6,60	0,25
	Eixo X (°)	3,63	0,33
	Eixo Y (°)	1,72	1,28
Tamanho da amostra	Força (N)	76	64
	Eixo X (°)	76	64
	Eixo Y (°)	76	64
Erro máximo da estimativa, com 95% de confiança	Força (N)	0,44	0,02
	Eixo X (°)	0,16	0,02
	Eixo Y (°)	0,15	0,07

Tabela 10.3 – Parâmetros estatísticos dos sistemas empregados na centrífuga do IPT durante os ensaios com a âncora 3

Parâmetro Estatístico	Grandezas		
	Físicas	Sistema	
		Convencional	Sem Fios
Média	Força (N)	123,46	124,23
	Eixo X (°)	53,43	56,49
	Eixo Y (°)	1,07	1,36
Mediana	Força (N)	123,47	124,12
	Eixo X (°)	53,14	56,51
	Eixo Y (°)	1,11	1,36
Variância da amostra	Força (N)	2,06	0,12
	Eixo X (°)	0,42	0,02
	Eixo Y (°)	0,01	0,00
Erro padrão	Força (N)	0,22	0,06
	Eixo X (°)	0,08	0,03
	Eixo Y (°)	0,01	0,00
Amplitude (valor máximo – valor mínimo)	Força (N)	5,82	3,51
	Eixo X (°)	2,31	0,47
	Eixo Y (°)	0,34	0,05
Tamanho da amostra	Força (N)	68	43
	Eixo X (°)	68	43
	Eixo Y (°)	68	43
Erro máximo da estimativa, com 95% de confiança	Força (N)	0,44	0,11
	Eixo X (°)	0,16	0,07
	Eixo Y (°)	0,01	0,00

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Campos, G.C., Campos, E. P.; Medeiros Jr., C.J. (2006). Utility of the reduced physical models of the boundary analysis for turtle anchors. In: III Congress Geotechnical Brazilian-Portugal, p. 429-434.

Candeias, J.P. Modelação Física com centrífuga 1999, tese de doutorado, Universidade Técnica de Lisboa-Instituto superior Técnico, Portugal.

Cheekiralla, S. M. S. L.; Development of a Wireless Sensor Unit for Tunnel Monitoring, 2004. Thesis (Master Science) in Civil Engineering Department and Ambient of the MIT

– Massachusetts Institute of Technology; USA.

ChipCon:Quick Start Instructions CC1010DK Development Kit, 2003 , Norway.

Niu, R., Varshney, P.K., Cheng, Q. :”Distri buted Detection in a large Wireless Sensor Network”, Eisevier, Science Direct, pp 1-15, 2005.

Niyama, S. Contribuição para o estudo do embuchamento em estacas cravadas de ponta aberta 1992, Tese de doutorado, Escola Politécnica da Univesidade de São Paulo.

Portugal, J.A. (1999). Physical Modelling with Centrifuge. Portugal, 241 p. Doctoral Thesis – Lisboa College Technician Institute.

Ramires, R.S. (2007). Method for data protection against communication failures in wireless smart sensors networks. 2007. Doctoral Thesis – Escola Politécnica – University of São Paulo, São Paulo, Brazil, 326 p., 2007.

Tanenbaum, A.S.: ”Sistemas Operacionais Modernos” 2ª edição Person Prentice Hall, São Paulo 0. 1996.

Wilson, D. W.; Weber. G. H.; Slankard, T.; Hamann, B.; Kutter, B. L.. Visualization in Experimental Earthquake Engineering, 2004. CITRIS Workshop on Sensor, Sensor Networks and Sensor Applications, University California Davis, USA.

Zornberg, J.E., Friedrichsen J., Avanzi, E.D.: “ Performance of Cemtrifuge Data Acquisition System using wirelee Transmission” Geotetchnical Testing Journal , vol 28 n2 pp 1-7 USA 2005.