

## **Estudo Do Monitoramento De Umidade De Solos Utilizando Sensores De Cerâmica Porosa**

RELATÓRIO FINAL DE PROJETO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA  
(PIBIC/CNPq/INPE)

Fábio Nascimento de Melo (UNIVAP, Bolsista PIBITI/CNPq)  
E-mail: fabionascimentodemelo@yahoo.com.br

Maria do Carmo de Andrade Nono (CTE/LAS/INPE, Orientador)  
E-mail: maria@las.inpe.br

Rodrigo de Matos Oliveira (CTE/LAS/INPE, Co-orientador)  
E-mail: rodmatos@las.inpe.br

Julho/2011 – Agosto/2012

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a minha família.

Ao meu pai e minha mãe pela educação e oportunidade de estudos que me deram, em detrimento de seus próprios desejos muitas vezes.

Ao meu irmão por ser mais que um irmão, tornando-se também um verdadeiro amigo.

Agradeço agora a Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono e ao Dr. Rodrigo de Matos Oliveira pela oportunidade, aprendizado e orientação.

Agradeço também a todos os amigos e colegas de laboratório, pela ajuda, troca de informações e companheirismo que tornou o ambiente de trabalho propício ao aprendizado.

Agradeço também ao CNPq e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade de realizar Iniciação Científica em uma instituição tão importante.

No mais a todos aqueles que já fizeram ou fazem parte da minha vida, que de maneira direta ou indireta contribuíram para que eu chegasse aonde cheguei e então também possuem sua parcela de contribuição neste trabalho.



## Resumo

A precisão e a confiabilidade no monitoramento da umidade de solos são muito importantes para a melhoria das práticas de agricultura, construção civil, drenagem urbana e rural, assim como para o controle de desastres naturais. No Brasil, devido aos freqüentes deslizamentos de encostas ocorridos nos últimos anos, buscou-se, nesse projeto, dar continuidade ao desenvolvimento de elementos sensores cerâmicos de umidade e, com isso, monitorar o conteúdo de água em solos, a fim de prever e evitar o risco dessas catástrofes. Segundo um levantamento feito pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo - IPT, cerca de 150 municípios brasileiros, localizados principalmente nos Estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Pernambuco, Bahia, Espírito Santo e Santa Catarina são afetados pela ocorrência desses processos nos períodos chuvosos. Dessa forma, há mais de 20 anos, Pesquisadores do Grupo de Tecnologias Ambientais - TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais - LAS, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, têm se dedicado à elaboração de técnicas de diagnóstico, desenvolvimento e caracterização de materiais e no aprimoramento de elementos sensores e de sistemas sensores de umidade relativa do ar. A partir de 2001, iniciou-se a pesquisa e desenvolvimento de elementos sensores cerâmicos para o monitoramento do conteúdo de água em solos, que foi baseado nos bons resultados encontrados na pesquisa de elementos sensores de umidade relativa. Neste trabalho, portanto, os elementos sensores cerâmicos, sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, desenvolvidos anteriormente, foram aplicados para monitorar o conteúdo de água em amostras deformadas e indeformadas de solo. As medições foram realizadas através de uma Ponte RLC, onde curvas de capacitância em função do conteúdo de água em amostras de solo, em diferentes freqüências, foram obtidas. Os resultados encontrados mostraram que as pastilhas cerâmicas apresentaram potencial para serem utilizadas como elementos sensores de umidade de solo, com estrutura preservada e não.

Palavras chave: Sensores cerâmicos, umidade do solo, deslizamentos de encostas.



## **Abstract**

The accuracy and reliability in the monitoring of soil moisture is very important for the improvement of agricultural practices, construction, drainage urban and rural, as well as the control of natural disasters. In Brazil, due to frequent landslides in recent years, we sought in this project to continue the development of ceramic humidity sensor elements and, therefore, monitor the water content in soils in order to predict and prevent the risk of disasters. According to a survey by the Institute Technological Research of São Paulo - IPT, about 150 municipalities, located mainly in the states of Sao Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Pernambuco, Bahia, Espirito Santo and Santa Catarina are affected by such processes in rainy periods. Thus, for over 20 years, researchers from the Environmental Technologies Group - TECAMB, that is part of the Associated Laboratory of Sensors and Materials - LAS, the National Institute of Space Research - INPE, has been dedicated to the development of diagnostic techniques, characterization of materials, the improvement of sensors and sensor systems of relative humidity. Since 2001, began the research and development of ceramic sensing elements for monitoring water content in soil which was based on good results in search of relative humidity sensors. In this study the sensor elements ceramics sintered at temperatures of 1000, 1100 and 1200 °C, developed previously were applied to monitor the water content in disturbed and undisturbed samples of soil. Measurements were performed using an RLC bridge, where capacitance curves as a function of water content in soil samples were obtained at different frequencies. The results demonstrate that the ceramic inserts showed potential to be used as elements of soil moisture sensors whether preserved structure as not.

Keywords: Ceramic sensors; Soil moisture; Landslides.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Ciclo hidrológico.....	9
Figura 3.1 – Ponto onde foram realizadas as coletas de solo no INPE.....	13
Figura 3.2 – Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico.....	15
Figura 3.3 – Procedimento experimental utilizado na confecção dos elementos sensores cerâmicos. ....	16
Figura 3.4 – Foto das amostras de solo com estrutura indeformada, os elementos sensores e a ponte RLC.....	18
Figura 3.5 – Foto da amostra de solo com estrutura deformada.....	18
Figura 4.1 – Curvas de capacitância <i>versus</i> conteúdo de água na amostra indeformada de solo para o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1000 °C, nas frequências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.....	21
Figura 4.2 – Curvas de capacitância <i>versus</i> conteúdo de água na amostra indeformada de solo para o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1100 °C, nas frequências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.....	22
Figura 4.3 – Curvas de capacitância <i>versus</i> conteúdo de água na amostra indeformada de solo para o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1200 °C, nas frequências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.....	23
Figura 4.4 – Curvas de capacitância <i>versus</i> conteúdo de água na amostra deformada de solo para os elementos sensores sinterizados nas temperaturas de a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C, nas frequências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.....	25
Figura 4.5 – Curvas obtidas pelo sensor comercial.....	26





# SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos gerais.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	3
<b>2 Revisão Bibliográfica.....</b>	<b>5</b>
2.1 Sensores de umidade.....	5
2.2 Materiais cerâmicos.....	7
2.3 Mecanismos de adsorção de água nos elementos sensores .....	7
2.4 Solo.....	8
2.5 Ciclo hidrológico e a presença de água no solo .....	9
2.6 Deslizamentos de encostas.....	10
<b>3 Materiais e Métodos .....</b>	<b>13</b>
3.1 Solo .....	13
3.2 Elementos sensores cerâmicos.....	14
3.3 Medições realizadas com os elementos sensores cerâmicos.....	16
<b>4 Resultados e Discussões .....</b>	<b>21</b>
<b>5 Conclusões .....</b>	<b>27</b>
<b>6 Referência Bibliográfica .....</b>	<b>29</b>



## 1 Introdução

A grande extensão territorial do Brasil faz com que tenhamos uma heterogeneidade muito grande de ambientes, clima, relevo, solos, biomas, entre outros aspectos. Isto faz com que se tenha, em regiões de relevo acidentado, uma suscetibilidade muito grande a deslizamento de encostas.

Todo ano, em épocas de chuvas intensas, nos deparamos com noticiários sobre os acidentes oriundos desses processos, causando um enorme número de mortes e, também, de danos em obras civis e deixando grandes prejuízos econômicos. De acordo com o estudo realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT), os Estados mais afetados são: São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Pernambuco, Bahia, Santa Catarina e Espírito Santo [1].

No Brasil, a disparidade social faz com que a população menos favorecida, sem opção de moradia, ocupe de forma irregular as encostas, removendo a vegetação existente, realizando obras de aterramento e corte de morro sem qualquer metodologia técnica, não executam obras de captação de águas e sistema de drenagem, o que acaba sobrecarregando as encostas, aumentando a frequência dos deslizamentos [2].

Deslizamentos de encostas, também chamados de movimentos de massa, são grandes movimentos de solo e/ou rocha vertente encosta abaixo por ação da gravidade, que são influenciados por fatores como a água, gelo ou ar [3].

Os fatores que influenciam a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de encostas são: tipo de solo, relevo e topografia, e a precipitação [4].

Devido à importância do tema, há um número crescente de estudos de susceptibilidade e risco de deslizamentos em encostas, porém ainda existem mecanismos referentes a este processo pouco conhecidos [6].

Há mais de 24 anos, integrantes do Grupo de Pesquisas em Tecnologias Ambientais (TECAMB), que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), têm se dedicado à elaboração de técnicas de diagnóstico, desenvolvimento e caracterização de materiais e no aprimoramento de elementos sensores e de sistemas sensores de parâmetros ambientais [6].

Em 2001, foram adaptados sensores inicialmente utilizados para medição de umidade do ar, para se realizar medições de umidade de solo. Em um primeiro momento, os sensores seriam para o monitoramento da umidade do solo para serem usados como ferramenta de auxílio no manejo do solo na agricultura. Com os crescentes danos causados por deslizamento de encostas nos últimos anos, estes sensores podem ser uma alternativa para o entendimento e monitoramento de umidade do solo em encostas. E que isso possa auxiliar a adoção de medidas na mitigação e prevenção desses danos tão frequentes [6].

### **1.1 Objetivos gerais**

O escopo principal foi investigar as influências das características físicas das amostras de solo na capacidade de absorção/adsorção de água em medições em laboratório e no campo.

## **1.2 Objetivos específicos**

- Realizar uma revisão de literatura sobre os tipos de sensores de umidade utilizados;
- Realizar revisão bibliográfica sobre a importância do monitoramento da umidade do solo;
- Realizar as medições de umidade do solo utilizando sensores de cerâmica porosa;
- Analisar os resultados obtidos com os componentes do solo.



## **2 Revisão Bibliográfica**

### **2.1 Sensores de umidade**

Nos últimos anos o entendimento sobre a dinâmica e funcionamento dos parâmetros ambientais como temperatura, umidade, pressão, entre outros têm se mostrado fato muito importante, pois esses fatores interferem diretamente na produção industrial e agrícola. Portanto, diversos sensores de natureza física e química têm sido desenvolvidos para monitorar e controlar estes fatores, com a finalidade de aumentar a eficiência e eficácia na produção de bens de consumo.

A umidade é um componente muito comum e de extrema importância em nosso planeta [5]. Por isso o monitoramento e controle deste componente têm sido muito utilizados em diversos ramos industriais, como: indústria automobilística, eletro-eletrônicos, alimentícia, têxteis, equipamentos médicos e, também, é usado na produção agrícola e no monitoramento ambiental [6]. É importante salientar que dependendo do uso e finalidade do monitoramento que se pretende, há um tipo de sensor de umidade específico.

Nos últimos anos, o controle e monitoramento da umidade do ar tem feito um aumento na qualidade da produção e conseqüentemente nos produtos produzidos [7].

Os sensores de umidade devem possuir as seguintes características básicas [5]:

- a) Boa seletividade nas faixas de umidade;
- b) Resposta rápida;
- c) Boa reprodutibilidade;
- d) Histerese mínima;



- e) Durabilidade;
- f) Resistência a contaminantes;
- g) Resistência a variações de temperatura;
- h) Estrutura simples;
- i) Baixo custo.

No Brasil ainda há uma defasagem nos sensores nacionais baseados nas características: velocidade de resposta (*Speed*), estabilidade físico-química (*Stability*), seletividade ao estímulo proposto (*Selectivity*) e sensibilidade (*Sensibility*) [6].

Os tipos de materiais mais utilizados na fabricação dos sensores de umidade são: polímeros orgânicos, eletrólitos e materiais cerâmicos. Todos estes materiais possuem vantagens e desvantagens.

Os sensores de umidade que utilizam eletrólitos, como o LiCl, desenvolvido por Dunmore na década de 30, possui baixo tempo de resposta e é incapaz de operar em condições muito úmidas ou na presença de amônia ou solventes orgânicos [7].

Os filmes poliméricos não podem ser utilizados sob altas temperaturas ou alta umidade, possuem baixo tempo de resposta, mostram histerese, e quando expostos a alguns solventes ou choques elétricos, sofrem degradação [7].

Já os sensores de umidade baseados em materiais cerâmicos, mais especificamente os óxidos de metais, têm apresentados mais vantagens em relação aos outros devido a sua resistência mecânica, resistência a contaminantes químicos e estabilidade física e térmica. Atualmente os sensores mais utilizados são os de polímeros e materiais cerâmicos [7].

## **2.2 Materiais cerâmicos**

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos e não metálicos, os quais são formados por ligações entre elementos metálicos e elementos não metálicos. Estas ligações são de características interatômicas ou iônicas [8].

Normalmente os materiais cerâmicos são formados através de aplicação de calor, ou algumas vezes de calor e pressão [9]. Por causa deste aspecto, que a terminologia da palavra cerâmica deriva da palavra grega *Keramikos*, que significa “matéria-prima queimada”.

Em um passado não muito distante, os materiais cerâmicos eram aqueles que continham argila como matéria-prima, hoje estes materiais são chamados de cerâmicas tradicionais. Com o passar dos anos muitos estudos sobre a natureza destes materiais foram desenvolvidos e então o termo cerâmica passou a ter um significado mais vasto [8].

Hoje a cerâmica é usada tanto na fabricação de produtos sanitários, porcelanas, vidros como também pode ser aplicada para comunicação ótica, aplicações eletro óticas para materiais a laser e substratos em circuitos eletrônicos para eletrodos em dispositivos fotoeletroquímicos [9].

## **2.3 Mecanismos de adsorção de água nos elementos sensores**

A adsorção de água na superfície dos elementos sensores cerâmicos alteram as propriedades elétricas desta superfície, principalmente a dos óxidos metálicos. Os óxidos metálicos, quando estão em contato com a água no estado gasoso (umidade relativa do ar) e/ou líquido (conteúdo de água no solo), adsorvem as moléculas de água em sua superfície, principalmente nos grãos dos cristais, que por dissociação formam dois íons de hidroxila ( $\text{OH}^-$ ) para cada molécula de água.

As hidroxilas adsorvidas pelos cátions metálicos na superfície dos grãos reagem com o oxigênio de uma superfície adjacente para formar um segundo grupo de hidroxila. A camada adsorvida quimicamente, uma vez formada, não pode mais ser afetada pela exposição à umidade [7].

Quando a primeira camada de água é adsorvida, outras camadas de moléculas de água são fisicamente adsorvidas pela camada de hidroxila. A adsorção física da água é facilmente dissociada em  $H_3O^+$  devido à camada eletrostática formada na camada adsorvida quimicamente. A adsorção física ocorre em mais camadas quando ocorre um aumento na pressão de vapor da água. A adsorção física das moléculas de água só ocorrem em temperaturas menores que 100 °C. A partir desta temperatura só ocorre adsorção química (até 400°C) [7].

## **2.4 Solo**

O solo é formado por meio da ação combinada do clima, organismos, material de origem (rocha) e tempo. É constituído por minerais, poros (os quais são ocupados por ar e água), matéria orgânica e relevo. A disponibilidade de água, ar e nutrientes nos solos variam bastante, condicionando produtividades diferentes e conseqüentemente potenciais de uso diferenciados [10]

O solo é variável em três dimensões, e quando se observa sua variação vertical (perfil do solo), observam-se variações em camadas mais ou menos definidas e perceptíveis. Essas camadas são chamadas de horizontes.[10].

Os solos apresentam características de suporte físico dos ecossistemas, funcionalidades ecológicas (produção de biomassa e regulação do ciclo hidrológico) e também é considerado como recurso natural do ponto de vista antrópico [11].

Os solos diferem entre si devido as características de suas propriedades, são elas: constituição, cor, textura, estrutura, cerosidade, porosidade, consistência, cimentação pedoclima e pedoforma [10].

## 2.5 Ciclo hidrológico e a presença de água no solo

A água está presente na natureza em seus três estados físicos: sólido, líquido e gasoso. O mecanismo pela qual a água entra em contato com o solo é denominado ciclo hidrológico (Figura 2.1).

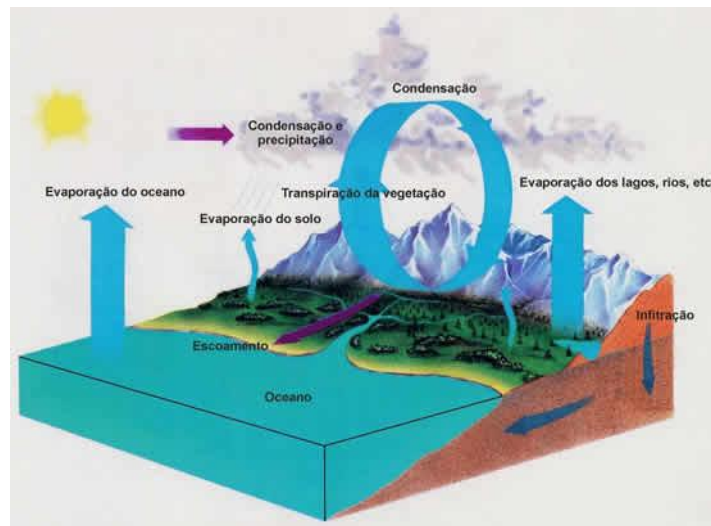


Figura 2.1 – Ciclo hidrológico. Fonte: [12].

O ciclo hidrológico tem como mecanismos básicos a precipitação da água das nuvens, a infiltração da água no solo ou seu escoamento para os cursos da água e rios, seguidos pela evaporação e evapotranspiração, que levam a água de volta para a atmosfera.

Precipitação é o termo usado para todas as formas naturais de págua na atmosfera que caem na superfície do solo (granizo, chuva e neve) e sua unidade básica de registro é em milímetros. Por meio da precipitação a água chega até a superfície do solo podendo sofrer infiltração ou ser escoada para os rios.

A água dos rios e a água retida no solo sofrem o processo de evaporação e retornam para a atmosfera. A água retida nas plantas é transpirada e também retorna para a atmosfera em sua forma gasosa. A combinação da evaporação com a transpiração das plantas é chamada de evapotranspiração.

Com isso, através do ciclo hidrológico é que se tem a interação do sistema água-solo [13].

## **2.6 Deslizamentos de encostas**

Os processos de deslizamento de encostas, ou também chamados de movimentos de massa, é o processo de movimentação de materiais sólidos (solo e/ou rocha) ao longo de terrenos inclinados. Os terrenos com relevos íngremes e/ou encostas modificadas pela ação antrópica são as áreas com maior possibilidade de serem afetadas por esses processos.

No Brasil, na região Sul e Sudeste (Serra do Mar e Serra da Mantiqueira), no Nordeste (regiões assentadas sobre a Formação Barreiras) e as regiões serranas nos planaltos centrais são as áreas do país com maior tendência a sofrer com estes tipos de processos [14].

Entre os fatores mais atuantes e contribuintes ao processo de deslizamento de encostas destaca-se a dinâmica da água no terreno, a qual pode afetar a consistência do solo. A consistência do solo é a manifestação das forças de coesão e adesão em função da variação de umidade. À medida que aumenta o teor de umidade no solo diminuem-se as forças de coesão entre as partículas de solo, chegando a um ponto onde este se comporta como um líquido viscoso (limite de liquidez). O teor de umidade também afeta a resistência ao cisalhamento, podendo levar as encostas a ruptura [14,11].

Augusto Filho (1992) elaborou uma metodologia para classificar os processos de deslizamentos de encostas, os quais podem ser classificados como: rastejos (*creep*), escorregamentos (*slides*), quedas (*falls*) e corridas [15].

A tabela a seguir mostra os tipos de deslizamentos de encostas (Tabela 2.1):

Tabela 2.1 – Principais tipos de deslizamentos e suas características. Fonte: [15].

PROCESSOS	CARACTERÍSTICAS DO MOVIMENTO, MATERIAL E GEOMETRIA
Rastejo	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vários planos de deslocamento (internos)</li> <li>- velocidades muito baixas (cm/ano) a baixas e decrescentes com a profundidade</li> <li>- movimentos constantes, sazonais ou intermediários</li> <li>- solo, depósitos, rocha alterada/fraturada</li> <li>- geometria indefinida</li> </ul>
Escorregamentos	<ul style="list-style-type: none"> <li>- poucos planos de deslocamento (externos)</li> <li>- velocidades médias (m/h) a altas (m/s)</li> <li>- pequenos a grandes volumes de material</li> <li>- geometria e materiais variáveis</li> </ul> <p>PLANARES — solos pouco espessos, solos e rochas com um plano de fraqueza            CIRCULARES — solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas            EM CUNHA — solos e rochas com dois planos de fraqueza</p>
Quedas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- sem planos de deslocamento</li> <li>- movimentos tipo queda livre ou em plano inclinado</li> <li>- velocidades muito altas (vários m/s)</li> <li>- material rochoso</li> <li>- pequenos a médios volumes</li> <li>- geometria variável: lascas, placas, blocos, etc</li> </ul> <p>ROLAMENTO DE MATAÇÃO            TOMBAMENTO</p>
Corridas	<ul style="list-style-type: none"> <li>- muitas superfícies de deslocamento (internas e externas à massa em movimentação)</li> <li>- movimento semelhante ao de um líquido viscoso</li> <li>- desenvolvimento ao longo de drenagens</li> <li>- velocidades médias a altas</li> <li>- mobilização de solo, rocha, detritos e águas</li> <li>- grandes volumes de material</li> <li>- extenso raio de alcance, mesmo em áreas planas</li> </ul>



### 3 Materiais e Métodos

#### 3.1 Solo

As amostras de solo foram coletadas dentro das propriedades do INPE, em São José dos Campos, SP, em um trecho localizado atrás do Laboratório Associado de Sensores e Materiais, mais precisamente nas coordenadas UTM 23K 412.147m E e 7.433.185m S, conforme imagem abaixo (Figura 3.1):

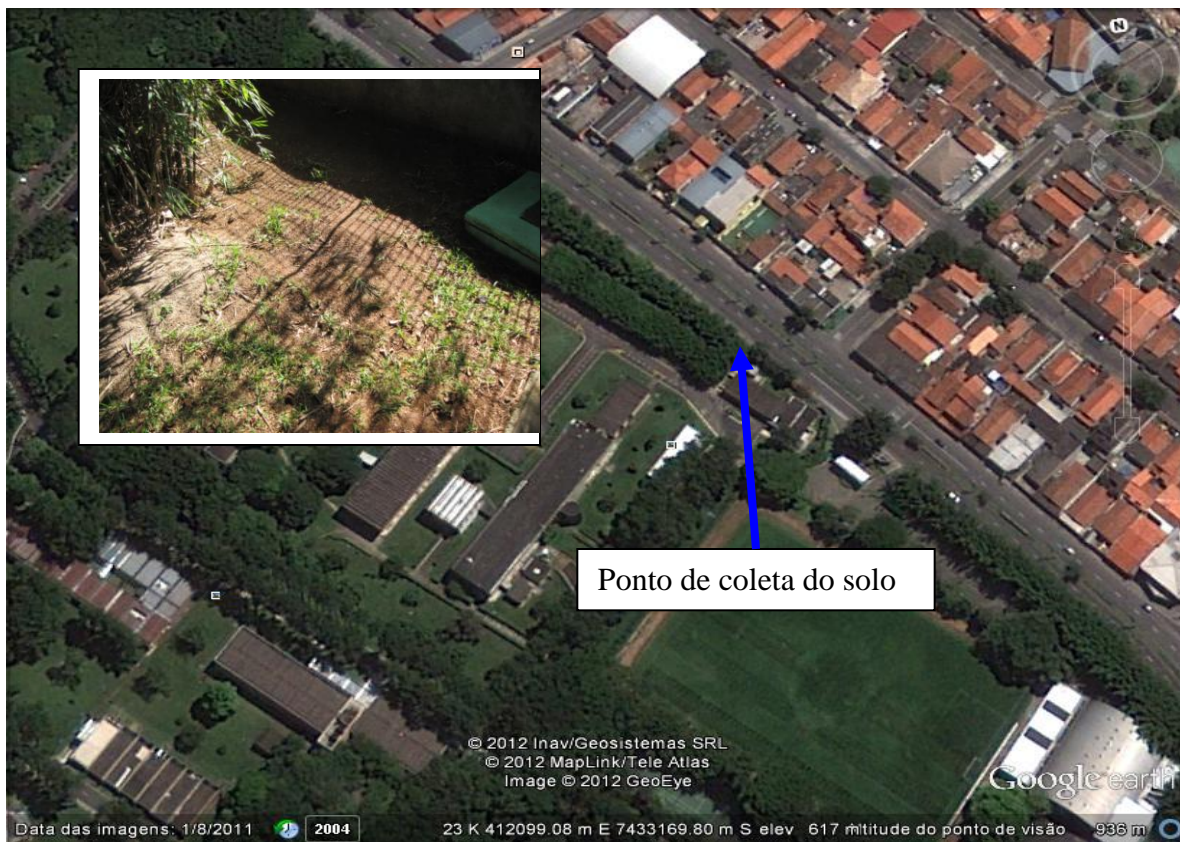


Figura 3.1 – Ponto onde foram realizadas as coletas de solo no INPE. Fonte: *Google Earth* (imagem 2011).

As amostras de solo com estrutura indeformada foram coletadas através de cilindros de aço apropriados, onde foram mantidas assim durante todo o período



de experimentos, com a finalidade de manter a estrutura da amostra de solo intacta.

Já as amostras deformadas, com estrutura não preservada, foram coletadas e acondicionadas em béqueres, mantidas assim também durante a realização dos experimentos.

### **3.2 Elementos sensores cerâmicos**

Os sensores cerâmicos utilizados foram desenvolvidos em trabalhos anteriores, fruto de estudos e pesquisas realizados, ao longo dos últimos 10 anos, pelos integrantes do Grupo de Pesquisa em Tecnologias Ambientais (TECAMB) que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE).

As cerâmicas porosas foram confeccionadas a partir das seguintes etapas: mistura mecânica a úmido e secagem dos pós; prensagem uniaxial das misturas dos pós e sinterização nas temperaturas de 1000 °C, 1100 °C e 1200 °C [6].

Os sensores desenvolvidos são do tipo capacitivo, em formato de *sandwich*, ou seja, placa condutora + material dielétrico (pastilha cerâmica) + placa condutora. Para se obter esta configuração, depositou-se uma cola de prata em cada uma das superfícies da pastilha cerâmica, para se obter o efeito capacitivo, onde foram acoplados eletrodos de cobre, conforme Figura 3.2. Posteriormente, os elementos sensores foram encapsulados em uma resina polimérica com a finalidade de manter a integridade física e química do material e evitar interferências [6].

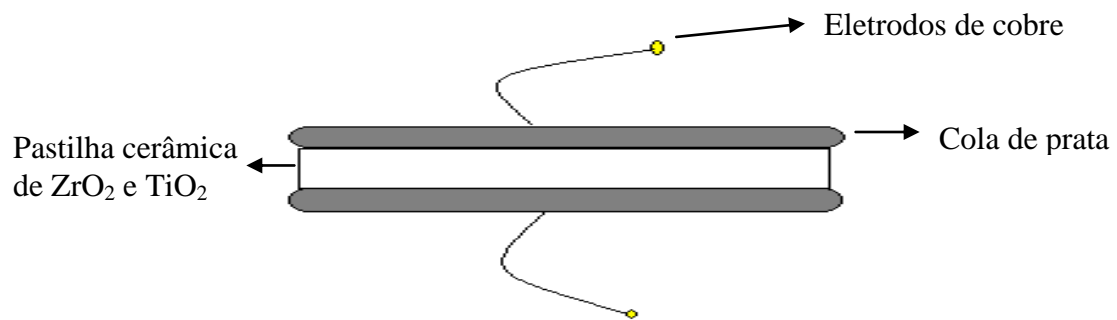


Figura 3.2 – Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico. Fonte: adaptada [6].

A Figura 3.3 apresenta um fluxograma do procedimento experimental adotado para o processamento dos elementos sensores cerâmicos porosos de  $ZrO_2-TiO_2$ , a partir de matérias primas nacionais

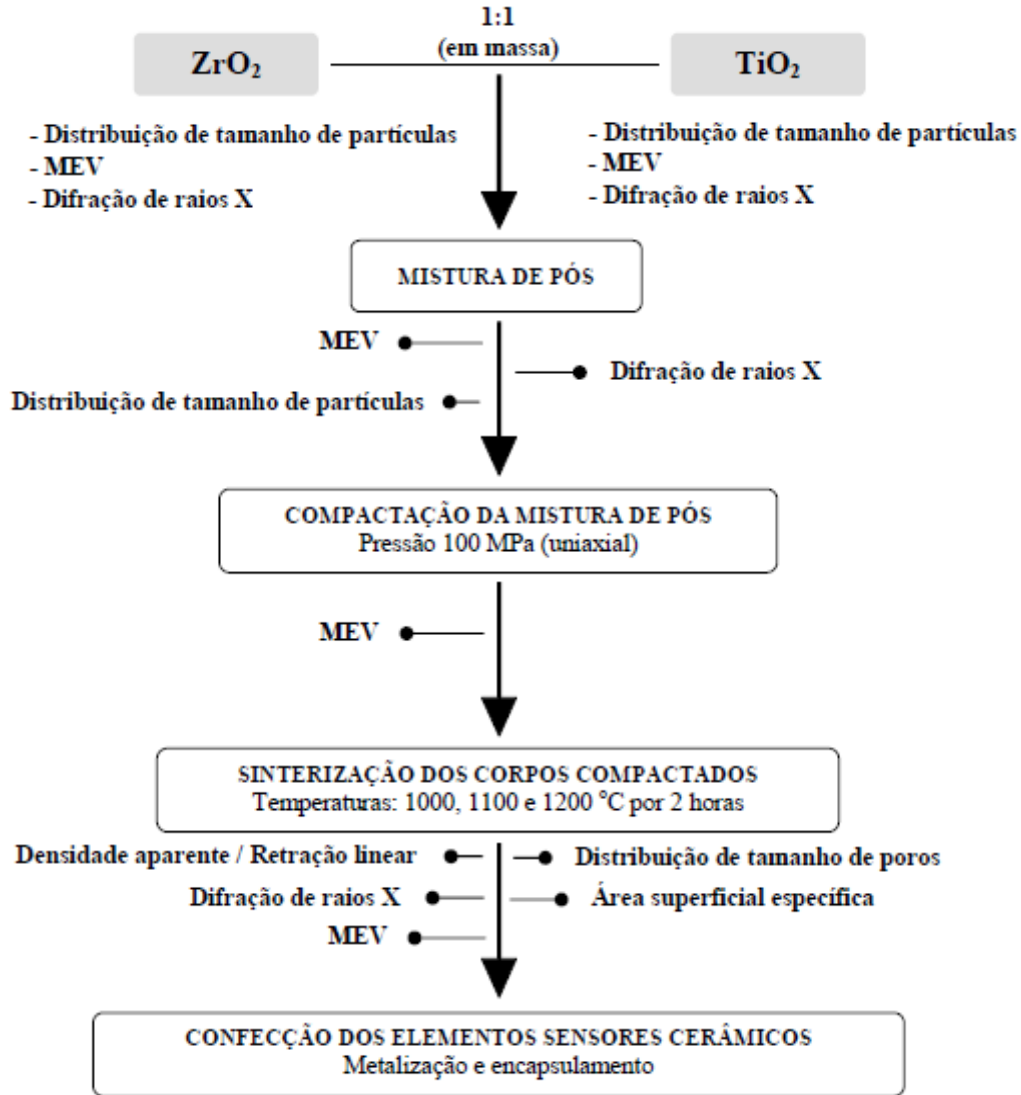


Figura 3.3 – Procedimento experimental utilizado na confecção dos elementos sensores cerâmicos. Fonte: [6].

### 3.3 Medições realizadas com os elementos sensores cerâmicos

Para a realização das medições de umidade do solo, primeiramente precisava-se saber qual a quantidade de água real para que as amostras de solo chegassem ao ponto de saturação. Para isto, foi realizado um estudo prévio para obter o grau de saturação de cada amostra de solo.

Em seguida, por meio da relação da massa de água necessária para saturar certa massa de amostra de solo, estimou-se a quantidade de água necessária para que se atingisse o ponto de saturação em cada uma das amostras de solo.

Antes de realizar qualquer medição da umidade do solo, as amostras de solo foram colocadas em uma estufa durante 24 horas, com temperatura aproximada de 110 °C, para que a amostra perdesse o máximo possível de umidade.

Para as medições de umidade do solo nas amostras indeformadas, os elementos sensores de  $ZrO_2-TiO_2$ , sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, foram fixados em três amostras diferentes, porém do mesmo solo, até que os mesmos atingissem aproximadamente metade da profundidade total da amostra.

Após isto, realizaram-se 10 séries de medições em diferentes faixas de umidade do solo, sendo a primeira medição realizada em solo seco e as posteriores com o solo úmido, até atingir então, o ponto de saturação. Cada uma das séries de medições contém 30 medidas de capacitância, para que ao final se obtivesse um valor médio de capacitância para cada faixa de umidade e o desvio padrão para cada medição, para que se tenha uma maior confiabilidade nos dados. Para que a amostra não perdesse umidade para a atmosfera, após cada adição de água a amostra foi vedada com filme PVC transparente.

As medições de capacitância foram obtidas através de uma Ponte RLC (PHILIPS-FLUKE/PM6304). Esta Ponte RLC é responsável pela excitação e aquisição de sinais elétricos dos corpos cerâmicos utilizados como elementos sensores, conforme a Figura 3.4. Foram realizadas medições nas frequências de 100 Hz, 1 KHz e 10 KHz em todos os três sensores utilizados.



Figura 3.4 – Foto das amostras de solo com estrutura indeformada, os elementos sensores e a ponte RLC.

Para as medições de umidade do solo com estrutura deformada, utilizaram-se os mesmos procedimentos, porém os elementos sensores cerâmicos foram fixados em uma única amostra de solo conforme Figura 3.5.



Figura 3.5 – Foto da amostra de solo com estrutura deformada.

Na amostra de solo deformada foi usado, para comparação das medições, um sensor de umidade de solo comercial, adquirido junto a *Ag Solve – Monitoramento Ambiental*, representante brasileira da *Decagon Device, Inc. – Measure World, Pullman WA U.S.A.* O princípio de operação deste sensor consiste na medição da constante dielétrica de áreas circunvizinhas, fazendo uma relação direta com o volume de água no solo, utilizando a técnica de Reflectometria no Domínio do Tempo (TDR) – *Time Domain Reflectometry*.

É importante ressaltar que todas as medições de umidade do solo, tanto das amostras com estrutura preservadas ou não, foram realizadas em temperatura ambiente.



#### 4 Resultados e Discussões

Primeiramente, os comportamentos elétricos dos elementos sensores cerâmicos, sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, diante das amostras de solo com estrutura indeformada (preservada), nas freqüências de 100 Hz, 1 e 10 kHz, foram analisados (Figuras 4.1, 4.2 e 4.3).

Na Figura 4.1, observa-se uma tendência ao comportamento linear das curvas de capacitância até o conteúdo de água de, aproximadamente, 50 %, em todas as freqüências utilizadas, para o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1000 °C. Verificou-se, também, que os valores da variação de capacitância diminuíram com o aumento da freqüência, conforme mostrado na Figura 4.1.

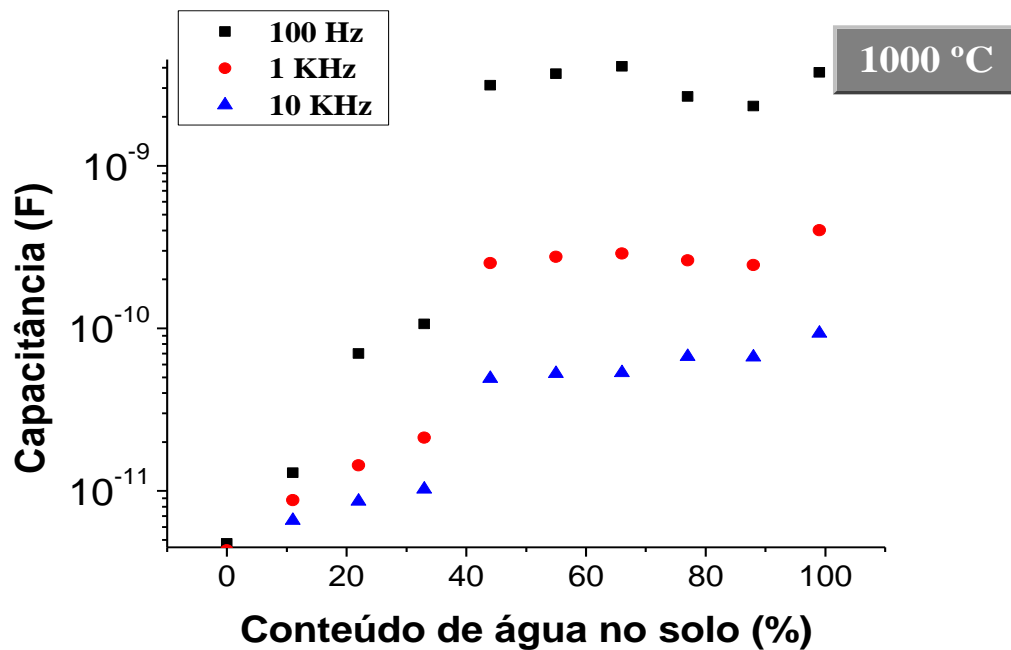


Figura 4.1 – Curvas de capacitância *versus* conteúdo de água na amostra indeformada de solo para o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1000 °C, nas freqüências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.



Na Figura 4.2, o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1100 °C apresentou um comportamento semelhante ao do elemento sensor sinterizado na temperatura de 1000 °C, nas freqüências analisadas, conforme mostrado na Figura 4.1. No entanto, os resultados do elemento sensor sinterizado em 1100 °C apresentaram maior estabilidade ao longo do conteúdo de água na amostra de solo, em questão.

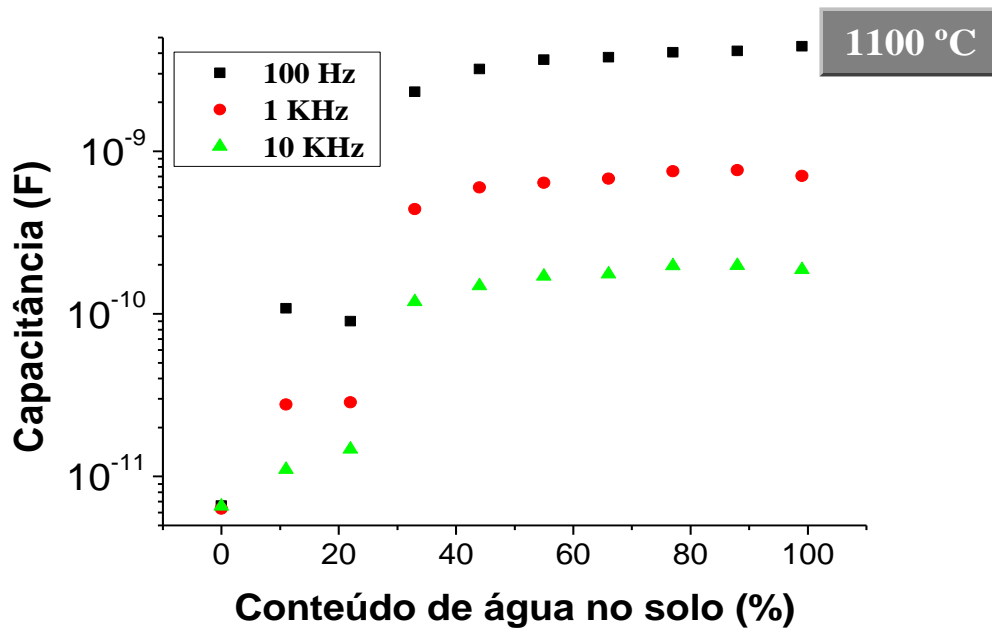


Figura 4.2 – Curvas de capacitância *versus* conteúdo de água na amostra indeformada de solo para o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1100 °C, nas freqüências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.

Agora, o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1200 °C, conforme mostrado na Figura 4.3, apresentou maior linearidade quando comparado com os elementos sinterizados na temperaturas de 1000 e 1100 °C, em todas as freqüências, até a saturação da amostra indeformada de solo.

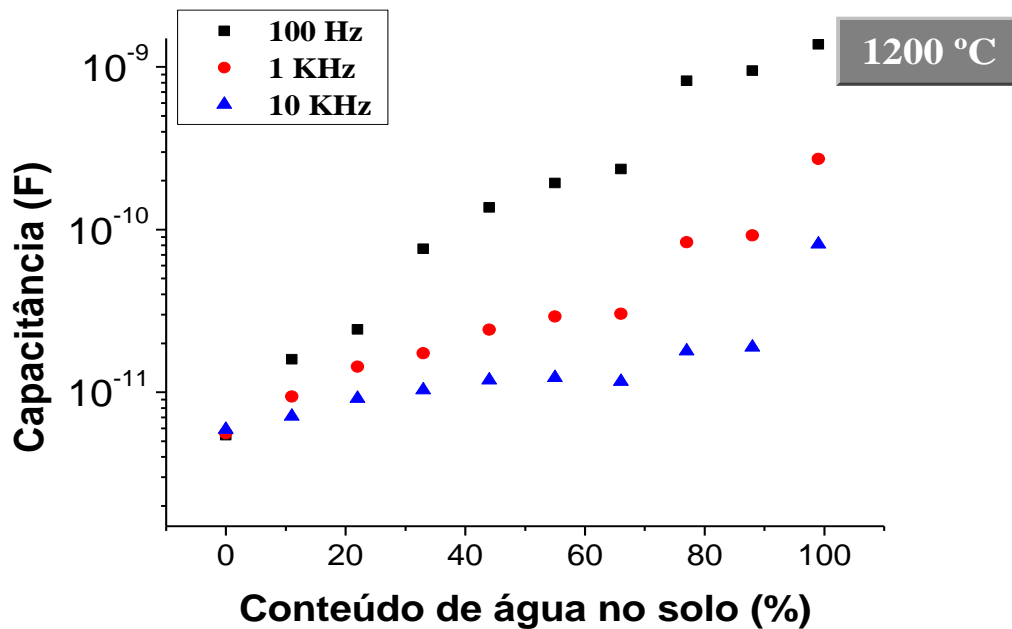
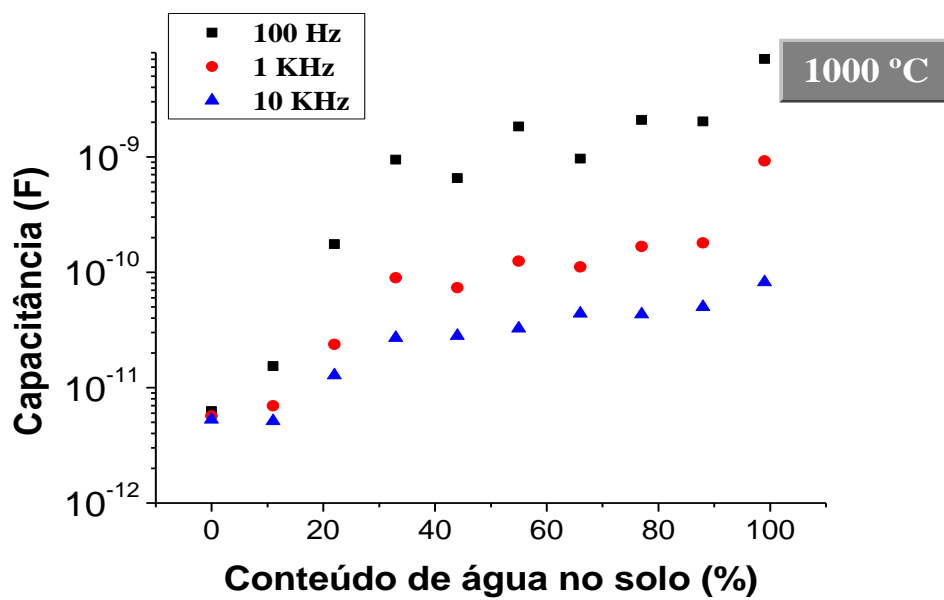


Figura 4.3 – Curvas de capacitância *versus* conteúdo de água na amostra indeformada de solo para o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1200 °C, nas freqüências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.

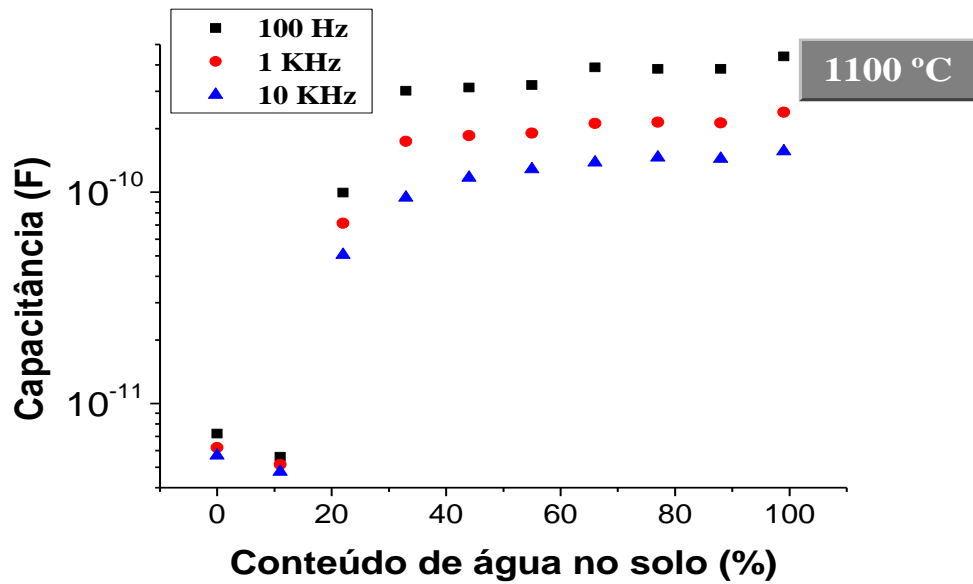
Finalmente, os comportamentos elétricos dos elementos sensores cerâmicos, sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, diante das amostras de solo com estrutura deformada, nas freqüências de 100 Hz, 1 e 10 kHz, foram analisados, conforme Figura 4.4, juntamente com os resultados apresentados por um sensor comercial, conforme visualizados na Figura 4.5. Vale ressaltar que o sensor comercial foi utilizado, somente, nas medições realizadas com a amostra de solo deformada, devido a sua maior dimensão modificar a integridade das amostras indeformadas (preservadas), o que geraria resultados duvidosos.

Na Figura 4.4, observa-se uma tendência ao comportamento linear das curvas de capacitância em função do conteúdo de água nas amostras deformadas de solo,

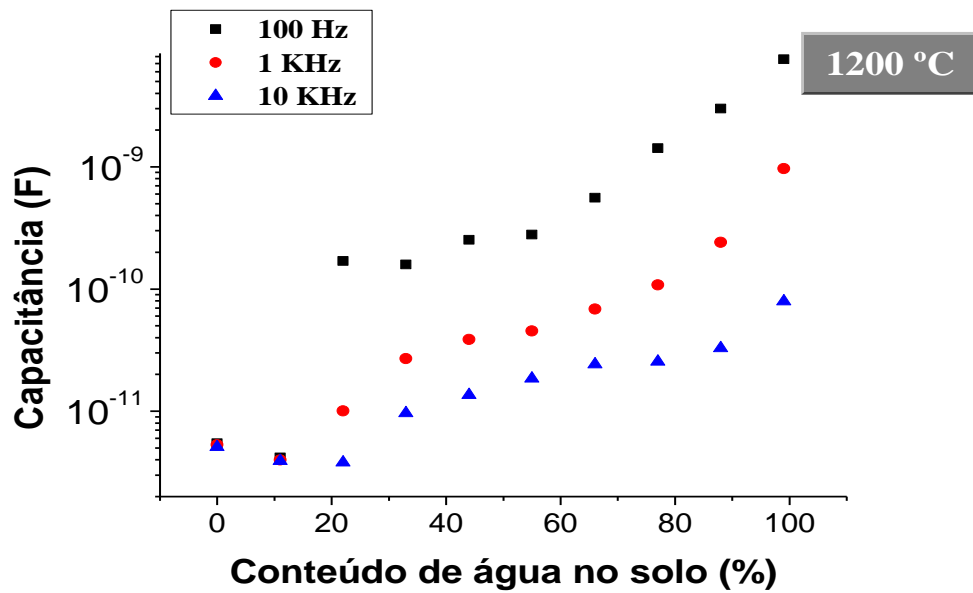
nas frequências utilizadas, para todos os elementos sensores cerâmicos estudados. No entanto, conforme verificado nos resultados obtidos para as amostras indeformadas de solo, o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1200 °C obteve melhores resultados quanto a sua linearidade (Figura 4.4c). Os valores da variação de capacitância diminuíram com o aumento da frequência, conforme mostrado nas Figuras 4.4a, 4.4b e 4.4c. Os resultados, obtidos pelo sensor comercial, apresentaram um comportamento linear (Figura 4.5). No entanto, em 20 % do conteúdo de água na amostra deformada de solo houve uma incoerência, quando comparado com a literatura consultada.



a)



b)



c)

Figura 4.4 – Curvas de capacitância versus conteúdo de água na amostra deformada de solo para os elementos sensores sinterizados nas temperaturas de a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C, nas freqüências de 100 Hz, 1 e 10 kHz.

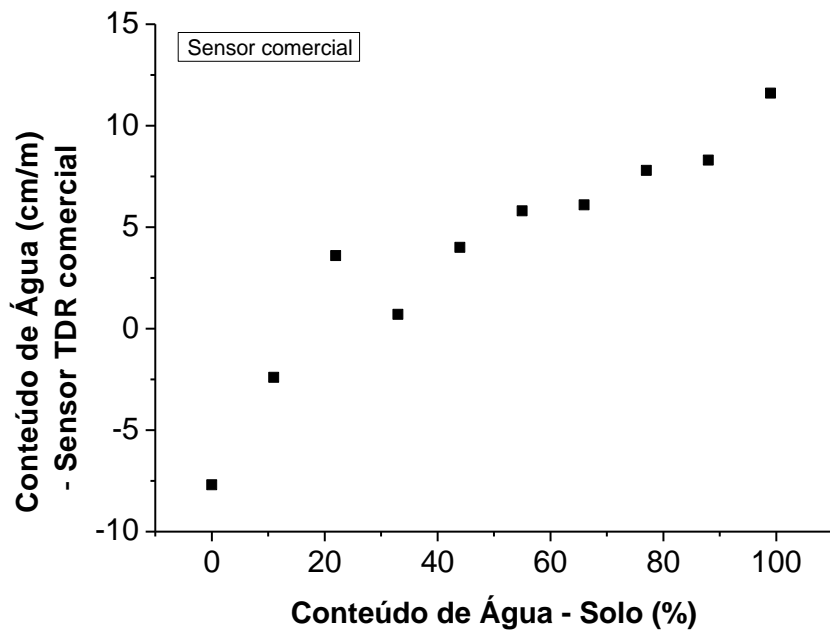


Figura 4.5 – Curvas obtidas pelo sensor comercial.

## 5 Conclusões

Os resultados obtidos mostraram que os elementos sensores cerâmicos porosos de  $ZrO_2-TiO_2$ , sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, apresentaram potencial para serem utilizados no monitoramento dos níveis de água nas amostras indeformadas e deformadas de solo, nas frequências de 100 Hz, 1 kHz e 10 kHz, em temperatura ambiente. No entanto, o destaque foi para o elemento sensor cerâmico sinterizado na temperatura de 1200 °C, devido a sua maior linearidade.



## 6 Referência Bibliográfica

- [1] AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à estabilização de encostas: Uma proposta metodológica. In: CONFERÊNCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS, nº1, 1992, Rio de Janeiro, RJ. **Anais...** Rio de Janeiro, RJ: ABMS/ABGE/PCRJ, v.2, 1992. p. 721-733.
- [2] CARVALHO, C.S.; MACEDO, E.S.; OGURA, A.T. (organizadores). **Mapeamento de riscos em encostas e margens de rios**. 1. Ed. Brasília: Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT, 2007. 176p. ISBN 978-85-60133-81-9.
- [3] BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. 1ª ed. Florianópolis: Ed. UFSC, 2003.
- [4] Secretaria Nacional da Defesa Civil. Deslizamento. Brasília. Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br/desastres/recomendacoes/deslizamento.asp>. Acesso em 15/05/2012.
- [5] YAMAZOE, N.; SHIMIZU, Y. Humidity sensors: Principles and applications. **Sensors and actuators**. V.10. p.379-398. 1986.
- [6] OLIVEIRA, R.M. **Desenvolvimento de elementos sensores de cerâmica porosa de  $ZrO_2 - TiO_2$  para aplicação no monitoramento do conteúdo de água em solos**. Tese de doutorado, INPE – São José dos Campos, 2010.
- [7] TRAVERSA, E. Ceramic sensors for humidity detection: The state-of-the-art and future developments. **Sensors and actuators B**, v.23, p.135-156, 1995.
- [8] CALISTER, Jr. W.D. **Ciência e engenharia dos materiais: uma introdução**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC), 2002. 589p. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. (Materials Science and Engineering: Na introduction. Copyright© 2000, John Wiley & Sons, Inc.)
- [9] BARSOUM, M.W. **Fundamentals of ceramic**. New York: Ed. Taylor and Francis, 2003. 603p.
- [10] RESENDE, M. et.al. **Pedologia: Bases para distinção de ambientes**. 5ª ed. Lavras: Editora UFLA, 2007. 322p.



- [11] TAVARES,S.R.L. et al. **Curso de recuperação de áreas degradadas:**Uma visão da ciência do solo no contexto do diagnóstico, manejo, indicadores de monitoramento e estratégias de recuperação.Rio de Janeiro:Embrapa Solos,2008.228p.
- [12] Site: [http://aguaesseliquidoprecioso.blogspot.com.br/2010/09/texto-2\\_30.html](http://aguaesseliquidoprecioso.blogspot.com.br/2010/09/texto-2_30.html)  
Acesso em:15/05/2012.
- [13] VELISIND,P.A.; MORGAN,S.M. **Introdução à engenharia ambiental.** 2ªed.São Paulo:Editora Cengage Learning. Tradução *All tasks (Introduction to environmental engineering)*.
- [14] SANTOS,F.R.**Vulnerabilidade ambiental:**Desastres naturais ou fenômenos induzidos? Brasília:Ministério do Meio Ambiente,2007.192p.
- [15] AUGUSTO FILHO,O.Caracterização geológico-geotécnica voltada a estabilização de encostas: Uma proposta metodológica.In: CONFERENCIA BRASILEIRA SOBRE ESTABILIDADE DE ENCOSTAS,nº1,1992, Rio de Janeiro,RJ.**Anais...**Rio de Janeiro,RJ:ABMS/ABGE/PCRJ,v.2,1992.p.721-733.