4 Ensaios de Laboratório

4.1. Preparação dos Corpos de Prova

Para a realização dos ensaios de condutividade térmica e do calor específico dos solos, a metodologia de ensaio adotada neste trabalho foi a mesma utilizada por Duarte (2004) com algumas adaptações. Todos os ensaios foram realizados em corpos de prova compactados pelo processo estático, utilizando uma prensa de Adensamento Convencional modelo Bishop, exceto para os solos compostos por areia pura, AMG e AU, que foram compactados através de vibração.

Geralmente são utilizados três tipos de compactação de laboratório para determinação da relação entre umidade e peso específico, compactação através de impacto, através de vibração e por meio de processo estático. Nos diversos métodos de compactação existem alguns fatores que conduzem a aplicação de energias de compactação diferentes, como a má distribuição dos golpes nos ensaios dinâmicos e a colocação de camadas em volumes diferentes. Isto influencia de forma negativa os resultados de ensaios mecânicos realizados em corpos de prova compactados de maneira não uniforme. Por isso, optou-se por trabalhar com compactação estática e obter maior repetibilidade nos parâmetros.

Para determinar as tensões que seriam aplicadas em cada solo na compactação estática, foram realizados ensaios de Adensamento Convencional, com o intuito de se trabalhar com os corpos de prova partindo de uma mesma condição inicial de índice de vazios. Para as areias puras, AMG e AU, trabalhouse nas condições limites de índice de vazios, $e_{máx}$ e e_{min} , e em condições intermediárias.

4.1.1. Ensaios de Adensamento Convencional

Os ensaios de Adensamento Convencional foram realizados segundo os procedimentos especificados pelo Método de Ensaio da ABNT – MB 3336/90.

Foram utilizadas prensas de adensamento modelo Bishop (Figura 22) e anéis de adensamento com altura e diâmetro de 2cm e 7cm, respectivamente.



Bishop.



Figura 22 - Prensa de Adensamento Convencional (Prensa Oedométrica) modelo

Os corpos de prova foram moldados a partir de amostras deformadas. Para moldagem dos corpos de prova trabalhou-se com cerca de 100g de cada solo com umidades equivalentes aos seus limites de liquidez, garantindo assim a sua saturação. A preparação e a moldagem foram realizadas da seguinte maneira:

- Separava-se cerca de 100g de solo;
- Adicionava-se água destilada em quantidade suficiente para deixar o solo no seu limite de liquidez;
- Realizava-se a homogeneização do solo com a água com o auxílio de uma espátula;
- Armazenava-se o material homogeneizado em sacos plásticos fechados por pelo menos 24h em câmara úmida para permitir a sua hidratação;
- Colocava-se um papel filtro e o anel de adensamento sobre uma placa de vidro com superfície lisa;
- Preenchia-se o anel com o solo em camadas, com o auxílio de uma espátula, de modo que todo o seu volume fosse ocupado.

A Figura 23 apresenta fotografias que mostram algumas etapas do processo de moldagem.

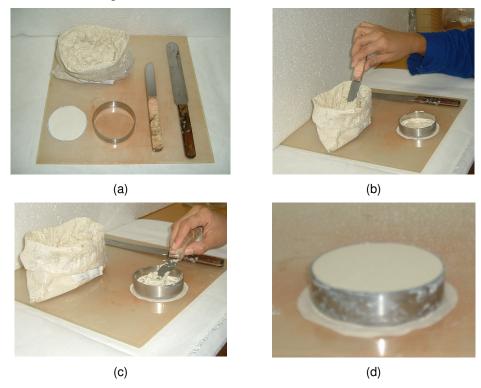


Figura 23 – Moldagem de corpo de prova para ensaio de adensamento convencional a partir de amostra deformada.

Os ensaios de adensamento foram feitos em 8 estágios de carregamento e 3 estágios de descarregamento. As cargas aplicadas foram de 5, 10, 20, 40, 80, 150, 300 e 600 KPa no carregamento e 150, 40 e 5 KPa no descarregamento.

A Figura 24 apresenta apenas as curvas resultantes dos estágios de carregamento para todos os solos ensaiados, visto que o descarregamento não foi levado em consideração para a escolha do índice de vazios e cargas a serem aplicadas no processo de compactação estática.

Observa-se através das curvas apresentadas na Figura 24 que o solo C100, composto somente por caulim foi o que menos se deformou axialmente, o que já era esperado pois, diferente da bentonita, o caulim não é expansivo e quase não absorve água de hidratação, pois praticamente não apresenta sais solúveis em sua composição, conforme foi apresentado na Tabela 6 da análise química. O material que mais se deformou foi o C40, composto por 60% de bentonita, pois além da sua propriedade expansiva natural quando em contato com água, esta bentonita em particular possui um alto teor de sais solúveis,

necessitando de uma quantidade de água significativa para a sua total saturação e hidratação.

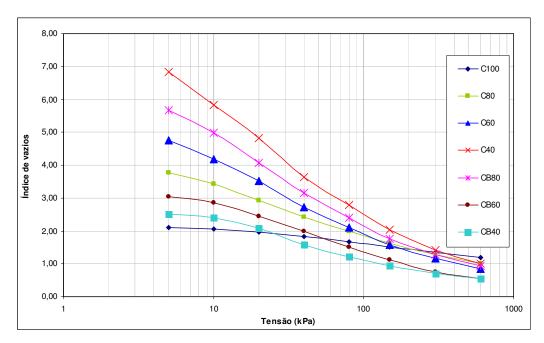


Figura 24 - Curvas resultantes da etapa de carregamento dos ensaios de adensamento convencional.

Observa-se através dos gráficos que os resultados dos ensaios foram coerentes, visto que as deformações axiais constatadas através da variação do índice de vazios durante o ensaio, aumentaram com o aumento da quantidade de bentonita nas misturas desta com o caulim, e diminuíram com a diminuição da quantidade de argila nas misturas de caulim, bentonita e areia. Os valores do coeficiente de adensamento Cv, que expressa a velocidade de deformação axial do solo, e do coeficiente de permeabilidade K obtidos através dos ensaios estão listados na Tabela 13.

Tabela 13 – Valores de Cv (cm²/s) e K (cm/s) resultantes dos ensaios de adensamento.

Solo	Cv x 10 ⁻⁴	K x 10 ⁻⁷
	(cm²/s)	(cm/s)
C100	7,2	1,183
C80	0,26	0,180
C60	0,076	0,069
C40	0,054	0,008
CB80	0,060	0,009
CB60	0,073	0,040
CB40	0,119	0,065

Através dos resultados da Tabela 13 observa-se que os valores de Cv diminuem à medida que aumentam as porcentagens de bentonita nas misturas desta com caulim, ou seja, do solo C100 ao solo C40, fato este explicado pela menor permeabilidade da bentonita, o que comprovam também os resultados da Tabela 13. Por outro lado, os valores de Cv aumentam à medida que as porcentagens de areia crescem nas misturas desta com caulim e bentonita, ou seja, do solo CB80 ao solo CB40, pois as areias são mais permeáveis. Entretanto, percebe-se que os valores de Cv encontrados para estas misturas são muito próximos aos valores encontrados para as misturas de caulim e bentonita. Isso se deve ao fato de a mistura caulim mais bentonita utilizada nos solos CB80, CB60 e CB40 ser de 40% e 60% respectivamente, além de a areia mal graduada possuir porcentagens de areia fina, média e grossa de 34%, 64% e 2%, respectivamente, tornando a mistura final pouco permeável.

A partir das curvas de adensamento apresentadas na Figura 24 definiu-se trabalhar com um índice de vazios inicial (após a compactação) em torno de 1,5 para todos os solos ensaiados, obtendo-se assim as respectivas tensões de compactação apresentadas na Tabela 14.

Tabela 14 – Tensões de compactação aplicadas na moldagem dos corpos de prova.

Solo	Tensão (KPa)	Solo	Tensão (KPa)
C100	156,24	CB80	216,88
C80	188,99	CB60	82,55
C60	171,17	CB40	46,66
C40	276,69	-	-

4.1.2. Compactação Estática

No processo de compactação estática a pressão de compactação é distribuída uniformemente sobre o topo de cada camada. A distribuição da pressão ao longo de cada camada depende do atrito lateral, que pode ter seu efeito reduzido através da lubrificação das paredes do molde ou pela redução da relação entre a espessura e a altura da camada.

Para se trabalhar com os corpos de prova partindo da mesma condição inicial de índice de vazios, ou seja, em torno de 1,5, as tensões aplicadas no processo de compactação estática para cada solo, as quais foram extraídas das curvas de adensamento, estão listadas na Tabela 14.

Antes da moldagem dos corpos de prova, separava-se cerca de 1kg de solo, adicionava-se água destilada de modo que o teor de umidade obtido fosse próximo ao seu limite de liquidez, garantindo assim a saturação. O solo era homogeneizado e armazenado em sacos plásticos numa câmara úmida para a sua completa hidratação durante pelo menos 48h antes da compactação. Os corpos de prova foram compactados na prensa de adensamento em uma única camada até estabilização das deformações.

Os moldes fabricados para a compactação estão apresentados em fotografias na Figura 25. Foram fabricados ao todo 03 moldes de alumínio e 03 moldes de latão para as medidas de condutividade térmica e calor específico. Foram fabricados ainda dois pares de colarinhos com alturas de 2,0cm e 2,5cm, e 03 pares de colarinhos com altura de 6,0cm. Os colarinhos com altura de 6,0cm foram fabricados para serem utilizados na compactação dos solos mais compressíveis, visto que para compactá-los e atingir o índice de vazios desejado, a quantidade de solo necessária era relativamente grande, em torno de 1,5Kg, o volume ocupado por essa massa também era grande e não cabia nos moldes existentes com os colarinhos de 2,0cm e 2,5cm.



Figura 25 - Moldes utilizados na compactação dos corpos de prova: molde de alumínio com espaçadores e cabeçote (a), molde de latão com colarinho de 6,0cm (b).

O molde de alumínio tem diâmetros interno e externo de 10,14cm e 14,9cm, respectivamente, e altura de 6cm. O molde de latão tem o mesmo diâmetro interno do anterior e altura de 8cm. Foram fabricados 15 espaçadores para auxiliar na moldagem e desmoldagem dos corpos de prova, sendo 06 de alumínio e 09 de PVC. Desses 15, 04 com 2cm de altura, 05 com alturas de 1,5cm e 06 com 1cm de altura. Um cabeçote metálico foi utilizado para que as

tensões aplicadas fossem uniformemente distribuídas na superfície do corpo de prova. Os colarinhos utilizados têm o mesmo diâmetro interno do molde.

Os corpos de prova foram moldados a partir de amostras deformadas. Para isto trabalhou-se com cerca de 1kg de solo para cada molde com umidades equivalentes aos seus limites de liquidez, garantindo assim a sua saturação. A preparação e a moldagem foram realizadas da seguinte maneira:

- Separava-se cerca de 1kg de solo;
- Adicionava-se água destilada em quantidade suficiente para deixar o solo no seu limite de liquidez;
- Realizava-se a homogeneização do solo com a água manualmente e com o auxílio de uma espátula;
- Armazenava-se o material homogeneizado em sacos plásticos fechados por pelo menos 48h em câmara úmida para permitir a sua hidratação;
- Colocava-se uma pedra porosa já saturada, um papel filtro e o molde de compactação sobre uma bancada com superfície lisa;
- Preenchia-se o molde com o solo em camadas com o auxílio de uma espátula;
- Ocupado o volume com a massa de solo pré-determinada (calculada anteriormente), colocava-se um papel filtro sobre a superfície do solo horizontalizada, seguido de uma pedra porosa e espaçador que servia como cabeçote;
- O molde era então levado para a prensa de adensamento onde o corpo de prova era compactado até estabilização das deformações.

A Figura 26 apresenta fotografias que mostram algumas etapas do processo de moldagem.

Para os solos mais compressíveis, ou seja, que continham uma porcentagem maior de bentonita, aplicou-se uma sobrecarga durante a compactação estática para acelerar o adensamento, visto que as camadas de solo de cerca de 8cm a 20cm dificultavam a saída de água do material quando compactados com as cargas definidas a partir das curvas de adensamento. Alguns solos passaram aproximadamente 30 dias adensando, mesmo com sobrecargas consideráveis sendo aplicadas. Os solos eram compactados para que sua altura final fosse de aproximadamente 7cm, obtendo-se assim o índice de vazios próximo de 1,5, que era o desejado.

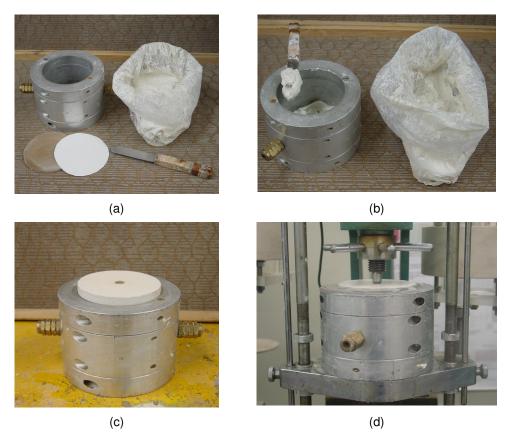


Figura 26 – Moldagem de corpo de prova para compactação estática.

Após a compactação do material, o corpo de prova era retirado do molde com cuidado para não sofrer amolgamento e posto para secar ao ar durante no máximo 10 dias para a obtenção de parâmetros térmicos em função de diferentes teores de umidade. Foram preparados 08 corpos de prova para cada solo, sendo que um desses 08 era ensaiado logo após o desmolde, sem secar ao ar. A Figura 27 mostra os corpos de prova secando ao ar.

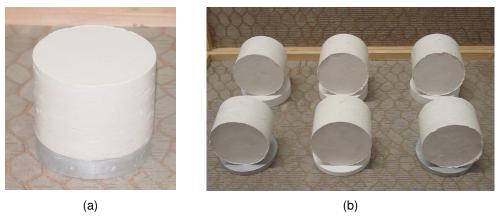


Figura 27 – Corpos de prova prontos e secando ao ar.

4.1.3. Compactação por Vibração

As areias Uniforme (AU) e Mal Graduada (AMG) foram compactadas dentro de um cilindro de compactação normal, através de vibração numa mesa vibratória. O cilindro de compactação tem altura média de 12,7cm e diâmetro interno de 10,2cm. Trabalhou-se com as areias secas, não saturadas e saturadas. Para cada estado de saturação, variou-se o índice de vazios através do tempo de compactação.

Para um índice de vazios mínimo, a compactação era realizada em três camadas, sendo cada camada compactada durante 15min.

Para o índice de vazios máximo, com as areias secas, não se realizava nenhum tipo de vibração, sendo o solo depositado dentro do cilindro em apenas uma camada, caindo uniformemente de dentro de um funil.

Para o grau de saturação de 100% e índice de vazios máximo, o cilindro de compactação era previamente preenchido com água e a areia era colocada aos poucos com o auxílio de uma colher, caindo lentamente de uma determinada altura dentro do cilindro. Para a obtenção do índice de vazios mínimo, cada camada de solo saturado era compactada com uma lâmina d'água sobre a mesma. Os corpos de prova eram mantidos dentro do molde de compactação para a realização das medidas.

A Figura 28 mostra fotos do molde e da mesa vibratória utilizados na compactação.





Figura 28 - Molde de compactação (a) e mesa vibratória para a compactação das areias (b).

4.2. Ensaios de Laboratório

4.2.1.

Condutividade Térmica

Conforme discutido no Capítulo 2, os métodos de fluxo transiente são considerados mais adequados para solos, pois são mais versáteis, mais rápidos e minimizam os gradientes de umidade.

O método da sonda térmica (agulha térmica) é o método mais rápido e conveniente para medir condutividade térmica de solos em campo e em laboratório.

O fluxo de calor que sai da sonda atravessa o material no qual está imersa com uma difusividade térmica (D), segundo a equação (36), já apresentada no Capítulo 2:

$$(T - T_0) = \frac{q}{4\pi\lambda} \cdot \left[\ln(t) - a - \ln\left(\frac{r^2}{4D}\right) \right]$$
 (36)

onde:

q - calor produzido por unidade de tempo e comprimento (W)

λ – condutividade térmica (W / m K)

D – difusividade térmica (m²/s)

t – tempo (s)

 T_0 – temperatura no tempo t = 0

a – constante de Euler (0,5772...)

Um gráfico linear da Temperatura x ln(t) dá uma inclinação (S), que pode ser igualada à inclinação teórica $(q/4\pi\lambda)$ da equação (36):

$$S \cong \frac{q}{4\pi\lambda} \Rightarrow \lambda \cong \frac{q}{4\pi S}$$
 (37)

Para a realização dos ensaios no presente trabalho, adquiriu-se uma sonda de imersão da empresa DECAGON, modelo KD2-S que mede os parâmetros térmicos de condutividade, resistividade e difusividade. A sonda tem aplicações em estudos de fluxo de calor em solos, no balanço de energia, em projetos geotérmicos, dissipação de calor em linhas elétricas enterradas e em propriedades térmicas em relação ao teor de umidade e densidade de solos. A

sonda de aço inoxidável fornece um fluxo de calor constante quando inserida no material ensaiado. Este fluxo é mantido até que o equilíbrio entre a energia térmica transferida e a energia térmica dissipada seja estabelecido. O comprimento da sonda é de 6cm e o seu diâmetro é de 1,28mm. Ela opera em ambientes com temperaturas entre -10° C e 40° C e tem que estar totalmente inserida no solo para fazer as medições. Seus intervalos de medida são de 0,02 a 2 W/m° C para a condutividade, com 5% de exatidão, de 0,5 a 10 m° C/W para a resistividade e de 0,1 a 1 mm2/s para a difusividade térmica, com 10% de exatidão. Esta sonda é acoplada a um sistema de aquisição de dados portátil modelo KD2-C, também da DECAGON, que faz os cálculos de condutividade e difusividade térmica de acordo com o que foi descrito anteriormente. A Figura 29 apresenta uma fotografia da sonda utilizada.



Figura 29 – Sonda térmica utilizada: modelo KD2-S.

4.2.1.1. Metodologia de Ensaio

Os corpos de prova ensaiados foram compactados de acordo com o que foi descrito nos itens 4.1.2 e 4.1.3.

Os corpos de prova dos solos C100, C80, CB40 e CB60, após compactados foram desmoldados com cuidado para não provocar amolgamento e postos para secar uniformemente ao ar antes de serem ensaiados com a sonda. Foram preparados 08 corpos de prova para cada solo, ensaiados com diferentes umidades depois de secos ao ar até no máximo 10 dias. Um dos 08 corpos de prova era ensaiado logo após a compactação estática, ou seja, sem secar ao ar. Foram feitas 04 medidas para cada corpo de prova, sendo a média

dessas medidas o valor final de condutividade térmica para uma determinada umidade e peso específico seco.

Foi necessária a utilização de uma broca com diâmetro de 1,2mm para se fazer um pré-furo nos corpos de prova mais secos antes de realizar os ensaios, pois com a secagem os corpos de prova adquiriram uma rigidez tal que não permitia a inserção da sonda.

Os solos C60, C40 e CB80 não foram ensaiados, pois possuíam porcentagens significativas de bentonita, o que os tornava bastante expansivos. Tal fato não permitiu que os corpos de prova fossem moldados e compactados estaticamente, pois havia limitação na altura dos moldes utilizados e na altura da própria prensa de adensamento.

As areias não foram desmoldadas, mas sim ensaiados dentro do próprio molde, que possuía dimensões suficientes para não interferir nos valores obtidos através da sonda. Trabalhou-se com as areias secas, saturadas e não saturadas, sendo as umidades e graus de saturação intermediários obtidos através de secagem das areias saturadas em estufa de 40°C. Variou-se o índice de vazios através do tempo de vibração durante a compactação. Foram feitas 04 medidas para cada corpo de prova, sendo a média dessas medidas o valor final de condutividade térmica para uma determinada umidade e peso específico seco.

A Figura 30 apresenta fotografias de corpos de prova do solo C100 e da Areia Uniforme sendo ensaiados.

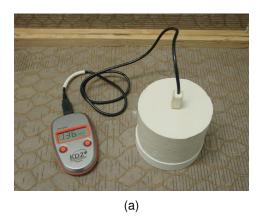




Figura 30 – Medição de parâmetros térmicos: corpo de prova argiloso fora do molde (a) corpo de prova de areia dentro do molde de compactação (b).

4.2.2. Calor Específico

O calor específico do solo úmido (c) pode ser determinado através da expressão desenvolvida por Abu-Hamdeh (2003) e já apresentada no Capítulo 2:

$$c = \frac{\rho_d}{\rho} \cdot (c_s + w) \tag{38}$$

Como também já foi visto no Capítulo 2, Duarte (2004) sugeriu uma metodologia para estimar o calor específico dos sólidos do solo (c_s). A expressão revisada de Duarte (2004) é apresentada a seguir:

$$c_s = \left(\frac{\lambda}{D \cdot \rho_s}\right) \cdot (e+1) - w \tag{39}$$

onde:

c_s – calor específico dos sólidos do solo (cal/g⁰C)

e - índice de vazios

w – umidade gravimétrica do solo

A difusividade térmica também pode ser obtida da equação (36). A intersecção da reta de ΔT x ln(t) com o eixo do tempo (t), significa ΔT =0 no tempo t₀. Então, a equação (36) se torna:

$$\ln(t_0) = a + \ln\left(\frac{r^2}{4D}\right) \tag{40}$$

Conhecidos todos os termos da equação (40) determina-se a difusividade térmica (D) em m²/s.

Duarte (2004) determinou o calor específico dos sólidos dos solos segundo Mitchell e Kao (1978), utilizando moldes de compactação de latão, placas isolantes de ACETAL e submetendo os corpos de prova ensaiados a condições de contorno específicas em banho-maria. Desta forma a autora determinava a difusividade térmica através do monitoramento da variação de temperatura do solos ao longo do tempo e posteriormente calculava o calor específico dos satravés da equação (39).

A sonda utilizada neste trabalho já fornecia o valor de difusividade térmica, de tal forma que não foi preciso adotar a mesma metodologia que a autora citada. Obtendo-se os valores de condutividade e difusividade térmicas

diretamente da sonda, calculava-se o calor específico dos sólidos através da equação (39).

4.2.2.1. Metodologia de Ensaio

Os corpos de prova ensaiados foram compactados estaticamente e por vibração de acordo com o que foi descrito nos itens 4.1.2 e 4.1.3, respectivamente. Os mesmos corpos de prova foram utilizados para fazer as medições da condutividade térmica e para estimar o calor específico, visto que a sonda fazia medidas de condutividade, resistividade e difusividade térmica ao mesmo tempo. O mesmo procedimento aplicado no item 4.2.1.1 foi aplicado aqui.

A partir dos dados dos corpos de prova ensaiados, estimou-se o calor específico dos solos segundo a equação (38), sugerida por Abu-Hamdeh (2003). A partir dos valores de difusividade e condutividade térmicas fornecidos pela sonda e dos dados dos corpos de prova ensaiados, calculou-se o calor específico dos sólidos dos solos através da equação (39), revisada de Duarte (2004).

É importante lembrar que os valores de condutividade e difusividade térmicas adotados eram a média de 04 medidas realizadas. A partir desses valores médios calculava-se o calor específico de cada corpo de prova.