



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO  
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



## **DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE SENSORES DE UMIDADE DE SOLO DE CERÂMICAS POROSAS DE $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$ DOPADOS COM NIÓBIA**

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

Vanessa Fernandez Banhara (UNIVAP, Bolsista PIBITI/CNPq)  
E-mail: [vanessabanhara@yahoo.com.br](mailto:vanessabanhara@yahoo.com.br)

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

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

Agosto/2011 – Julho/2012

## **Agradecimentos**

Primeiramente agradeço a Deus, e aos meus pais José Rogério Banhara e Sarita Trilla Banhara por terem me dado esta oportunidade única de estar estudando e sem os quais não estaria aqui hoje.

Agradeço a Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono e ao Dr. Rodrigo de Matos Oliveira por toda confiança, atenção e suporte para que eu pudesse ter a exclusiva oportunidade de realizar o projeto.

Agradeço aos meus amigos e colegas de laboratório, por toda experiência e ajuda transmitida, além do companheirismo, que foi essencial para a preparação de todo projeto.

Agradeço também ao CNPq e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade de realizar Iniciação Científica, na qual eu aprendi muito e adquiri experiências.



## Resumo

A instrumentação de precisão está em amplo crescimento, devido à necessidade de monitoramento ambiental confiável do território brasileiro. O Brasil é vulnerável às mudanças climáticas atuais e, mais ainda, às que se projetam para o futuro, especialmente quanto aos extremos climáticos. Nesse sentido, a proposta deste trabalho foi aperfeiçoar o desempenho de elementos sensores cerâmicos de umidade de solo, robustos, confeccionados a partir de pós comerciais de  $TiO_2 - ZrO_2$ , com adições de porcentagens controladas de  $Nb_2O_5$ , para, no futuro próximo, serem aplicados no monitoramento de deslizamento de encostas. Essas catástrofes têm ocorrido em várias regiões do Brasil, principalmente nas duas últimas décadas, em períodos chuvosos. As cerâmicas, ao longo dos últimos 20 anos, vêm sendo estudadas por Pesquisadores do Grupo de Tecnologias Ambientais - TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais - LAS, do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE, devido a sua estrutura única, consistindo de grãos, contornos de grãos, superfícies e poros que as fazem adequadas para serem utilizadas como elementos sensores de umidade. As caracterizações elétricas dos elementos sensores cerâmicos foram realizadas em amostras de solo, pré-selecionadas, na qual se utilizou uma ponte de RLC, em diferentes frequências. As amostras de solo foram coletadas no Km 30 da Rodovia Floriano Rodrigues Pinheiro (SP-123), localizada na região serrana do Estado de São Paulo, próximo ao município de Santo Antônio do Pinhal, em uma situação real de escorregamento de encosta. Os resultados obtidos foram satisfatórios, o que mostrou a potencialidade dos elementos sensores cerâmicos desenvolvidos pelo Grupo TECAMB.

Palavras chave: Materiais cerâmicos; Sensores de umidade do solo; Deslizamentos de encostas.



## Abstract

The precision instrumentation is vast growth due to the need for reliable environmental monitoring of the Brazilian territory. Brazil is vulnerable to current climate change and, moreover, to that project into the future, especially with regard to climatic extremes. Therefore, the purpose of this study was to improve the performance of ceramic sensor elements of soil moisture, robust, made from commercial powders of  $\text{TiO}_2$  -  $\text{ZrO}_2$ , with controlled additions of  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  percentages for the foreseeable future, be applied in monitoring of landslides. These disasters have occurred in several regions of Brazil, especially in the last two decades, during rainy periods. The ceramics, over the past 20 years, have been studied by researchers of the Environmental Technologies Group - TECAMB, part of the Associated Laboratory of Sensors and Materials - LAS, the National Institute for Space Research - INPE, due to its unique structure, consisting of grain, grain boundaries, surfaces, and pores that are suitable for use as sensing elements of moisture. The electrical characterization of ceramic sensor elements were performed on soil samples, pre-selected, which was used in a RLC bridge at different frequencies. Soil samples were collected at 30 km of Highway Floriano Rodrigues Pinheiro (SP-123), located in the mountainous region of São Paulo, near the city of Santo Antonio do Pinhal, in a real slip slope. The results were satisfactory, which showed the potential of ceramic sensor elements developed by the Group TECAMB.

Keywords: Ceramics; Soil moisture sensors; Landslides.



## LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 Aproximação de moléculas de água na superfície cerâmica.. .....	6
Figura 2.2 Superfície cerâmica ligada quimicamente a hidroxilas provenientes dissociação das moléculas de água.....	6
Figura 2.3 Moléculas de água formando a camada fisiossorvida.....	6
Figura 3.1 Sensor de umidade de solo.....	14
Figura 3.2 Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico.....	15
Figura 3.3 Localização da área de coleta da amostra de solo .....	16
Figura 3.4 Local de coleta das amostras de solo. ....	17
Figura 3.5 Esquema da realização das medições de umidade do solo.....	19



## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivos gerais.....	2
1.2 Objetivos específicos .....	2
<b>2 Fundamentação Teórica .....</b>	<b>3</b>
2.1 Propriedades dos materiais cerâmicos .....	3
2.2 Mecanismos de adsorção de água e condutividade elétrica nas cerâmicas sensoras de umidade .....	4
2.3 Solo .....	7
2.4 Deslizamentos de encostas .....	7
2.5 Movimentos de massa .....	10
2.5 Ocorrência de água no solo.....	11
<b>3 Materiais e Métodos .....</b>	<b>13</b>
3.1 Processo de fabricação do sensor .....	13
3.2 Amostras de solos.....	15
3.2.1 Características da amostra de solo .....	16
3.3 Medições realizadas com os elementos sensores cerâmicos.....	17
<b>4 Resultados e Discussões.....</b>	<b>21</b>
<b>5 Conclusões.....</b>	<b>25</b>
<b>6 Referência Bibliográfica .....</b>	<b>27</b>



## 1 INTRODUÇÃO

O Brasil possui muitas regiões que são suscetíveis ao deslizamento de encostas; 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 [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 são episódios de extrema importância, resultantes da atuação de processos geomorfológicos nas mais diversas escalas temporais causando, em geral, enormes prejuízos à sociedade. Dentre os diversos fatores condicionantes destacam-se os parâmetros morfológicos do terreno, os quais controlam diretamente o equilíbrio das forças e, indiretamente, a dinâmica hidrológica dos solos. Embora muitos estudos tenham voltado à atenção para a descrição de eventos e para o monitoramento de campo, pouco ainda se sabe sobre a previsão de ocorrência destes fenômenos [3].

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 [1].

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 freqüentes [1].

### **1.1 Objetivos gerais**

A principal meta foi analisar as influências das características físicas da amostra de solo na capacidade de absorção/adsorção de água em medições em laboratório.

### **1.2 Objetivos específicos**

- Caracterizar cerâmicas com porosidade controlada, confeccionadas a partir de pós iniciais de titânia ( $\text{TiO}_2$ ), zircônia ( $\text{ZrO}_2$ ) e nióbia ( $\text{Nb}_2\text{O}_5$ );
- Caracterizar estas cerâmicas porosas através de medições de sua condutividade elétrica, quando imersas em uma amostra de solo deformada, com diferentes quantidades de umidade;
- Relacionar os valores de condutividade elétrica com a porosidade, a composição das cerâmicas e da amostra de solo testada.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Propriedades dos materiais cerâmicos**

Historicamente, os materiais cerâmicos precedem os metálicos. Os materiais metálicos são melhores condutores térmicos e elétricos do que os cerâmicos, um fato que se deve à liberdade dos átomos de valência dos metais. Ao contrário, os materiais cerâmicos têm propriedades dielétricas muito superiores às dos metais. Os cerâmicos são muito mais estáveis, nos desempenhos químicos e térmicos, são muito mais resistentes à compressão do que à tração [4].

Materiais cerâmicos são, geralmente, uma combinação de elementos metálicos e não metálicos. Geralmente a ligação predominante é a iônica. São isolantes de calor e eletricidade geralmente. São mais resistentes às altas temperaturas e à ambientes severos. Em relação às propriedades mecânicas, estes são duros, porém frágeis [4].

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 [5].

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 [6].

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 Mecanismos de adsorção de água e condutividade elétrica nas cerâmicas sensoras de umidade**

Nos sensores cerâmicos para os quais o mecanismo de transporte de cargas elétricas é de natureza iônica, inicialmente, as baixas umidades, as moléculas de água são adsorvidas quimicamente na superfície, devido à alta densidade de cargas e aos altos campos elétricos locais dos sítios catiônicos ou aniônicos. Após a formação desta primeira camada ligada quimicamente, à medida que a umidade aumenta, as moléculas de água passam a ser adsorvidas fisicamente para a formação das sucessivas camadas. Nas vizinhanças da camada adsorvida quimicamente, ocorre a dissociação das novas moléculas de água que se aproximam, pois trata-se de uma região de alta densidade de troca de elétrons e de campo eletrostático, produzindo hidrônio e íons hidroxila [8].

A condutividade dos elementos sensores cerâmicos pode ser de dois tipos: eletrônica ou iônica. A natureza do transporte elétrico é determinada pela espessura da camada adsorvida de água nos poros onde inicialmente, em baixas umidades, ocorre o transporte elétrico através do salto de prótons entre as hidroxilas da camada quimiossorvida, é um sistema de condução onde é necessária elevada energia de ativação para que a ligação covalente entre o hidrogênio e o oxigênio seja quebrada para que desse modo o H<sup>+</sup> seja despreendido. Com o aumento da umidade ocorre, o transporte eletrolítico de acordo com a reação química denominada *Grotthus Chain* onde os prótons saltam entre moléculas de água da camada fisissorvida, é um processo onde a energia necessária para que haja condução elétrica é menor já que esse mecanismo de transporte é energeticamente favorável em água líquida. Uma vez formada a camada fisissorvida esta não mais será afetada pelo aumento da

umidade. No caso da anatase, que é a fase da titânia utilizada neste trabalho, é estimada que a temperatura na qual dessorção da camada quimiossorvida ocorre situa-se em torno de 200 °C. Por volta de uma umidade relativa em torno de 20 % a primeira camada fisissorvida completa-se e muitas outras podem ser formadas de acordo com o aumento da umidade. Quando os poros se tornam saturados com vapor de água começa a ocorrer a condensação por capilaridade. A uma temperatura de 23 °C começa a ocorrer a condensação nos mesoporos com tamanhos de 20 Å quando a umidade relativa situa-se por volta de 15 %, essa condensação continua até atingir poros de diâmetros de 1000 Å sob uma atmosfera saturada [9].

A Fig. 2.1 mostra o processo de adsorção da molécula de água na superfície cerâmica, vale ressaltar que não existe compartilhamento de elétrons entre o metal e o oxigênio da cerâmica já que se trata de ligação iônica. Com a aproximação de uma molécula de água na superfície cerâmica, observa-se a diferença de densidade de carga dos átomos constituintes da superfície bem como o início da dissociação das moléculas de água onde ocorre a formação da camada quimiossorvida, camada esta formada apenas por hidroxilas ( Fig. 2.2).

Como mostra a Fig. 2.3, as duas primeiras camadas fisissorvidas não possuem mobilidade, isso ocorre devido às pontes duplas de hidrogênio, após estas, e até a condensação nos poros existem apenas pontes de hidrogênio simples.

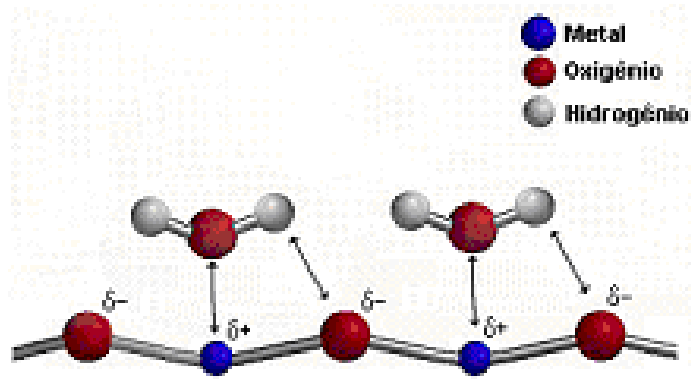


Figura 2.1. Aproximação de moléculas de água na superfície cerâmica. Fonte: [10].

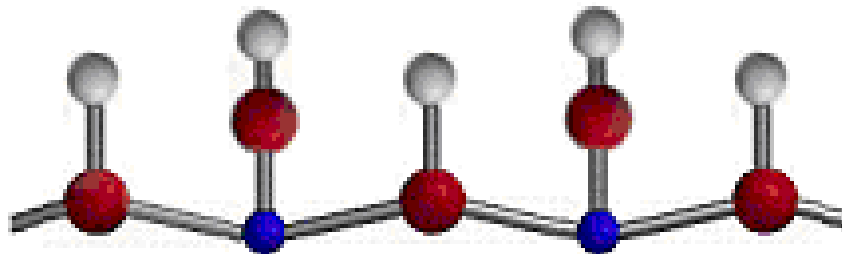


Figura 2.2. Superfície cerâmica ligada quimicamente a hidroxilas provenientes da dissociação das moléculas de água. Fonte: [10].

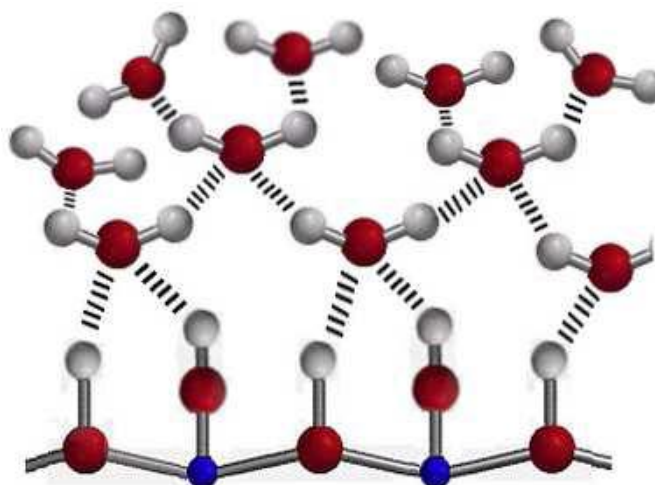


Figura 2.3. Moléculas de água formando a camada fisissorvida. Fonte: [10].



### **2.3 Solo**

De um modo geral, o solo pode ser conceituado como um manto superficial formado por rocha desagregada e, eventualmente, cinzas vulcânicas, em mistura com matéria orgânica em decomposição, contendo, ainda, água e ar em proporções variáveis e organismos vivos [11].

A proporção de cada um dos componentes pode variar de um solo para outro. Mesmo em um solo de determinado local, as proporções de água e ar variam sazonalmente, com os períodos de maior ou menor precipitação. Em termos médios de grandeza, os componentes podem ser encontrados na seguinte proporção: 45% de elementos minerais; 25 % de ar; 25 % de água; e 5 % de matéria orgânica [12].

### **2.4 Deslizamentos de encostas**

A princípio os deslizamentos de terra e de encostas fazem parte, assim como outros tipos de movimento de massa, da dinâmica de transformação e formação natural da crosta terrestre e se relacionam a fenômenos naturais como a variação climática e a gravidade, porém em lugares onde há a ocupação humana esses movimentos tendem a ter conseqüências muito graves. Em situações de deslizamento não há como conter o movimento de terra iniciado e tudo o que estiver pela frente pode ser soterrado ou mesmo levado pela encosta. No entanto, mesmo se tratando de fenômenos naturais, os movimentos de massa e os deslizamentos de encostas são na maioria das vezes desencadeados pela natureza e agravados pela ação humana, que acaba sendo decisiva para a ocorrência ou ainda para o agravamento desses movimentos [13].

Associado a ação do homem com a ocupação desgovernada, a construção de estradas e a degradação da vegetação nativa, está o clima tropical brasileiro, onde são comuns períodos muito chuvosos tanto no inverno quanto no verão. Esse é

um fator decisivo que faz com que o solo fique encharcado, criando a situação propícia para os deslocamentos de massa com o conseqüente deslizamento de encostas. Quanto mais íngremes e sem vegetação forem às encostas, maiores os riscos de deslizamento [14].

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 [13].

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</p> <p>CIRCULARES — solos espessos homogêneos e rochas muito fraturadas</p> <p>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</p> <p>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>

## 2.5 Movimentos de massa

Assim como todos os materiais da Terra, o material desagregado das rochas e o regolito (ou manto de alteração) formado pela ação do intemperismo sofrem a ação contínua da gravidade. Enquanto a rocha sã é normalmente resistente a ação desta força constante, o regolito é passível de ser movimentado de forma relativamente fácil pela gravidade. Aos movimentos de rocha desagregada e regolito por ação da gravidade dá-se o nome de Movimentos de Massa. Esse é o principal processo de retirada do material liberado pelo intemperismo para sua posterior incorporação pelos agentes transportadores.

A ação contínua da gravidade sobre o regolito, faz com que as encostas estejam em constante evolução. O material liberado no topo das colinas e ao longo de toda encosta são constantemente retirados de sua posição original e levados para posições topográficas mais baixas. O processo pode ser muito lento e imperceptível, a menos que haja marcadores do movimento, ou pode ser rápido e catastrófico.

A inclinação da encosta é um fator de estabilidade muito importante. Isso porque com o aumento da inclinação da encosta aumenta o efeito da força de gravidade em relação à força de atrito. Desta forma, quanto maior a encosta maior a tendência de movimento dos materiais sobre ela. A estabilidade dos materiais em encostas com diferentes inclinações é definido pelos fatores anteriormente mencionados. Qualquer fator que altere a inclinação das encostas pode, portanto, alterar a estabilidade das mesmas. A presença de vegetação é um fator adicional que define a condição de estabilidade das encostas. As raízes das árvores aumentam a coesão do solo, aumentando o seu ângulo de repouso. A perda dessa cobertura vegetal, por sua vez, modifica as condições de estabilidade da encosta. O resultado final é normalmente um acentuamento da erosão das encostas e o aumento do potencial para movimentos rápidos na mesma. [16]

## 2.6 Ocorrência de água no solo

Das três fases do solo, sólida, líquida e gasosa, as duas últimas são complementares, isto é, a máxima presença de uma implica na ausência da outra. Sempre a porção do espaço poroso não ocupada pela fase líquida será complementada pela fase gasosa. Portanto, a fase líquida pode estar presente nos poros do solo completa ou parcialmente. No primeiro caso, o solo é dito saturado e, no segundo, não saturado. De modo geral, os solos se encontram não saturados de água, mas mesmo assim armazenam considerável quantidade de água, parte da qual deve ser utilizada pelas plantas. Os processos dinâmicos da água em solos não saturados fazem parte de assuntos científicos terrestres do ciclo hidrológico e de problemas relacionados com irrigação, ecologia de plantas, e com a biologia da fauna e flora do solo. Processos específicos de grande interesse e importância incluem infiltração, redistribuição e evaporação da água pelos solos. [17]

Segundo Lepsch (1976), os microporos funcionam como tubos capilares e, por esta razão, a água é referida como água capilar. Ela está retida no solo com tal força que consegue manter-se no solo mesmo contra a ação da gravidade. Nem todos os solos têm a mesma capacidade de reter água, variando em função de diversas características tais como: textura, estrutura e conteúdo de matéria orgânica. Solos arenosos e com pouco húmus têm menor capacidade de reter água do que solos argilosos ricos em húmus [10].



### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados na caracterização das cerâmicas porosas de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  sem e com adições de porcentagens controladas de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , através de medições de sua condutividade elétrica, quando imersas na amostra de solo, selecionada com diferentes quantidades de umidade são mostradas a seguir.

- Pastilhas cerâmicas de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  dopadas com 1, 5, 10, 15, 20 % de nióbia e
- Microcomputador ligado a uma ponte RLC da marca PHILIPS – PM 6304.

#### 3.1 Processo de fabricação do sensor

No caso das pastilhas do estudo complementar, realizados anteriormente, os elementos cerâmicos de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  foram sintetizados a partir da mistura de 50% em massa de  $\text{TiO}_2$  e 50% em massa de  $\text{ZrO}_2$ . Os pós foram misturados, em suspensão alcoólica, em moinho centrífugo. Após a mistura ser seca em estufa, o material foi prensado, em prensa uniaxial, a pressões de 100 MPa em matriz de aço na forma de pastilhas. As pastilhas foram sinterizadas em temperaturas de 1100 °C por 3 horas. Após essa etapa, na pastilha cerâmica foi, em ambos os lados, depositada uma fina camada de cola prata para que desse modo fossem criadas duas placas condutoras paralelas separadas pela cerâmica que tem a função do dielétrico do capacitor gerado. Em seguida foi soldado com o auxílio de cola de prata, nas faces do capacitor fios de estanho como anteriormente.

Após a etapa anterior o elemento sensor foi isolado por resina polimérica como mostra a Figura 3.1. Esta se apresentou excelente para tal propósito já que possui alta constante de isolamento, além de elevada resistência tanto mecânica quanto ao ataque químico proveniente do meio agressivo onde será aplicada. A resina juntamente com seu catalisador e o sistema “fio-capacitor”

foram então inseridos em um molde metálico onde após 24 horas foram retirados.



Figura 3.1. Sensor de umidade de solo. Fonte: [12].

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].



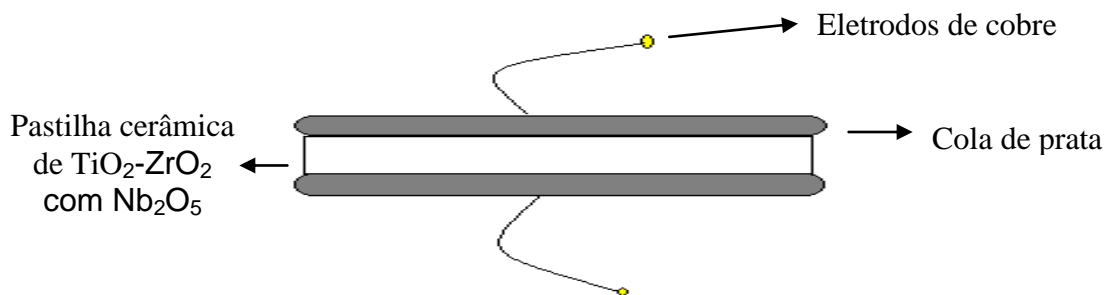


Figura 3.2. Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico. Fonte: adaptada [6].

### 3.2. Amostra de solo

A amostra deformada de solo, proveniente de um deslizamento de terra, foi coletada no Km 30 da rodovia Floriano Rodrigues Pinheiro (SP-123), localizado na região serrana do Estado de São Paulo, microrregião da Serra da Mantiqueira, próximo ao município de Santo Antônio do Pinhal (Figura 3.3).

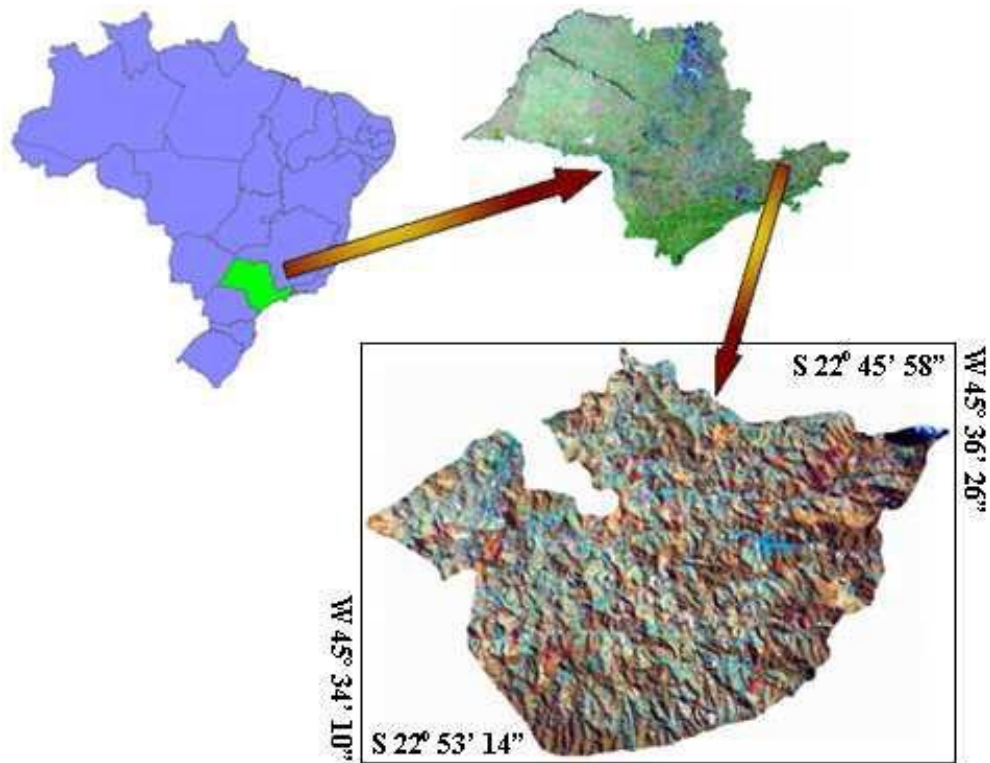


Figura 3.3. Localização da área de coleta da amostra de solo, que corresponde ao município de Santo Antônio do Pinhal, mostrado em relação ao Brasil e ao Estado de São Paulo. Fonte: [1].

De acordo com a Base de Dados Geoambientais do Estado de São Paulo, elaborada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT), a região de coleta das amostras de solos apresenta de alta a muito alta suscetibilidade a processos de escorregamentos [1].

### 3.2.1 Características das amostras de solo

A amostra de solo foi coletada próximo ao município de Santo Antônio do Pinhal, região serrana do Estado de São Paulo (microrregião da Serra da Mantiqueira), como mostra na Figura 3.4 o local da extração da amostra.



Figura 3.4. Local de coleta das amostras de solo, situado na rodovia Floriano Rodrigues Pinheiro (SP-123), km 30, no município de Santo Antônio do Pinhal, SP. Fonte: [1].

### **3.3 Medições realizadas com os elementos sensores cerâmicos**

Para a efetivação das medições de umidade do solo, inicialmente era necessário saber qual a quantidade de água real para que a amostra de solo chegasse ao seu ponto de saturação. Então, foi realizado um estudo prévio para obter o grau de saturação da 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.

Após isto, realizaram-se 10 séries de medições em diferentes faixas de umidade do solo, sendo a primeira realizada em solo seco e as demais com o solo úmido, até atingir então, o ponto de saturação. Cada uma das séries de medições contém 30 medidas de capacitância, com o objetivo de se ter um valor médio de capacitância para cada faixa de umidade e o desvio padrão para cada medição, a fim de que se tivesse 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.

Segue abaixo a Figura 3.5, que demonstra o esquema da realização das medições de umidade do solo.

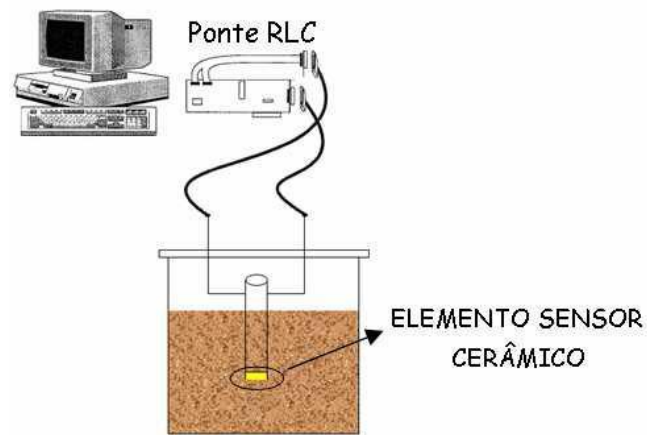


Figura 3.5. Esquema da realização das medições de umidade do solo. Fonte: [1].

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

É importante destacar que todas as medições de umidade do solo foram realizadas em temperatura ambiente (25 °C).

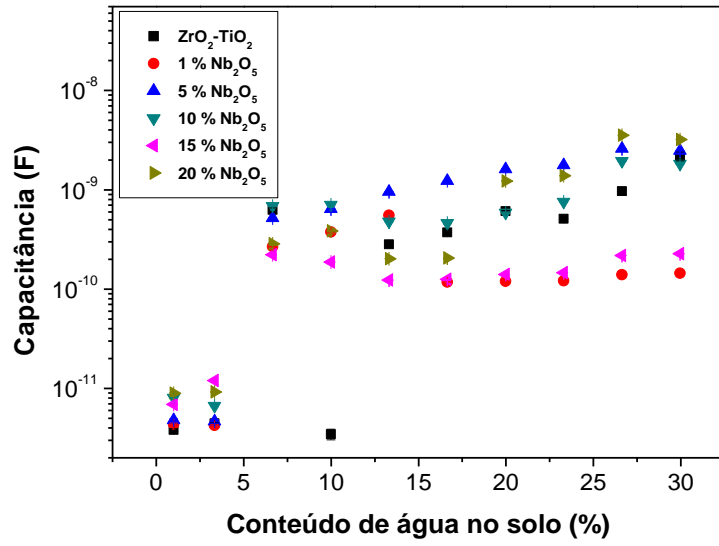


## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

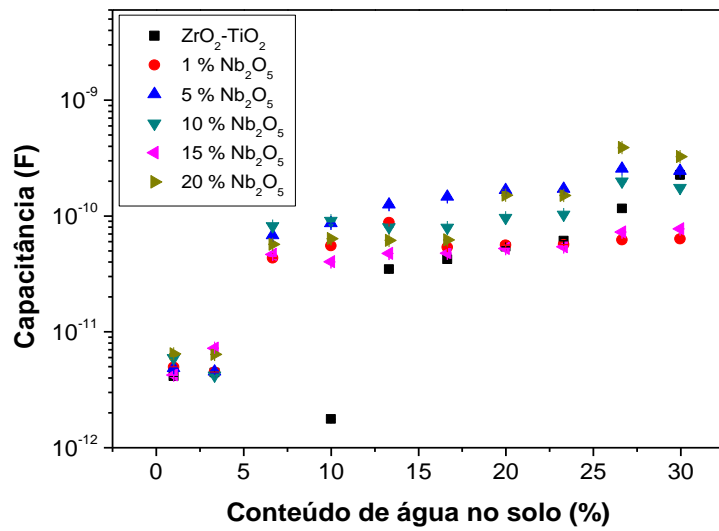
Os comportamentos elétricos dos elementos sensores cerâmicos de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  e com adições de 1, 5, 10, 15 e 20 % de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , sinterizados na temperatura de 1100 °C, em função do conteúdo de água em amostra selecionada de solo, nas frequências de 100 Hz, 1 kHz e 10 kHz, foram analisados (Figura 4.1).

Na Figura 4.1a, observa-se uma tendência ao comportamento linear das curvas de capacitância em função do conteúdo de água no solo para os elementos sensores cerâmicos, em estudo. Até o conteúdo de água no solo de, aproximadamente, 3 %, todos os elementos sensores cerâmicos apresentaram comportamentos semelhantes e, a partir de, aproximadamente, 7 % de água na amostra de solo, os elementos sensores com as adições de 1 e de 15 % de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  apresentaram menor capacidade sensora. Por outro lado, os elementos sensores de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  e com adições de 5, 10 e 20 % de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$  apresentaram uma maior variação de capacitância com o aumento do conteúdo de água na amostra de solo. Com isso, esses elementos sensores cerâmicos apresentaram maior capacidade sensora para o conteúdo de água no solo.

Os valores de capacitância diminuíram com o aumento da frequência, conforme mostrado nas Figuras 4.1b e 4.1c. Entretanto, na Figura 4.1b, a variação das curvas de capacitância foi menor, quando comparado com os valores mostrados na Figura 4.1a, tornando-as mais estáveis. Ao contrário pode se observar na Figura 4.1c, cujos valores iniciais de capacitância apresentaram maior variação, quando comparado com os valores mostrados na Figuras 4.1a e 4.2b, tornando-os menos estáveis e, a partir do conteúdo de água no solo de, aproximadamente, 7 % apresentaram menor capacidade sensora.

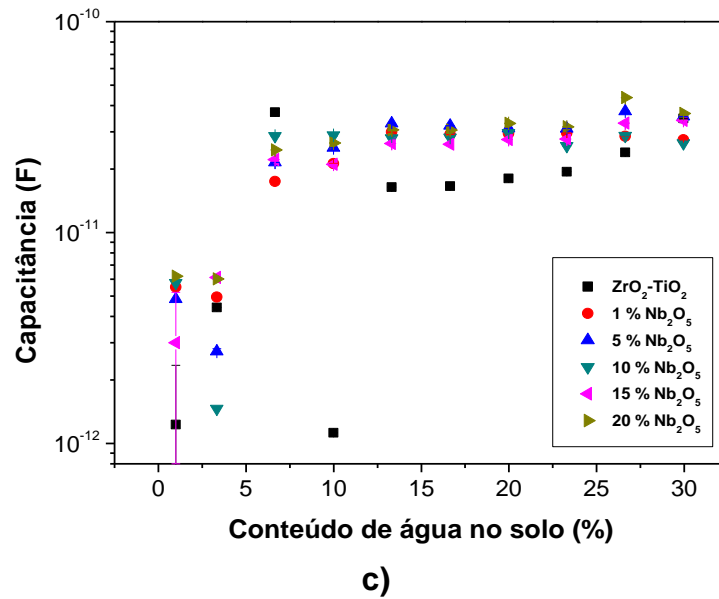


a)



b)





**Figura 4.1.** Curvas de capacitância em função do conteúdo de água em amostra de solo, previamente selecionada, utilizando elementos sensores cerâmicos de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  e com dopagens de 1, 5, 10, 15 e 20 % de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , sinterizados na temperatura de 1100 °C, realizadas nas seguintes frequências **a)** 100 Hz, **b)** 1 kHz e **c)** 10 kHz, na temperatura ambiente de 25 °C.



## 5 CONCLUSÃO

Os elementos sensores de cerâmicas porosas de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  e com adições de porcentagens controladas de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , sinterizados na temperatura de  $1100\text{ }^\circ\text{C}$ , apresentaram potencial para serem utilizados no monitoramento do conteúdo de água em amostras selecionadas de solo. Porém, os resultados não foram conclusivos. No entanto, os resultados mais satisfatórios ocorreram para os elementos sensores de  $\text{TiO}_2\text{-ZrO}_2$  e com 5, 10 e 20 % de  $\text{Nb}_2\text{O}_5$ , nas frequências utilizadas.



## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] 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.
- [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] FERNANDES, F. N. et. al. Condicionantes Geomorfológicos dos Deslizamentos nas Encostas: Avaliação de Metodologias e Aplicação de Modelo de Previsão de Áreas Susceptíveis. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, Volume 2, Nº 1, p. 51, out. 2001.
- [4] VAN VLACK, L. H., **Propriedades dos Materiais Cerâmicos** (1920); tradução, Cid Silveira e Shioyuki Oniki. São Paulo, Edgar Blücher, Ed. Da Universidade de São Paulo, 1973.
- [5] 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.)
- [6] BARSOUM, M. W. **Fundamentals of ceramic.** New York: Ed. Taylor and Francis, 2003. 603p.

- [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] Ciência dos materiais multimídia. Disponível em: <http://www.cienciadosmateriais.org>. Acesso em: 03 de julho de 2012.
- [9] ISIKONAL, SEZENSOYER, SELIMSEKIN. **Adsorption of water and ammonia on TiO<sub>2</sub>-anatase cluster models**, 2006.
- [10] BRITTO, G. P. Desenvolvimento e caracterização de sensores de umidade de solo de cerâmicas porosas de ZrO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> dopados com nióbia. Relatório Final, INPE – São José dos Campos, 2009.
- [11] LEPSCH, I. F. **Solos: Formação e Conservação**. 2. Ed. São Paulo: Edições Melhoramentos, 1976.
- [12] BRAGA, B. et al. Introdução à Engenharia Ambiental: O desafio do desenvolvimento sustentável. São Paulo. 2ªed. Editora Afiliada, 2009. 318p.
- [13] SANTOS, F. R. **Vulnerabilidade ambiental: Desastres Naturais ou Fenômenos Induzidos?** Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2007.192p.
- [14] Desastres Naturais. Disponível em: <http://meioambiente.culturamix.com/desastres-naturais/deslizamentos-de-encostas>. Acesso em: 10 de julho de 2012.
- [15] AUGUSTO FILHO, O. Caracterização geológico-geotécnica voltada à 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.

[16] PORCHER, C. C., Movimentos de massa. Disponível em: [http://www.ufrgs.br/geociencias/cporcher/AtividadesDidaticas\\_arquivos/Geo02001/MovimentosdeMassa.htm](http://www.ufrgs.br/geociencias/cporcher/AtividadesDidaticas_arquivos/Geo02001/MovimentosdeMassa.htm). Acesso em: 10 de julho de 2012.

[17] PREVEDELLO, L. C., Dinâmica da Água no Solo. Disponível em: <http://estudonline.tripod.com/toppage11.htm>. Acesso em: 10 de julho de 2012.