

6 Equipamentos e Metodologias de Ensaio

Antes de propor uma metodologia para se avaliar a técnica de dessorção térmica, é necessário que se conheça os parâmetros e índices envolvidos no problema. A Tabela 14 contém desde os parâmetros e índices mais básicos, presentes em qualquer tipo de pesquisa, até os mais específicos, para o caso de fluxo de temperatura e volatilização dos contaminantes, bem como, quais os parâmetros determinados e quais os parâmetros retirados de correlações. Para a determinação de um certo parâmetro a técnica que será utilizada está apresentada na coluna Determinação. Os parâmetros ou índices que não forem determinados serão obtidos por correlações, listadas na segunda coluna da Tabela 14.

Tabela 14 – Parâmetros necessários nas análises

Parâmetros / Índices	Correlações	Determinação
Peso específico natural, peso específico real dos grãos, umidade natural, limites de consistência, análise granulométrica	Por correlações determina-se uma série de outros parâmetros (índice de vazios, porosidade, peso específico seco e saturado, grau de saturação, etc.)	Caracterização completa do solo
Propriedades dos contaminantes: ponto de ebulição, pressão de vapor, solubilidade na água		Dados apresentados anteriormente na Tabela 3, ou se necessário, retirado de outras fontes bibliográficas.
Fluxo de temperatura		Imposto
Condutividade Térmica (λ)		Será determinado utilizando-se do método de agulha de aquecimento conforme descrito no item 6.2
Teor de umidade volumétrica	$\theta = f(w) \Rightarrow \theta = \frac{\gamma_d}{\gamma_w} \cdot w$	
Calor específico do solo (c_n), da água (c_w) e do ar (c_a)	Calor específico da água e do ar são tabelados, conforme descrito nas Tabelas 5 e 7	Será determinado utilizando-se do método de agulha térmica de acordo com o item 6.2

Tabela 14 (continuação) - Parâmetros necessários nas análises

Parâmetros/Índices	Correlações	Determinação
Capacidade de Aquecimento volumétrico	$C = \rho \cdot c$ <p>e</p> $C = \theta_s C_s + \theta_w C_w + \theta_a C_a$	
Difusividade térmica (D)		Método da Agulha Térmica (item 6.2)
Condutividade hidráulica saturada (k)		Determinação em permeâmetros de carga constante e parede flexível, conforme o item 6.1
Curva característica de sucção		Determinada com a técnica do papel filtro, de acordo com item 6.3
Condutividade hidráulica não-saturada (k_θ)	Determinada a partir da condutividade hidráulica saturada (k) e curva de sucção através das equações de Van Genuchten (1980)	
Condutividade hidráulica saturada com temperatura controlada		Adaptação de um permeâmetro de carga constante e parede flexível a aplicadores e controladores de temperatura altamente precisos. Sua descrição se encontra no item 6.4
Difusividade térmica do vapor (D_{TV}), difusividade isotérmica do vapor ($D_{\theta V}$), difusividade térmica do líquido (D_{TL}), difusividade isotérmica do líquido ($D_{\theta V}$)	Correlações com constantes e com as curvas características de sucção e condutividade hidráulica não saturada.	

Os próximos itens apresentarão às descrições detalhadas dos equipamentos utilizados nos ensaios, assim como a metodologia empregada.

6.1 Condutividade Hidráulica Saturada

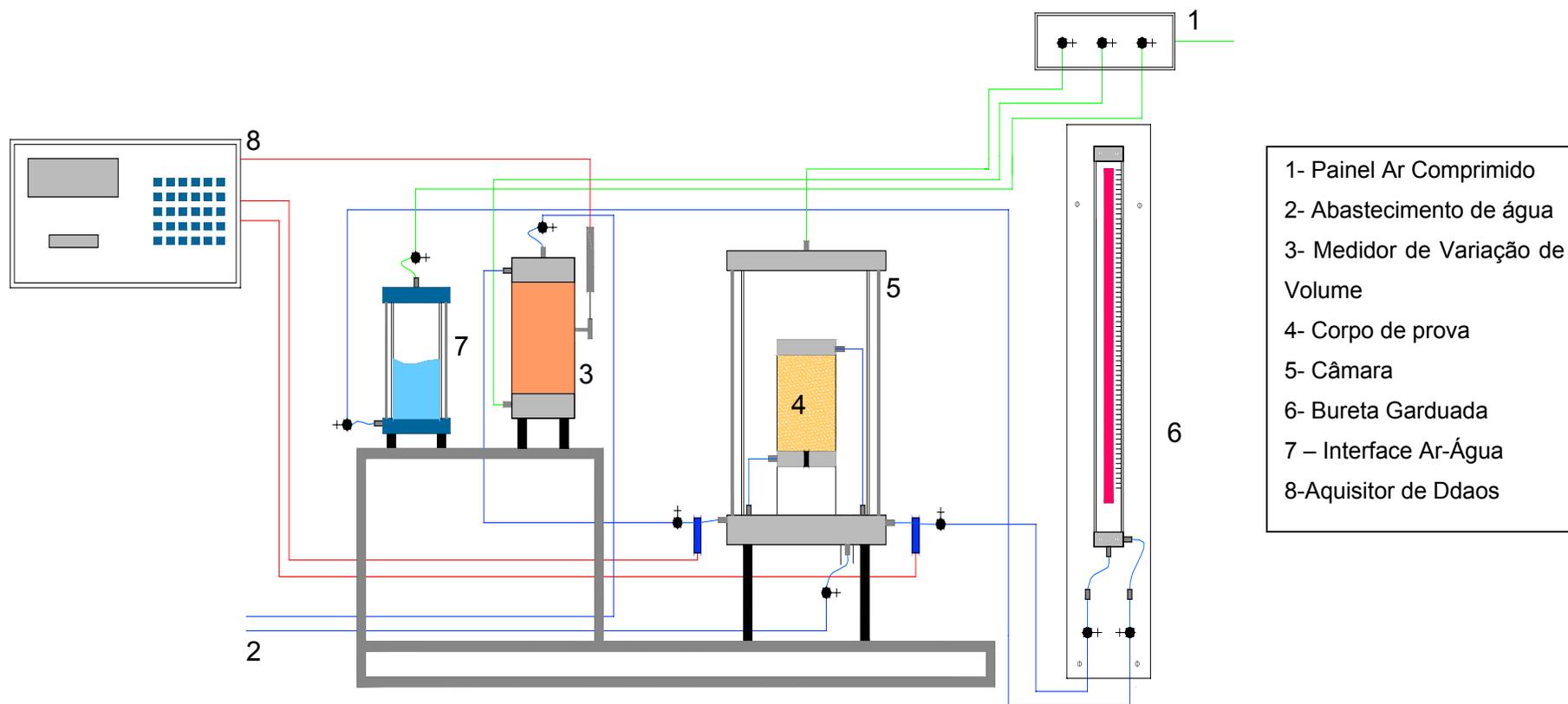
O equipamento de ensaio, desenvolvido no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio, consiste de um permeâmetro de parede flexível para a realização de ensaios com carga constante. A Figura 19 apresenta a visão geral do equipamento, enquanto que a Figura 20 apresenta um diagrama esquemático do mesmo.



Figura 19 – Permeâmetro desenvolvido no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio

O fluxo neste equipamento é vertical ascendente, com medidas do volume de entrada e de saída de fluido das amostras. O pedestal da base e o cabeçote superior medem 10,16cm de diâmetro e a câmara pode acondicionar corpos de prova de até 25cm de altura.

Neste equipamento é utilizado um sistema de aplicação de pressão a ar comprimido. O painel de aplicação de pressão é composto por três válvulas, sendo na primeira linha de válvulas, a da esquerda, utilizada para aplicar pressão na base e a da direita para aplicar pressão no topo. A válvula inferior é usada para aplicar a tensão confinante.



- 1- Painel Ar Comprimido
- 2- Abastecimento de água
- 3- Medidor de Variação de Volume
- 4- Corpo de prova
- 5- Câmara
- 6- Bureta Garduada
- 7 – Interface Ar-Água
- 8-Aquisitor de Ddaos

Figura 20 – Representação esquemática do permeâmetro

A tensão confinante é aplicada com ar comprimido através de uma interface ar-água e medida através de um transdutor elétrico de pressão, marca Schaevitz, com capacidade de 1000kPa, devidamente calibrado. Os métodos utilizados para a calibração de todos os instrumentos elétricos utilizados e suas respectivas curvas de calibração estão apresentados no Apêndice A

O gradiente hidráulico é estabelecido para amostra por meio de aplicação de pressões diferentes no topo e na base. Essas pressões também são medidas com transdutores elétricos de pressões devidamente calibrados, conforme Apêndice A. A pressão no topo é medida no mesmo transdutor que mede a tensão confinante. O transdutor elétrico de pressão usado para medir a pressão da base, também é da marca Schaevitz, com capacidade de 1000kPa.

A base de cada amostra é ligada a um medidor de variação de volume que funciona também como interface. Os medidores foram construídos na oficina do próprio laboratório. Os detalhes de projeto podem ser vistos em Borges (1996). Uma pressão de ar comprimido é aplicada no reservatório inferior e transmitida ao fluido de percolação, contido no reservatório superior, através de um êmbolo. O fluido sai gradualmente do reservatório, sendo injetado na base da amostra. Existe um transdutor de deslocamento LSC-HS, acoplado ao êmbolo do medidor de variação de volume que indica o volume que entra na amostra através de uma curva de calibração, e que se encontra no Apêndice A.

Os sinais elétricos advindos dos transdutores são captados pelo sistema de aquisição de dados – ORION, onde são convertidos para unidades de engenharia através das curvas de calibração, que estão apresentadas no Apêndice A.

O topo é ligado a uma bureta com capacidade volumétrica de 5cm^3 , com resolução de $0,1\text{cm}^3$, onde é medido o volume de fluido que sai da amostra.

O equipamento conta ainda com um sistema de distribuição de água para os medidores de variação de volume. Quando o reservatório do fluido do medidor de variação de volume esvazia, o sistema permite o seu abastecimento com água.

6.1.1 Metodologia de Ensaio

Para corpos de prova compactados conforme descrito anteriormente (5.2.1), com altura de 6cm e diâmetro de 10,14cm, os ensaios de permeabilidade foram

executados em amostras submetidas a diferentes temperaturas – temperatura ambiente (22°C), 50°C, 100°C, 150°C, 200°C, 250°C e 300°C, para o solo do Campo Experimental, e, temperatura ambiente (22°C), 100°C, 200°C, e 300°C, para o solo da Cidade dos Meninos.

Após sua fabricação todas as amostras foram secas ao ar para depois serem submetidas a uma determinada temperatura na mufla durante 8 horas.

O corpo de prova é então colocado na célula com papel-filtro e pedra porosa, separando as suas extremidades da base e do topo e envolvido por uma membrana de látex, presa com anéis de vedação à base e ao cabeçote.

Fecha-se a câmara e enche-se a mesma com água até um pouco mais que a altura do corpo de prova. Com a água colocada na câmara aplica-se a tensão confinante por meio da interface ar-água. Regula-se então as pressões que serão aplicadas na base e no topo da amostra, deixa-se percolar água pela amostra, e quando é atingido o regime de fluxo permanente as vazões de entrada e de saída são praticamente iguais. Admitindo-se que a amostra está saturada, calcula-se assim a condutividade hidráulica do solo. Este procedimento é repetido para os corpos de prova submetidos a diferentes temperaturas.

6.2 Condutividade Térmica e Calor Específico

A condutividade térmica governa a condição de fluxo permanente, enquanto a difusividade térmica é aplicada aos casos em que a temperatura varia com o tempo.

Existem várias maneiras de se medir condutividade térmica. Os métodos existentes são de fluxo de calor estacionário (temperatura constante) ou de fluxo de calor transiente (temperatura variando com o tempo). Quando o método estacionário é usado para estudar transferência de calor num solo não saturado aplica-se tanto um gradiente de temperatura como um gradiente de umidade. Ao aplicar-se uma diferença constante de temperatura numa coluna de solo, o solo próximo à face quente se torna seco, enquanto que o solo próximo à face fria se torna úmido. Devido a este inconveniente, alguns estudos incluindo o de Mitchell e Kao (1978), sugerem que os métodos estacionários somente devem ser

utilizados para medir condutividade e difusividade em solos secos, evitando-se desta maneira os gradientes de umidade.

Segundo Jackson e Taylor (1986) os métodos que utilizam fluxo de calor transiente são considerados mais adequados para solos. Dentre as vantagens do método transiente pode-se citar: o movimento de água em resposta a gradientes de temperatura é minimizado e não é necessário uma longa espera para que os gradientes térmicos se tornem constantes. de Vries (1957) sugere o uso de pequenos gradientes de temperatura, para se minimizar os movimentos de água devido a aplicação de gradientes de temperatura.

Alguns autores, como por exemplo, Jackson e Taylor (1986) e Farouki (1986), indicam que o método da agulha térmica (ou sonda térmica) é um método rápido e conveniente para medir a condutividade térmica de solos *in-situ* ou em laboratório.

A agulha é inserida no solo que será ensaiado, e deve ser suficientemente fina para não causar amalgamentos ou distúrbios no solo. A agulha térmica consiste de um sistema aquecedor que produz energia térmica a uma taxa constante e de um sensor de temperatura (termopar). A razão de aumento da temperatura da agulha depende da condutividade térmica do meio que ela está inserida.

A equação genérica da condução de calor, a qual descreve tanto o fluxo de calor transiente quanto o estacionário é:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \nabla^2 T \quad (59)$$

onde: T – temperatura (°K)

t – tempo (s)

D – difusividade térmica (m²/s)

A teoria do método da agulha térmica é baseado na teoria da fonte linear de aquecimento num espaço semi-infinito, para um meio homogêneo e isotrópico. O fluxo de calor que sai da sonda atravessa o material que está sendo ensaiado, com uma difusividade térmica (D), seguindo a equação geral de Fourier. Para um fluxo de calor unidimensional na direção longitudinal a equação 59 se torna:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \cdot \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (60)$$

A relação entre condutividade térmica λ e difusividade térmica D é dada por:

$$D = \lambda \cdot C \quad (61)$$

onde: C – calor de aquecimento volumétrico = calor específico x densidade

Para coordenadas cilíndricas, correspondentes a direção radial ao redor da agulha térmica, a equação 60, pode ser descrita de acordo com:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = D \left[\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \left(\frac{1}{r} \right) \cdot \left(\frac{\partial T}{\partial r} \right) \right] \quad (62)$$

onde r – distância radial da fonte (m).

Para medidas da condutividade térmica a fonte linear infinita é aproximada por um longo fio aquecido eletricamente, colocado num corpo de prova cilíndrico. A corrente de aquecimento é fornecida pelo fio e o aumento de temperatura é medido em um termopar colocado próximo ao fio.

Carlsaw e Jaeger (1959) assumiram que o calor é produzido desde um tempo $t = 0$, com uma taxa constante, q , por unidade de comprimento da sonda, a solução resultante para o aumento de temperatura $(T - T_0)$ para uma distância radial r da fonte é representado por:

$$(T - T_0) = \left[\frac{q}{4\pi \cdot \lambda} \right] \cdot -E_i \left(\frac{-r^2}{4 \cdot D \cdot t} \right) \quad (63)$$

onde: q – calor produzido por unidade de tempo e unidade de comprimento (W)

λ – condutividade térmica (W/m²K)

D – difusividade térmica (m²/s)

t – tempo (s)

T_0 – temperatura no tempo $t = 0$ e,

o termo $-E_i(-r^2/4 \cdot D \cdot t)$, é uma integral exponencial que pode ser aproximada a uma série de potência logarítmica, conforme mostrado na equação 64:

$$-E_i\left(-r^2/4 \cdot D \cdot t\right) = \int_{-r^2/4 \cdot D \cdot t}^0 (1/\mu) \exp(-\mu) d\mu = -\gamma - \ln(r^2/4 \cdot D \cdot t) + (r^2/4 \cdot D \cdot t) + (r^2/4 \cdot D \cdot t)^2/4 + \dots \quad (64)$$

onde: γ - constante de Euler (0,5772...) e μ - variável de integração.

Segundo Jackson e Taylor (1986) para valores de $r^2/4 \cdot D \cdot t \ll 1$ todos os termos depois do termo logarítmico podem ser negligenciados. Os erros causados por se ter negligenciado os termos após o segundo termo da série de potência e os erros causados pelo raio finito da fonte de aquecimento são infinitesimais. Para o período de aquecimento a temperatura aumenta considerando-se:

$$(T_1 - T_0) = \frac{q}{4\pi \cdot \lambda} \left[d + \ln \frac{t_1}{t_0} \right] \quad \text{para } t_0 < t_1 \quad (65)$$

onde: d – constante obtida através da simplificação da série de potência

t_1 – tempo final do período de aquecimento.

Numa agulha térmica real, os valores de temperatura T_0 e T_1 correspondem aos tempos t_0 e t_1 respectivamente. As temperaturas são medidas no interior da agulha (próximo da fonte de aquecimento) por intermédio de um termopar situado num ponto equidistante das extremidades da mesma.

A condutividade λ é calculada pela equação de medida da inclinação S e a inclinação teórica $\frac{q}{4\pi \cdot \lambda}$ dada pela equação 65. É mais conveniente plotar o aumento de temperatura x logaritmos decimais de tempo, e, conseqüentemente a inclinação passa a ser:

$$S = 2,303 \cdot \frac{q}{4\pi \cdot \lambda} \quad (66)$$

O calor produzido q é obtido através de medidas de corrente e resistência, ou usando a Lei de Ohm. Se I é a corrente em ampères e R a resistência em ohm por centímetro de cilindro então $I^2 R$ é o calor produzido em Watts. Substituindo $I^2 R$ por q e arrumando-se a equação obtém-se:

$$\lambda = \frac{18,34I^2 R}{S} \quad (67)$$

Uma agulha térmica difere da idealizada fonte linear por ser uma fonte de aquecimento cilíndrica com o comprimento finito, raio, e, condutividade térmica própria. E ainda existe a resistência de contato dela com o meio. Para se garantir as condições de fluxo radial ao redor da agulha sugere-se que seu comprimento seja pelo menos 25 vezes o seu diâmetro. O tempo necessário para que a curva de temperatura x logaritmo do tempo se torne linear depende do raio da agulha e de suas constantes térmicas, do meio circundante e das resistências de contato. Farouki (1982) mencionou que este tempo pode ser menor do que um minuto para agulhas com raio de 1mm, chegando a uma hora para agulhas com diâmetro de 1cm.

Um diagrama esquemático de uma sonda térmica utilizada nas medidas de condutividade térmica está apresentado na Figura 21. A sonda térmica normalmente é de aço inoxidável, pôr ser um material de baixo calor específico e alta difusividade térmica.

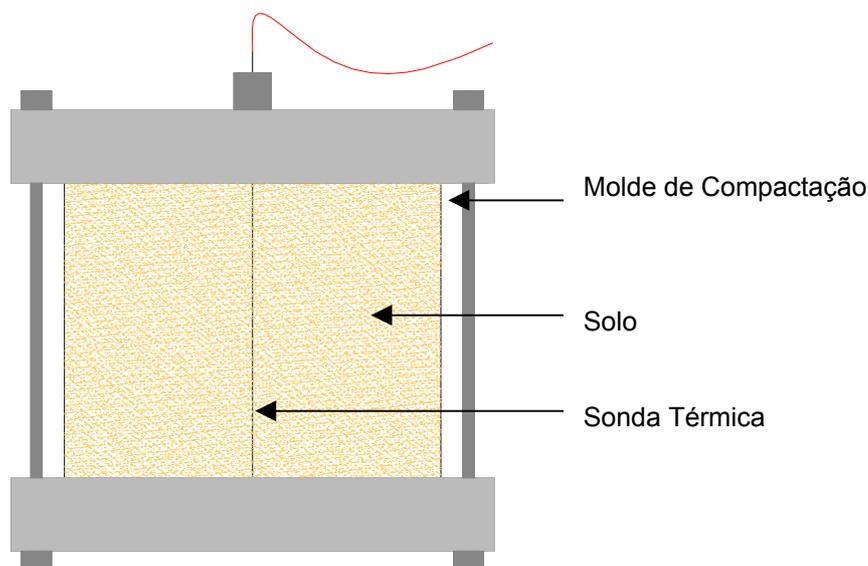


Figura 21 – Esquema de sonda térmica

Uma amostra de solo é compactada dentro de um molde. Insere-se a agulha térmica no centro. A sonda térmica consiste em produzir energia térmica de aquecimento a uma carga constante e de um elemento que meça a temperatura, tal como um termopar. A razão do aumento da temperatura da sonda depende da condutividade térmica do meio que a está envolvendo. A condutividade térmica é medida conforme a equação (65).

As medições de condutividade térmica que se utilizam da sonda térmica existentes na literatura consultada, em essência são todas iguais, o que as distingue são as formas de inserção da sonda e as maneiras de efetuar e controlar a compactação.

Mitchell e Kao (1978) usaram o ensaio da agulha térmica para solos desde argilas altamente plásticas até pedregulhos bem graduados, tendo sucesso em suas experiências. A variação de resistividade térmica medida vai desde $30^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ a $300^{\circ}\text{C}\cdot\text{cm}/\text{W}$ e as temperaturas as quais foram submetidas as amostras variaram de -10°C a 90°C . Oliveira Jr. (1993) utilizou o método da sonda térmica para determinar a condutividade em função do grau de saturação, provando que esta varia com a saturação. Este resultado já era esperado, evidenciando desta forma que a condutividade térmica que se está buscando é uma função que depende do teor de umidade do solo.

Para a realização de ensaios da presente tese adquiriu-se uma sonda de imersão de condutividade térmica da empresa ALMEMO modelo FP A437-1, que fornece um fluxo de calor constante quando colocada dentro do material a ser ensaiado. Este fluxo é mantido até que o equilíbrio seja estabelecido entre a energia térmica transferida para o material e a energia térmica dissipada. Esta sonda é acoplada a um *data-logger* portátil, modelo ALMEMO 2290, que faz os cálculos de condutividade térmica de acordo com o que foi descrito anteriormente. Uma foto do conjunto sonda/*data-logger* é apresentado na Figura 22. O diâmetro da sonda é de 1,5mm, com comprimento de 12 cm. A sonda trabalha com dois termopares Pt100, sendo de 6cm a menor espessura de solo que se pode medir a condutividade térmica. A condutividade térmica é determinada com unidade $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$. A faixa de trabalho é da ordem de 0,025 a 0,410 $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$, com resolução de 0,001 $\text{W}/\text{m}^{\circ}\text{K}$. Este medidor permite a determinação de condutividades térmica de maneira fácil e rápida.



Figura 22- Sonda térmica e *Data-Logger*

Para a medida do calor específico um novo conjunto solo-molde foi acoplado a placas isolantes. Escolheu-se latão para o novo molde de compactação, uma vez que este apresenta uma capacidade de aquecimento maior que a do alumínio e ferro. O molde de compactação de latão tem o mesmo diâmetro que o anterior, 10,14cm e uma altura de 6,00cm. A este novo molde foram acopladas placas isolantes e impermeáveis de ACETAL, com temperatura de utilização em trabalho contínuo entre 40 °C e 100°C. A foto do sistema molde de latão e placas isolantes está apresentada na Figura 23.

A Figura 23(a) mostra o detalhe dos anéis de vedação utilizados no conjunto placas-isolantes-molde. A Figura 23(b) mostra o detalhe da placa isolante do topo onde foi instalado uma entrada para a agulha térmica. Essa entrada também está devidamente isolada com anéis de vedação entre a agulha térmica e a rosca, fazendo com que todo o sistema esteja hermeticamente fechado.

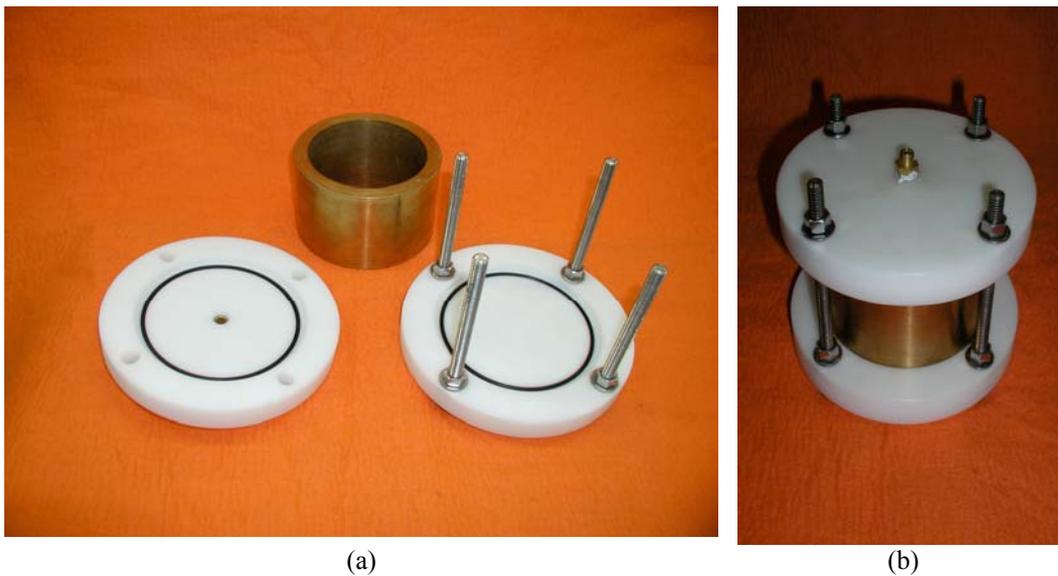


Figura 23 – Molde de latão e placas isolantes para a medição do calor específico.

A agulha térmica é inserida no centro do corpo de prova e todo o sistema molde-placas isolantes e solo compactado é colocado em banho-maria conforme ilustra a Figura 24.



Figura 24 – Medição do calor específico

A temperatura no centro da amostra é medida como uma função do tempo, com o auxílio da sonda térmica, sendo que esta funciona neste momento apenas como termopar, Pt 100 com resolução de 0,01°C. A temperatura da água em

banho-maria é medida por um termômetro digital da marca MINIPA, modelo MT-511, com resolução de 0,1°C, visto na Figura 25.



Figura 25 – Termômetro digital MINIPA

A relação teórica entre a percentagem de variação de temperatura central e o fator tempo adimensional para fluxo de calor radial para estas condições de contorno radiais está apresentada na Figura 26 (Mitchell e Kao, 1978). O calor específico, c_s , pode ser calculado com a adição das seguintes relações:

$$D = \frac{d^2 T_{50}}{t_{50}} \quad (68)$$

onde:

D – difusividade (m^2/s)

t_{50} – tempo no qual ocorre 50% da mudança de temperatura no centro da amostra

T_{50} – fator tempo para 50% de variação da temperatura (Figura 26)

d- diâmetro do cilindro

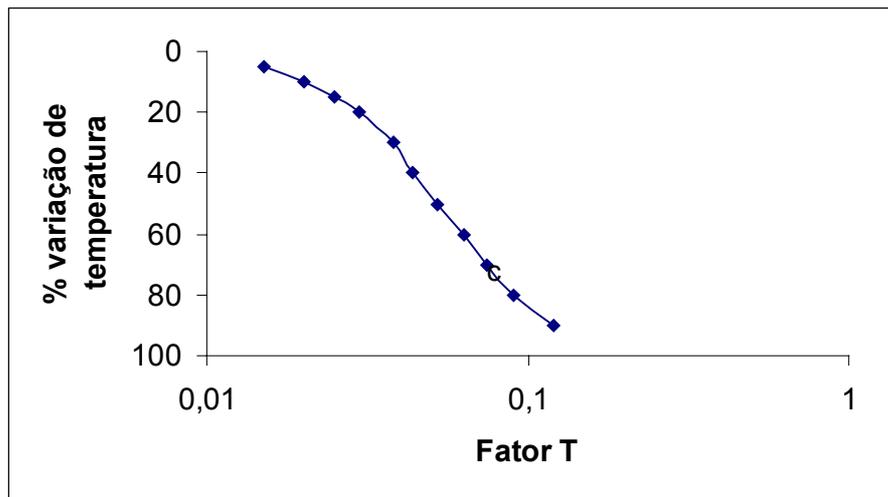


Figura 26 – Curva de fator tempo para fluxo de calor radial. Michell e Kao (1978)

Sabe-se que a difusividade, D (m^2/s), é dada pela razão da condutividade térmica, λ ($W/m \cdot ^\circ K$) pela capacidade de aquecimento volumétrico, $C(\theta)$ ($kJ/kg \cdot ^\circ K$), conforme:

$$D = \frac{\lambda}{C(\theta)} \quad (69)$$

O volume total de um determinado solo é composto pelas fases sólidas, líquidas e gasosas, sendo a capacidade de aquecimento volumétrico dependente da componente de cada fase, de maneira que:

$$C(\theta) = \frac{V_s}{V} \cdot C_s + \frac{V_w}{V} \cdot C_w + \frac{V_a}{V} \cdot C_a \quad (70)$$

onde:

C_s , C_w e C_a , são as capacidades de aquecimento volumétrico dos sólidos, da água e do ar respectivamente.

V_s , V_w e V_a os volumes ocupados pelas frações sólidos, água e ar.

V – volume total.

De acordo com a Tabela 5, a capacidade de aquecimento volumétrica do ar, $0,00029 \text{ cal/g}^\circ C$, é da ordem de 10^{-4} vezes menor que a dos sólidos e a da água, transformando o último termo em desprezível. Na mesma Tabela 5 pode-se retirar o valor da capacidade de aquecimento volumétrico da água, $1 \text{ cal/g}^\circ C$. A

capacidade de aquecimento dos sólidos é dada pelo produto do calor específico do material pela sua massa específica seca.

Substituindo-se os valores das capacidades de aquecimento volumétrico da água e do ar, a definição da capacidade de aquecimento volumétrico em dos solos e a definição de difusividade térmica (equação 69) na equação 70 obtém-se:

$$\frac{\lambda}{D} = \frac{V_s}{V} c_s \cdot \rho_d + \frac{V_w}{V}$$

$$\frac{V_s}{V} c_s \cdot \rho_d = \frac{\lambda}{D} - \frac{V_w}{V} \therefore c_s = \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{V}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_d} - \frac{V_w}{V} \cdot \frac{V}{V_s} \cdot \frac{1}{\rho_d} \quad (71)$$

$$c_s = \frac{\lambda}{\rho_d \cdot D} (1 + e) - w$$

onde: c_s – calor específico dos sólidos (J/m³°K)

ρ_d – densidade específica seca (g/cm³)

w – umidade em peso (%)

λ – condutividade térmica radial (W/m.°K)

e – índice de vazios

6.2.1 Metodologia de Ensaio

6.2.1.1 Condutividade Térmica

Os corpos de prova aqui utilizados foram compactados conforme descrito no item 5.2.1. Vale ressaltar que todos os corpos de prova foram compactados adicionando-se 210mL de água a 1kg de solo seco para o solo do Campo Experimental e 170mL e 1kg de solo para o solo da Cidade dos Meninos.

Após a compactação o corpo de prova secava ao ar, dentro do molde de compactação por períodos diferentes – 24hs, 48hs, 72hs, 96hs, e assim por diante até completar o ciclo de dezoito dias.

Com o tempo de secagem concluído, foram feitas as medidas da condutividade térmica. Para um mesmo corpo de prova fez-se cinco medidas e adotou-se a média destas como valor de condutividade térmica para aquela

determinada umidade. Foram realizados 19 ensaios de condutividade térmica, variando com a umidade, para o solo do Campo Experimental e 13 ensaios de condutividade térmica, variando com a umidade, para o solo da Cidade dos Meninos. Para o solo seco, com umidade zero, a condutividade térmica foi medida após deixá-lo em estufa a 105°C por 24 horas.

Foi necessário utilizar uma broca com o diâmetro imediatamente inferior ao diâmetro da agulha térmica para fazer o pré-furo do corpo de prova, pois os corpos de prova adquiriram uma rigidez que tornou impossível a inserção da agulha sem danificá-la.

6.2.1.2 Calor Específico

Compactou-se os corpos de prova no novo molde de latão seguindo as mesmas metodologias descritas em 5.2.1. Os corpos de prova após compactados eram secos ao ar, analisando-se assim a dependência do calor específico com a umidade. Foram ensaiados quatro corpos de prova para ambos os solos.

Antes do fechamento do sistema molde-placas isolantes, fazia-se um pré-furo com uma broca, de 1,5mm de diâmetro, nos corpos de prova. Antes de se inserir o molde em banho-maria media-se a condutividade térmica do solo.

Para a determinação do calor específico, colocava-se o conjunto composto de molde, placas isolantes e sonda térmica em banho-maria a temperaturas diferentes: 40°C, 50 °C e 60 °C. Este procedimento foi seguido com o intuito de verificar a dependência do calor específico com a temperatura.

Os cálculos foram realizados conforme descrito anteriormente, equação 71 e Figura 26. Determinou-se o calor específico do solo do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos em função da temperatura.

O calor específico dos solos é dada pela relação calor específico x temperatura na umidade higroscópica.

6.3 Curvas Características de Sucção

A curva característica de sucção dos solos é uma relação que associa o aumento de sucção matricial ao decréscimo da umidade do solo ou vice-versa.

Para realizar-se a determinação da curva característica utilizou-se a técnica de papel-filtro. Villar e de Campos (2001) mostraram que esta técnica apresenta resultados próximos se comparados aos obtidos por outras técnicas, como por exemplo, o uso de dessecadores, transdutor de pressão e tensiômetros instalados no solo. Para o uso desta técnica alguns cuidados na determinação da umidade do papel filtro tem que ser levadas em consideração.

A técnica do papel-filtro baseia-se no princípio de que em um solo com alguma umidade, em contato com o papel-filtro, com umidade menor, faz com que este último absorva certa quantidade de água do solo até que se atinja um equilíbrio de pressões. Este fluxo de água entre a amostra de solo e o papel-filtro pode ocorrer de duas maneiras: através de fluxo de vapor ou fluxo capilar. Para determinação da sucção mátrica esta transferência se dá através de fluxo capilar.

A determinação da sucção mátrica envolve a colocação do papel filtro em contato com o solo. Discute-se muito a dificuldade de se garantir um bom contato entre o papel e o solo, quando se quer medir sucção mátrica. Contudo alguns estudos tem mostrado, incluindo Marinho (1994) que o grau de contato tem pouca influência desde que o tempo de equilíbrio adequado seja utilizado.

O tempo de equalização da troca de água do solo com o papel filtro, proposto pela norma americana, ASTM-D5298-92, é de 7 dias para a determinação da sucção mátrica. O tempo sugerido pela ASTM está de acordo com os estudos publicados por Marinho (1997), Swarbrick (1995) e Villar e de Campos (2001). Alguns autores, como Ridley (1995), sugerem prazos maiores para valores de sucção baixos, chegando-se até a 14 dias para a sucção de 200kPa.

A norma americana ASTM-D5298-92 determina a colocação do papel filtro na estufa por 16 horas antes de ser colocado em contato com o solo. Segundo Marinho (1997), esse procedimento pode afetar as características de absorção do papel, alterando assim a curva de calibração. O autor acima citado, propõe a utilização do papel diretamente de sua embalagem. Este procedimento foi empregado neste trabalho.

O papel-filtro utilizado foi o Whatman N.º 42. A ASTM-D5298-92 apresenta a curva de calibração, proposta por Chandler *et al.* (1992), em função do teor de umidade do papel, dada pelas seguintes equações:

Umidade > 47 %:

$$Sucção (kPa) = 10^{(6,05 - 2,48 \times \log w)} \quad (72)$$

Umidade ≤ 47%

$$Sucção (kPa) = 10^{(4,84 - 0,0622 \cdot w)} \quad (73)$$

6.3.1 Metodologia de Ensaio

Para a obtenção das amostras de solo que foram utilizados na determinação da curva característica, o solo foi compactado sempre com a mesma umidade e energia de compactação. Conforme descrito na seção 5.2.1, para cada corpo de prova gerado, retiravam-se duas amostras com anéis moldadores nas extremidades dos corpos de prova. Estes anéis moldadores têm o diâmetro de 5,04 cm e altura de 2,00 cm. Existem 12 anéis com estas dimensões no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio.

Foram determinadas as curvas características de sucção para as amostras de solo submetidas a diferentes temperaturas, temperatura ambiente, 50°C, 100°C, 200°C, e 300°C para o solo do Campo Experimental e da Cidade dos Meninos. Após a extração das amostras estes corpos de prova foram secos ao ar para depois serem submetidas a diferentes temperaturas na mufla durante 8 horas.

Quando os corpos de prova eram retirados da mufla, eram umedecidos com diferentes quantidades de água, com a ajuda de uma pipeta, realizando-se assim uma trajetória de umidecimento. As amostras umidecidas eram deixadas em câmara úmida por 24 horas, enroladas em filme de PVC e colocados dentro de sacos plásticos, para que pudesse existir uma melhor equalização de umidade nas mesmas.

Fez-se também a trajetória de secagem para o solo do Campo Experimental. Após a retirada dos amostras da Mufla estas foram saturadas e depois secas ao ar em diferentes intervalos de tempo.

Para as amostras de solos que não foram submetidas a incrementos de temperatura realizou-se tanto a trajetória de umidecimento quanto a de secagem. Para se determinar a trajetória de secagem, o corpo de prova quando retirado da mufla era saturado, e após esta saturação deixado secar ao ar em diferentes intervalos de tempo.

No solo da Cidade dos Meninos foi seguida somente a trajetória de secagem, uma vez que era pouca a quantidade disponível deste solo. Na retirada das amostras, subestimou-se a quantidade necessária de solo para os ensaios. Devido ao acesso restrito, sendo necessária autorização legal para entrar no local, não foi possível uma segunda visita para retirada de mais amostras indeformadas em tempo hábil.

O papel filtro foi cortado no mesmo diâmetro da amostra, tomando-se o mais rigoroso cuidado para que não existisse o contato entre o papel-filtro e qualquer coisa que pudesse transmitir umidade para o mesmo.

Colocou-se o papel filtro em contato com o solo e depois o conjunto foi envolvido com algumas camadas de filme de PVC. Em seguida, colocou-se uma camada de papel alumínio, fita adesiva e dois sacos plásticos, nesta seqüência.

O período de equalização foi de 14 dias, com as amostras mantidas dentro de uma caixa de isopor, com o intuito de minimizar a variação de temperatura nas amostras. Esta caixa era colocada no interior de uma sala com temperatura de aproximadamente 20°C.

Após esse período retirou-se o papel-filtro envoltório da amostra, pesando-se o papel em balanças analíticas de 3 e 4 casas decimais. O processo de pesagem do papel filtro para a determinação da sua umidade foi proposto por Villar e de Campos (2001). Remove-se o papel-filtro com pinça tomando-se o cuidado para que não hajam partículas de solo aderidas ao mesmo. Ao retirar a última camada do filme de PVC o cronômetro era acionado. Em seguida levou-se o papel filtro à balança e iniciou-se o monitoramento da perda de umidade do papel filtro durante 3 minutos, sendo os 2 primeiros minutos a cada 10s e o último a cada 15s. Assim, pode-se obter o gráfico do peso do papel filtro pela raiz do tempo, possibilitando uma extrapolação gráfica para a determinação do peso do papel quando em contato com o solo (tempo igual a zero).

Logo após a pesagem do papel e do corpo de prova, eles eram colocados na estufa a 105°C por 24 horas para a determinação da umidade. Como a balança é sensível à temperatura, sobre ela colocou-se um pedaço de isopor, de aproximadamente 2cm, para a determinação do peso, logo que o papel fosse retirado da estufa. O peso seco do papel foi obtido da mesma forma de quando se retirava o mesmo do contato com o solo.