

ESTUDO DO MONITORAMENTO DE UMIDADE DE SOLOS UTILIZANDO SENSORES DE CERÂMICA POROSA

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

Manoela de Oliveira Couto (UNIP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: manoela.oliveira.couto@gmail.com

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 de 2014

Agradecimentos

Primeiramente agradeço a Deus e a minha família.

Aos meus pais que me proporcionaram todo o apoio financeiro e moral, pois sem isso, não teria conquistado nada até hoje.

A Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono e ao Dr. Rodrigo de Matos Oliveira por toda a oportunidade de aprendizado e orientação.

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

RESUMO

A pesquisa e o desenvolvimento de materiais para aplicação como sensores ambientais têm crescido, ao longo das últimas décadas, devido a necessidade de se obter maior confiabilidade no monitoramento de parâmetros ambientais, a fim de avaliar os riscos associados às mudanças climáticas globais, principalmente. Além disso, há uma grande deficiência de elementos sensores produzidos no Brasil, capazes de mensurar o conteúdo de água em solos brasileiros, com tecnologia nacional. Neste sentido, o objetivo desse trabalho é aprimorar os dispositivos sensores cerâmicos, desenvolvidos pelo Grupo de Pesquisas em Micro e Nanotecnologias Espaciais e Ambientais – TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS, do INPE, através de medições elétricas da umidade em amostras de solo, previamente selecionadas, em diferentes condições climáticas. Essa linha de pesquisa é completamente original no sentido de investigar a capacidade das interações de moléculas de água, provenientes do solo, com a microestrutura controlada das cerâmicas sensoras. Os resultados obtidos mostraram boa sensibilidade dos elementos sensores cerâmicos em monitorar as diferentes porções de água adicionadas ao solo, até a sua saturação, em diferentes umidades relativas e temperaturas do ambiente. Com esse estudo, busca-se, futuramente, empregar essas cerâmicas sensoras no monitoramento de áreas com riscos de deslizamentos de terra, nos períodos de chuva.

Palavras-chave: materiais cerâmicos; sensores de umidade do solo; deslizamento de encostas.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1. Ciclo Hidrológico.

Figura 3.1. Procedimento experimental utilizado na confecção do elemento sensor de cerâmica porosa.

Figura 3.2. Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico.

Figura 4.1. Comportamento do dispositivo sensor cerâmico, desenvolvido no TECAMB/LAS, em função de valores crescentes de conteúdo de água em amostra deformada de solo, até a saturação, realizadas na frequência de 100 Hz e nas condições climáticas de umidade relativa de 30, 50, 70 e 90 % e nas temperaturas ambiente de: a) 25 °C e b) 45 °C.

Figura 4.2. Comportamento do dispositivo sensor cerâmico, desenvolvido no TECAMB/LAS, em função de valores crescentes de conteúdo de água em amostra deformada de solo, até a saturação, realizadas na frequência de 1 kHz e nas condições climáticas de umidade relativa de 30, 50, 70 e 90 % e nas temperaturas ambiente de: a) 25 °C e b) 45 °C.

Figura 4.3. Comportamento do dispositivo sensor cerâmico, desenvolvido no TECAMB/LAS, em função de valores crescentes de conteúdo de água em amostra deformada de solo, até a saturação, realizadas na frequência de 10 kHz e nas condições climáticas de umidade relativa de 30, 50, 70 e 90 % e nas temperaturas ambiente de: a) 25 °C e b) 45 °C.

SUMÁRIO

	Págs.
1. Introdução.....	01
1.1 Objetivos.....	02
2. Fundamentação Teórica.....	03
2.1 Materiais cerâmicos.....	03
2.2 Mecanismos de adsorção de água nos elementos.....	03
2.3 Ciclo hidrológico e a presença de água no solo.....	04
2.4 Deslizamento de encostas.....	05
3. Materiais e Métodos.....	07
3.1 Elementos Sensores Cerâmicos.....	07
4. Resultados e Discussões.....	10
5. Conclusão.....	13
6. Referência Bibliográfica.....	14

1. INTRODUÇÃO

O Brasil possui muitos relevos acidentados, com preocupação ao deslizamento de encostas. A população menos favorecida acaba ocupando as encostas, sem qualquer metodologia técnica e retirando a vegetação, o que favorece aos deslizamentos das terras. 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].

Os deslizamentos de encostas, por sua vez, são fenômenos naturais que podem ocorrer em qualquer área com alta declividade, sendo favorecido pela água, gelo ou ar. Os fatores que influenciam a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de encostas são: tipos de solo, relevo, topografia e precipitação [2].

Atualmente, há uma grande deficiência de elementos sensores produzidos no Brasil capazes de mensurar o conteúdo de água nos solos brasileiros baseados na **Regra dos 4S**. Essa regra é usada para qualificar sensores através dos seguintes parâmetros: (i) velocidade de resposta (*Speed*), (ii) estabilidade física e química (*Stability*), (iii) seletividade ao estímulo proposto (*Selectivity*) e (iv) capacidade sensitiva (*Sensibility*).

Ao longo das duas últimas décadas, integrantes do Grupo de Pesquisas em Micro e Nanotecnologias Espaciais e 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 mais confiáveis, versáteis e de baixo custo [3].

Com esse trabalho, portanto, busca se monitorar, prevenir e compreender melhor as áreas com riscos de deslizamentos de encostas e que isso possa auxiliar na adoção de medidas mitigatórias e na prevenção desses danos tão frequentes.

1.1. Objetivos

Investigar a dinâmica da água em uma amostra selecionada de solo, através das influências de suas características, em diferentes condições climáticas. Para isso, sensores cerâmicos capacitivos, confeccionados a partir de matérias-primas nacionais, desenvolvidos pelo grupo de pesquisa Micro e Nanotecnologias Espaciais e Ambientais - TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais - LAS, do INPE, serão utilizados para a detecção do conteúdo de água nessas amostras de solo. Com esse estudo, busca-se, futuramente, empregar esses dispositivos cerâmicos no monitoramento de áreas com riscos de deslizamentos de terra, nos períodos de chuva.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos e não metálicos, os quais são formados por ligações entre elementos metálicos e não metálicos. Estas ligações são interatômicas ou iônicas; são também estáveis nos desempenhos químicos e térmicos [9].

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 [10]

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 [11].

2.2. Mecanismos de adsorção de água nos elementos sensores

A seleção do material apropriado para ser utilizado como elemento sensor de umidade é difícil e deve ser baseada em materiais que apresentam sensibilidade em uma ampla faixa de umidade e temperatura e estabilidade nos ciclos térmicos e de tempo e quanto a exposição em ambientes agressivos e a produtos químicos específicos [5]. Neste sentido, as cerâmicas, em particular os óxidos metálicos, têm mostrado vantagens do ponto de vista de sua resistência mecânica, resistência quanto ao ataque químico e estabilidade física e química em ambientes hostis devido, principalmente, à estabilidade de suas fortes ligações químicas [6].

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 (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 $100\text{ }^\circ\text{C}$. A partir desta temperatura só ocorre adsorção química (até $400\text{ }^\circ\text{C}$) [7].

2.3. Ciclo hidrológico e a presença de água no solo

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, que levam a água de volta para a atmosfera (Figura 2.1).

Precipitação é o termo usado para todas as formas naturais de água 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, conforme pode ser observado na Figura 2.1.



Figura 2.1. Ciclo Hidrológico. Fonte: Adaptado de [7].

2.4. Deslizamento de encostas

A princípio, os deslizamentos de terra e de encostas, também chamado de movimentos de massa, relacionam se a fenômenos naturais como a variação climática e a ação da gravidade.

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.

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).

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: Adaptado de [8].

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

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo do monitoramento do conteúdo de água em uma amostra selecionada de solo, foi utilizado um elemento sensor capacitivo de cerâmica porosa. As caracterizações elétricas, realizadas através do comportamento da variação de medições de capacitância, em função de valores crescentes de água na amostra deformada de solo, até a sua saturação. As medições de capacitância foram realizadas em condições climáticas pré-estabelecidas, com as umidades relativas de 30, 50, 70 e 90 % e com as temperaturas ambiente de 25 e 45 °C, realizadas em uma câmara climática, nas frequências de 100 Hz, 1 kHz e 10 kHz, realizadas em uma ponte RLC.

Os materiais utilizados no estudo do monitoramento de umidade de solos empregando sensores de cerâmica porosa, através de medições de sua condutividade elétrica, são mostrados a seguir.

- Elemento sensor de cerâmica porosa confeccionado a partir do processamento cerâmico tradicional, utilizando pós precursores de ZrO_2 e de TiO_2 , em formato de pastilhas;
- Ponte RLC da marca PHILIPS - FLUKE/PM 6304, responsável pela excitação e aquisição de sinais elétricos;
- Câmara climática da marca WEISS TECHNIK, modelo WKL 100/40 e
- Amostra deformada de solo, coletada próximo ao Laboratório TECAMB do LAS-INPE, em uma área de 1 m². Essa amostra de solo, com estrutura não preservada, foi coletada e acondicionada em béqueres, durante todo o procedimento experimental.

3.1. Elemento sensor cerâmico utilizado no experimento

Ao longo das últimas décadas, foram desenvolvidos pelos integrantes do Grupo de Pesquisa em Micro e Nanotecnologias Espaciais e Ambientais - TECAMB/LAS – INPE, sensores de cerâmica porosa confeccionados a partir de pós precursores de ZrO_2 e de TiO_2 .

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 em diferentes temperaturas, conforme mostrado na Figura 3.1

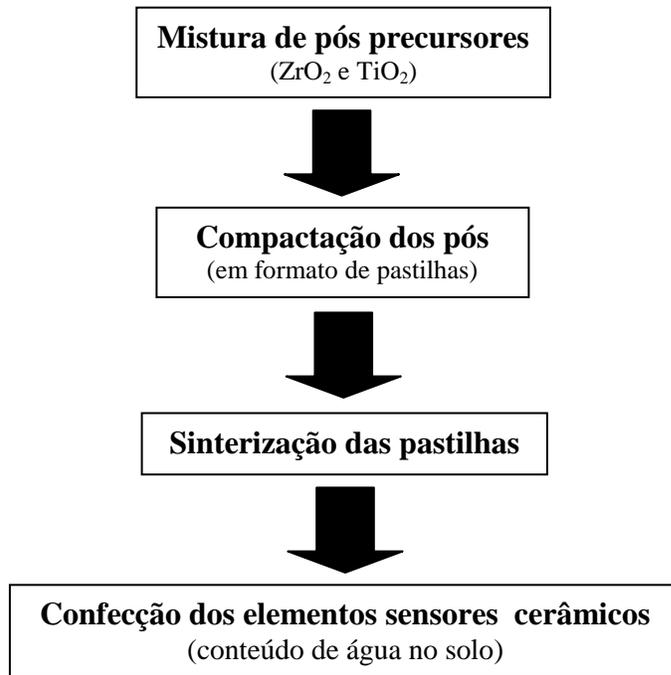


Figura 3.1. Procedimento experimental utilizado na confecção do elemento sensor de cerâmica porosa.

Em seguida, as pastilhas cerâmicas foram metalizadas em formato de *sandwich*, a fim de gerar o efeito capacitivo nas mesmas e, por fim, foram adequadamente encapsuladas, cuja finalidade foi manter a integridade física e química do material e evitar interferências conforme é observada na Figura 3.2.

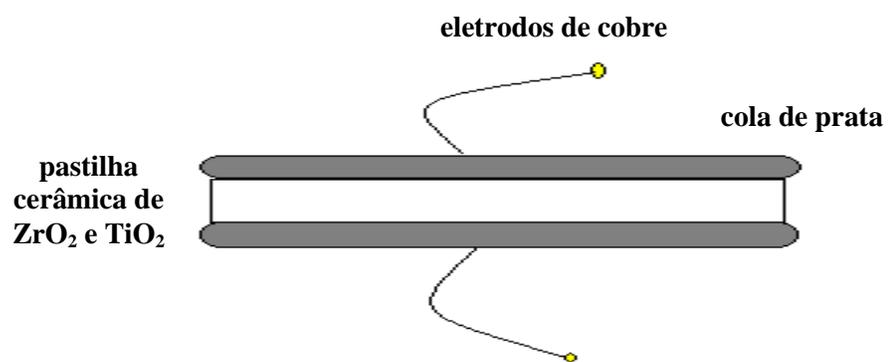


Figura 3.2. Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3, o elemento sensor cerâmico foi caracterizado eletricamente, através do comportamento da variação de medições de capacitância, em função de valores crescentes de conteúdo de água em uma amostra deformada de solo, previamente selecionada, até a saturação. As medições de capacitância foram realizadas em condições climáticas pré-estabelecidas, com as umidades relativas de 30, 50, 70 e 90 % e com as temperaturas ambiente de 25 e 45 °C, nas frequências de 100 Hz (Figura 4.1), 1 kHz (Figura 4.2) e 10 kHz (Figura 4.3).

Na Figura 4.1a, o dispositivo sensor cerâmico apresentou valores semelhantes de capacitância para a condição seca da amostra de solo (0 % de conteúdo de água no solo), na frequência de 100 Hz e na temperatura ambiente de 25 °C, em todas as umidades relativas propostas. No entanto, ao longo das adições de água na mesma amostra de solo, os valores de capacitância obtidos na umidade relativa de 30 % foram superiores aos demais, seguidos, em sua maioria, pelos valores de capacitância obtidos nas umidades relativas de 50, 70 e, por último, 90 %. Em relação a temperatura ambiente de 45 °C, conforme observado na Figura 4.1b, o elemento sensor cerâmico apresentou os mesmos comportamentos obtidos para a temperatura ambiente de 25 °C (Figura 4.1a), ambos realizados na mesma frequência de 100 Hz e nas mesmas umidades relativas de 30, 50, 70 e 90 %.

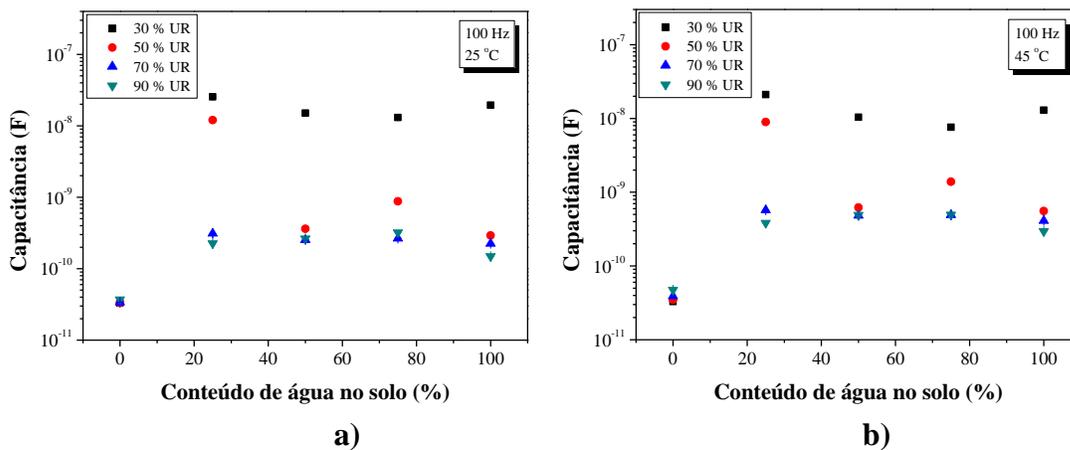


Figura 4.1. Comportamento do dispositivo sensor cerâmico, desenvolvido no TECAMB/LAS, em função de valores crescentes de conteúdo de água em amostra deformada de solo, até a saturação, realizadas na frequência de 100 Hz e nas condições climáticas de umidade relativa de 30, 50, 70 e 90 % e nas temperaturas ambiente de: a) 25 °C e b) 45 °C.

Nas Figuras 4.2a e 4.2b, os comportamentos do elemento sensor cerâmico se mantiveram para as medições de capacitância realizadas na frequência de 1 kHz, nas mesmas condições anteriores (Figura 4.1). Para a condição seca da amostra de solo, os valores de capacitância foram próximos, em todas as umidades relativas e nas temperaturas ambiente de 25 e 45 °C. Ao longo das adições de água no solo, os valores de capacitância realizados na umidade relativa de 30 % se mantiveram superiores, seguidos pelas umidades de 50, 70 e 90 %, em ambas temperaturas ambiente.

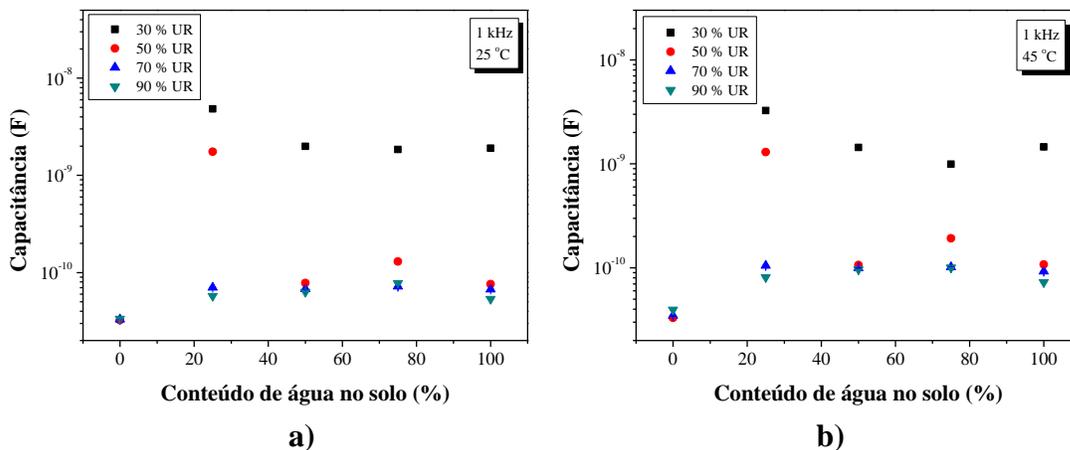


Figura 4.2. Comportamento do dispositivo sensor cerâmico, desenvolvido no TECAMB/LAS, em função de valores crescentes de conteúdo de água em amostra deformada de solo, até a saturação, realizadas na frequência de 1 kHz e nas condições climáticas de umidade relativa de 30, 50, 70 e 90 % e nas temperaturas ambiente de: a) 25 °C e b) 45 °C.

Já nas Figuras 4.3a e 4.3b, os valores de capacitância obtidos na frequência de 10 kHz, realizados na umidade relativa de 30 %, foram maiores na amostra de solo em condição seca e se manteve até a saturação (100 % de conteúdo de água no solo). No entanto,

diferentemente dos comportamentos apresentados até o momento, conforme visualizados nas Figuras 4.1 e 4.2, os valores de capacitância obtidos na umidade relativa de 30 % foram seguidos pelas capacitâncias obtidas em 90 % de umidade relativa para a amostra seca de solo, em ambas temperaturas ambiente, e também em 50 % do conteúdo de água no solo, na temperatura ambiente de 45 °C, as demais medições se mantiveram, seguidas pelas capacitâncias obtidas em 50, 70 e 90 % de umidade relativa.

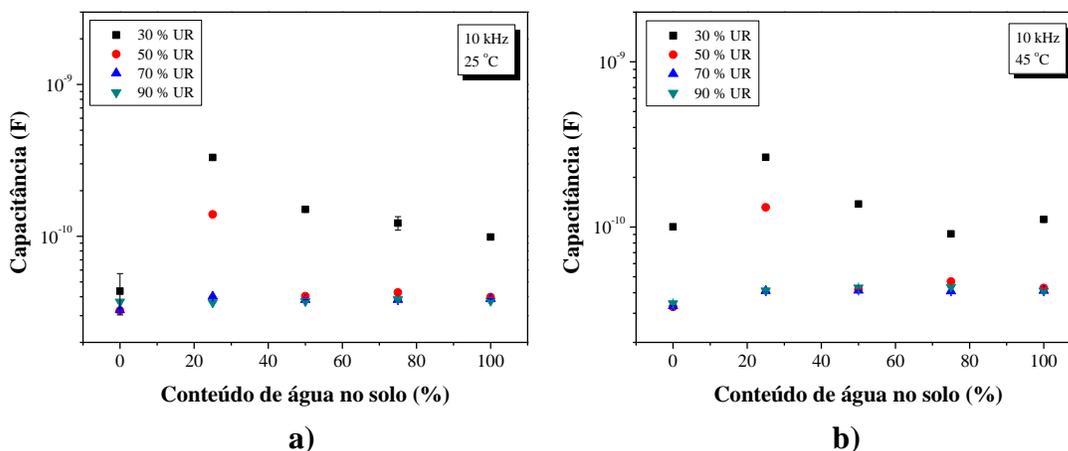


Figura 4.3. Comportamento do dispositivo sensor cerâmico, desenvolvido no TECAMB/LAS, em função de valores crescentes de conteúdo de água em amostra deformada de solo, até a saturação, realizadas na frequência de 10 kHz e nas condições climáticas de umidade relativa de 30, 50, 70 e 90 % e nas temperaturas ambiente de: a) 25 °C e b) 45 °C.

O comportamento dos dispositivos sensores cerâmicos apresentou variações de capacitância maiores para a frequência de 100 kHz, cuja variação entre o maior e o menor valor foi de 12,92 nF, em seguida, as medições realizadas na frequência de 1 kHz apresentou variação de 1,87 nF e, por último, a variação para 10 kHz foi de 0,066 nF.

5. CONCLUSÃO

O dispositivo sensor cerâmico apresentou um comportamento mais linear, ao longo das adições de água na amostra deformada de solo, na frequência de 100 kHz, devido a sua maior variação de capacitância em relação a amostra de solo nas condições seca (0 % de umidade relativa) e saturada (100 % de umidade relativa). O dispositivo cerâmico também apresentou coerência nas variações climáticas pré-estabelecidas ao qual foi submetido. Os comportamentos das curvas de capacitância do sensor cerâmico, para as frequências de 100 Hz e 1 kHz, mantiveram se inalterados em função das umidades relativas e das temperaturas ambiente estabelecidas. Já na frequência de 10 kHz, a medição de capacitância obtida com a amostra seca do solo, em 30 % de umidade relativa, sofreu um aumento considerável na temperatura ambiente de 45 °C, em relação a temperatura de 25 °C.

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] Secretaria Nacional da Defesa Civil. Deslizamento. Brasília. Disponível em: <http://www.defesacivil.gov.br/desastres/recomendacoes/deslizamento.asp>. Acesso em 15/06/2013
- [3] 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.
- [4] SEIYAMA, T.; YAMAZOE, N.; ARAI H. Ceramic humidity sensors. **Sens. Actuators B**, V. 4, p.85-96, 1983
- [5] KULWICKI, B. M. Humidity sensors. **J. Am. Ceram. Soc.**, v. 74, 697-708p., 1991.
- [6] NITTA, T. Development and application of ceramic humidity sensors. In: SEIYAMA, T. (ed.), **Chemical sensor technology**, v.1, Kodansha, Tokyo/Elsevier, Amsterdam, p. 57-78, 1988.
- [7] Site: <http://www.vanialima.blog.br/2012/10/ciclo-da-agua.html>. Visualizado em 15 de junho de 2014.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.).

- [11] 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.