



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS



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

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

Danielle Rabelo Henrique (Etep, Bolsista PIBIC/CNPq)
E-mail: daniellerh@uol.com.br

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

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

COLABORADOR

Dr. Sergio Luiz Mineiro (LAS/CTE/INPE)

Julho de 2011

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE – Laboratório Associado de Sensores e Materiais – LAS, Centro de
Tecnologias Especiais – CTE.

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

Autor: Danielle Rabelo Henrique

Iniciação Científica na Área de **Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores**,
orientado pela Profa. Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono.

“Estamos diante de um momento crítico
da história da Terra,
numa época em que a Humanidade deve
escolher o seu futuro...
ou formar uma aliança global para
cuidar da Terra e uns dos outros,
ou arriscar a nossa destruição e a da
diversidade da vida...”

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus pela vida e pela família.

Ao meu pai e à minha mãe que se sacrificam pela formação da minha educação.

As minhas irmãs pela ajuda

Ao meu namorado que sempre me incentivou

À professora Dra. Maria do Carmo de Andrade Nono pela oportunidade, orientação e aprendizado.

Ao Laboratório Associado de Sensores e Materiais do Centro de Tecnologias

Especiais do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (LAS/CTE/INPE).

Aos meus companheiros e companheiras do laboratório por tanta atenção, solidariedade e amizade.

RESUMO

Nesta etapa do projeto, compreendido entre fevereiro e julho de 2011, foram investigadas as influências das características físicas de amostras de solos deformadas e indeformadas, previamente caracterizadas, na capacidade de absorção/adsorção de água em sensores cerâmicos porosos, desenvolvidos no Laboratório de Tecnologias Ambientais do LAS-INPE. Os elementos sensores cerâmicos, selecionados para esse estudo, foram confeccionados a partir de pós precursores, comerciais, de ZrO_2 e TiO_2 , sinterizados em diferentes temperaturas. Em laboratório, as variações elétricas de capacitância desses elementos sensores cerâmicos, através de uma Ponte RLC (PHILIPS – PM 6304), foram obtidas em função da variação do conteúdo de água nas amostras de solo. Essa situação se assemelha a um período chuvoso, ocorrido em uma área de risco, onde há o encharcamento do solo e, conseqüentemente, o deslizamento do mesmo. As amostras de solo foram coletadas no Km 32 da Rodovia Floriano Rodrigues Pinheiro (SP-123), localizado na região serrana do Estado de São Paulo, próximo ao município de Santo Antônio do Pinhal, em maio de 2011.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Sensor do tipo capacitivo de umidade do ar, com configuração de <i>sandwich</i>	4
Figura 2.2 - Composição volumétrica de um solo.....	6
Figura 2.3 - Ciclo hidrológico.....	7
Figura 2.4 - a) Aparelho de Casagrande usado para a determinação do limite de liquidez.....	8
Figura 3.1 - Fluxograma esquemático do procedimento experimental adotado para a confecção dos elementos sensores cerâmicos.....	11
Figura 3.2 - Esquema da caracterização elétrica, pelo medidor RLC, dos sensores cerâmicos de umidade de solo.....	12
Figura 4.1 - Imagens obtidas por MEV das superfícies de fratura das cerâmicas sinterizadas nas temperaturas de a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C.....	13
Figura 4.2 - Difractogramas de raios X das cerâmicas sinterizadas nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C por 2 horas.....	14
Figura 4.3 - Comportamentos das curvas de capacitância, em função do conteúdo de água na amostra indeformada de solo, utilizando os elementos sensores cerâmicos sinterizados nas temperaturas de: a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C.	15
Figura 4.4 - Comportamentos das curvas de capacitância, em função do conteúdo de água na amostra deformada de solo, utilizando os elementos sensores cerâmicos sinterizados nas temperaturas de: a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C.....	17

ÍNDICE

CAPÍTULO 1.....	1
1. Introdução.....	1
1.1 Objetivo.....	1
CAPÍTULO 2.....	2
2.Fundamentação Teórica.....	2
2.1 Material Cerâmico.....	2
2.1.1 Os principais materiais cerâmicos.....	2
2.1.2 Escolha do Material Cerâmico.....	3
2.2 O Elemento Sensor de Umidade.....	3
2.2.1 Adsorção de moléculas de água em superfícies de elementos sensores cerâmicos.....	4
2.3 Solo.....	5
2.3.1 Composição do solo.....	5
2.3.2 Comportamento da água no solo.....	6
2.3.3 Infiltração de água em solos.....	7
CAÍTULO 3.....	10
3. Metodologia.....	10
3.1 Coleta das amostras de solo.....	10
3.2 Elementos sensores cerâmicos.....	10
3.3 Medidas com os elementos sensores cerâmicos.....	12
CAPITULO 4.....	13
4. Resultado e Discussão.....	13
CAPITULO 5.....	18
5. Conclusão.....	18
CAPITULO 6.....	19
6. Referencia Bibliográfica.....	19

CAPÍTULO 1

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]. Desde 2001, o Grupo de Pesquisas em Tecnologias Ambientais (TECAMB), que integra o Laboratório Associado de Sensores e Materiais (LAS), do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), tem se dedicado ao monitoramento de áreas com risco de deslizamentos, seja através da elaboração de técnicas de diagnóstico, desenvolvimento e caracterização de materiais, como também no aprimoramento de elementos sensores cerâmicos e sistemas sensores versáteis, confiáveis e de custo baixo. Esta linha de pesquisa é completamente original, em termos mundiais, no sentido de investigar a potencialidade de utilização de cerâmicas porosas como elementos sensores do conteúdo de água no solo para serem aplicados, inicialmente, na irrigação e hidráulica agrícola e nas drenagens urbanas e rurais. Além da originalidade do projeto, optou-se pela utilização de matérias primas brasileira para a produção destes elementos sensores cerâmicos, resultando em uma pesquisa e desenvolvimento totalmente nacionais. Atualmente, o projeto apresenta condições de desenvolvimento de elementos sensores para aplicações em solos com diferentes características químicas e físicas.

1.1 OBJETIVO

Neste trabalho foi proposto a utilização de cerâmicas porosas, que estavam sendo estudadas como elementos sensores de umidade do ar, para realizar uma investigação no monitoramento do conteúdo de água em amostras deformadas e indeformadas de solo, coletadas em áreas com risco de deslizamentos de encosta.

As cerâmicas porosas, confeccionadas a partir de pós comerciais de ZrO_2 e de TiO_2 , foram compactadas por prensagem uniaxial e sinterizadas nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C.

As matérias primas foram selecionadas com base em: ZrO_2 devido, principalmente, ao seu caráter anfotérico que promove a adsorção de cátions e ânions e TiO_2 que, além de seu caráter hidrofílico, apresenta a capacidade trocadora de íons.

CAPÍTULO 2

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MATERIAL CERÂMICO

Os materiais cerâmicos são materiais inorgânicos, não metálicos, constituídos de elementos metálicos e elementos não metálicos, ligados por ligações iônicas e/ou covalentes.

Apresentam alto ponto de fusão, são geralmente isolantes elétricos, embora possam existir materiais cerâmicos semicondutores, condutores e até mesmo supercondutores (estes dois últimos, em faixas específicas de temperatura), são comumente estáveis sob condições ambientais severas e são geralmente duros e frágeis.

Os materiais cerâmicos têm composições químicas muito variadas, desde compostos simples a misturas de várias estruturas cristalinas complexas ligadas entre si [2,3]. As etapas do processamento cerâmico, como a morfologia dos pós precursores, a conformação e os ciclos de tratamentos térmicos afetam diretamente as propriedades físicas [4]. A correlação entre as propriedades físicas e a estrutura do corpo cerâmico é de extrema importância para a definição de sua aplicação. Portanto, é relevante definir a rota a ser escolhida para a preparação destas cerâmicas. A finalidade, no entanto, é obter homogeneidade química e microestrutura coerente com a aplicação desejada.

2.1.1 OS PRINCIPAIS MATERIAIS CERÂMICOS

A maioria dos materiais cerâmicos se enquadra em um esquema de aplicação-classificação, conforme mostrado abaixo [5].

- Vidros (vidros e vitro-cerâmica);
- Produtos argilosos (produtos argilosos estruturais e louças brancas);
- Refratários (argila refratária, sílica, básico e especial);
- Abrasivos;
- Cimentos;
- Cerâmicas Avançadas.

2.1.2 ESCOLHA DO MATERIAL CERÂMICO

A seleção do material apropriado para ser utilizado como elemento sensor de umidade deve ser baseado em materiais que apresentam:

- Sensitividade em uma ampla faixa de umidade e temperatura;
- Estabilidade nos ciclos térmico e de tempo e quanto a exposição em ambientes agressivos e a produtos químicos específicos.

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;
- Estabilidade física e química em ambientes hostis devido, principalmente, à estabilidade de suas fortes ligações químicas.

É importante ressaltar que as cerâmicas possuem uma estrutura única, consistindo de grãos, contornos de grãos, superfícies e poros, cujo controle permite a obtenção de microestruturas adequadas para serem utilizadas nos sensores de umidade. As cerâmicas têm sido utilizadas como elementos sensores, principalmente como corpos porosos sinterizados, preparados pelo processamento cerâmico tradicional, para permitir que a água passe livremente através de sua microestrutura e ocorra a condensação na capilaridade dos poros entre as superfícies dos grãos. As técnicas de processamento, combinadas às matérias primas adequadas, permitem a otimização do desempenho dos corpos cerâmicos como elementos sensores de umidade, através do controle de suas propriedades elétricas e das demais solicitações exigidas [6,7].

2.2 O ELEMENTO SENSOR DE UMIDADE

Os sensores de umidade do solo utilizam a capacitância como tipo de detecção. Estes são geralmente, em formato de *sandwich* (placa condutora + material dielétrico + placa condutora), como mostrado na Figura 2.1. Neste tipo de detecção, o controle da microestrutura do corpo sensor aliado à escolha adequada da composição do material utilizado e a relação área da placa condutora/distância entre as placas com configuração do tipo *sandwich* estão diretamente relacionados com a capacidade de condução deste tipo de sensor. Desta forma, a capacitância aumenta devido à diferença entre a constante

dielétrica do material utilizado como elemento sensor e a da água (a água tem constante dielétrica 80, valor maior que a dos materiais utilizados como elementos sensores).

Quanto maior a quantidade de água entre as duas placas condutoras, ou seja, quanto maior o mecanismo absorção/adsorção da água na microestrutura do sensor, maior a capacitância.

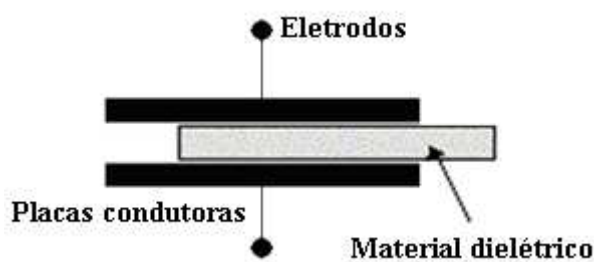


Figura 2.1 - Sensor do tipo capacitivo de umidade do ar, com configuração de *sandwich*.
Fonte: [8].

Características dos sensores de umidade capacitivos são [9]:

- Boa resposta na medição da umidade;
- Linearidade em baixas umidades;
- Não são degradados pela condensação;
- Tamanho pequeno;
- Baixa resistência a contaminantes.

2.2.1 ADSORÇÃO DE MOLÉCULAS DE ÁGUA EM SUPERFÍCIES DE ELEMENTOS SENSOES CERÂMICOS

A adsorção superficial é o termo utilizado para descrever o fenômeno no qual moléculas que estão presentes em um fluido no estado líquido ou gasoso, depositam-se espontaneamente sobre uma superfície sólida. Geralmente, a adsorção superficial ocorre como resultado de forças não balanceadas na superfície do sólido e que atraem as moléculas de um fluido em contato por um tempo finito.

O fenômeno da adsorção é conhecido desde o século XVIII, quando se observou que certa espécie de carvão retinha em seus poros grandes quantidades de vapor d'água, o qual era liberado quando submetido ao aquecimento. Nas últimas décadas, com o avanço das pesquisas e do conhecimento nas áreas meteorológicas, geológicas, eletroquímica e petroquímica, conversão de energia, química de corrosão, catálises

heterogêneas, bem como o acentuado desenvolvimento registrado na área de monitoramento ambiental, a adsorção passou a ser utilizada como uma operação unitária importante dentro da engenharia de materiais, devido a sua utilização para o desenvolvimento de materiais especiais utilizados, principalmente, como elementos sensores de umidade [10,11].

As formas de adsorção da água nas superfícies cerâmicas, em particular de óxidos metálicos, são as grandes responsáveis pelas mudanças nas propriedades elétricas dessas superfícies, permitindo o uso destes materiais como sensores de umidade, seja qual for seu princípio de operação (capacitivo ou resistivo). A compreensão dos mecanismos de adsorção de água nas superfícies destes sólidos torna possível o aprimoramento de modificações na microestrutura destas cerâmicas e a escolha adequada das suas composições químicas. O controle destes parâmetros permite a otimização do desempenho dos elementos sensores cerâmicos, através da exploração de suas propriedades elétricas.

2.3 SOLO

O solo, dependendo dos objetivos e enfoques científicos, tem sido interpretado de maneiras diversas: produto do intemperismo físico e químico das rochas (Geologia); material escavável, que perde sua resistência quando em contato com a água (Engenharia Civil); camada superficial de terra arável, possuidora de vida microbiana (Agronomia) [12].

De modo geral, considerando a importância dos fatores de formação, o solo pode ser definido como corpos dinâmicos naturais que possuem características decorrentes das influências combinadas de clima e atividades bióticas, modificadas pela topografia, que atua sobre os materiais originários, ao longo de certo período de tempo [13].

2.3.1 COMPOSIÇÃO DO SOLO

Os solos são constituídos de proporções e tipos variáveis de minerais, gases, água e matéria orgânica. A matéria sólida mineral é, preponderantemente, proveniente de rochas desagregadas no próprio local ou em locais distantes, trazidas pela água e pelo ar (intemperismo). A parte líquida do solo é fundamentalmente constituída por água proveniente de precipitações tais como chuvas, sereno, neblina, orvalho e degelo de neve e geleiras, que contenham em solução substâncias originalmente presentes nas

fases sólidas e gasosas. A parte gasosa do solo é proveniente do ar existente na superfície e, em proporções variáveis, dos gases da biodegradação de matéria orgânica nos quais predomina o dióxido de carbono (biodegradação aeróbia) e outros como o metano (biodegradação anaeróbia). A parte orgânica é proveniente da queda de folhas, frutos, galhos e ramos, além de restos de animais, excrementos e outros resíduos, em diferentes estágios de decomposição, em fase sólida ou líquida. A proporção de 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 [14]. Em termos médios de ordem de grandeza, os componentes podem ser encontrados na proporção como mostrado na Figura 2.3.

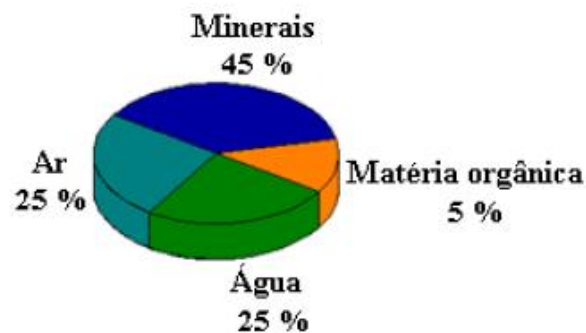


Figura 2.2 - Composição volumétrica de um solo.

2.3.2 COMPORTAMENTO DA ÁGUA NO SOLO

As relações entre as várias formas de ocorrência da interface solo-água se processam dentro de um sistema fechado denominado ciclo hidrológico (Figura 2.4) [15].

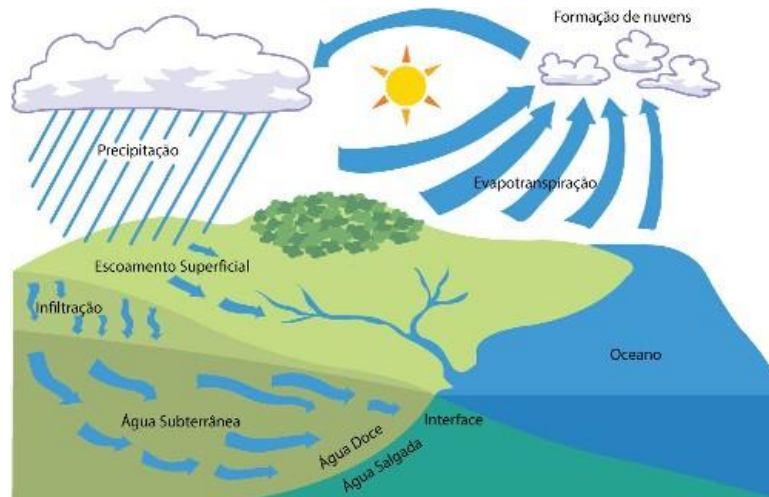


Figura 2.3 - Ciclo hidrológico.
Fonte: [16]

O ciclo da água na natureza inicia-se com a evaporação que ocorre nos mares, rios e lagos. O vapor d'água, alcançando a atmosfera, é distribuído pelos ventos e se precipita quando atinge temperaturas mais baixas. Quando chove sobre a superfície da Terra, uma parte da água se evapora e retorna à atmosfera; outra se desloca por sobre a superfície, constituindo as águas de escoamento superficial. Parte da água das chuvas infiltra-se no solo, formando as águas subterrâneas. Além disso, uma pequena parcela é absorvida pelos animais e plantas, sendo utilizada no seu metabolismo [17].

Neste trabalho, portanto, destacou-se somente a infiltração como parte do ciclo hidrológico.

2.3.3 INFILTRAÇÃO DE ÁGUA EM SOLOS

A infiltração é a passagem de água da superfície para o interior do terreno. É um processo que depende da disponibilidade de água, da natureza do terreno, do estado de sua superfície, da sua cobertura vegetal e do seu teor de umidade.

Neste sentido, o Limite de Liquidez (LL) foi utilizado como parâmetro para avaliar a capacidade sensora dos elementos sensores cerâmicos. Esse parâmetro (LL), determinado através do Aparelho de Casagrande (Figura 2.5), define a quantidade de água necessária para uma amostra de solo se tornar um fluído viscoso, semelhante ao ocorrido na maioria dos deslizamentos de encostas.



Figura 2.4 - a) Aparelho de Casagrande usado para a determinação do limite de liquidez.
Fonte: [18].

O volume e a velocidade de infiltração dependem de alguns fatores, entre eles, destaca-se [17]:

a. Tipo e condição dos materiais terrestres. A infiltração é favorecida pela presença de materiais porosos e permeáveis, como solos e sedimentos arenosos. Por outro lado, materiais argilosos são desfavoráveis à infiltração. A quantidade de água transmitida pelo solo depende de uma característica importante, chamada de **capacidade de campo**, que corresponde ao volume de água absorvido pelo solo, antes de atingir a saturação, e que não sofre movimento para níveis inferiores.

b. Cobertura vegetal. Em áreas vegetadas a infiltração é favorecida pelas raízes que abrem caminho para a água descendente no solo. A cobertura florestal também exerce importante função no retardamento de parte da água que atinge o solo, através da interceptação, sendo o excesso lentamente liberado para a superfície do solo por gotejamento.

c. Topografia. De modo geral, declives acentuados favorecem o escoamento superficial direto, diminuindo a infiltração. Superfícies suavemente onduladas permitem o escoamento superficial menos veloz, aumentando a possibilidade de infiltração.

d. Precipitação. Chuvas regularmente distribuídas ao longo do tempo promovem uma

infiltração maior, pois, desta maneira, a velocidade de infiltração acompanha o volume de precipitação. Ao contrário, chuvas torrenciais favorecem o escoamento superficial direto, pois a taxa de infiltração é inferior ao grande volume de água precipitada em curto intervalo de tempo.

e. Ocupação do solo. O avanço da urbanização e a devastação da vegetação influenciam significativamente a quantidade de água infiltrada em adensamentos populacionais e zonas de intenso uso agropecuário. Nas áreas urbanas, as construções e a pavimentação impedem a infiltração, causando efeitos catastróficos devido ao aumento do escoamento superficial. Nas áreas rurais, a infiltração sofre redução pelo desmatamento em geral, pela exposição de vertentes através de plantações sem terraceamento, e pela compactação dos solos causada pelo pisoteamento de animais.

CAPÍTULO 3

3. METODOLOGIA

3.1 COLETA DAS AMOSTRAS DE SOLO

Neste período foi feita a coleta de amostras de solo no Km 32 da Rodovia Floriano Rodrigues Pinheiro (SP-123), localizado na região serrana do Estado de São Paulo, próximo ao município de Santo Antônio do Pinhal.

As amostras de solo, com estrutura preservada (indeformada), foram coletadas através de cilindros de aço apropriados, onde também foram mantidas em laboratório. No caso das amostras de solo, com estrutura não-preservada (deformada), foram utilizados béqueres para armazenamento das mesmas, em laboratório.

3.2 ELEMENTOS SENSORES CERÂMICOS

Neste trabalho, utilizaram-se elementos sensores cerâmicos porosos, desenvolvidos em outros trabalhos, para monitorar (quantificar) o conteúdo de água em amostras deformadas e indeformadas de solo.

As cerâmicas porosas, confeccionadas a partir de pós comerciais de ZrO_2 e de TiO_2 , foram compactadas por prensagem uniaxial e sinterizadas nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C.

As matérias primas foram selecionadas com base em: ZrO_2 devido, principalmente, ao seu caráter anfotérico que promove a adsorção de cátions e ânions e TiO_2 que, além de seu caráter hidrofílico, apresenta a capacidade trocadora de íons.

Na Figura 3.1 é mostrado um fluxograma do procedimento experimental adotado para a confecção dos elementos sensores cerâmicos porosos de $ZrO_2 - TiO_2$, utilizados nesse trabalho.

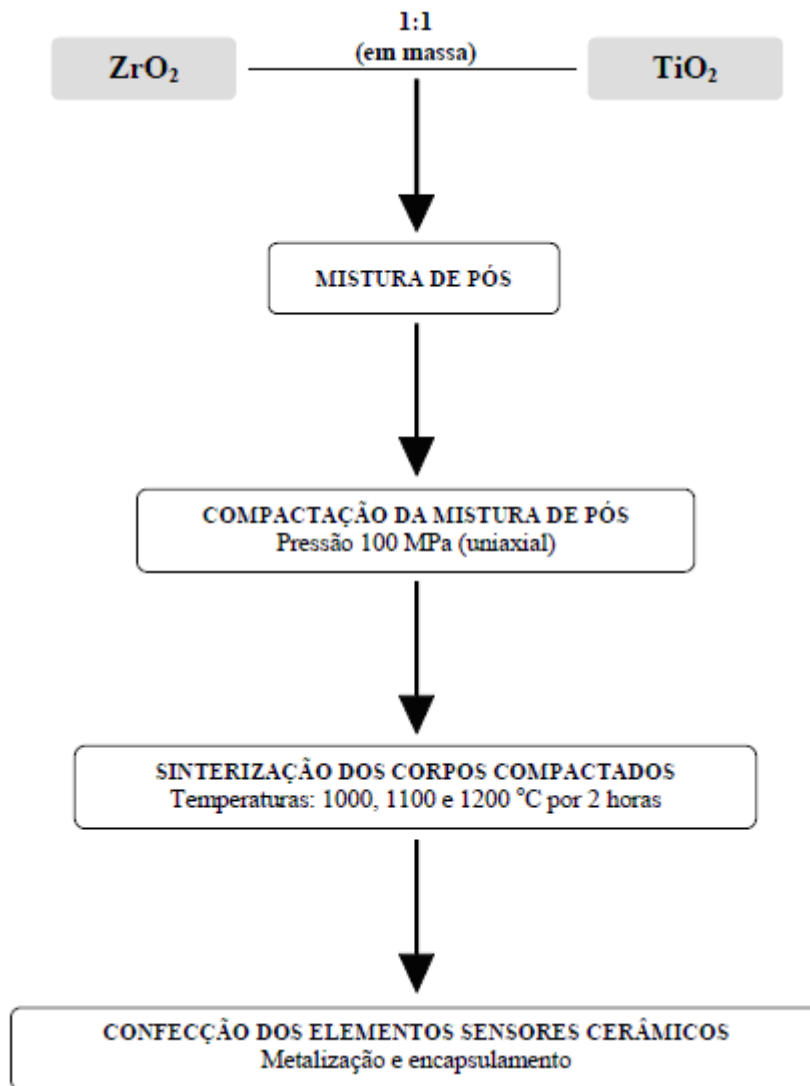


Figura 3.1 - Fluxograma esquemático do procedimento experimental adotado para a confecção dos elementos sensores cerâmicos.

Fonte: [8]

3.3 MEDIDAS COM OS ELEMENTOS SENSORES CERÂMICOS

Os elementos sensores de ZrO_2-TiO_2 , sinterizados em 1000, 1100 e 1200 °C, foram imersos nas amostras deformadas e indeformadas de solo. Usando uma Ponte RLC (PHILIPS-FLUKE/PM6304) foram realizadas 6 medições de capacitância, em cada elemento sensor, para cada quantidade de água adicionada às amostras de solo, partindo da condição seca das amostras de solo até a saturada (teor de umidade utilizado: Limite de Liquidez - LL). A Ponte RLC foi responsável pela excitação e aquisição de sinais elétricos dos corpos cerâmicos utilizados como elementos sensores (Figura 3.2).

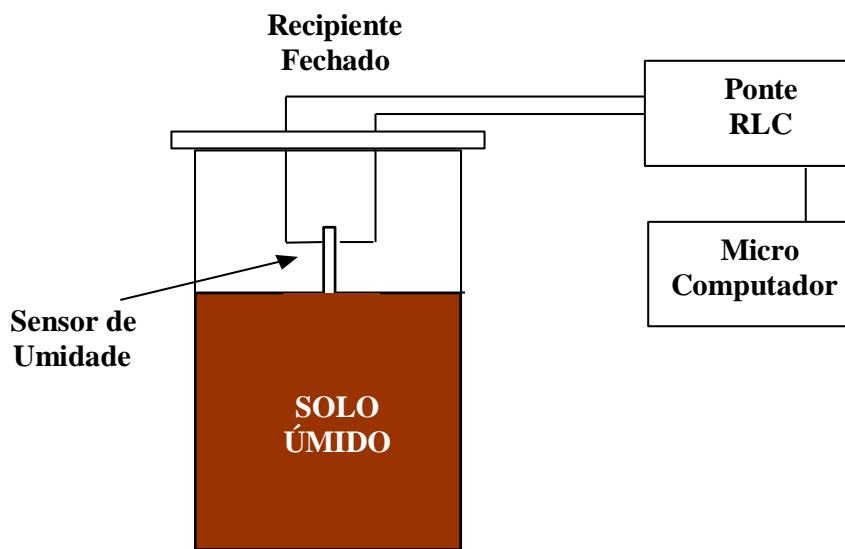


Figura 3.2 - Esquema da caracterização elétrica, pelo medidor RLC, dos sensores cerâmicos de umidade de solo.

CAPITULO 4

4. RESULTADO E DISCUSSÃO

Nas imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) das pastilhas cerâmicas sinterizadas nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, como mostrada na Figura 4.1, identifica-se a presença de poros de vários tamanhos e formas. Na Figura 4.1a, a microestrutura mostra que uma parte das partículas não apresenta formação de pescoço, característica do primeiro estágio de sinterização. No entanto, nas Figuras 4.1b e 4.1c, observam-se o progresso do processo de sinterização apresentando uma menor quantidade de poros, com tamanhos menores quando comparado à cerâmica sinterizada em 1000 °C (Figura 4.1a).

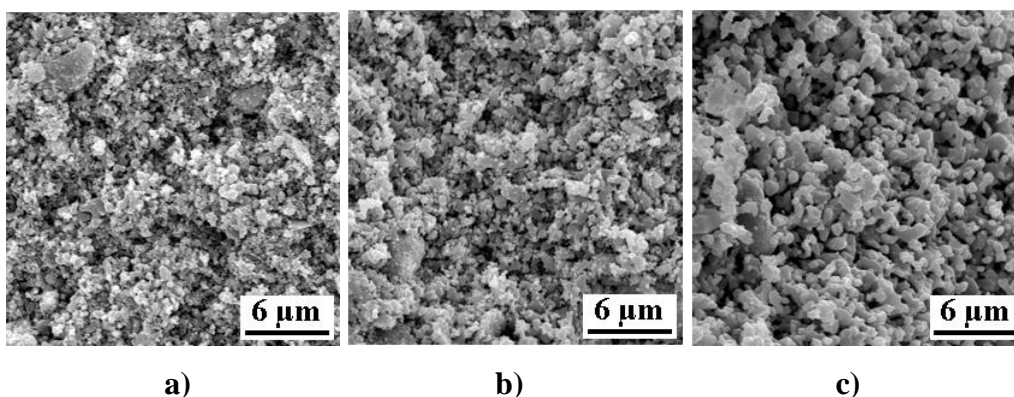


Figura 4.1 - Imagens obtidas por MEV das superfícies de fratura das cerâmicas sinterizadas nas temperaturas de a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C.

Fonte: [13].

De acordo com os difratogramas de raios X, mostrados na Figura 4.2, obtidos das pastilhas cerâmicas sinterizadas nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, identificou-se a presença de duas fases distintas: ZrO_2 e TiO_2 , conforme previsto.

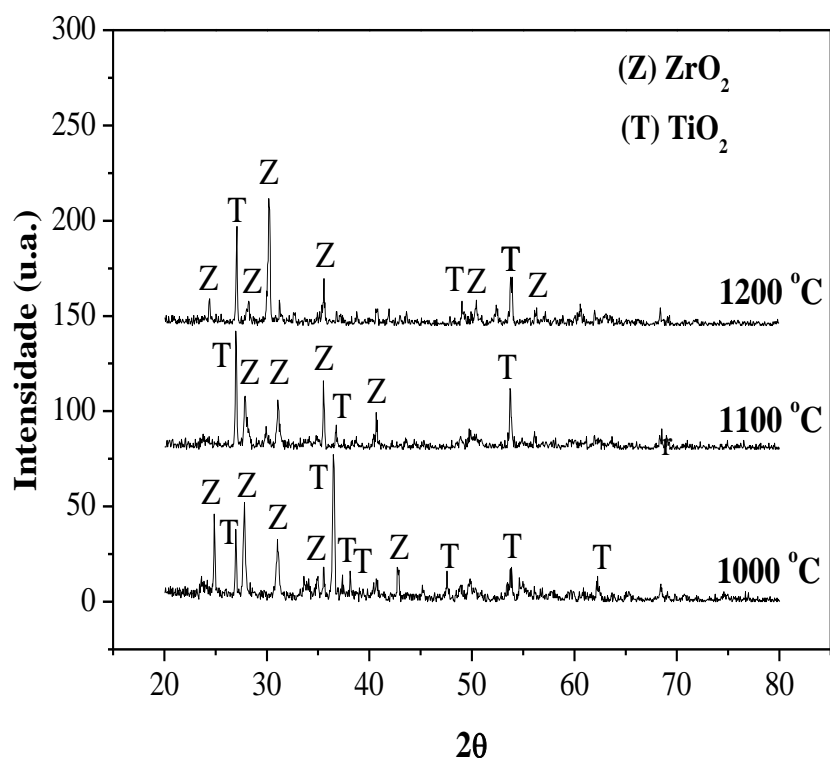
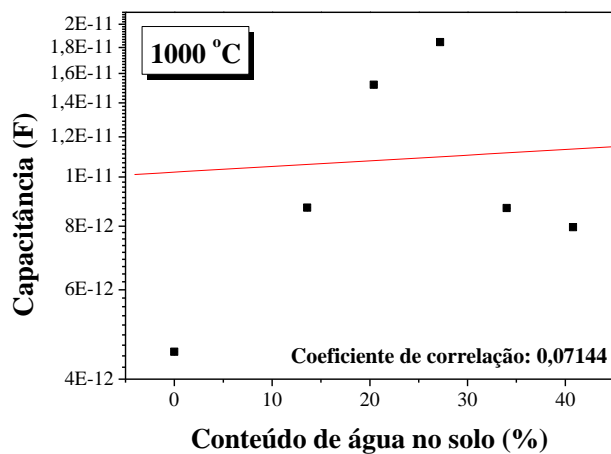


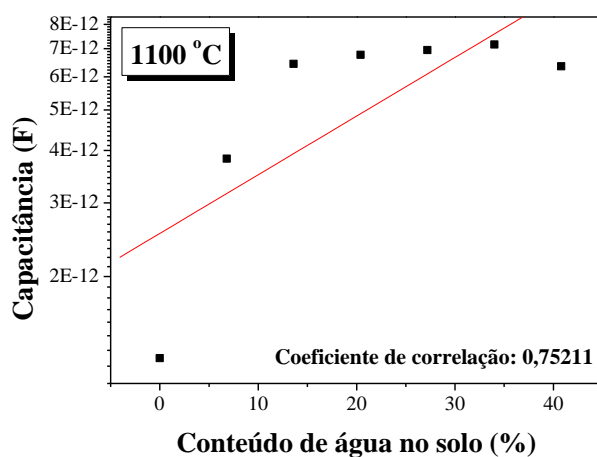
Figura 4.2 - Difratoformas de raios X das cerâmicas sinterizadas nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C por 2 horas.

Fonte: [8]

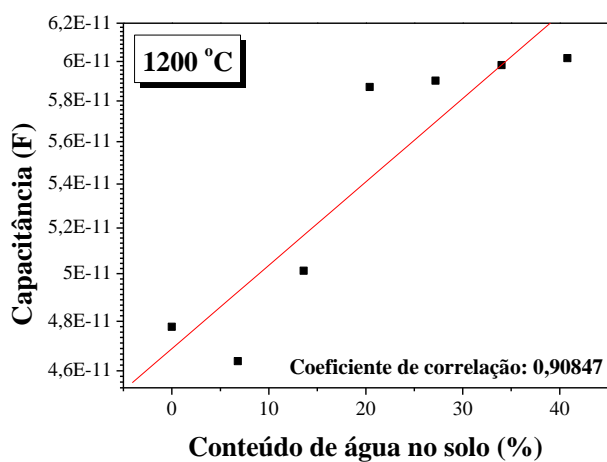
De acordo com as curvas de capacitância *versus* conteúdo de água na amostra indeformada de solo, encontradas para os elementos sensores cerâmicos sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C (Figura 4.3), observa-se que o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1200 °C mostrou maior linearidade, pois o coeficiente de correlação, 0,90847, foi maior quando comparado com os elementos sensores sinterizados nas temperaturas de 1000 e 1100 °C, 0,07144 e 0,75211, respectivamente.



a)



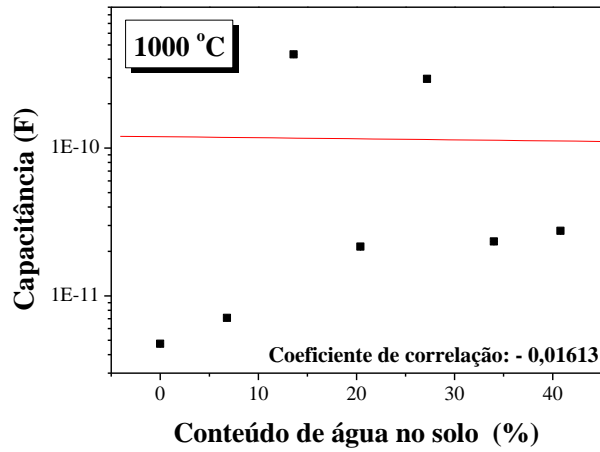
b)



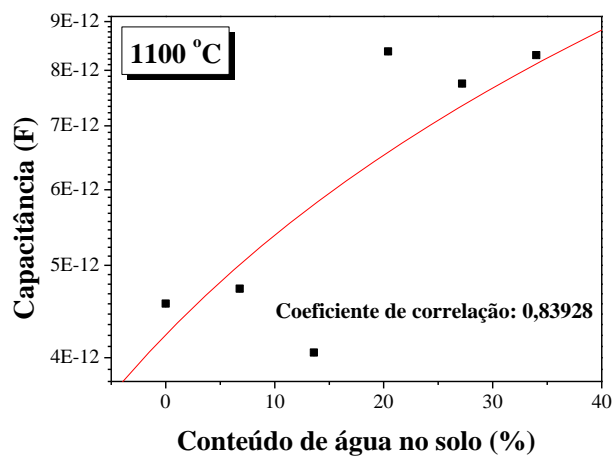
c)

Figura 4.3 - Comportamentos das curvas de capacitância, em função do conteúdo de água na amostra indeformada de solo, utilizando os elementos sensores cerâmicos sinterizados nas temperaturas de: a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C.

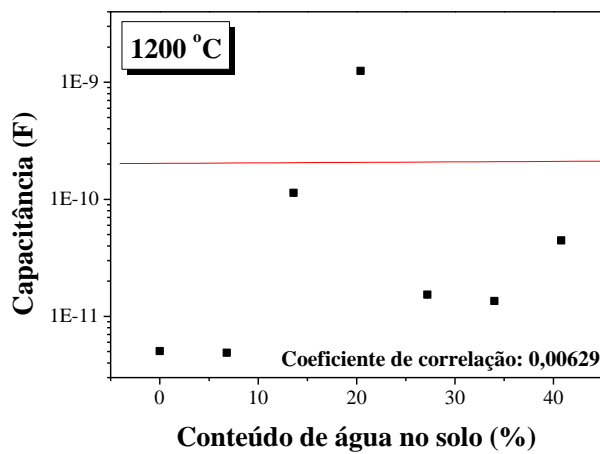
De acordo com as curvas de capacitância *versus* conteúdo de água na amostra deformada de solo, encontradas para os elementos sensores cerâmicos sinterizados nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C (Figura 4.4), observa-se que o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1100°C mostrou maior linearidade, pois o coeficiente de correlação, 0,83928, foi maior quando comparado com os elementos sensores sinterizados nas temperaturas de 1000 e 1200 °C, 0,01613 e 0,00629 , respectivamente.



a)



b)



c)

Figura 4.4 - Comportamentos das curvas de capacitância, em função do conteúdo de água na amostra deformada de solo, utilizando os elementos sensores cerâmicos sinterizados nas temperaturas de: a) 1000, b) 1100 e c) 1200 °C.

CAPITULO 5

5. CONCLUSÃO

Neste trabalho foram apresentados os resultados de microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X das amostras cerâmicas porosas de ZrO_2-TiO_2 , sinterizada nas temperaturas de 1000, 1100 e 1200 °C, realizados anteriormente. As caracterizações elétricas, obtidas através de medições da variação de capacitância, quando os elementos sensores cerâmicos foram imersos em amostras de solo deformadas e indeformadas, com diferentes quantidades de umidade, em temperatura ambiente, a fim de comprovar a potencialidade destes materiais como elementos sensores do conteúdo de água em solos. Nas fotomicrografias, obtidas pelo MEV, observa-se com o aumento da temperatura de sinterização de 1000 para 1200 °C uma maior coalescência das partículas e, conseqüentemente, uma tendência mais acentuada à densificação das microestruturas das pastilhas cerâmicas. As análises de difração de raios X mostraram a presença de duas fases distintas: ZrO_2 e TiO_2 . Através destas análises, comprovou-se que o aumento da temperatura de sinterização de 1000 para 1200 °C não foi suficiente para formar uma nova fase e os dois compostos presentes formaram uma solução sólida. Com isso, estes compostos, ZrO_2 e TiO_2 , mantiveram suas propriedades individuais. As curvas de capacitância *versus* conteúdo de água em solos mostraram que o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1100 °C apresentou maior linearidade, ou seja, maior sensibilidade quando em contato com moléculas de água contidas na amostra de solo deformada. Enquanto na amostra indeformada de solo, o elemento sensor sinterizado na temperatura de 1200 °C mostrou maior capacidade sensora. No entanto, novos testes deverão ser realizados em todos os elementos sensores estudados.

CAPITULO 6

6. REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] CARVALHO, C. S.; MACEDO, E. S. OGURA, A. T. (organizadores). **Mapeamento de riscos em encostas e margem de rios**. 1. Ed. Brasília: Ministério das Cidades/Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT, 2007. 176p. ISBN 978-85-60133-81-9.
- [2] REED, J. S. **Principles of ceramics processing**. 2. ed. New York, Chichester, Brisbane, Toronto: John Wiley & Sons, Inc., 1995, 658p.
- [3] CHIANG, Y. M.; BIRNIE, D. P.; KINGERY, W. D. **Physical ceramics: principles for ceramic science and engineering**. 1. ed. New York: John Wiley & Sons, 1996. 522p.
- [4] RING, T. A. **Fundamentals of ceramic powder processing and synthesis**. 1. ed. New York: Academic Press, 1995. 961p.
- [5] CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e engenharia de materiais: Uma introdução**. 5^a Edição. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S.A. (LTC), 2002. 589p. Tradução Sérgio Murilo Stamile Soares. (*Materials Science and Engineering: An Introduction*. Copyright © 2000, John Wiley & Sons, Inc.).
- [6] ARNDT, J. IN GOPEL, W.; HESSE, J.; ZEMEL, J. N. (eds.). **Sensors: a comprehensive survey**, , Weinheim: VCH., 1989. v. 1, p. 247-278.
- [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] OLIVEIRA, R. M. **Desenvolvimento de elementos sensores de cerâmicas porosas de ZrO₂-TiO₂ para aplicação no monitoramento do conteúdo de água em solos**, Tese Doutorado, INPE – São José dos Campos, 2010.
- [9] NAWROCKI, W. **Measurement systems and sensors**. 1.ed. Boston/London: Artech House, Inc., 2005. 338p. ISBN 1-58053-945-9.
- [10] THIEL, P. A.; MADEY, T. E. The interaction of water with solid surfaces: Fundamental aspects. *Surf. Sci. Rep.*, v. 7, 214-239p., 1987.
- [11] HENDERSON, M. A. The interaction of water with solid surfaces: Fundamental aspects revisited. **Surf. Sci. Rep.**, v. 46, p.29-33, 2002.
- [12] SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Solos em Pedologia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (eds). **Geologia de engenharia**. 1.ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. 586p. ISBN 85-7270-002-1.
- [13] BUCKMAN, H. O.; BRADY, N. C. **Nature and properties of soil**. 6.ed. New York: McMillan, 1969. 567p.

[14] BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M. PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental** 1.ed. São Paulo: Prentice Hall, 2002. 305p. ISBN 85-87918-05-2.

[15] JORGE, F. N.; UEHARA, K. Águas de Superfície. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N.A. (Eds.). **Geologia de engenharia**. 1. ed. São Paulo: Associação Brasileira de Geologia de Engenharia (ABGE), 1998. 586p. ISBN 85-7270-002-1.

[16] Site: www.revistaescola.abril.com.br/ciencias/pratica-pedagogica/caminho-aguas-490504.shtml

[17] KARMANN, I. Ciclo da água: água subterrânea e sua ação geológica. In: TEIXEIRA, W.; TOLEDO, M. C. M.; FAIRCHILD, T. R.; TAIOLI, F. (orgs.). **Decifrando a Terra**. 2. Reimpressão. São Paulo: Oficina de Textos, 2003. 557p. ISBN 85-86238-14-7.

[18] FIORI, A. P.; CARMIGNANI, L. **Fundamentos de mecânica dos solos e das rochas**: aplicações na estabilidade de taludes. Curitiba: Editora da UFPR, 2001. 550p.