

## 8 Conclusões e Sugestões

### 8.1 Conclusões

A presente tese teve como objetivo a definição e determinação de parâmetros requeridos na avaliação da aplicabilidade da técnica de dessorção térmica.

Foi abordada uma descrição da tecnologia de dessorção térmica utilizada na descontaminação de áreas. Esta tecnologia se baseia no aquecimento direto do solo contaminado, realizando um tratamento físico-térmico no mesmo. Por ser uma tecnologia inovadora, são escassos estudos mais detalhados do comportamento de aquecimento do meio poroso, sendo necessário estudos do padrão de comportamento das propriedades físico-químicas, hidráulicas e térmicas de solos submetidos a gradientes de temperatura.

Apresentou-se a modelagem do aquecimento de um solo dando-se enfoque à teoria mais utilizada para fluxo acoplado de calor e umidade (Philip e de Vries, 1957). Foram descritos e definidos conceitualmente os parâmetros necessários para esta análise. Um enfoque maior foi dado ao aspecto teórico da condutividade térmica, calor específico e difusividade térmica de solos. Foram determinadas as funções paramétricas do solo que são necessárias num estudo de um problema de fluxo de calor acoplado: condutividade hidráulica em função da umidade volumétrica, condutividade térmica em função da umidade volumétrica, capacidade de aquecimento volumétrico (função do calor específico), e sucção em função do teor de umidade volumétrico.

Foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre a influência da temperatura no comportamento dos solos, enfatizando-se o efeito da temperatura no comportamento hidráulico e de deformabilidade.

Para a determinação dos parâmetros foram utilizados dois solos de classificação geotécnica diferentes, sendo um argiloso e outro arenoso. O solo argiloso é maduro e coluvionar e se localiza no Campo Experimental da PUC-Rio.

O solo arenoso é sedimentar e foi retirado da Cidade dos Meninos – Duque de Caxias, localizada na Baixada Fluminense.

Dos parâmetros do solo que são necessários para analisar a técnica de dessorção térmica, ou seja um problema de fluxo de calor acoplado, foram determinados: a condutividade térmica em função da umidade volumétrica, a sucção em função do teor de umidade volumétrico, a condutividade hidráulica não saturada e o calor específico (relacionado à capacidade de aquecimento volumétrico), atingindo-se o objetivo da presente tese.

### 8.1.1

#### **Propriedades Físicas, Físico-Químicas e Mineralógicas**

Foram feitas análises granulométricas e de limites para amostras dos solos naturais e previamente aquecidas. Até a temperatura de 200°C não se observou mudanças significativas nas curvas granulométricas. Quando submetidos à temperatura de 300°C as mudanças ocorridas na granulometria foram enormes, fazendo com que o solo do Campo Experimental deixasse de ser um material argilo-arenoso para se tornar um solo com classificação granulométrica areno-siltoso, e, quanto ao solo da Cidade dos Meninos, este aumentou seu percentual de areia diminuindo o de argila. Quanto aos limites de consistência ambos os solos se mostraram sensíveis ao aumento de temperatura, perdendo sua plasticidade quando eram submetidos à temperatura de 300°C. As variações nas curvas granulométricas e nos limites, indicaram uma possível ocorrência de cimentação dos grãos de argila.

Quanto às propriedades físico-químicas dos solos com relação à temperatura, ficou claro que esta exerce grande influência no seu comportamento. O aumento de temperatura fez com que ambos os solos perdessem um pouco da sua capacidade de troca catiônica, sendo significativa a diferença sentida nas quantidades de alumínio e no teor de ferro. Com o aquecimento, o alumínio e o ferro precipitaram, passando a funcionar como um material cimentante, por serem não hidratáveis e bloquearem a posição de troca do argilo-mineral. Este fato veio a explicar as variações observadas nas curvas de distribuição granulométrica e dos limites de consistência com a temperatura, fazendo com que ambos os solos

aquecidos a 300°C perdessem a sua capacidade plástica, diminuindo assim a capacidade de absorção do argilo-mineral.

Os difratogramas de Raios-X mostraram a alteração na estrutura do argilo-mineral caulinita com o aumento de temperatura. Foi possível também observar que quando se atingia 300°C ocorria precipitação de ferro para o solo do Campo Experimental e a eliminação da gibsita para o solo da Cidade dos Meninos. Os picos referentes aos minerais de quartzo se mantiveram inalterados com o incremento de temperatura.

### 8.1.2

#### Condutividade Hidráulica Saturada

As condutividades hidráulicas saturadas para cada solo ensaiado, na temperatura ambiente, em corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas mostraram que estas aumentam linearmente com a temperatura. Utilizando-se a analogia proposta por Taylor (1948) verificou-se que o único parâmetro que estava sendo alterado com os incrementos de temperatura era o fator de forma C. Este parâmetro se relaciona com a estrutura do solo. Demonstrando-se que possivelmente as variações de temperaturas impostas induzem o aparecimento de microfissuras nos corpos de prova.

Com o auxílio do microscópio eletrônico comprovou-se o aparecimento de microfissuras e o aumento percentual de poros no interior do solo aquecido, correlacionando-se estas microfissuras e aumento de poros ao fator de forma C, ou seja, a maneira como os vazios estão interconectados. As variações das condutividades hidráulicas para o solo argilo-arenoso do Campo Experimental foram levemente maiores do que as variações obtidas para o solo areno-argiloso da Cidade dos Meninos. Este fato se deve a maior percentagem argilosa e de aumento de poros com a temperatura no solo do Campo Experimental.

Foi feita uma adaptação num permeâmetro de parede flexível para a determinação da condutividade hidráulica saturada com temperatura controlada. Nessa adaptação o que mais se visou foi à precisão e a eficácia do sistema de aplicação e controle de temperatura. Para que não ocorresse a dissipação da temperatura aplicada, o permeâmetro foi instalado dentro de uma estufa com a implementação de um sistema de controle de temperatura da mesma. Foi

projetado um controlador de temperatura que também funcionasse como um sistema de aplicação de calor, sendo este acoplado à base da câmara. A principal característica deste controlador é que este é um sistema de rampa e patamares com precisão de  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Como última adaptação ao equipamento, foram instalados termopares para que fossem medidas as temperaturas de entrada e de saída da água percolada no corpo de prova.

Quanto à variação das condutividade hidráulicas com a temperatura observou-se a variação da viscosidade e do peso específico da água com a temperatura refletiram nos resultados obtidos, posto que o fluido permeante sofreu aquecimento. A condutividade hidráulica para ambos os solos apresentou um comportamento exponencial. Considerando-se a condutividade hidráulica intrínseca observou-se novamente uma relação linear entre a condutividade hidráulica e o acréscimo de temperatura, evidenciando que outros fatores afetam a variação da permeabilidade com a temperatura, como o índice de vazios e o fator de forma C. Novamente o solo do Campo Experimental se mostrou um pouco mais sensível à temperatura que o solo da Cidade dos Meninos.

Existem relações, como a proposta por de Campos (1979), que visam obter a condutividade hidráulica como função da temperatura levando-se em conta não somente a variação do peso específico e da viscosidade do fluido permeante com a temperatura como também a variação do índice de vazios com a temperatura. Esta relação, no entanto, não conseguiu simular adequadamente a condutividade hidráulica, pois os valores estimados para ambos os solos eram inferiores aos obtidos em laboratório. Esta constatação somente veio a ressaltar que ocorrem variações estruturais nos corpos de prova que vão além da diminuição do índice de vazios. O microfissuramento induzido com incrementos de temperatura impostos, já antes observado, está refletido no fator de forma C, da equação de Taylor (1948). Utilizando-se das relações normalizadas lineares do fator de forma C, obtidas nos ensaios de condutividade hidráulica saturada para corpos de prova previamente aquecidos, estimou-se o aumento da condutividade hidráulica com a temperatura, obtendo-se bons resultados. O que ressalta a grande importância da temperatura na microestrutura do solo, e que este comportamento tem que ser levado em conta de alguma maneira.

### 8.1.3 Condutividade Térmica e Calor Específico

A condutividade térmica foi determinada pela técnica de sonda térmica. Os resultados obtidos estavam dentro do padrão de comportamento esperado. Solos argilosos apresentam valores mais baixos de condutividade térmica do que os solos arenosos. Obteve-se valores médios de condutividade térmica na umidade higroscópica de: 0,209 e 0,274 para o solo do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos respectivamente.

Os ensaios de condutividade térmica demonstraram a dependência desta com relação à quantidade de água que existe no solo. Na literatura existem tabelas que fornecem valores únicos de condutividade térmica de acordo com a classificação de solo, não sendo aconselhável considerar estes valores como significativos, uma vez que a condutividade térmica é dependente da umidade e da temperatura, não sendo portanto um parâmetro único e sim uma relação.

Ao determinar as curvas da condutividade térmica em relação às umidades gravimétrica e volumétrica, os valores de condutividade térmica obtidos foram crescentes em relação ao aumento das umidades, e as equações logarítmicas foram as que melhores ajustaram os dados experimentais. A relação da condutividade térmica com a umidade apresentou um padrão de comportamento intermediário entre os valores relatados na literatura para solos arenosos e solos argilosos, sendo mais próxima aos valores dos solos argilosos. Corriqueiramente os solos arenosos usados na determinação da condutividade térmica são areias puras ou fabricadas, conseqüentemente obtém-se altos valores de condutividade térmica para estes solos. Existem equações que se propõem a prever o comportamento da condutividade térmica com o aumento de umidade, levando-se em consideração o peso específico seco, a sua quantidade de água e os minerais constituintes de um determinado solo. Estas equações não ajustaram bem os resultados experimentais aqui obtidos, uma vez que são equações empíricas que foram baseadas em solos arenosos fabricados e não nos solos tropicais brasileiros. Estas equações normalmente superestimam os valores de condutividade térmica. A equação que melhor ajustou os dados experimentais foi à proposta por Ewen (1988). O inconveniente desta equação é que como se trata de um ajuste de curva

torna-se necessário à realização de ensaios para que se obtenha um ajuste de curva.

Foi desenvolvida uma metodologia para a determinação do calor específico utilizando-se de uma correlação com a difusividade térmica. Para a medição do calor específico inicialmente eram feitas as determinações da condutividade térmica com a sonda térmica, sendo posteriormente o corpo de prova colocado em banho-maria. A temperatura no centro do corpo de prova era então medida como uma função do tempo, com o auxílio da sonda térmica, sendo que esta funcionava naquele momento apenas como um termopar.

Foram obtidos valores de calor específico para os solos em sua umidade higroscópica, a uma temperatura de 40°C, de 0,223 e 0,177 para os solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos, respectivamente. Ressalta-se que estes valores encontram-se dentro dos padrões existentes para a classificação desses solos.

A grande maioria dos valores de calor específico apresentados na literatura são únicos para uma determinada classificação de solo, assim como relatado anteriormente para o caso da condutividade térmica. Este fato não é verdadeiro e existe uma dependência do calor específico com a umidade em que se encontra o solo e com a temperatura em que são realizados os ensaios. A inclinação da relação de calor específico com a temperatura se manteve constante para as diferentes umidades em que foram feitos os ensaios. Um aumento da umidade para uma dada temperatura aumenta o valor do calor específico. O solo do Campo Experimental apresentou uma maior variação nos valores de calor específico para uma dada umidade do que o solo da Cidade dos Meninos, levando-se em consideração as temperaturas ensaiadas. Este fato vem a enfatizar que os solos argilosos mantêm o calor por mais tempo do que os solos arenosos, e que o calor específico está relacionado com a capacidade que um determinado solo tem de reter o calor. O calor específico se mostrou também dependente da estrutura do meio poroso.

#### 8.1.4 Curvas Características de Sucção

Foram determinadas curvas características de sucção utilizando-se da técnica de papel-filtro, para os solos na temperatura ambiente e para corpos de prova que foram submetidos a diferentes níveis de temperatura (50, 100, 200 e 300°C), seguindo-se tanto a trajetória de umedecimento como a de secagem.

Para o solo do Campo Experimental, considerando amostras que não foram submetidas a nenhum tipo de aquecimento, verificou-se que a pressão de entrada de ar é muito baixa, da ordem de 5kPa, para um teor de umidade volumétrica de 50%. O teor de umidade volumétrico residual é de 35% para um valor de sucção de 3200kPa seguindo-se a trajetória de secagem e de 26% para um valor de sucção de 5500kPa, seguindo-se a trajetória de umedecimento. Para as curvas características obtidas ambos os solos apresentaram dois pontos de inflexão.

Observando-se as curvas características de sucção de ambos os solos fica clara a dependência do seu comportamento com a temperatura, sendo seu efeito mais relevante para níveis baixos e médios dos valores de sucção. Para o caso do solo do Campo Experimental o efeito de pré-aquecimento da matriz do solo só foi sentido para sucções de até a ordem de 1000kPa, com a umidade correspondente coincidente com o limite de plasticidade deste solo, sendo que o segundo ponto de inflexão acontece na umidade correspondente ao limite de contração. Para o solo da Cidade dos Meninos a umidade saturada tem um valor inferior ao limite de plasticidade, e as curvas características de sucção se tornam únicas a partir da sucção de 6000kPa, com a umidade correspondente coincidente com o limite de contração do solo.

O aumento de temperatura fez com que a umidade diminuísse para uma dada sucção, ou para uma dada umidade a sucção tende a diminuir com o aumento de temperatura. Comparando-se as curvas características extremas, solo não aquecido e corpos de prova pré-aquecidos a temperatura de 300°C, vê-se que a variação máxima da relação entre os valores de umidade para uma dada sucção é da ordem de 20% para o solo do Campo Experimental e de 17% para o solo da Cidade dos Meninos, quando se considera a umidade gravimétrica. Ocorreu uma diminuição das umidades volumétricas saturadas com o aumento de temperatura, considerando-se os extremos, de 50% para 45% no caso do solo do Campo

Experimental, e, de 40% para 35% no caso do solo da Cidade dos Meninos. Os dois pontos de inflexão, umidades volumétricas residuais, de ambos os solos se mantiveram praticamente inalterados, sendo de 26% e 10% para o solo do Campo Experimental e de 18% e 7,5% para o solo da Cidade dos Meninos.

A variação nas curvas características estão de acordo com o padrão de microfissuramento e aumento de poros do solo quando submetidos a gradientes de temperatura, o que foi verificado com o auxílio do microscópio eletrônico.

A condutividade hidráulica não saturada em função da umidade volumétrica foi determinada a partir das condutividades hidráulicas saturadas e das curvas características de sucção utilizando-se das equações propostas por van Genuchten (1980). Este modelo não consegue simular adequadamente dois pontos de inflexão. No caso dos solos do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos, pode-se dizer que este modelo simula bem os dados experimentais, até a sucção de 100kPa. A condutividade hidráulica não saturada se demonstrou dependente da temperatura. O aumento da temperatura fez com que as permeabilidades não saturadas apresentassem uma relação crescente com a mesma.

A temperatura induz a variação de volume nos corpos de prova aquecidos. Para o solo da Cidade dos Meninos a variação de volume se apresentou inferior a variação volumétrica dos corpos de prova do solo do Campo Experimental. Este comportamento ocorreu devido aos baixos índices de vazios iniciais dos corpos de prova da Cidade dos Meninos. A variação de volume para ambos os solos é crescente com a temperatura até atingir um valor máximo mantendo-se constante a partir deste valor. Este fato está correlacionado com o limite de contração dos solos, ou seja, a máxima deformação que estes podem atingir.

### **8.1.5 Aplicação da Técnica de Dessorção Térmica**

Quanto à aplicação da técnica de dessorção térmica, pode-se afirmar com base nos estudos aqui realizados que esta é bastante promissora. A temperatura tende a aumentar a condutividade hidráulica e diminuir a sucção, facilitando o transporte de um dado contaminante em um meio poroso. Os parâmetros térmicos evidenciam que esta é uma técnica que pode realmente ser aplicada em solos arenosos e argilosos, pois ambos conduzem calor de maneira satisfatória. Os solos

arenosos permitem que o fluxo de calor seja transmitido mais rapidamente. Já os solos argilosos têm uma alta capacidade de reter calor. Esta tendência tende a aumentar com o acréscimo da temperatura. Além disto, o aquecimento dos solos induz ao aparecimento de microfissuras que também podem vir a ajudar no transporte do contaminante por advecção e dispersão.

## **8.2** **Sugestões para pesquisas futuras**

O estudo do comportamento dos parâmetros de solos aquecidos ainda é um desafio. Existem ainda muitos aspectos a se pesquisar e várias questões a serem elucidadas. A seguir são apresentadas algumas sugestões e recomendações para pesquisas futuras, com o objetivo de completar e comprovar os dados apresentados.

Com relação aos estudos físico-químicos, estes devem ser mais aprofundados. Uma sugestão seria o estudo de como a macroporosidade e microporosidade são afetados pela temperatura. Deveriam ser feitos ensaios utilizando-se do método da mesa de tensão bem como a contagem de poros em microscópio eletrônico.

É necessário a fabricação de uma sonda térmica que atenda as necessidades dos solos tropicais brasileiros, com uma faixa de trabalho consistente com as condutividade térmicas, esta sonda tem que ser adaptável a medidas de campo.

Recomenda-se a construção de um protótipo instrumentado com sensores de umidade, pressão e de temperatura que permitam analisar o fluxo de calor dentro do solo. Poderia ser realizada uma posterior comparação numérica experimental do fluxo de calor, empregando os parâmetros aqui obtidos.

Seria interessante estender os estudos térmicos para outros tipos de solos, sendo necessário também desenvolver amplo estudo do comportamento solo-contaminante com a temperatura, indicando-se a eficiência de se tratar um determinado tipo de solo com um dado contaminante.

Como ainda não existem dados suficientes sobre os parâmetros térmicos, é necessário um amplo estudo envolvendo solos fabricados e naturais para que se

possa ter um banco de dados que balissem a aplicação da técnica de dessorção térmica e que forneça parâmetros aplicáveis aos solos tropicais brasileiros.

Recomenda-se a aplicação da técnica de dessorção térmica em uma área experimental, que poderia ser a Cidade dos Meninos, uma vez que os parâmetros termo-hidráulicos já foram aqui determinados. A área experimental seria equipada com aparelhos de monitoração de fluxo de calor, umidade, temperatura e pressão. Poderiam ser analisados os comportamentos físico-químicos, termo-hidráulicos e de resistência dos solos, antes e após a aplicação de calor, sendo também avaliada a eficiência da remoção do contaminante.