

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

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

Gustavo de Souza Oliveira (UNIVAP, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: gustavo.so@bol.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, Coorientador)
E-mail: rodmatos@las.inpe.br

Julho de 2013

Agradecimentos

Primeiramente a Deus pela vida e pela família.

Aos meus pais por terem me dado esta única oportunidade de estudar e sem a qual eu não estaria aqui hoje.

A Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono e ao Dr. Rodrigo de Matos Oliveira por toda confiança, oportunidade de aprendizado e suporte para que eu pudesse ter realizado este projeto.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, por toda ajuda e experiência transmitida, além do companheirismo, que proporcionou um ambiente agradável de aprendizado e desenvolvimento do projeto.

Ao CNPq e ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/CTE/INPE) pela oportunidade de realizar Iniciação Científica em uma instituição tão importante, na qual eu aprendi e adquiri muita experiência.

Resumo

O Brasil possui muitas regiões que são suscetíveis ao deslizamento de encostas, cujas ocorrências aumentam, principalmente, nos períodos chuvosos. Com o objetivo de auxiliar no monitoramento e na prevenção desses desastres ambientais, ocorridos, com frequência, nos últimos anos, buscou-se o aperfeiçoamento no desenvolvimento de elementos sensores, confeccionados a partir de materiais cerâmicos porosos, para o monitoramento do conteúdo de água em solos, localizados em áreas de risco. Esta aplicação foi baseada nos promissores resultados alcançados para o monitoramento da umidade relativa do ar, utilizando estas cerâmicas avançadas. Neste trabalho, os elementos sensores cerâmicos de ZrO_2 - TiO_2 , comerciais, sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C e compactados na pressão de 100 MPa, foram imersos em amostras de solo, pré-selecionadas, a fim de monitorar a capacidade de infiltração do solo, até a sua saturação, cuja situação se assemelha a um deslizamento de encosta, nas épocas de chuva. Para isso, realizaram-se medições elétricas de capacitância, em função da variação do conteúdo de água na amostra de solo, através de uma ponte RLC, em diferentes frequências. Os resultados obtidos mostraram boa sensibilidade dos elementos sensores cerâmicos em monitorar as diferentes umidades da amostra de solo e verificar a capacidade de infiltração da mesma.

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

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 2.1. Ciclo hidrológico.....	3
Figura 3.2. Procedimento experimental utilizado na confecção dos elementos sensores cerâmicos.....	7
Figura 3.3. Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico.....	8
Figura 4.1. Comportamento dos dispositivos sensores cerâmicos em função do conteúdo de água em amostras deformadas de solo, realizadas a cada 2 horas, nas seguintes frequências: a) 100 Hz; b) 1 kHz e c) 10 kHz.....	10
Figura 4.2. Comportamento dos dispositivos sensores cerâmicos em função do conteúdo de água em amostras deformadas de solo, realizadas a cada 4 horas, nas seguintes frequências: a) 100 Hz; b) 1 kHz e c) 10 kHz.....	12
Figura 4.3. Comportamento dos dispositivos sensores cerâmicos em função do conteúdo de água em amostras deformadas de solo, realizadas a cada 8 horas, nas seguintes frequências: a) 100 Hz; b) 1 kHz e c) 10 kHz.....	14

SUMÁRIO

	Pág.
1 Introdução	1
1.1 Objetivos.....	1
2 Fundamentação Teórica	2
2.1 Materiais cerâmicos.....	2
2.2 Ciclo hidrológico e a presença de água no solo.....	2
2.3 Solo.....	3
2.4 Deslizamentos de encostas.....	4
2.5 Ocorrência de água no solo.....	4
3 Materiais e Métodos	6
3.1 Medições realizadas com os sensores cerâmicos de $ZrO_2 - TiO_2$	6
3.2 Elementos sensores cerâmicos.....	6
4 Resultados e Discussões	8
5 Conclusões	16
6 Referência Bibliográfica	18

1. Introdução

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 sistemas de drenagem, o que acaba sobrecarregando as encostas, aumentando a frequência dos deslizamentos de terra [1]. Além disso, 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 [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 água, gelo ou ar [3]. Os fatores que influenciam a suscetibilidade à ocorrência de deslizamentos de encostas são: tipos de solo, relevo, topografia e precipitação [4].

Com esse trabalho, portanto, busca-se monitorar, prevenir e compreender melhor as áreas com riscos de deslizamentos de encostas, através da utilização de elementos sensores cerâmicos de ZrO_2-TiO_2 na medição (detecção) do conteúdo de água em solos. Essa linha de pesquisa é completamente original no sentido de investigar a capacidade das interações de moléculas de água, provenientes de solos, com a microestrutura controlada das cerâmicas sensoras para tal aplicação [5 - 6].

1.1. Objetivos

O objetivo desse trabalho é investigar as influências das características da amostra de solo, selecionada, na capacidade de absorção/adsorção de água, empregando elementos sensores cerâmicos de umidade, através da detecção do volume e da velocidade de infiltração de

água no solo, em medições de laboratório. Esses sensores cerâmicos, confeccionados a partir de pós precursores de ZrO_2 e de TiO_2 , foram desenvolvidos previamente no Laboratório de Pesquisas em Micro e Nanotecnologias Espaciais e Ambientais – TECAMB, que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS, do INPE. Para isso, medições elétricas de capacitância *versus* adições de água na amostra de solo, até a condição de saturação, conforme ocorrem em áreas com risco de deslizamentos nos períodos de chuva, foram discutidas.

2. Fundamentação Teórica

2.1. Materiais cerâmicos

Os materiais cerâmicos são, geralmente, uma combinação de elementos metálicos e não metálicos, estáveis nos desempenhos químicos e térmicos, e também resistentes à compressão do que à tração [7].

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 [9].

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 [10].

2.2. Ciclo hidrológico e a presença de água no solo

O ciclo hidrológico (Figura 2.1) 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.

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.



Figura 2.1. Ciclo hidrológico. Fonte: [11].

2.3. Solo

Solo é um corpo de material, que recobre a superfície terrestre emersa, entre a litosfera e a atmosfera. Os solos são constituídos de três fases: sólida (minerais e matéria orgânica), líquida (solução do solo) e gasosa (ar).

Contudo, pode ser visto sobre diferentes óticas. Para um engenheiro agrônomo, solo é a camada na qual se pode desenvolver vida (vegetal e animal). Para um engenheiro civil, solo é um corpo passível de ser escavado, sendo utilizado dessa forma como suporte para construções ou material de construção. Para um biólogo, o solo infere sobre a ciclagem biogeoquímica dos nutrientes minerais e determina os diferentes ecossistemas e *habitats* dos seres vivos [12,13].

2.4. Deslizamentos de encostas

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

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, 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; um fator que faz com que o solo fique encharcado, criando a situação propícia para os deslocamentos de massa com o conseqüente deslizamento de encostas. [13,14].

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
Rastejo	-vários planos de deslocamento; -movimentos constantes, sazonais ou intermediários.
Escorregamentos	-poucos planos de deslocamento; -pequenos e grandes volumes de material.
Quedas	-sem planos de deslocamento; -movimento tipo queda livre ou em plano inclinado.
Corridas	-muitas superfícies de deslocamento à massa em movimentação; -movimento semelhante a um líquido viscoso.

2.5. Ocorrência de água no solo

As 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 ocupado 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. [16]

3. MATERIAIS E MÉTODOS

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.

- Elementos sensores de cerâmicas porosas de $ZrO_2 - TiO_2$, sinterizadas nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, por 2 horas;
- Ponte RLC da marca PHILIPS - FLUKE/PM 6304, acoplada a um microcomputador, responsável pela excitação e aquisição de sinais elétricos;
- Amostra de solo coletada próximo ao Laboratório TECAMB do LAS-INPE.

3.1. Medições realizadas com os sensores cerâmicos de $ZrO_2 - TiO_2$

Nesse estudo, medições elétricas de capacitância foram realizadas em função de adições de água na amostra de solo selecionada, até a condição de saturação, em diferentes intervalos de tempo (2, 4 e 8 horas), a fim de prever o volume e a velocidade de infiltração e, com isso, a capacidade dos elementos sensores cerâmicos em detectar tais estímulos em diferentes situações, conforme as situações reais ocorridas em deslizamentos de terra, nos períodos chuvosos. Para isso, séries de medições elétricas, em função do tempo, foram realizadas, em diferentes frequências (100 Hz, 1 e 10 kHz), a partir da amostra de solo com conteúdo de água de aproximadamente 0 % até a saturação da mesma. A amostra de solo foi adequadamente vedada após cada adição de água, a fim de evitar interferências externas.

3.2. Elementos sensores cerâmicos

Vale ressaltar que os elementos sensores de cerâmicas porosas, confeccionados a partir de pós precursores de ZrO_2 e de TiO_2 , foram desenvolvidos em trabalhos anteriores, fruto de estudo e pesquisa realizados, ao longo das últimas décadas, pelos integrantes do Grupo de pesquisa em Micro e Nanotecnologias Espaciais e Ambientais - TECAMB/LAS - INPE. As cerâmicas porosas foram confeccionadas através do procedimento cerâmico tradicional, que engloba as seguintes etapas: (i) mistura mecânica e secagem das matérias-primas, (ii)

prensagem do pó resultante e (iii) sinterização dos compactos em diferentes temperaturas, conforme é mostrada resumidamente na Figura 3.2. 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 3.3 [6].

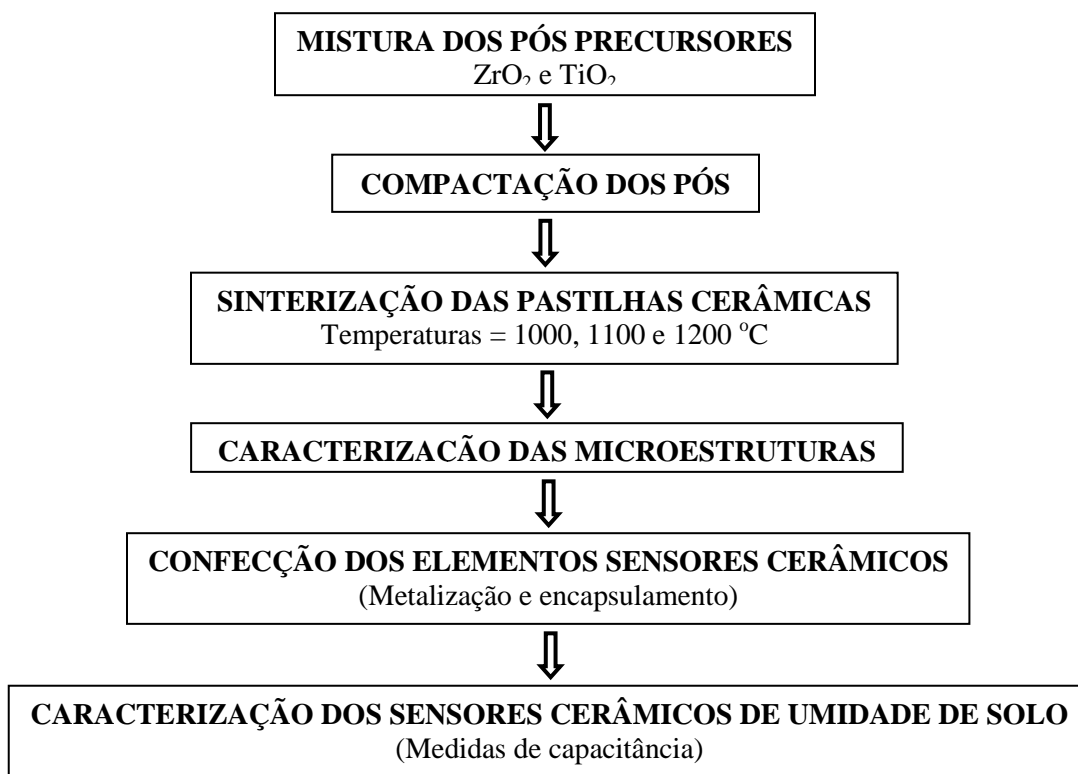


Figura 3.2. Procedimento experimental utilizado na confecção dos elementos sensores cerâmicos. Fonte: [6].

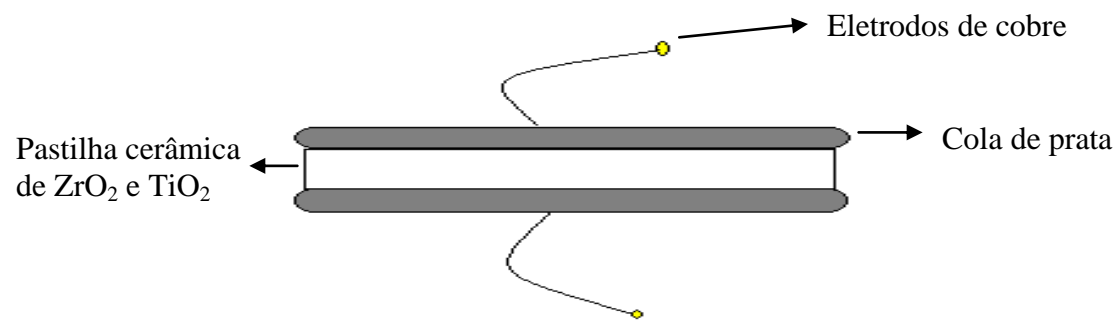
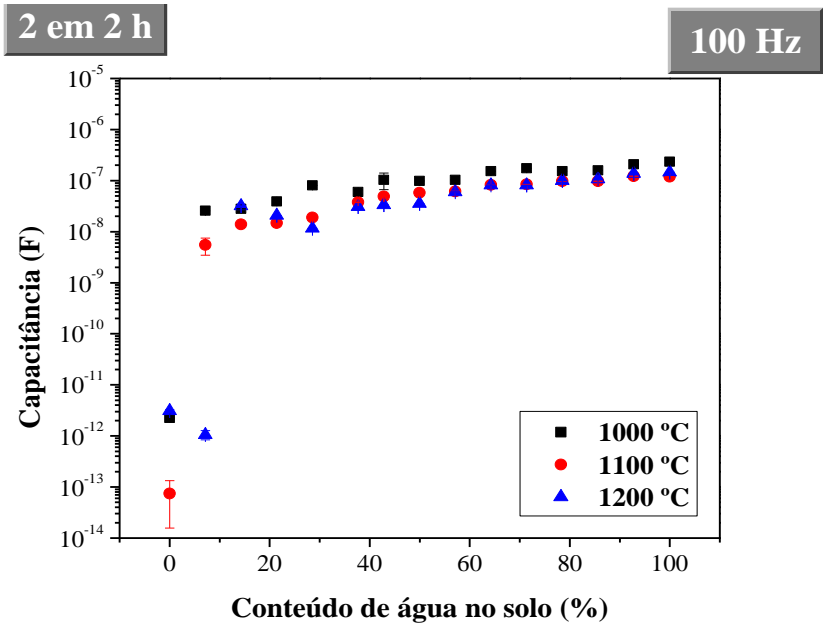


Figura 3.3. Desenho esquemático do elemento sensor cerâmico. Fonte: [6].

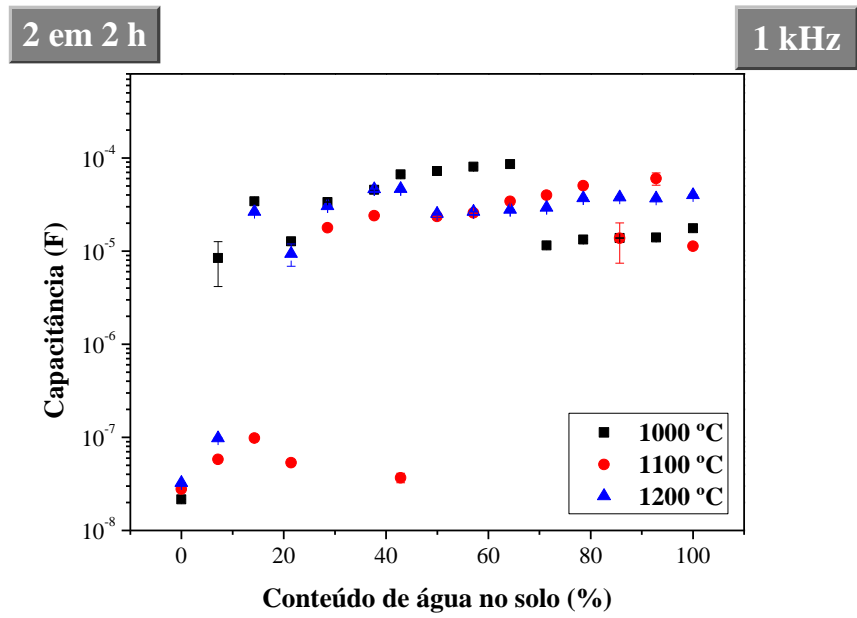
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nas Figuras a seguir, os dispositivos sensores cerâmicos, sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, foram caracterizados eletricamente, através do comportamento da variação de capacitância em função de valores crescentes de água no solo, até a saturação, em temperatura ambiente (25 °C) e nas frequências de 100 Hz, 1 e 10 kHz. Nestes ensaios, buscou-se avaliar a capacidade desses elementos sensores cerâmicos em monitorar a umidade do solo em situações distintas de análise; no primeiro caso, as medições foram realizadas a cada 2 horas em 100 Hz, 1 e 10 kHz, conforme podem ser vistas nas Figuras 4.1a, 4.1b e 4.1c, respectivamente; no segundo caso, as medições foram realizadas a cada 4 horas em 100 Hz, 1 e 10 kHz, conforme mostradas nas Figuras 4.2a, 4.2b e 4.2c, respectivamente, e no terceiro caso, as medições foram realizadas a cada 8 horas em 100 Hz, 1 e 10 kHz, conforme observadas nas Figuras 4.3a, 4.3b e 4.3c.

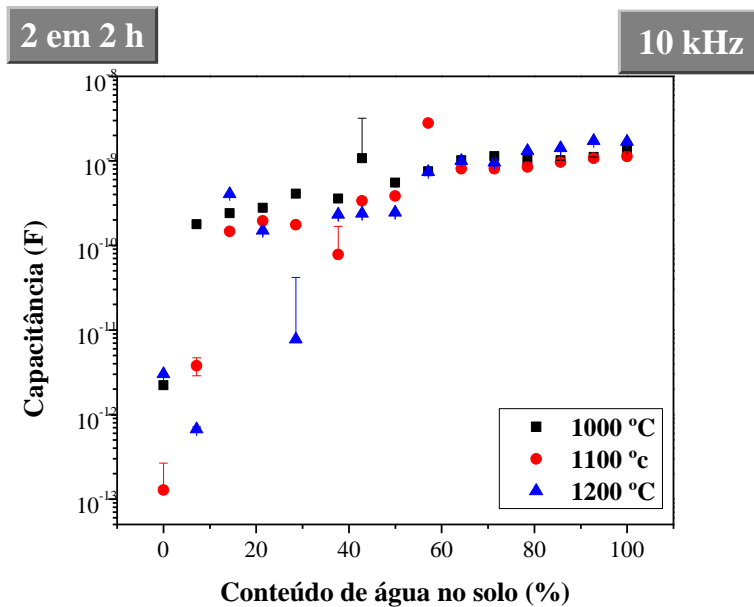
Nas medições elétricas de capacitância realizadas a cada 2 horas (Figura 4.1), os elementos sensores cerâmicos, sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, apresentam maior estabilidade a partir de, aproximadamente, 40 % do conteúdo de água na amostra deformada de solo, na frequência de 100 Hz (Figura 4.1a). Na Figura 4.1b, somente os elementos sensores sinterizados nas temperaturas de 1100 e 1200 °C apresentam estabilidade, a partir de 50 % de água no solo. Enquanto que o elemento sensor sinterizado em 1000 °C apresenta uma queda de capacitância em torno de 70 % de umidade do solo. Em 10 kHz, todos os dispositivos cerâmicos tendem a maior estabilidade a partir de 60 % de umidade do solo, conforme observados na Figura 4.1c. De acordo com as análises realizadas até o momento, os valores menores de conteúdo de água na amostra de solo são detectados nas frequências menores.



a)



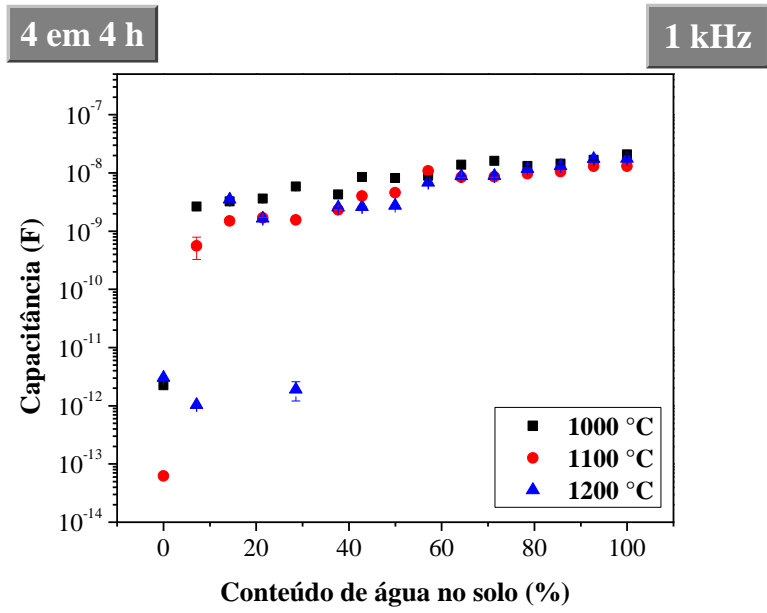
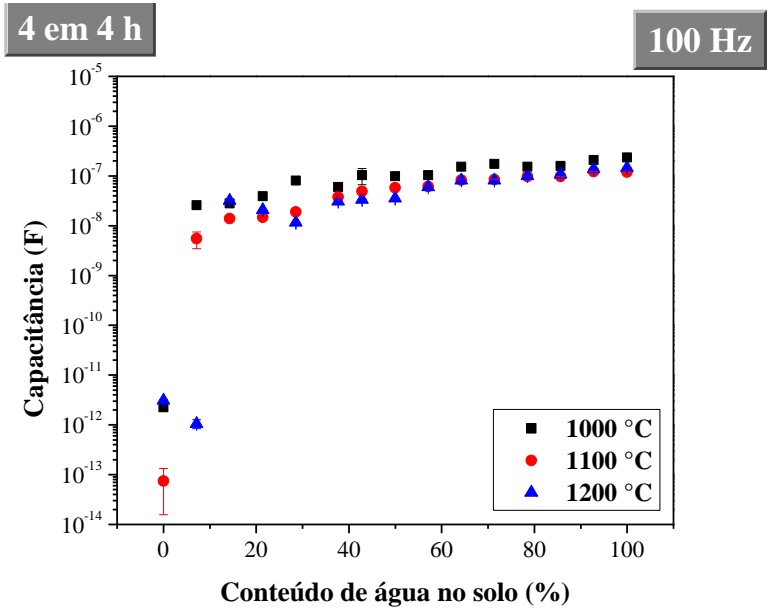
b)

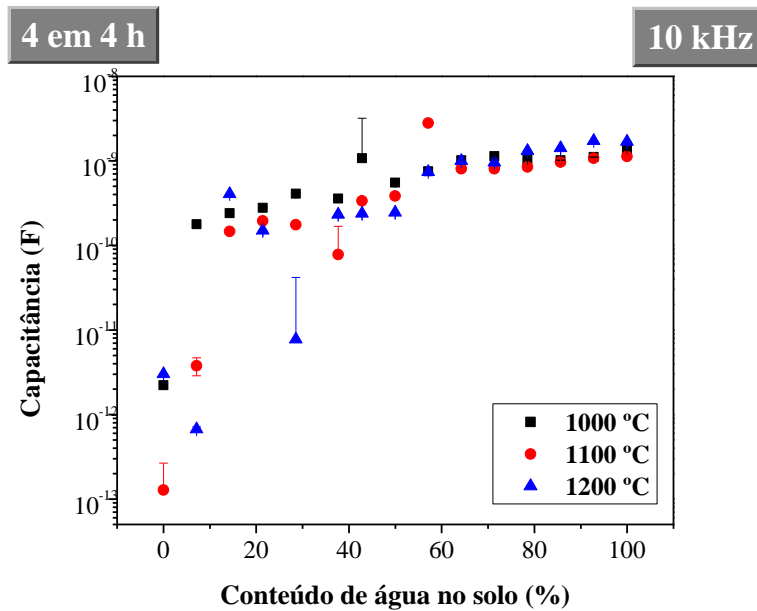


c)

Figura 4.1. Comportamento dos dispositivos sensores cerâmicos em função do conteúdo de água em amostras deformadas de solo, realizadas a cada 2 horas, nas seguintes frequências: a) 100 Hz; b) 1 kHz e c) 10 kHz.

Nas medições elétricas de capacitância realizadas a cada 4 horas (Figura 4.2), os sensores cerâmicos, sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, mantiveram se estáveis a partir de, aproximadamente, 40 % de água no solo, nas frequências de 100 Hz e de 1 kHz, conforme visualizadas nas Figura 4.2a e 4.2b, respectivamente. No entanto, na frequência de 10 kHz, mostrada na Figura 4.2c, os elementos sensores cerâmicos somente apresentaram comportamentos estáveis a partir de, aproximadamente, 63 % de umidade do solo. Nas frequências utilizadas, todos os sensores cerâmicos apresentam comportamentos bastante semelhantes quando tendem a estabilidade.

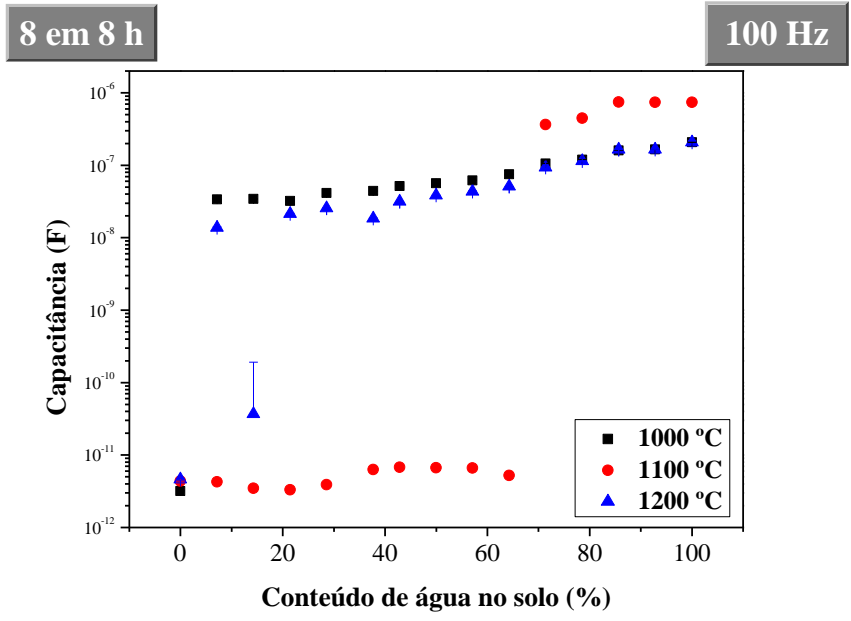




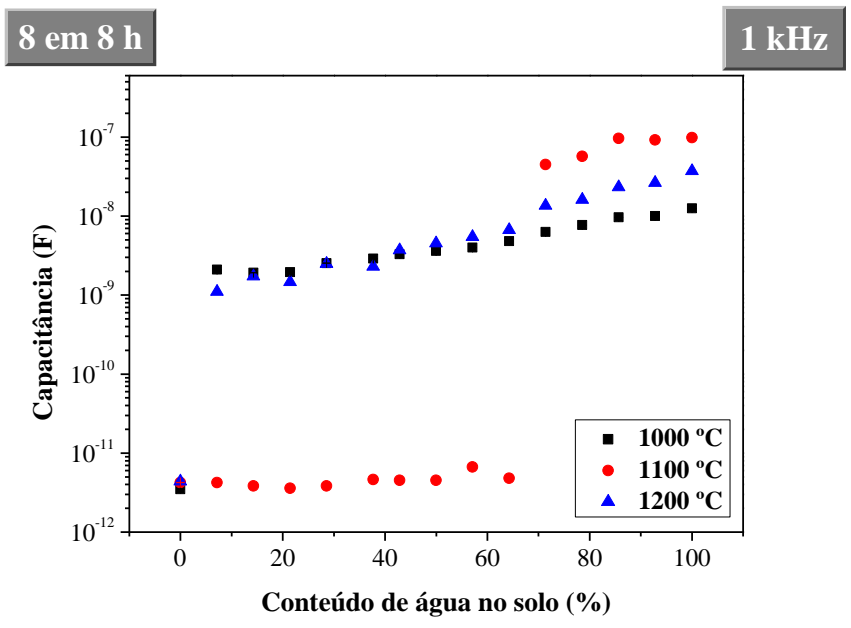
c)

Figura 4.2. Comportamento dos dispositivos sensores cerâmicos em função do conteúdo de água em amostras deformadas de solo, realizadas a cada 4 horas, nas seguintes frequências: a) 100 Hz; b) 1 kHz e c) 10 kHz.

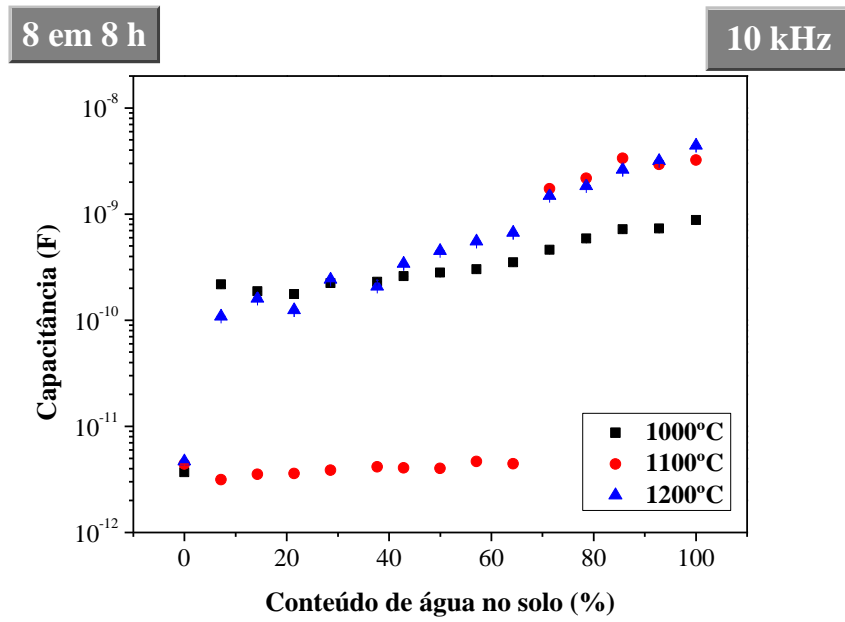
Nas medições elétricas de capacitância realizadas a cada 8 horas (Figura 4.3), os elementos sensores sinterizados nas temperaturas de 1000 e 1200 °C apresentam comportamentos estáveis ao longo de toda faixa de conteúdo de água no solo e, também, tendências linearizáveis, nas 3 frequências utilizadas, conforme podem ser visualizadas nas Figuras 4.3a, 4.3b e 4.3c. No entanto, o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1100 °C não apresenta reação ao estímulo proposto (água no solo) até a umidade de 70 %, porém, a partir desse valor, apresenta maiores valores de capacitância quando comparado aos sensores sinterizados em 1000 e 1200 °C até a saturação da amostra de solo.



a)



b)



c)

Figura 4.3. Comportamento dos dispositivos sensores cerâmicos em função do conteúdo de água em amostras deformadas de solo, realizadas a cada 8 horas, nas seguintes frequências: a) 100 Hz; b) 1 kHz e c) 10 kHz.

5. CONCLUSÕES

Os elementos sensores cerâmicos, empregados nesse projeto, apresentaram maior estabilidade em valores altos de conteúdo de água no solo, principalmente nas medições elétricas realizadas em intervalos curtos de tempo (a cada 2 e 4 horas). No intervalo de 8 horas, os dispositivos cerâmicos sinterizados nas temperaturas de 1000 e 1200 °C apresentaram estabilidade em toda a faixa de umidade do solo. Nas frequências menores (100 Hz e de 1 kHz), os sensores cerâmicos responderam melhor aos valores menores de adições de água no solo, assim como nas frequências maiores, os valores maiores de água no solo foram melhor detectados pelos dispositivos sensores.

6. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] 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.
- [2] 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.
- [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 15/06/2013
- [5] OLIVEIRA, R. M.; NONO, M. C. A.; KURANAGA, C.; WADA, M. Development of ZrO₂-TiO₂ porous ceramic as soil humidity sensor for application in environmental monitoring. Mater.Sci. Forum, v. 30-531, p. 14-419, 2006. 5th International Latin-American Conference on Powder Technology, Costa do Sauípe, BA, 2005.
- [6] OLIVEIRA, R. M. Desenvolvimento de elementos sensores de cerâmicas porosas de ZrO₂-TiO₂ para aplicação no monitoramento do conteúdo de água em solos. Tese de Doutorado, Curso de pós-graduação em Engenharia e Tecnologia Espaciais, INPE. INPE-16723-TDI/1661-TDI. Orientadora: Maria do Carmo de Andrade Nono
- [7] 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.
- [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. 28
- [10] 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
- [11] Ciclo Hidrológico da água. Wikipédia. Disponível em:
http://pt.wikipedia.org/wiki/Ciclo_hidrol%C3%B3gico. Acesso em 21/06/2013
- [12] Solos: Formação e Conservação. Wikipédia. Disponível em:
<http://pt.wikipedia.org/wiki/Solo> Acesso em: 21/06/2013
- [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: 15/06/2013
- [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.
- [16] PREVEDELLO, L. C., Dinâmica da Água no Solo. Disponível em:
<http://estudonline.tripod.com/toppage11.htm>. Acesso em: 10 de julho de 2012.