

## 5

### **Determinação da função de permeabilidade e da curva característica de sucção**

#### **5.1.**

#### **Equipamento utilizado para determinar a permeabilidade não saturada**

O equipamento utilizado para determinar a permeabilidade não saturada foi o inicialmente desenvolvido por Carrillo (2000). Para otimizar o funcionamento deste equipamento foram introduzidas algumas modificações considerando os problemas listados no capítulo precedente.

O equipamento é basicamente um permeômetro de parede flexível, que utiliza a técnica de translação de eixos para a aplicação de sucção. Os ensaios de permeabilidade podem ser executados utilizando as técnicas de vazão constante ou de carga constante.

A variação do volume do corpo de prova originalmente era obtida pela variação de altura do corpo de prova a partir das leituras de transdutores de proximidade. Atualmente este sistema foi modificado e a determinação da variação do volume do corpo de provas é feita pela medição da variação de volume de água da câmara. Esta variação de volume é registrada com o auxílio de uma balança de precisão de três casas decimais. Como neste equipamento não foi utilizada câmara dupla, a câmara de acrílico foi substituída por uma câmara de duro-alumínio para minimizar as variações de volume da câmara pela temperatura e pelas pressões aplicadas. O sistema de medição de variação de volume adotado está descrito no item 5.1.2. Descartou-se a utilização de instrumentação interna pelo espaço disponível entre o corpo de prova e a parede da câmara.

##### **5.1.1.**

##### **Permeômetro**

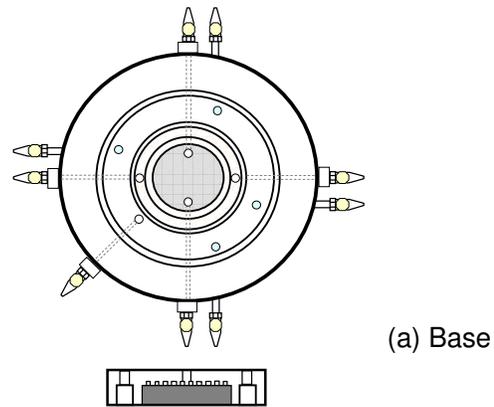
O permeômetro é constituído por um cilindro de duro-alumínio, uma base de aço inox e um top-cap de alumínio.

A base confeccionada em aço inox, possui cinco entradas laterais e quatro perpendiculares à seção transversal da mesma, sendo que, quatro delas são destinadas para a aplicação, controle e medição da pressão de ar, outras quatro para a aplicação, controle e medição das pressões de água, e por último, uma destinada à aplicação e controle da pressão da câmara (tensão confinante). As entradas para a aplicação e controle das pressões, tanto de ar quanto de água, estão ligadas aos sistemas de aplicação de pressão através dos medidores de vazão. A base, possui um rasgo circular concêntrico, no qual encontra-se colado pelas bordas o disco cerâmico de alto valor de entrada de ar ( $\phi=5,08$  cm,  $h=0,79$ mm). Logo embaixo do disco cerâmico, encontra-se uma câmara de água, a qual possui uma ranhura que possibilita a realização de fluxo para garantir a saturação e a extração de bolhas de ar que possam eventualmente ser formadas ao longo do ensaio, esta câmara está ligada a duas saídas laterais. Além do rasgo circular, a base possui um rasgo anelar que serve para alojar um anel de bronze sinterizado, o qual, é destinado à distribuição uniforme da pressão de ar na amostra. Sobre este anel é colocada uma membrana de teflon impermeável à água. Esta membrana suporta uma pressão de água de aproximadamente 90 kPa. O rasgo anelar está ligado às outras duas saídas laterais.

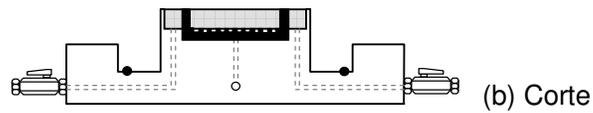
O top-cap, confeccionado em duro-alumínio, da mesma forma do que a base, possui um rasgo circular e outro anelar para alojar o disco cerâmico de alto valor de entrada de ar, o anel de bronze sinterizado e a membrana de teflon respectivamente. Sobre o disco poroso localiza-se uma câmara de água que por sua vez possui uma ranhura que possibilita a saturação e extração de bolhas de ar que possam formar-se ao longo do ensaio. Quatro furos diametralmente opostos, unem o top-cap com os furos da base (perpendiculares à seção transversal), através de tubos saran.

Um cilindro de duro-alumínio juntamente com a base e a tampa compõem a célula. Quatro hastes de amarração, confeccionadas em latão e providos de porcas, garantem a união da tampa, o cilindro e a base.

Na Figura 5.1 são apresentados detalhes das partes que compõem o permeâmetro. E na Figura 5.2 estão mostradas em detalhe, a tampa e a base do permeâmetro, na figura a) estão mostrados as partes, na figura b) a montagem final com a membrana de teflon sobre o anel de bronze sinterizado.



(a) Base



(b) Corte

Figura 5.1 – Permeâmetro PUC-Rio a) Base, b) , (1) anel de bronze sinterizado, (2) pedras porosas, (3) O'Rings.



a) Partes da Base e do Top-Cap



b) Base do permeâmetro

Figura 5.2 – Detalhes da Base e do Top-Cap do Permeâmetro PUC

Para medir as vazões de água são utilizados medidores de variação de volume tipo PUC (MVV), os quais possuem uma capacidade total de aproximadamente 250 cm<sup>3</sup> (na base) e 12 cm<sup>3</sup> (no topo). Estes medidores atuam também como interfaces, recebendo por um lado pressão de ar, e pelo outro transmitindo a pressão à água. Um esquema do medidor está mostrado na Figura 5.3.

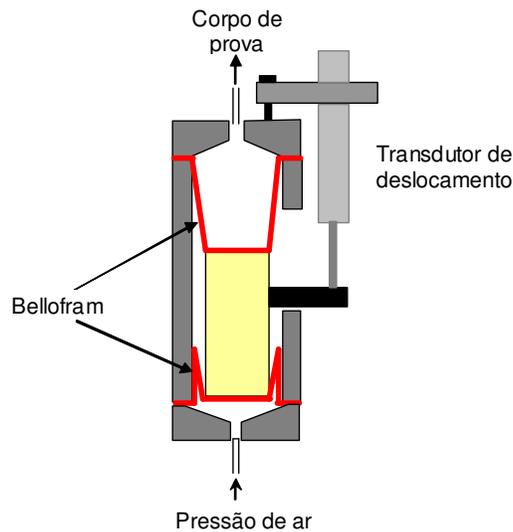


Figura 5.3 – Medidor de variação de volume Tipo PUC

Ligado aos discos porosos de alta entrada de ar da base e do topo existem sistemas de extração de bolhas ou bomba de bolhas. Uma detalhada descrição desta bomba de extração de bolhas, bem como do seu funcionamento, pode ser encontrada em Carrillo (1993). Para a medição das pressões de água e ar aplicadas optou-se inicialmente pela utilização de transdutores de pressão absoluta da marca Semsym com capacidade de 200kPa absoluta, permitindo a medição de pressões positivas e negativas de  $\pm 100$ kPa. Para a medição da pressão de câmara optou-se por um transdutor de pressão relativa da marca Gefran, com capacidade de 1000kPa. O sistema originalmente utilizado na aplicação de pressões de água e ar está mostrado na Figura 5.4.

Com o intuito de melhorar a acurácia das medições, os transdutores Semsym foram substituídos por transdutores diferenciais PD-9 da Druck. Esta mudança também foi motivada por problemas na saturação dos transdutores Semsym. Inicialmente tentou-se utilizar os transdutores Semsym só na fase de percolação, controlando as pressões aplicadas pelo transdutor da Gefran. Depois de vários testes, aplicando pressões no equipamento (sem amostras) só para comparar a acurácia dos transdutores Semsym com o Gefran, observou-se

que a resposta dos sensores não era sensível a pequenas variações de pressão (da ordem de 0,1kPa), o que comprometeria a medição das variações de pressão na fase de percolação do ensaio por vazão constante. Um terceiro *layout* foi montado medindo os valores das pressões absolutas com o transdutor Gefran e monitorando a fase de fluxo com os transdutores diferenciais. Esta nova e definitiva configuração do equipamento está mostrada na Figura 5.5.

A aplicação de vazão constante, nos ensaios de permeabilidade por vazão constante, foi executada com auxílio de uma bomba de fluxo tipo seringa da série P-74900-40 da Cole-Parmer Inc. A bomba é composta por um motor elétrico, o mesmo que desloca um atuador, que por sua vez empurra o embolo da seringa a uma velocidade constante. A velocidade é ajustada diretamente, através de um painel de controle localizado na bomba, permitindo a mudança de velocidade sem a necessidade de suspender o fluxo. A bomba possui uma ampla faixa de velocidades que varia de 0,008  $\mu\text{l}/\text{min}$  até 147  $\text{cm}^3/\text{min}$ , e pode trabalhar sob uma pressão máxima de 275kPa. O volume injetado ou extraído pode ser controlado tanto pela velocidade de injeção, quanto pelo diâmetro da seringa utilizada (ver Figura 5.4). Atualmente está sendo utilizada uma seringa de embolo de 17mm de diâmetro, o que permite aplicar uma vazão mínima de  $2,09 \times 10^{-5} \text{cm}^3/\text{s}$ .

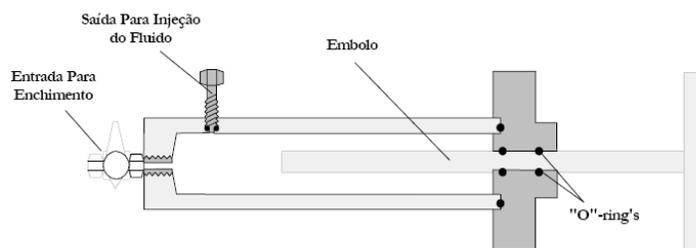


Figura 5.4 – Esquema da seringa utilizada (Carrillo, 2000)

Para ter uma melhor quantificação do volume de fluido injetado ou extraído, e aferir os valores acusados no visor da bomba, adicionou-se um transdutor de deslocamento, de maneira similar ao executado por Carrillo (2000). Este transdutor registra o deslocamento do atuador, multiplicando o valor de deslocamento registrado pela área do pistão obtém-se o volume injetado. Através de três testes, em diferentes velocidades, concluiu-se que o valor fornecido pela bomba não diferia do volume calculado a partir das leituras do transdutor de deslocamento. Também foram simulados ensaios de injeção conectando a bomba ao recipiente sobre uma balança de três casas decimais

(sistema utilizado na medição de variação de volume do corpo de provas). Também aqui não foram obtidas diferenças entre o volume injetado pela bomba e o volume medido pela balança.

As pressões são aplicadas em ambas as fases fazendo uso de um sistema de ar comprimido e um painel de válvulas de controle. No caso da fase líquida a aplicação das pressões é feita com auxílio dos MVV, já descritos.

O controle da pressão na fase líquida no topo e na base da amostra é realizado através de uma válvula reguladora de ar. A pressão de ar é aplicada no diafragma inferior do MVV e é transferida à água contida no diafragma superior que, por sua vez, encontra-se ligado ao sistema de extração de bolhas de ar difuso. O sistema de extração de bolhas possui duas linhas. Uma delas está conectada a um transdutor de pressão, o qual pode ser isolado por duas válvulas de controle, permitindo o ajuste e monitoramento da pressão ao longo das diferentes fases do ensaio. Este transdutor de pressão, por sua vez, é ligado à câmara de água localizada no top-cap adjacente ao disco cerâmico.

A outra linha é diretamente conectada à câmara de água localizada no top-cap, sendo destinada à aplicação de pressão e drenagem da fase líquida.

Como já foi mencionado anteriormente, as pressões em ambas as extremidades da amostra são monitoradas, sendo que a diferença de pressão entre a base e o topo (gerada no decorrer do ensaio), é obtida a partir das leituras dos transdutores diferenciais.

As pressões na fase gasosa são aplicadas através das válvulas reguladoras de ar, na base e no topo.

O fluido utilizado para o confinamento do corpo de prova sempre foi água deaerada. A aplicação e controle da tensão confinante foram realizados com auxílio de uma interface ar-água, utilizando o sistema de ar comprimido.

O sistema de aquisição de dados permite o monitoramento contínuo dos diferentes sensores. Este sistema é composto por um condicionador Mentor (de 16 canais absolutos ou 8 canais diferenciais), e uma interface que permite o registro contínuo das leituras no computador. A balança de três casas decimais é lida diretamente pelo computador.

As características dos diferentes instrumentos utilizados são apresentadas no Anexo 3 da presente.

Paralelamente à execução de novos ensaios, foi realizada uma modelagem para avaliar o funcionamento do equipamento, tanto em termos de equalização de sucção (tempo e distribuição) quanto de distribuição das sucções na fase de fluxo. Esta modelagem está descrita no item 5.1.5.

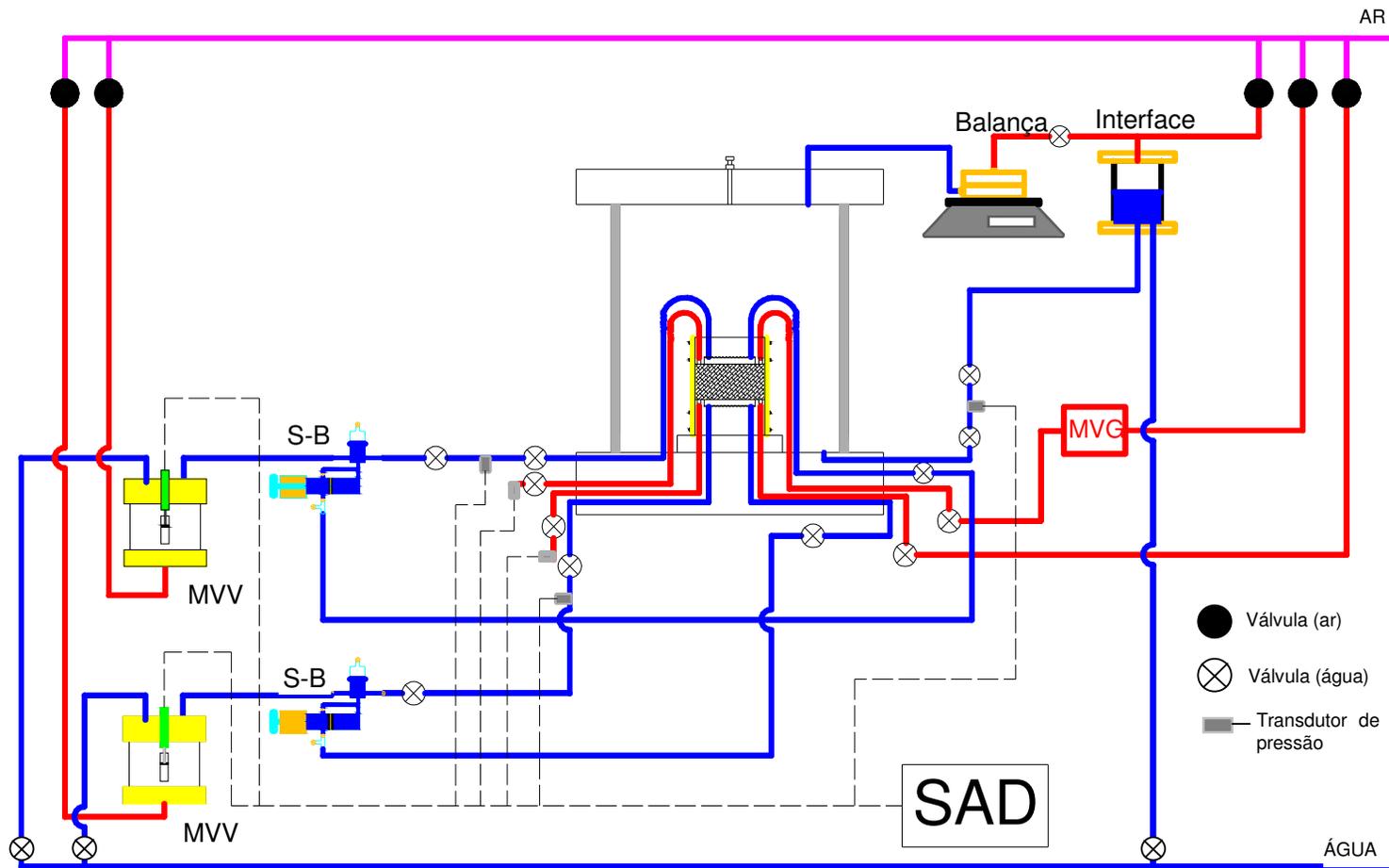


Figura 5.5 – Layout 1 – S-B : Sistema de Extração de Bolas, MVV: Medidor de Variação de Volume, SAD: Sistema de Aquisição de Dados.

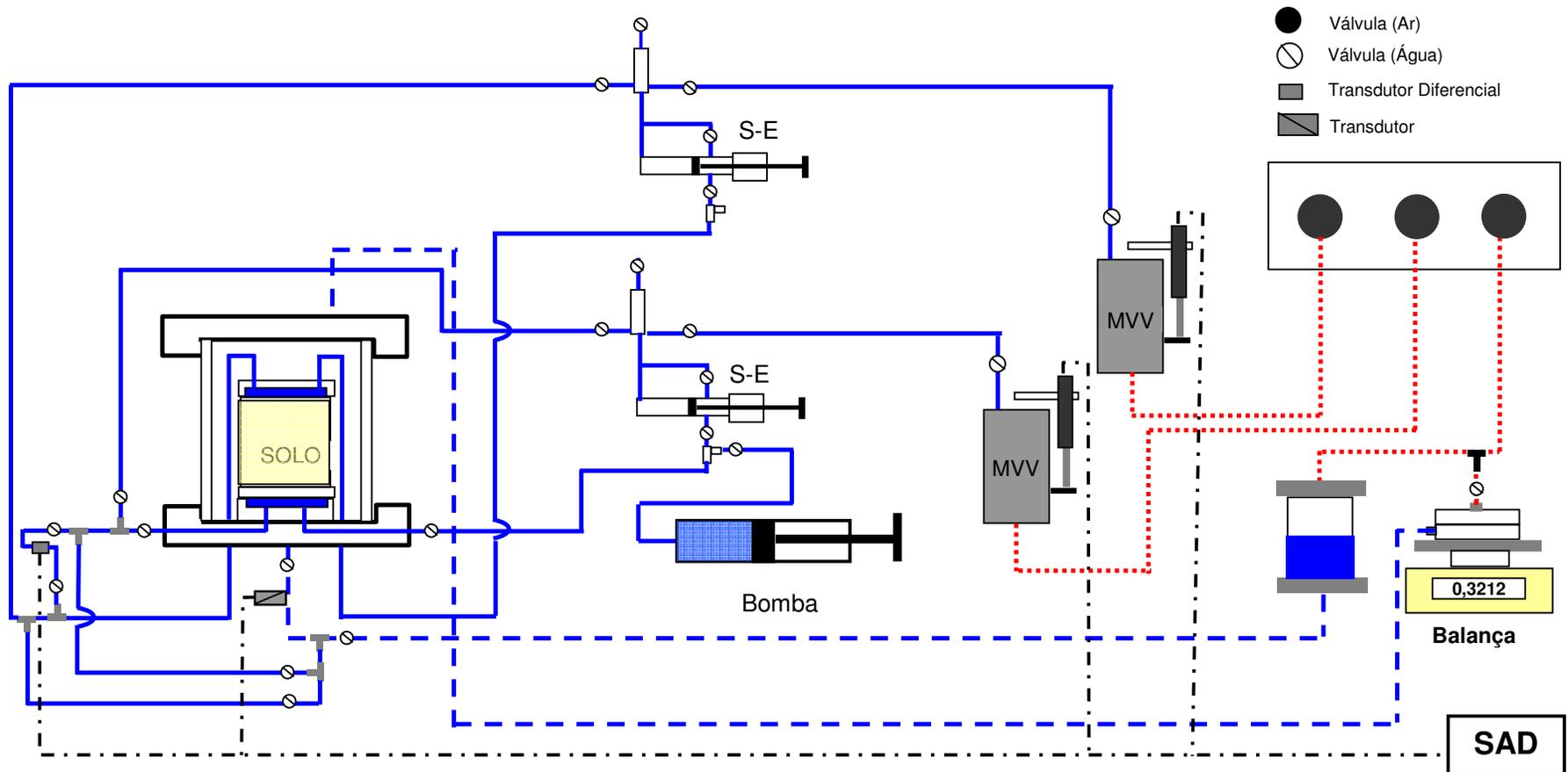


Figura 5.6 – Layout 2 - Sistema de aplicação de pressão de água.-S-E: Sistema de extração de bolhas, MVV: Medidor de Variação de Volume, SAD: Sistema de Aquisição de dados.

### 5.1.2. Variação de Volume Total

Para a determinação da variação do volume total da amostra, durante os ensaios de permeabilidade, optou-se pela medição da variação do volume de água da câmara através de uma balança analítica de precisão. Optou-se por esta técnica entre as outras mencionadas no item 4.1 porque ela possui boa acurácia (ver Tabela 4.3) e a implementação deste sistema não impunha grandes modificações ao projeto original do permeâmetro.

Este sistema de medição foi implementado da seguinte forma: a câmara é totalmente preenchida com água, o volume da câmara está ligado a um recipiente hermético que fica sobre a balança. A pressão confinante é aplicada tanto na câmara quanto no recipiente, segundo mostrado na Figura 5.7.

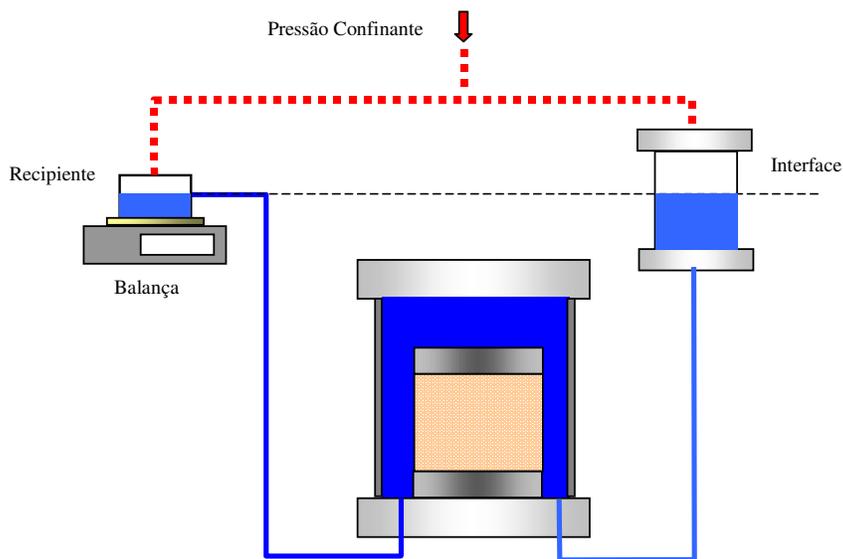


Figura 5.7 – Sistema de medição de variação de volume

A variação de volume total do corpo de prova pode ser calculada como:

$$\Delta Vol = \frac{\Delta M}{\rho_w} (A_{rec} + A_{int})$$

com

$\Delta Vol$  = Variação de volume total do corpo de prova,

$\Delta M$  = Variação de massa na balança,

$\rho_w$  = densidade da água,

$A_{rec}$  = área do recipiente,

$A_{int}$  = área da interface.

A balança de precisão escolhida é de três casas decimais com capacidade máxima de 500 gramas. A maior dificuldade na implementação deste sistema de medição foi a escolha do recipiente. O recipiente devia satisfazer várias condições: suportar pressões elevadas de até 500kPa (no caso do ensaio de permeabilidade não saturada), pesar em conjunto com água menos de 500g e ter o maior diâmetro possível (pela sensibilidade na medição de pequenas variações volumétricas). Considerando um peso limite de projeto do recipiente de 400g (recipiente + válvulas), pesquisaram-se vários materiais: acrílico, alumínio, aço inox e resina kevlar. Estes materiais foram descartados pelo peso, por não suportar a pressão limite ou por problemas de fabricação do recipiente. Inicialmente, optou-se pela utilização de peças de esgoto (Tigre). Assim dois caps foram unidos por rosca e colados com cola de tubos. Este recipiente conseguia cumprir a massa mínima necessária, mas não conseguia suportar pressão. Então foi feito um reforço com fibra de vidro. Dois engates foram colados na parte superior e na lateral do recipiente para permitir a aplicação da pressão confinante e a entrada de água, respectivamente. O conjunto montado ficou com um peso de 320grs.

Os primeiros ensaios foram executados com este reservatório, mas apresentou vazamentos e foi modificado por um feito de PVC, mostrado na Figura 5.8, que permite a aplicação de pressões elevadas, é fechado por 4 parafusos, com um o-ring de vedação entre a tampa e base. O conjunto montado ficou com um peso de 430grs.

A variação de volume da câmara foi calibrada pela aplicação de diferentes pressões confinantes na câmara, com um corpo rígido de duro-alumínio, simulando a amostra de solo. Nesta situação não foram observadas variações na massa registrada pela balança até a pressão limite de 500kPa. Esta pressão máxima foi mantida por 24hs e não foram registradas variações na massa registrada pela balança.

Uma segunda calibração foi executada, para avaliar a influência da variação da temperatura. Também, neste caso, foi utilizado um corpo rígido de duro-alumínio, e foram monitoradas as variações de volume por quatro dias, dois dias úteis e um final de semana. Aqui foi verificado que não existe influência da temperatura na variação de volume da câmara, o que confirma a escolha do cilindro de duro-alumínio na confecção da câmara do permeâmetro.

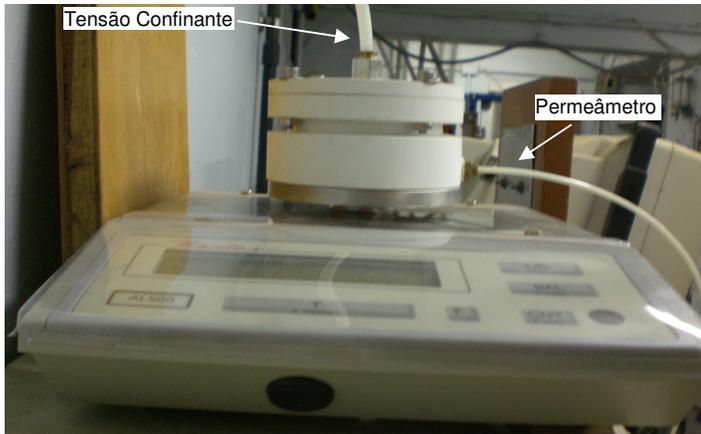


Figura 5.8 – Recipiente para a medição da variação de volume

### 5.1.3. Programa experimental

Esta parte do trabalho está destinada a apresentar os procedimentos adotados na execução dos ensaios de permeabilidade não saturada. Como já foi explicado, pela configuração, o sistema permite a execução de ensaios por Carga Constante e por Vazão Constante, e ambas metodologias foram utilizadas.

O procedimento de ensaio adotado para os ensaios por vazão constante consiste em duas etapas. Na primeira fase se atinge o grau de saturação desejado. A segunda fase é a fase de percolação, onde a água é injetada, numa das extremidades do corpo de prova, com auxílio da bomba de fluxo, monitorando e registrando, o volume expulso pela outra extremidade, a diferença de pressões geradas e a variação de volume do corpo de prova. O fim da fase de percolação é obtido quando a diferença de pressão entre ambas extremidades permanece constante, e o volume expulso é similar ao injetado.

Nos ensaios por carga constante é aplicada a sucção desejada (pela diferença de pressões de água e ar, na base e no topo da amostra) e monitora-se o volume de entrada e saída, as pressões e a variação de volume do corpo de provas até o sistema atingir o equilíbrio, ou seja, apresentar uma vazão similar (e constante) nas extremidades.

Para avaliar a resposta dos diferentes materiais, foram testados um solo residual de gnaiss (proveniente do perfil de intemperismo descrito no item 2.5.2, e um solo sedimentar arenoso do Maranhão (Moncada, 2002). Originalmente pensou-se em trabalhar com uma quantidade maior de materiais, mas devido à duração dos ensaios isto não foi possível.

Uma das limitantes no tempo de ensaio é a altura da amostra. Para diminuir este tempo sem afetar a representatividade da amostra, trabalhou-se com alturas de 3 a 6cm.

#### **5.1.4. Procedimento de ensaio**

Antes da montagem do corpo de prova no permeâmetro, é necessário saturar o sistema: discos cerâmicos, linhas de contrapressão, sistemas de medição de variação de volume e das câmaras de água sob os discos porosos.

A saturação das pedras de alto valor de entrada de ar foi realizada mediante fluxo de água através dos discos. Isto é executado enchendo parcialmente de água a câmara e aplicando uma diferença de pressão entre a câmara e as câmaras de água sob os discos porosos. Quantifica-se o volume de água que atravessa cada disco. Considera-se que o disco poroso encontra-se saturado quando o gráfico volume de água percolada vs tempo se torna linear. A permeabilidade dos discos foi obtida a partir destes dados de saturação.

A saturação das câmaras de água adjacentes aos discos porosos é realizada utilizando o sistema de extração de bolhas.

Também foi verificada a presença de vazamentos no sistema, o procedimento adotado foi a pressurização de trechos do sistema a presença de vazamentos foi detectada pelas variações no sistema de variação de volume (MVVs).

Depois destas operações preliminares, o corpo de prova pode ser montado no equipamento; entre o corpo de prova e os discos porosos são colocados discos de papel filtro saturado para melhorar o contato.

A aplicação da sucção é realizada utilizando a técnica de translação de eixos. As pressões de água e ar são ajustadas através das válvulas do painel, com as válvulas de drenagem fechadas. O mesmo é feito com a tensão confinante (mantendo fechada a válvula na base do permeâmetro). A posição da lâmina de água no interior do copo de coleta dos sistemas de remoção de bolhas é registrada. O sistema de aquisição de dados é ligado e as pressões são aplicadas na seguinte seqüência: em forma simultânea são aplicadas a tensão confinante e pressão de ar, seguidas da aplicação da pressão de água (abertura das válvulas de drenagem). Esta seqüência deve ser obedecida para não danificar os discos porosos. As pressões líquidas aplicadas sempre foram maiores que 60kPa, segundo a recomendação de Carrillo (2000). De acordo ao valor de sucção aplicada, maior ou menor que a sucção existente no corpo de prova, a água vai sair ou entrar nos medidores de variação de volume. Nesta etapa

são monitoradas as pressões de cada fase, a variação do volume de água, e a variação de volume do corpo de prova. Considera-se que a sucção aplicada encontra-se equalizada quando não sai (ou entra) mais água no corpo de prova. A duração desta fase depende da sucção aplicada, do tipo de solo, da altura do corpo de prova, e da trajetória seguida (umedecimento ou secagem).

Nos ensaios por vazão constante, antes da aplicação do fluxo, é necessário ter certeza que a sucção está totalmente equalizada. Para avaliar isto, utiliza-se o procedimento recomendado por Carrillo (2000), que consiste em fechar as drenagens da água e monitorar as pressões de água no topo e na base do corpo de prova. Se a pressão registrada permanece constante, se assume que a sucção está equalizada, caso contrário, as drenagens devem ser abertas e repetir esta operação até o equilíbrio ser atingido.

Com a sucção equalizada, o fluxo pode ser aplicado, para isto: as drenagens da água são fechadas, a bomba é conectada à válvula que liga o sistema de remoção de bolhas à atmosfera, a seringa da bomba é enchida a partir do MVV (para ter na seringa a mesma pressão que a aplicada na base). A vazão a ser aplicada é ajustada no controle da bomba, a válvula que liga a bomba ao sistema de extração de bolhas e a válvula que liga o sistema de extração de bolhas com a base do permeâmetro são fechadas. Isto é para que a água possa ser injetada diretamente na base do corpo de prova.

O programa de aquisição é ligado, registra-se a leitura inicial de todos os instrumentos. Começa-se a aplicação da vazão (ligando a bomba). Ao longo desta fase são monitoradas as pressões de ambas as fases, a variação de volume do corpo de prova, e a tensão confinante.

Em todos os ensaios monitora-se também a variação de temperatura da sala.

### **5.1.5 Interpretação dos resultados**

No presente trabalho, a determinação do coeficiente de permeabilidade foi feita sempre na condição de regime permanente. Existe também a possibilidade de calculá-lo, no ensaio por vazão constante, a partir da análise teórica (Morin e Olsen, 1987) da fase transiente inicial, este tipo de análise não foi aplicado no presente trabalho.

No caso do solo saturado, a diferença de pressão induzida entre ambas as fases do corpo de provas deve permanecer constante, resultando em volumes de entrada e saída iguais.

No caso do solo não saturado, não só os gradientes em cada fase devem permanecer constantes, mas também, o grau de saturação do meio em relação aos fluidos, isto é, não deve ocorrer deslocamento de um fluido pelo outro (critério de razão de saturação constante).

Neste trabalho foram adotados os mesmos critérios de Carrillo (2000), ou seja:

1. A razão de volume de entrada/volume de saída, deve ser constante, e igual ou próximo à unidade (entre 0,75 e 1,25);
2. O gradiente entre as extremidades do corpo de prova deve ser igual ou aproximadamente constante;
3. Grau de saturação deve permanecer constante (critério de razão de saturação constante).

Para ter uma interpretação correta do fenômeno de fluxo que acontece no ensaio dentro do permeâmetro utilizado foi realizada uma simulação numérica do ensaio, os resultados desta simulação estão apresentados no item seguinte.

#### **5.1.6. Modelagem numérica**

O primeiro objetivo desta modelagem foi avaliar a distribuição de sucção no interior do corpo de prova, para o ensaio de vazão constante, tanto na etapa de equalização de sucção como na etapa da aplicação da vazão constante. O segundo objetivo foi observar se existia dentro da amostra um fluxo unidimensional e uniforme. A modelagem numérica permitiu também observar a influência do valor de entrada de ar da pedra porosa utilizada nos tempos e nos valores de sucção atingidos no interior das amostras. E finalmente foi avaliada a influência da altura do corpo de provas na distribuição de sucção no interior do solo.

O programa utilizado nestas simulações foi o TOUGH2 (Pruess et al., 1999; Steger et. al, 2008), considerando o fluxo simultâneo de água e de ar, e analisando um setor de cilindro. Inicialmente, foram simulados quatro materiais diferentes: reservatório de água, pedra porosa de alta entrada de ar, pedra porosa grossa para o ar e solo. As propriedades dos diferentes materiais estão apresentadas na Tabela 5.1. Para avaliar o funcionamento do equipamento foi utilizado um material cujas propriedades hidráulicas foram determinadas de maneira independente e em outro equipamento. Para cumprir com estas condições escolheu-se como material, uma areia fina, cujos dados são apresentados por Fredlund and Xing (1994) e foram determinados originalmente por Gonzalez e Adams (1980). Estes dados estão apresentados na Figura 5.9 e na Tabela 5.2.

Na Figura 5.10 estão apresentados, o esquema simplificado do permeâmetro utilizado nas simulações e as condições de contorno adotadas.

Tabela 5.1 – Parâmetros adotados no modelo

Material	$k_s$ (cm/s)	Porosidade
Pedra porosa de 1Bar	$3,46 \times 10^{-7}$	34%
Pedra porosa (Ar)	$6,28 \times 10^{-6}$	34%
Solo Arenoso	$6,28 \times 10^{-6}$	39%
Reservatório	$3,46 \times 10^{-6}$	99%

Tabela 5.2 – Dados Areia Fina (Fredlund and Xing, 1994)

$u_a - u_w$ (kPa)	$\theta_w$
0,0	0,3877
10,8	0,3663
14,3	0,3377
16,7	0,3091
18,6	0,2806
20,4	0,2520
22,4	0,2234
24,3	0,1949
26,2	0,1663
29,1	0,1377
36,2	0,1091

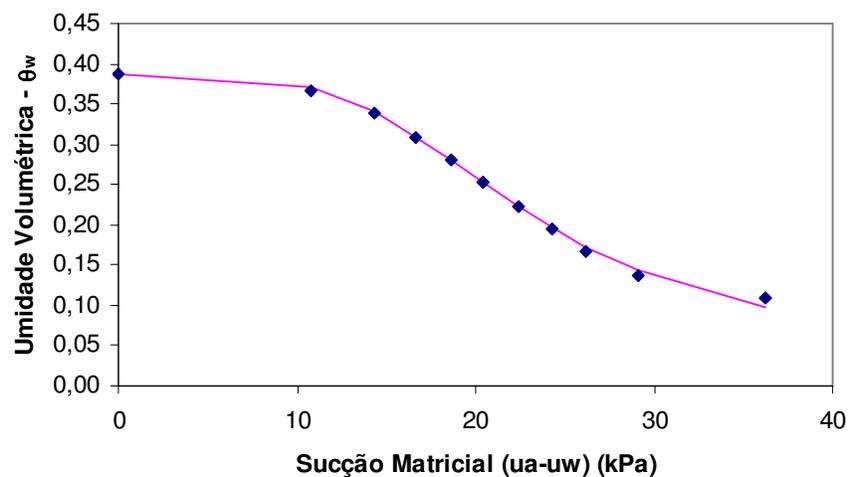
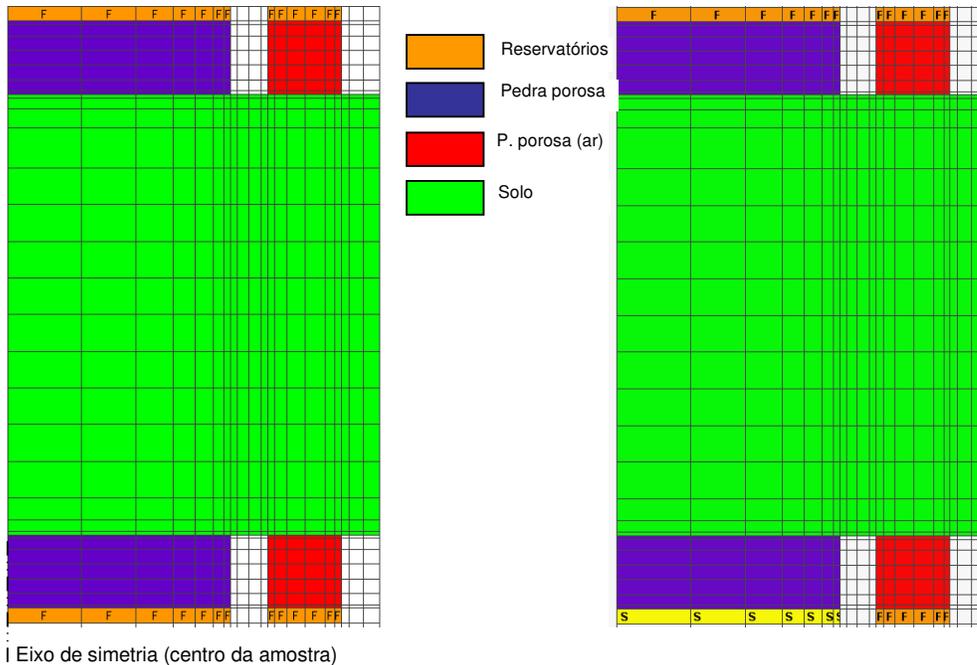


Figura 5.9 – Curva Característica Areia Fina



(a) Condições de contorno Equalização de (b) Condições de contorno Fluxo – F: valor de sucção – F: valor de pressão fixo de pressão fixo, S: vazão constante  
 Figura 5.10 – Esquema do permeâmetro e condições de contorno do modelo

O primeiro ponto desta modelagem foi avaliar a distribuição interna da sucção, na etapa de aplicação de sucção, no corpo de prova, esta primeira etapa é válida para as duas metodologias de ensaio (carga constante e vazão constante). Os resultados desta simulação considerando uma sucção aplicada de 20kPa, com valor inicial de sucção de 15kPa no corpo de prova, e para um tempo de 5 horas, estão apresentados na Figura 5.11. Pode observar-se na Figura que a distribuição da sucção é, em sua maior parte, uniforme. Na Figura 5.12 estão apresentados os vetores de fluxo de água e de ar, para o mesmo tempo. Pode observar-se uma simetria de fluxo de ar e de água em relação à meia altura da amostra.

Com o intuito de visualizar melhor a distribuição de sucção, foram observadas as distribuições da sucção com respeito ao tempo em um plano vertical e em um plano horizontal. Na Figura 5.13 estão mostrados os elementos analisados, e nas Figuras 5.14 e 5.15, os gráficos de sucção vs tempo para os diferentes elementos. A distribuição no plano horizontal apresenta o mesmo comportamento para todos os elementos analisados (361 até 379).

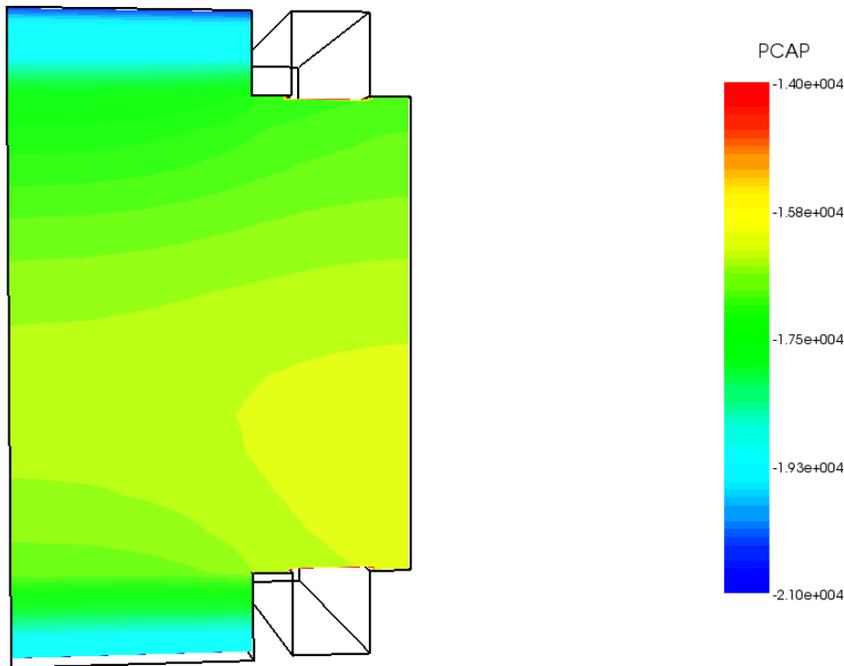
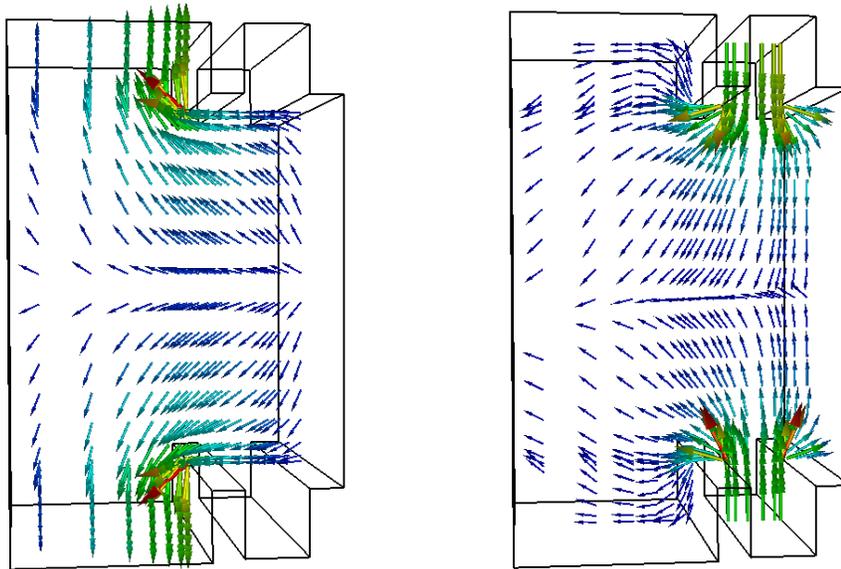


Figura 5.11 – Distribuição da sucção para t=5 horas.



(a) Vetores de fluxo de água

(b) Vetores de fluxo de ar

Figura 5.12 – Vetores de fluxo de água e ar para um t=5 horas.

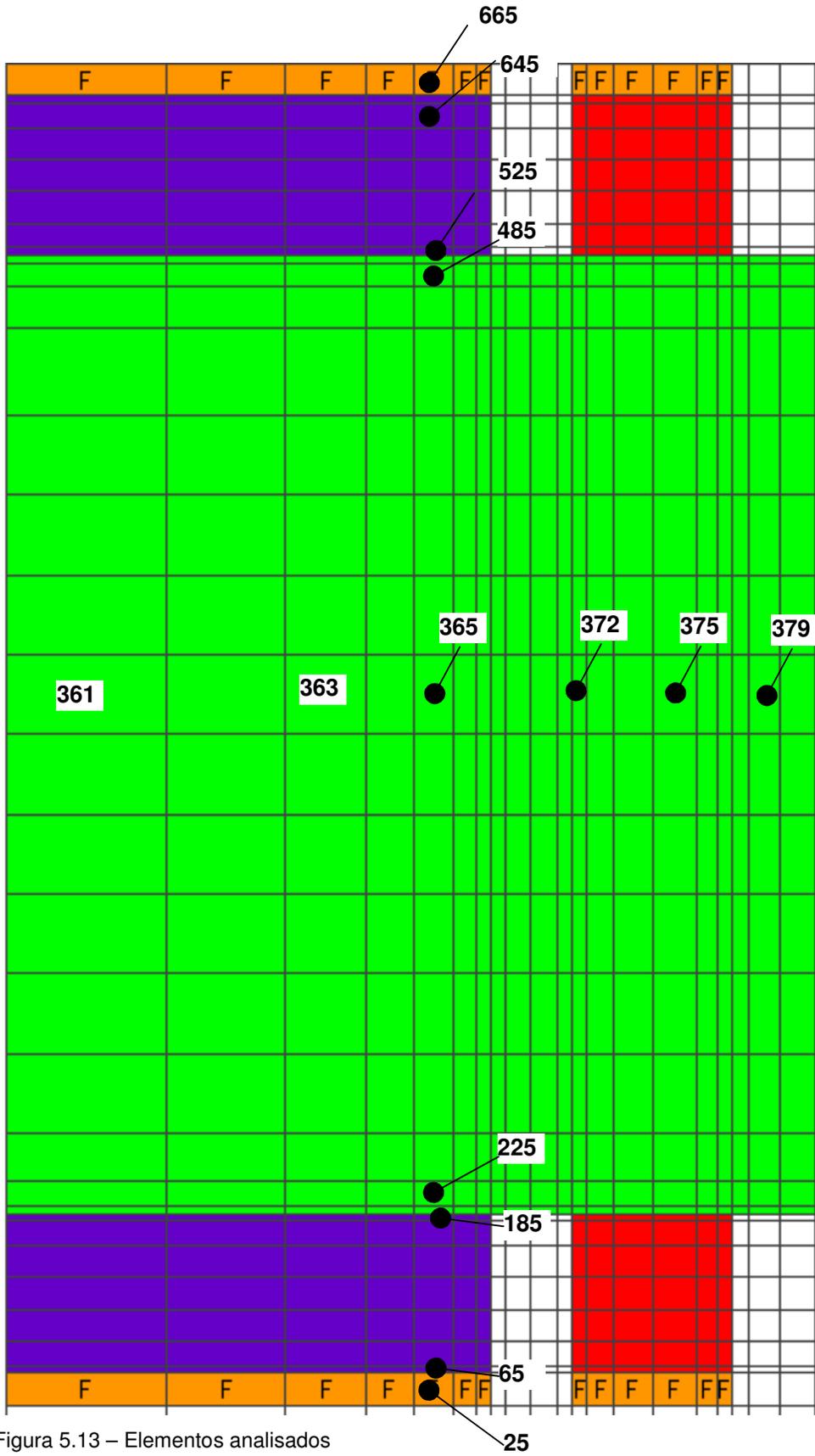


Figura 5.13 – Elementos analisados

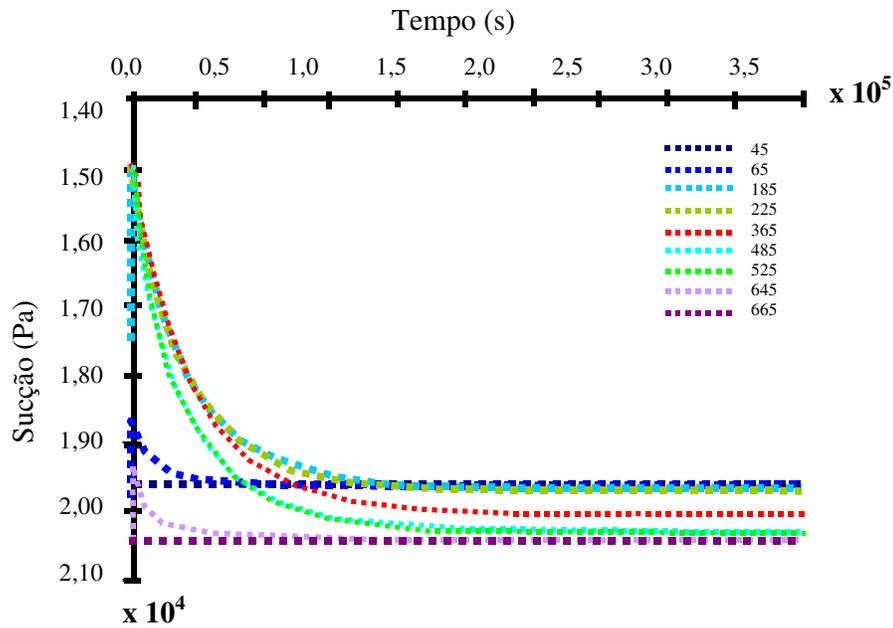


Figura 5.14 – Etapa de aplicação de sucção - Distribuição da sucção num plano vertical

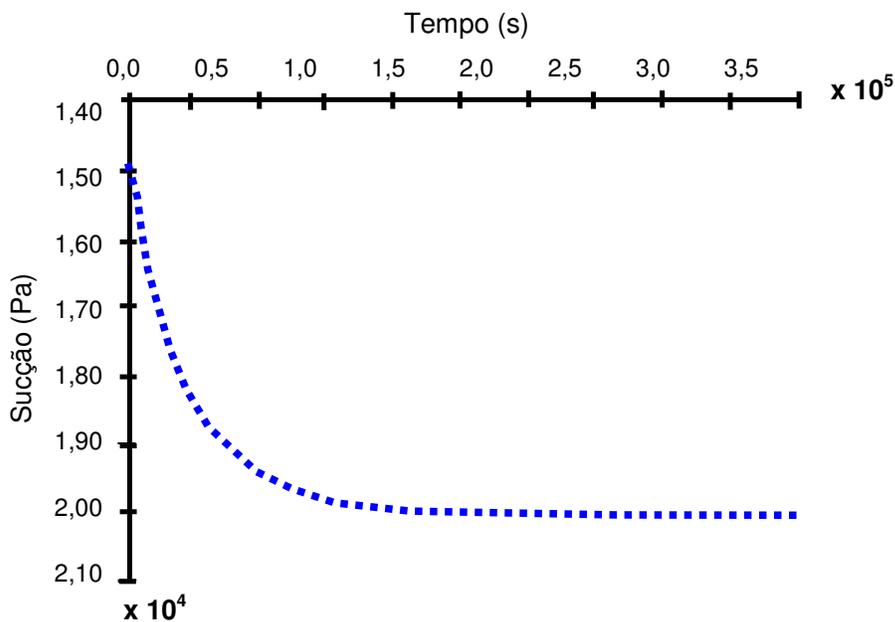


Figura 5.15 – Etapa de aplicação de sucção - Distribuição horizontal da sucção

A primeira análise mostra que a sucção se distribui uniformemente dentro do corpo de prova e que, para o material analisado e com uma pedra porosa de um bar, o tempo necessário para atingir o equilíbrio foi de aproximadamente 3 dias.

A segunda serie de simulações pretendeu modelar as variações de sucção no estado transiente e permanente do corpo de prova para o mesmo valor de sucção

simulado na etapa anterior (20kPa) e acoplado a injeção de uma vazão constante de  $2,3 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$  (similar a vazão mínima aplicada pela bomba). Nas Figuras 5.16, 5.17 e 5.18 estão apresentados os resultados desta simulação. Os elementos analisados nos gráficos são os mesmos que foram utilizados na etapa de aplicação de sucção.

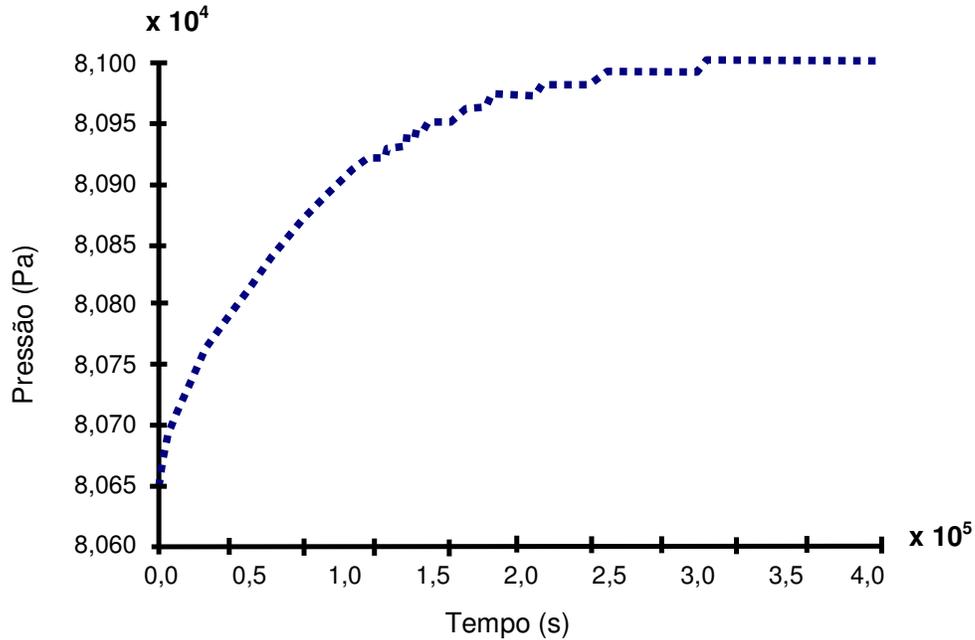


Figura 5.16 – Distribuição da pressão no recipiente da base, para  $q = 2,09 \times 10^{-5} \text{ cm}^3/\text{s}$ .

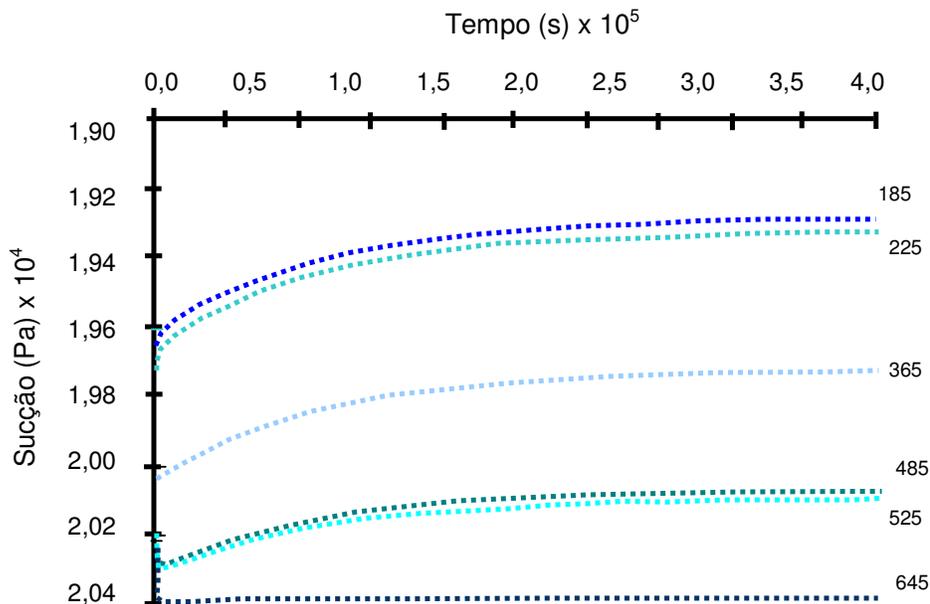


Figura 5.17 – Etapa de fluxo – Distribuição da sucção no plano vertical

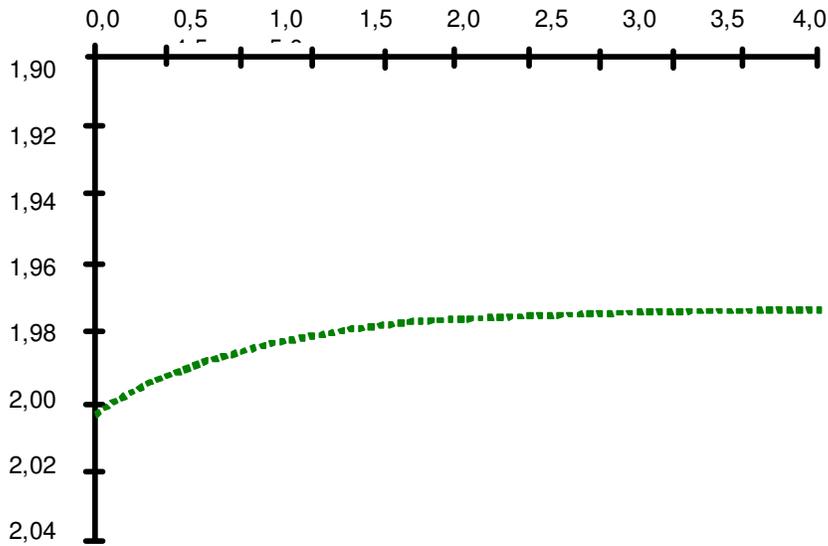


Figura 5.18 – Distribuição da sucção no plano horizontal

Por último, avaliou-se se existe um fluxo unidimensional e uniforme na amostra. Para isto observou-se a distribuição dos vetores de velocidade, nas secções transversais do corpo de prova. Na Figura 5.19 pode observar-se a distribuição de sucção no plano vertical para um tempo de 4 dias, e na Figura 5.20 pode observar-se que não existe uma distribuição uniforme da velocidade nos planos horizontais durante a aplicação da vazão constante.

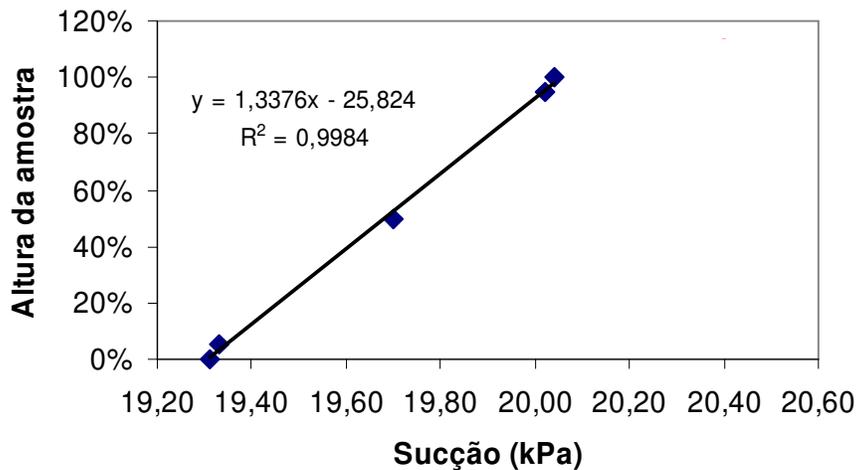


Figura 5.19 – Distribuição da sucção no plano vertical para um tempo de 4 dias

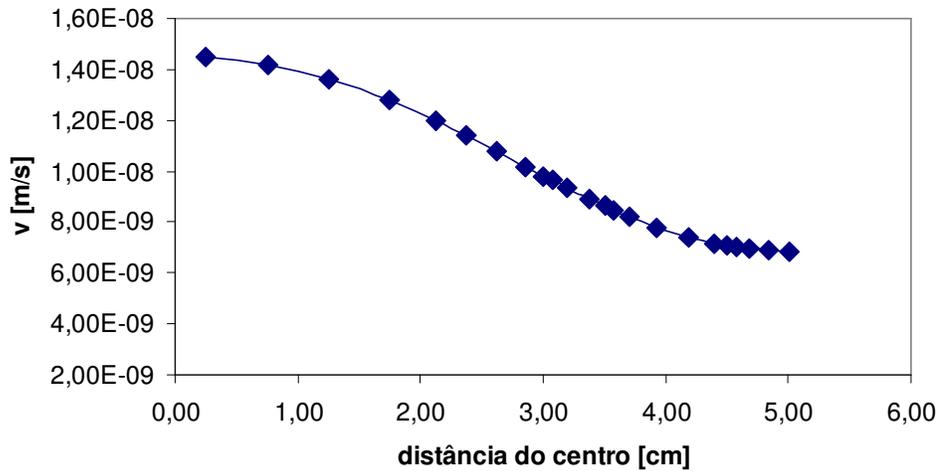


Figura 5.20 – Distribuição das velocidades no plano horizontal no meio da altura da amostra para um tempo de 4 dias.

A distribuição de sucções nas duas etapas foi satisfatória, a vazão escolhida na execução dos ensaios não gera variações significativas na sucção (ou no grau de saturação) do corpo de prova. Mas comprovou-se que a distribuição das velocidades não é uniforme, e essa não uniformidade depende da altura da amostra, como está mostrado na Figura 5.21, sendo maior quanto menor é a altura da amostra.

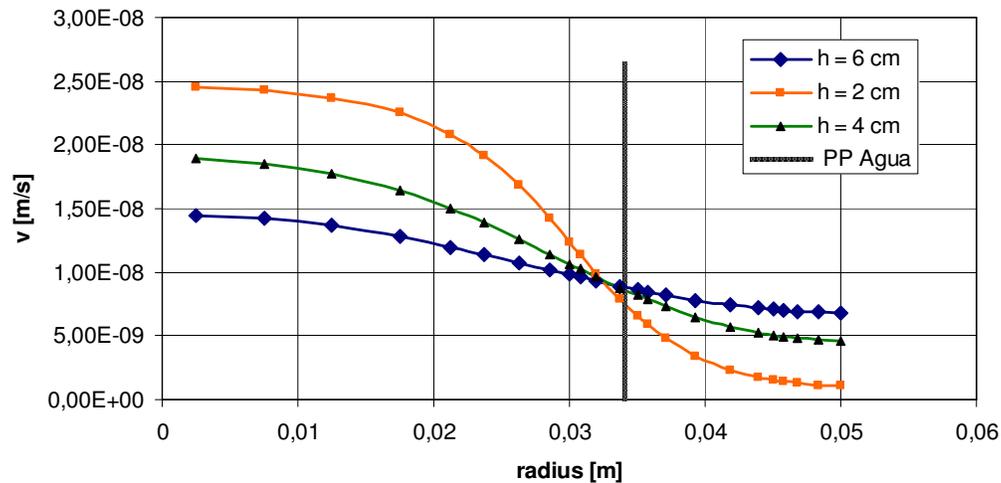


Figura 5.21 – Distribuição da velocidade para diferentes alturas do corpo de provas para uma sucção de 20kPa.

Na Tabela 5.3 está calculado o erro relativo a cada uma dessas alturas, sendo que o valor de  $k$  corresponde à sucção de 20kPa foi calculado a partir do ajuste pelo modelo de van Genutchen (1980) aplicado à função de permeabilidade (Figura 5.22).

O valor da simulação é calculado a partir dos dados de velocidade, fornecidos pela simulação, aplicando a lei de Darcy.

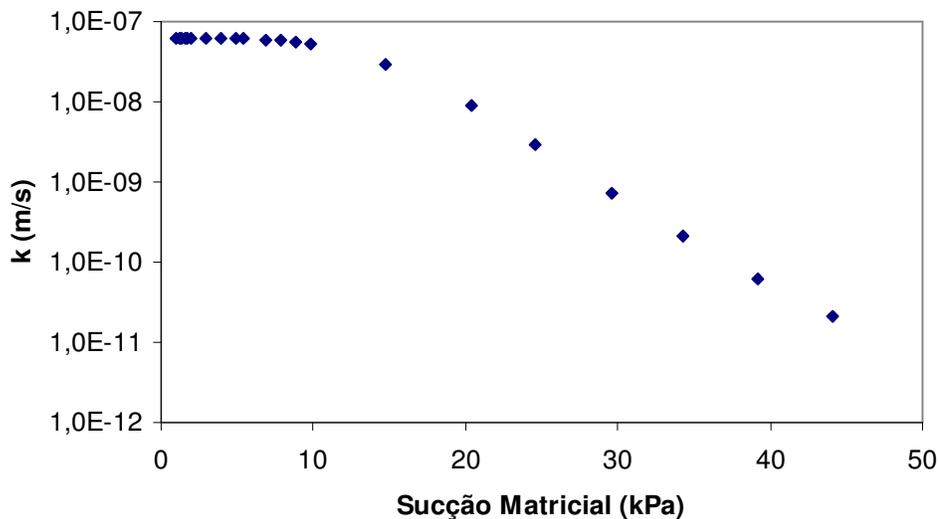


Figura 5.22 – Função de permeabilidade Areia Fina.

Tabela 5.3 – Erro no valor de k (para sucção de 20 kPa)

	Altura da amostra (cm)		
	6,00	4,00	2,00
kw simulação (m/s)	7,40E-09	5,81E-09	4,95E-09
kw van Genutchen (m/s)	8,96E-09	8,96E-09	8,96E-09
Erro (%)	17	35	45

Quando menor é o tamanho da amostra maior é o erro associado ao cálculo da permeabilidade. Todos os cálculos foram feitos considerando as distribuições de sucção e velocidades na altura meia da amostra.

### ***Influência dos discos porosos***

Também foi avaliada nesta pesquisa a influência do valor de entrada de ar da pedra porosa, no gradiente aplicado, no tempo e no valor de sucção atingido no interior do corpo de provas. As características dos discos porosos estão resumidas na Tabela 5.4. Foi simulado um ensaio do tipo carga constante, considerando que o equilíbrio é atingido quando o valor de vazão na secção transversal fica constante.

Tabela 5.4 - Características dos Discos Porosos de Alto Valor de Entrada de Ar

Valor de Entrada de Ar	Porosidade (%)	ks (cm/s)	Tamanho dos poros ( $\mu\text{m}$ )	K ( $\text{m}^2$ )
1 Bar (HF)	45	8,60E-06	2,50	8,79E-15
1 Bar (S)	34	3,47E-07	2,10	3,54E-16
2 Bar	38	1,73E-07	1,20	1,77E-16
3 Bar	34	1,70E-07	0,80	1,74E-16
5 Bar	31	1,21E-07	0,50	1,24E-16
15 Bar	32	2,59E-09	0,16	2,65E-18

ks = permeabilidade saturada, K = permeabilidade absoluta, HF = high flow, S = standard

Numa amostra de 3 cm foram aplicados valores de sucção diferentes no topo e na base. O valor da pressão de ar foi de 100kPa no topo e na base, e das pressões de água de 90kPa na Base e de 75kPa no topo. O tempo limite para todas as simulações foi de  $2 \times 10^7$  s. O valor de saturação inicial foi de 76% o que corresponde a uma sucção de 17,65kPa (Figura 5.9). Na Tabela 5.5 estão resumidas as perdas de carga que acontecem nas pedras porosas, para as pressões aplicadas.

Tabela 5.5 – Perdas de carga nos discos porosos de alta entrada de ar.

Valor de Entrada de Ar	$\Delta p$ (kPa)	t equilíbrio (s)	Sucção no cp <sup>(1)</sup> (kPa)
1 Bar (HF)	1,11	$1,10 \times 10^5$	14,72
1 Bar (S)	5,81	$1,58 \times 10^5$	17,30
3 Bar	6,46	$6,23 \times 10^6$	17,40
5 Bar	6,67	$6,23 \times 10^6$	17,50
15 Bar	7,33	sem equilíbrio p/t= $2 \times 10^7$	-

(1) valor na altura meia do corpo de provas

Isto demonstra que a perda de carga que acontece nos elementos porosos não é desprezível e deve ser considerada no cálculo da permeabilidade não saturada. As distribuições de sucção resultantes no interior do corpo de provas (para o tempo de equilíbrio) podem ser observadas na Figura 5.23. Só o disco poroso de 1BarHF consegue mostrar uma variação de sucção no interior do corpo de provas coerente com os valores de sucção aplicados no topo e na base da amostra. Na medida em que o coeficiente de permeabilidade do disco poroso diminui menor é a variação observada no caso extremo da pedra de 15 Bar nenhuma variação é observada.

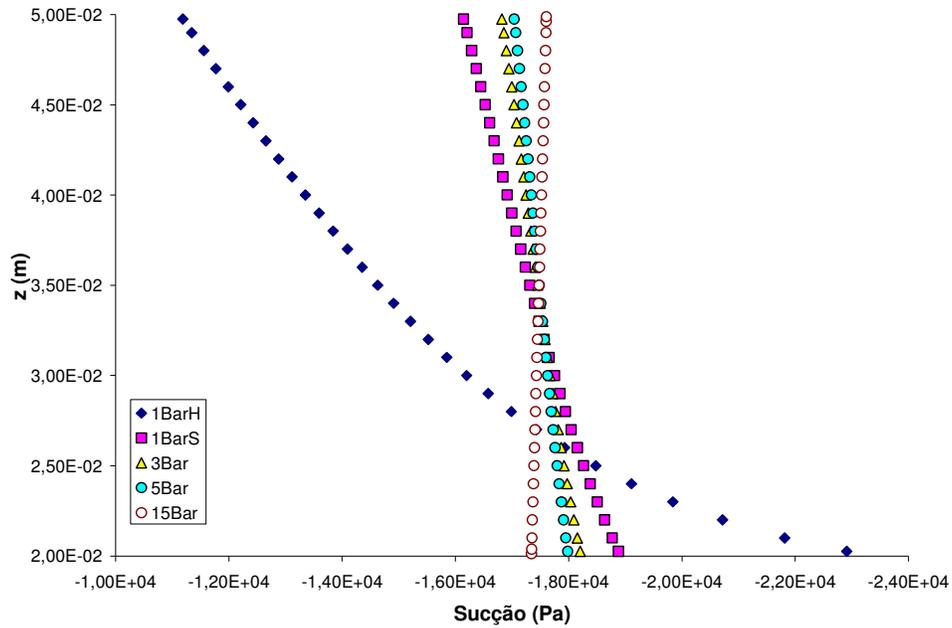


Figura 5.23 – Distribuição da sucção no interior do corpo de provas.

### ***Influência da altura do corpo de provas-Ensaio por Carga Constante***

De maneira similar ao já apresentado no caso de vazão constante, também foram efetuadas simulações para ensaios de carga constante com diferentes alturas de corpo de provas. Na Figura 5.24 estão apresentadas as distribuições de velocidades para as diferentes alturas. Na Tabela 5.6 está mostrada a influência final no cálculo do coeficiente de permeabilidade não saturado, nestes cálculos o valor da área utilizada é igual à secção transversal total do corpo de provas.

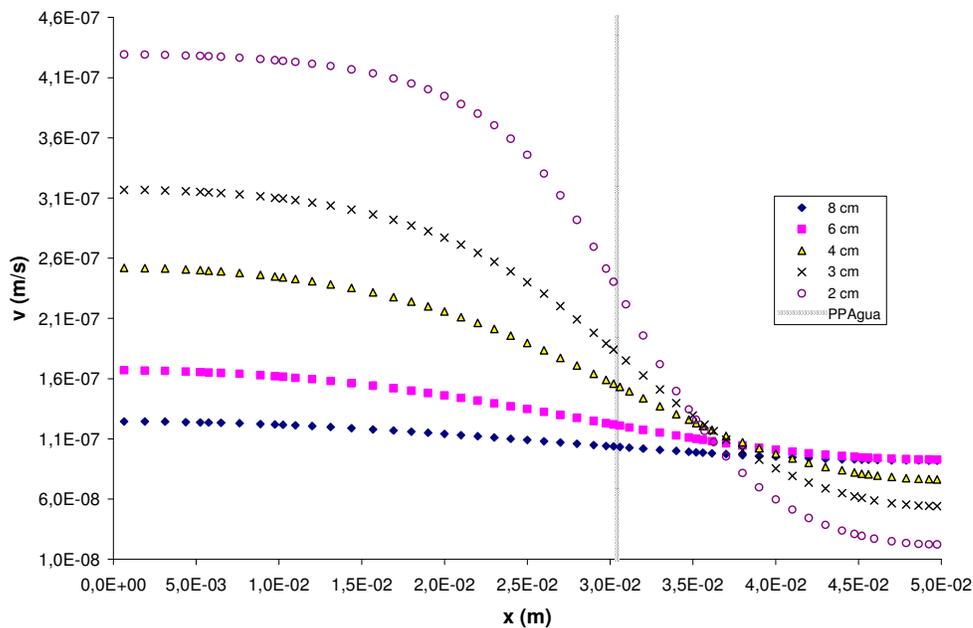


Figura 5.24 - Distribuição da velocidade

Tabela 5.6 - Influência da altura do corpo de provas

Sucção KPa	Velocidade m/s	h m	i	k simulação m/s	k ajuste VG m/s	Erro %
25	3,50E-08	0,02	34,76	1,01E-09	2,64E-09	61,84
26,5	2,94E-08	0,03	29,83	9,86E-10	1,73E-09	43,01
27,06	2,72E-08	0,04	26,22	1,04E-09	1,49E-09	30,27
28,1	2,30E-08	0,06	21,92	1,05E-09	1,13E-09	6,94
29,0	2,01E-08	0,08	19,50	1,03E-09	1,05E-09	1,72

Nas Figuras 5.25 e 5.26, pode-se ver a diferença entre a distribuição do fluxo nas amostras de 2cm e de 8cm. Da análise dos padrões de fluxo pode-se concluir que quanto maior é a amostra menor será influência das extremidades no padrão de fluxo desenvolvido.

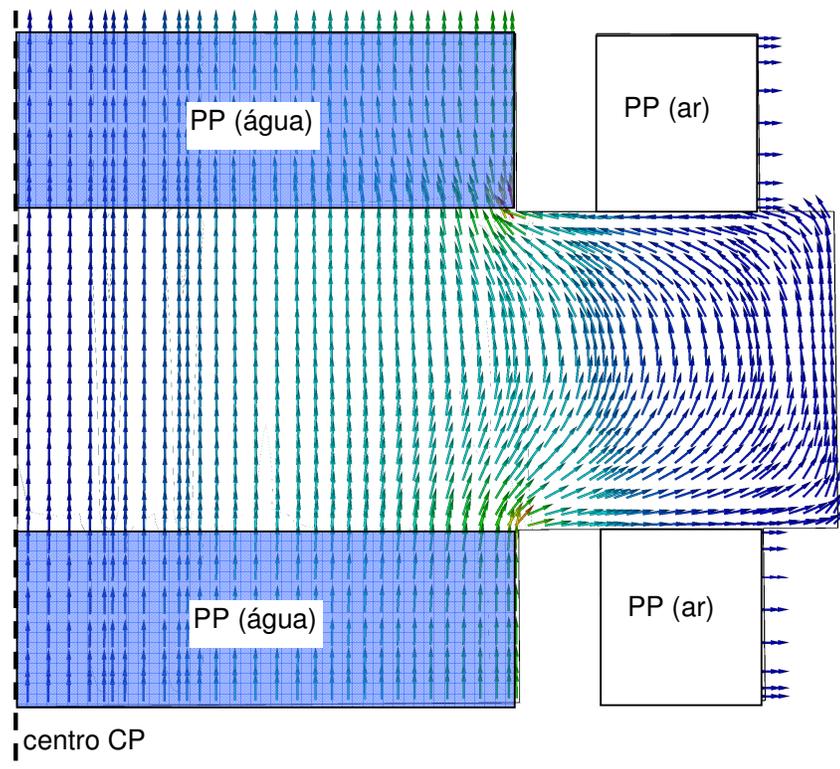


Figura 5.25 - Distribuição do fluxo de água – h do corpo de provas = 2 cm

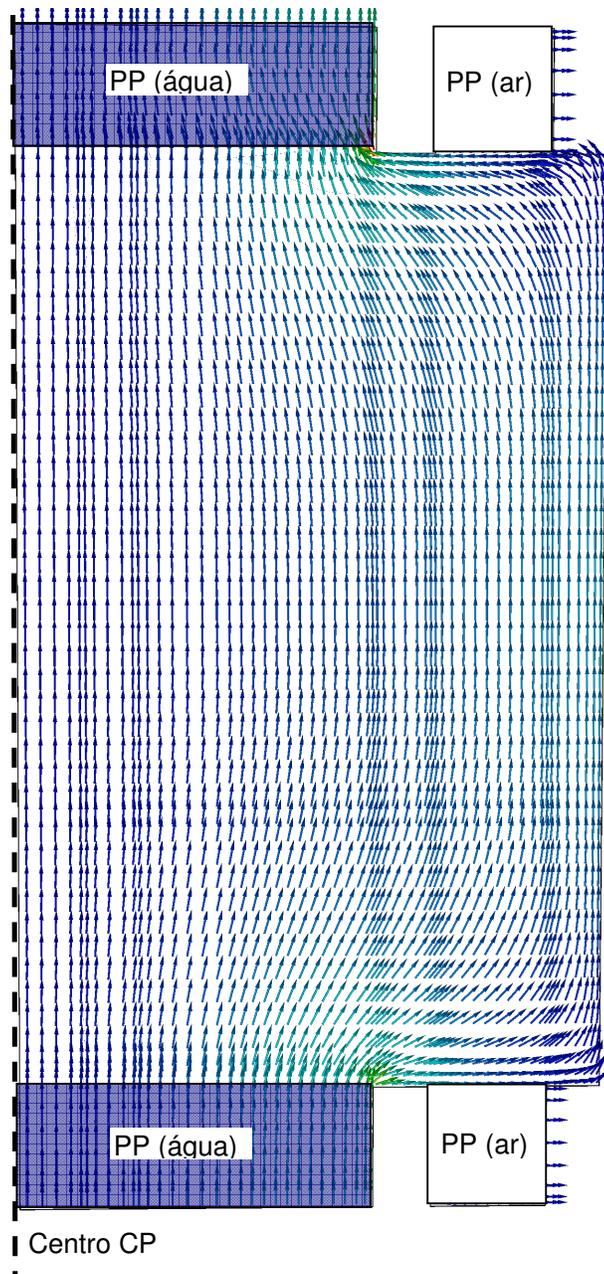


Figura 5.26 - Distribuição do fluxo de água – h do corpo de provas = 8 cm

### ***Faixa de sucção***

Para avaliar a influência da faixa da curva característica de sucção considerada no resultado final da permeabilidade não saturada, trabalhou-se com um corpo de prova de 3cm e diferentes valores de sucção final, abrangendo todos os valores apresentados na curva característica do material. Os resultados do cálculo estão apresentados na Tabela 5.7. Nesta análise utilizou-se um modelo diferente de equipamento, considerando que o ar é injetado no centro do corpo de provas, o

modelo adotado está mostrado na Figura 5.27. O valor de pressão de ar aplicado é igual na base e no topo da amostra, sendo aplicadas pressões de água diferentes no topo e na base.

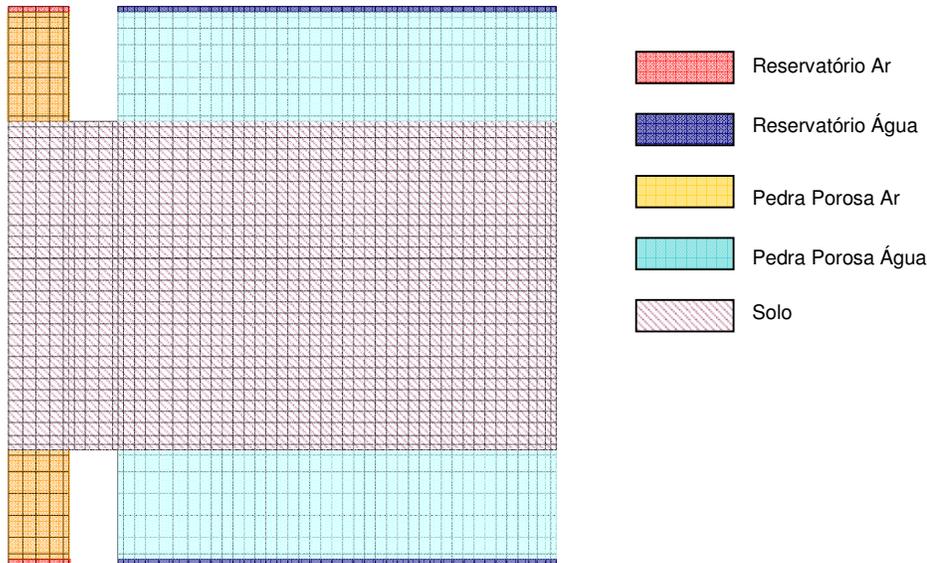


Figura 5.27 – Modelo adotado, injeção de ar no centro da amostra ( $h=3\text{cm}$ ).

Tabela 5.7 – Influência da faixa de sucção no cálculo da permeabilidade <sup>(1)</sup>

Sucção (Kpa)	$i$	$k$ simulação (m/s)	$k$ ajuste VG (m/s)	Erro (%)
5,43	14,04	6,29E-08	6,13E-08	-0,58
14,8	8,56	3,25E-08	2,92E-08	-6,98
19,7	9,80	1,17E-08	1,07E-08	-5,00
24,6	10,42	3,16E-09	2,95E-09	-2,71
29,6	10,60	7,90E-10	7,38E-10	-2,82

(1) corpo de provas de 3 cm de altura

Adotando este modelo de equipamento, as distribuições de velocidade e de sucção resultantes são uniformes e permite trabalhar com corpos de prova de altura menor, sem ter valores de erro elevados. O padrão de fluxo correspondente com este modelo está apresentado na Figura 5.28. Nas Figuras 5.29 e 5.30 estão apresentadas as distribuições de sucção e da velocidade resultantes da aplicação de 14,8kPa de sucção.

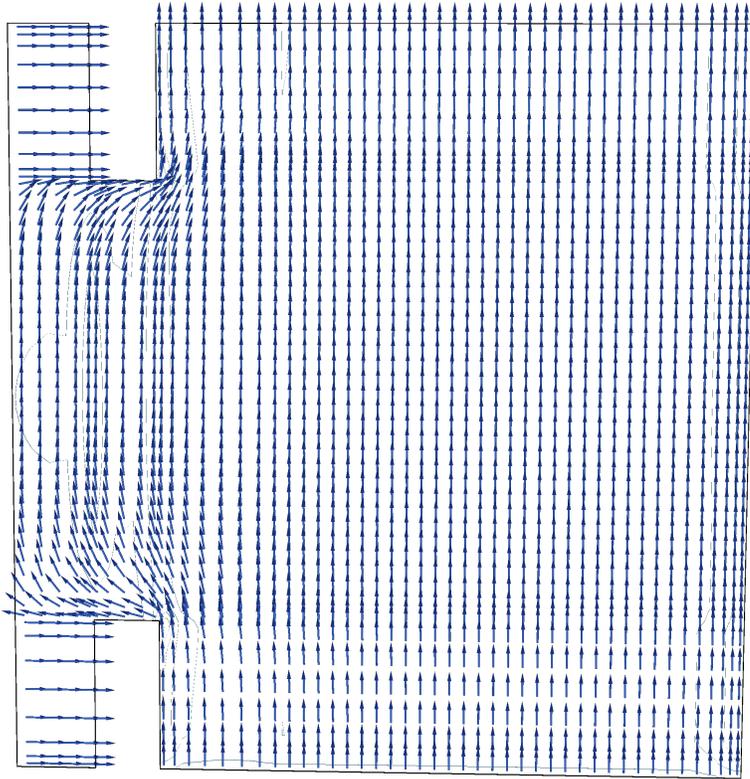


Figura 5.28 – Padrão de Fluxo – Ar no centro

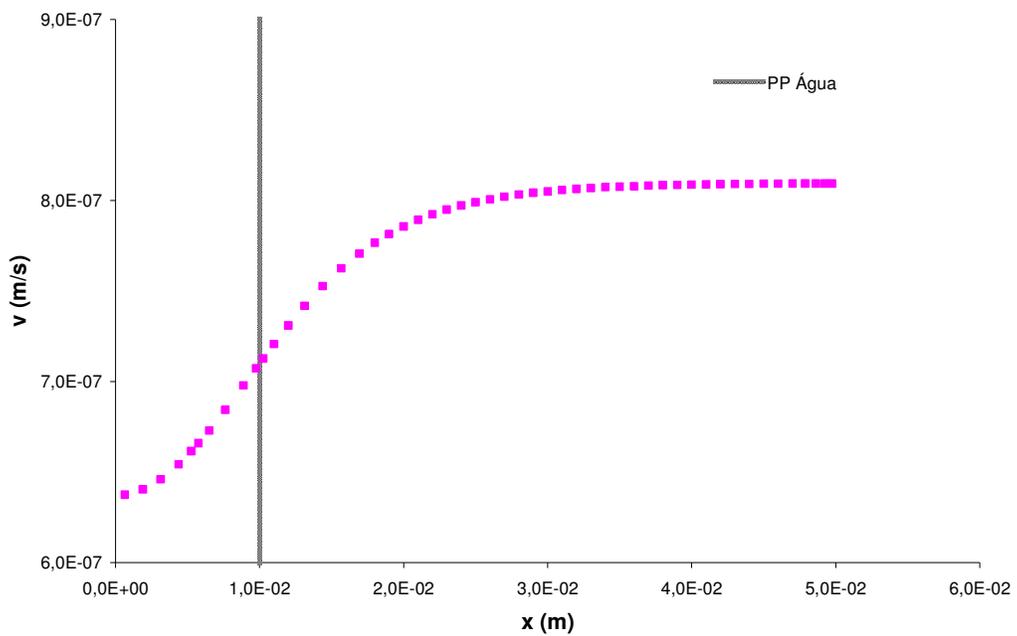


Figura 5.29 – Distribuição da velocidade, para  $z = 1,5$  cm – Ar no centro

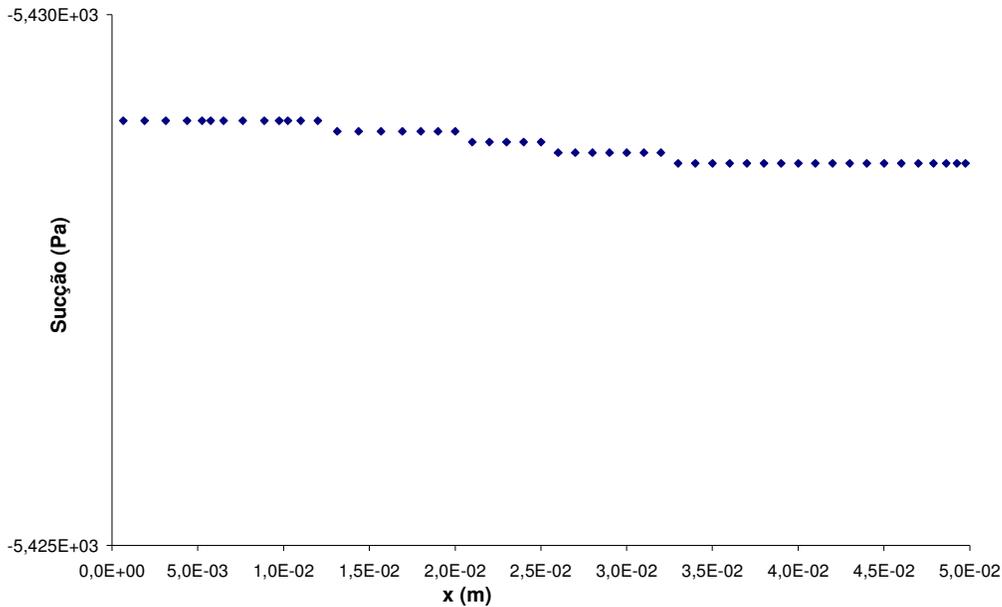


Figura 5.30 – Distribuição da sucção, para  $z = 1,5$  cm – Ar no centro

### 5.1.6.1

#### Resumo dos Resultados da Modelagem Numérica

Os resultados das análises numéricas, avaliando o funcionamento do permeâmetro PUC, mostraram que a aplicação de sucção é eficiente e consistente com os valores aplicados nos extremos do corpo de provas. A distribuição de velocidades (e da vazão) nas seções transversais não é uniforme, tanto nos ensaios de vazão constante como de carga constante. Quanto maior é o corpo de provas mais uniforme é a distribuição das velocidades (e da vazão) e menor o erro associado ao cálculo da permeabilidade.

Outro dos resultados obtidos nesta modelagem mostra que a permeabilidade do disco poroso influencia no valor máximo de sucção obtido no interior do corpo de provas e no tempo necessário para atingir esse valor.

A influência do gradiente aplicado na distribuição de sucção e de velocidade, e nos valores finais de permeabilidade, foi pesquisado por Steger et al. (2008). Dos resultados apresentados pode-se concluir que quanto menor é o gradiente, para uma mesma faixa de sucção, menor será o erro associado à determinação da permeabilidade. Isto se deve à distribuição fortemente não linear, na altura do corpo de provas, da sucção.

## 5.2. Determinação da Curva Característica de sucção

Para a determinação da curva característica de sucção foram utilizados a Placa de Pressão e o método do Papel Filtro, descritos nos item 4.3.1.3 e 4.3.2.1. Foram também desenvolvidos um sensor de umidade relativa e um tensiômetro de alta capacidade. Mais ainda, tal determinação foi efetuada a partir dos dados de porosimetria por injeção de mercúrio.

### 5.2.1. Sensor de umidade relativa

Como foi mencionado no item 4.1, uma das técnicas utilizadas para aplicar sucção é a técnica de transferência por vapor, que se baseia em impor um valor de sucção total por meio da umidade relativa em um ambiente saturado. Partindo deste princípio desenvolveu-se uma sonda para medir umidade relativa e temperatura com a finalidade de medir a sucção em solos a partir da determinação da umidade relativa (RH) das amostras.

A conversão de umidade relativa em sucção é obtida a partir da seguinte equação (Fredlund & Rahardjo, 1993):

$$s = -\frac{\rho_w RT}{M_w} \ln\left(\frac{RH\%}{100}\right) \quad \text{Equação 5-1}$$

onde

$$\rho_w (kg / m^3) = (-2 \times 10^{-6})T^4 + (0,0027)T^3 - 1,2268T^2 + 246,97T - 17673$$

ajustando os dados de Incropera & DeWitt (1996) para T (283,16K até 313,16K),

s = sucção do solo em kPa

R = constante universal dos gases (8,31432J/mol K)

T = temperatura absoluta (T=273,16+t)

t = temperatura em graus Celsius (°C)

M<sub>w</sub> = massa molecular do vapor de água (M<sub>w</sub>=18,016g/mol)

ρ<sub>w</sub> = densidade da água (kg/m<sup>3</sup>)

A variação da umidade relativa com a sucção, para uma temperatura de 20°C, é mostrada na Figura 5.31.

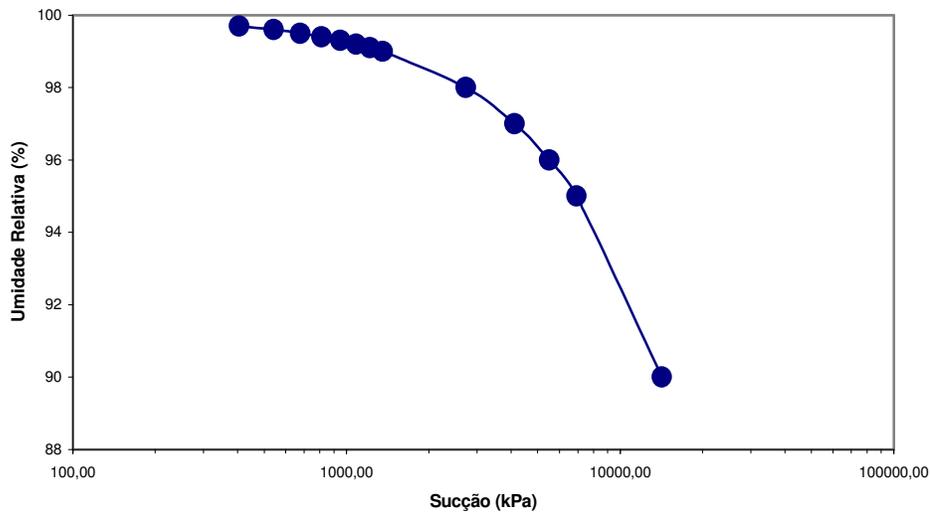


Figura 5.31 – Variação da Umidade Relativa para  $t=20^{\circ}\text{C}$ .

Nos ensaios efetuados foram utilizadas duas sondas, uma comercial (FHA646-E1 da Ahlborn, na Figura 5.32) e uma totalmente fabricada na PUC-Rio.

Em colaboração com o professor Luiz Gusmão, do departamento de Eng. Elétrica da PUC-Rio, foi construída uma sonda com um sensor de umidade HIH-4000 e sensor de temperatura da National. O primeiro protótipo da sonda está apresentado na Figura 5.33, os materiais usados na fabricação da nova sonda foram PVC e acrílico.



Figura 5.32 - Sonda de RH e temperatura – FHA646-E1 Ahlborn

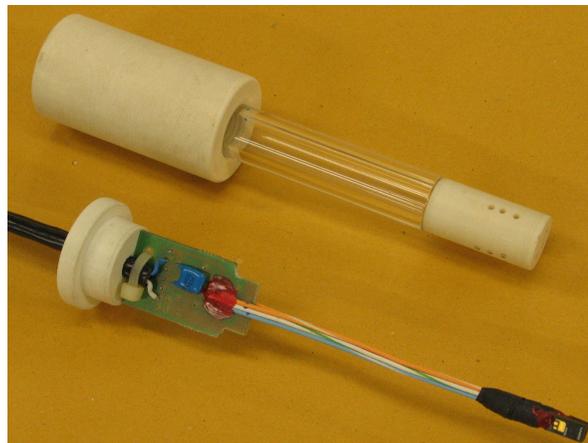


Figura 5.33 – Sonda RH e Temperatura PUC-Rio

A resposta das sondas foi verificada com valores conhecidos de RH, geradas por soluções salinas de NaCl e KCl saturadas, Figura 5.34. Os valores de sucção gerados por estas soluções estão apresentados na Tabela 5.8.

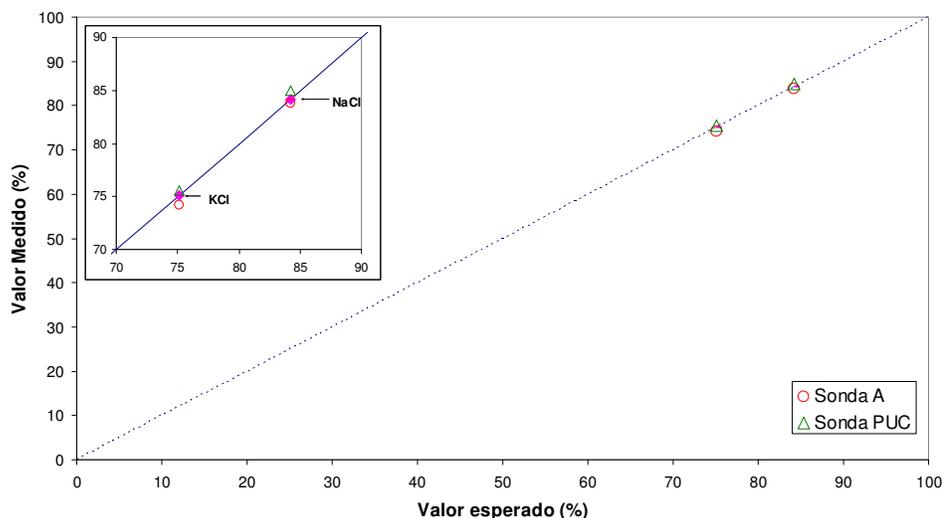


Figura 5.34 – Calibração das sondas usando soluções salinas saturadas

Tabela 5.8 – Sucções aplicadas por soluções salinas saturadas

Sal	%RH (25°C)	Sucção (kPa)	d(RH)/dT (% por °C)
NaOH · H <sub>2</sub> O	7	365183	0
LiCl · H <sub>2</sub> O	11,3	299419	-0,01
MgCl <sub>2</sub> · 6H <sub>2</sub> O	32,7	153501	-0,06
NaI · 2H <sub>2</sub> O	39,2	128604	-0,32
KNO <sub>2</sub>	48,2	100221	-0,18
Mg(NO <sub>3</sub> ) · 6H <sub>2</sub> O	52,8	87704	-0,29
Na <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> · 2H <sub>2</sub> O	53,7	85383	-0,27
NaBr · 2H <sub>2</sub> O	58,2	74332	-0,28
NaNO <sub>2</sub>	64,4	60431	-0,19
CuCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	68,4	52156	0,00
NaCl	75,1	39323	-0,02
(NH <sub>4</sub> ) <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	80,2	30300	-0,07
KCl	84,2	23617	-0,16
K <sub>2</sub> CrO <sub>4</sub>	86,5	19916	-0,06
BaCl <sub>2</sub> · 2H <sub>2</sub> O	90,3	14012	-0,08
(NH <sub>4</sub> )H <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	92,7	10409	-0,12
K <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	97,0	4183	-0,05
CuSO <sub>4</sub> · 5H <sub>2</sub> O	97,2	3900	-0,05

Para sucções baixas, foram utilizadas soluções de NaCl e KCl, ver Tabelas 5.9 e 5.10. O maior problema nas sucções abaixo de 500kPa é que a faixa de RH de interesse encontra-se entre umidades relativas de 96% a 99%, como pode ser confirmado da Figura 5.31. Para a calibração na faixa de baixas sucções foram

necessárias várias tentativas e a utilização de um recipiente hermético e isolado termicamente.

Tabela 5.9 – Sucção para diferentes concentrações de NaCl (kPa) (Extraído de Lu & Likos, 2004).

Molaridade	Temperatura				
	0°C	7,5°C	15°C	25°C	35°C
0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,2	836	860	884	915	946
0,5	2070	2136	2200	2281	2362
0,7	2901	2998	3091	3210	3328
1,0	4169	4318	4459	4640	4815
1,5	6359	6606	6837	7134	7411
1,7	7260	7550	7820	8170	8490
1,8	7730	8035	8330	8700	9040
1,9	8190	8530	8840	9240	9600
2,0	8670	9025	9360	9780	10160

Tabela 5.10 – Sucções para diferentes concentrações de KCl (kPa) (Extraído de Lu & Likos, 2004)

Molaridade	Temperatura						
	0°C	10°C	15°C	20°C	25°C	30°C	35°C
0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
0,1	421	436	444	452	459	467	474
0,2	827	859	874	890	905	920	935
0,3	1229	1277	1300	1324	1347	1370	1392
0,4	1628	1693	1724	1757	1788	1819	1849
0,5	2025	2108	2148	2190	2230	2268	2306
0,6	2420	2523	2572	2623	2672	2719	2765
0,7	2814	2923	2996	3057	3116	3171	3226
0,8	3208	3353	3421	3492	3561	3625	3688
0,9	3601	3769	3846	3928	4007	4080	4153
1,0	3993	4185	4272	4366	4455	4538	4620

A umidade relativa gerada por soluções salinas, mesmo saturadas, é altamente sensível às variações de temperatura, como já comentado na calibração das sondas e como pode observar-se no gradiente apresentado na Tabela 5.8. Isto obrigou ao desenvolvimento de uma câmara especial para a calibração e execução dos ensaios. Para minimizar ainda mais as mudanças de temperatura, depois de montado, o conjunto câmara-solução-sonda era colocado dentro de uma caixa de isopor. A estabilização das leituras era acompanhada pelos sistemas de aquisição de dados. Um esquema da montagem do ensaio está mostrado na Figura 5.35.

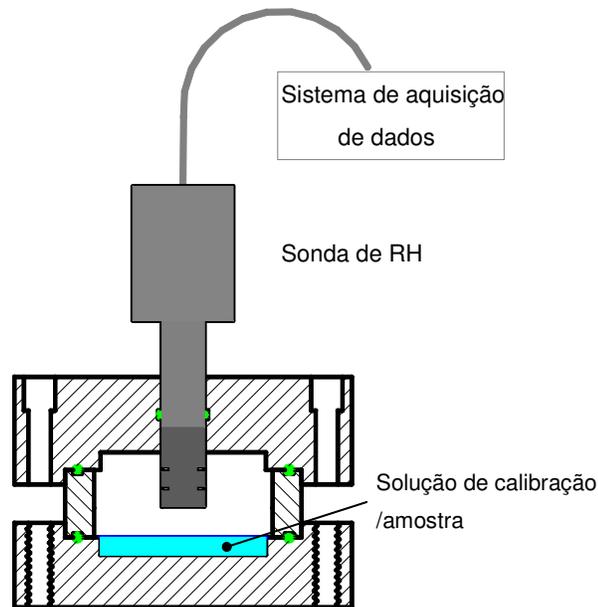


Figura 5.35 – Sistema de medição da Umidade Relativa

A influência da temperatura na umidade relativa gerada por soluções salinas é mostrada no trabalho de Tang & Cui (2005). Eles avaliaram a variação de RH até temperaturas de 60°C e os resultados obtidos mostram que para as soluções salinas de  $MgCl_2$ ,  $Mg(NO_3)_2$ ,  $NaNO_3$  e  $KCl$ , o valor de RH diminui com o aumento da temperatura. Para soluções saturadas de  $NaCl$ , o valor de RH aumenta com a temperatura. Os resultados apresentados por estes pesquisadores indicam a importância de ter um rigoroso controle da temperatura quando se trabalha com controle ou medição de sucção por transferência de vapor. Segundo Fredlund & Radarhjo (1993) indicam que para se ter uma exatidão de  $\pm 10\text{kPa}$  na medição da sucção total é necessário controlar a temperatura do ambiente com uma exatidão de  $\pm 0,0001\text{ }^\circ\text{C}$ . Os resultados apresentados por Tang & Cui (2005), na determinação da umidade relativa gerada pelas diferentes soluções salinas, mostram que variações de  $\pm 0,5\text{ }^\circ\text{C}$  não impõem variações significativas no valor de RH. Porém, é importante notar que variações bruscas da temperatura podem provocar variações bruscas de umidade relativa, e em ambientes de umidade elevada ( $>90\%$ ) isto pode provocar condensação da água sobre a sonda. Uma das soluções que apresenta uma sensibilidade pequena às variações de temperatura (ver Figura 5.36), é a solução saturada de  $NaCl$ , o que confirma a escolha. Como já foi mencionado (item 4.1) outras das soluções usadas para gerar sucção são as soluções ácidas. Nesta pesquisa, por razões de segurança, optou-se por não trabalhar com este tipo de solução.

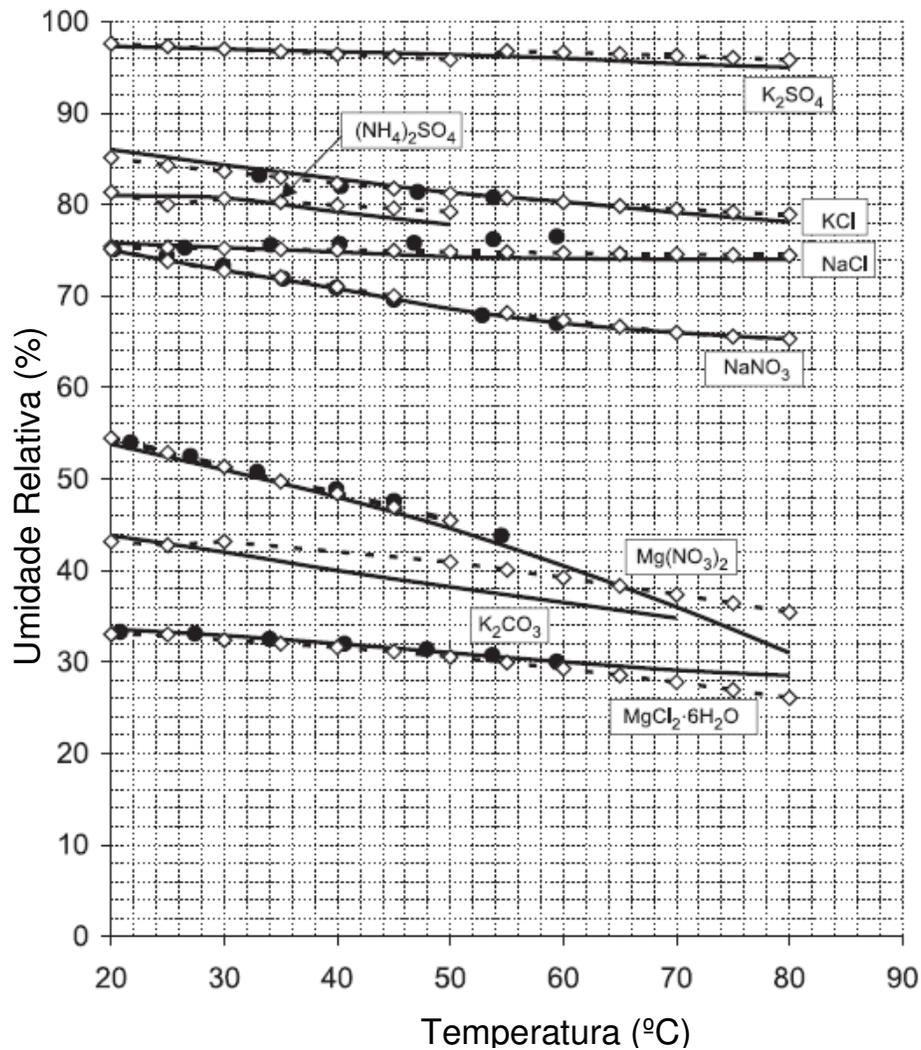


Figura 5.36 – Variações na umidade relativa com a temperatura para diferentes soluções (Tang & Cui, 2005).

Os valores de sucção medidos com estas sondas serão apresentados no Capítulo 6 de Resultados.

## 5.2.2 Tensiômetro de alta capacidade

Para medir diretamente os valores de sucção, foi desenvolvido um tensiômetro de alta capacidade e um sistema de saturação para o tensiômetro. O tensiômetro desenvolvido inicialmente era composto de três partes, de maneira semelhante ao apresentado no item 4.3.1.2, uma pedra porosa de alta entrada de ar de 15Bar, um transdutor diferencial de pressão DRUCK PD-10, e um reservatório de água, de 1mm

de profundidade. Depois de apresentar problemas elétricos na aquisição, o protótipo original foi modificado, de acordo com o desenho apresentado na Figura 5.37.

No novo projeto, o transdutor de pressão foi trocado por um sensor menor e com saída da fiação no meio do transdutor (9-DP da DRUCK). A idéia é fazer um instrumento como uma peça única, sem a presença de anéis de vedação de borracha. O novo projeto do tensiômetro, apresentado na Figura 5.37, prevê que o sensor de pressão será colado a duas peças de duro-alumínio, e estas por sua vez coladas entre si. Um furo entre ambas as peças permite a saída da fiação.

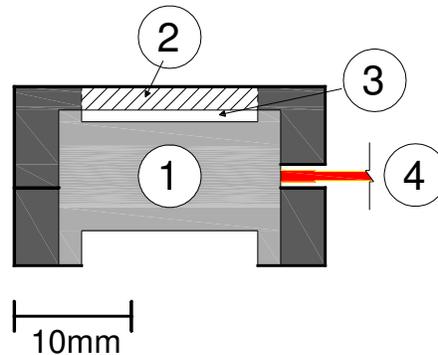


Figura 5.37 – Novo tensiômetro PUC-Rio – (1) Transdutor de pressão DP-9, (2) Pedra porosa de 15Bar, (3) Recipiente, (4) Ligação ao sistema de aquisição de dados.

O sistema de saturação projetado está mostrado na Figura 5.38. Este sistema é composto por duas peças cilíndricas de duro-alumínio. Estas peças são unidas por quatro hastes de amarração. A peça superior (2 no desenho) é retirada para fazer as medições de sucção e substituída por outra que contém a amostra de solo, de maneira similar ao sistema de peças aplicado na placa de pressão.

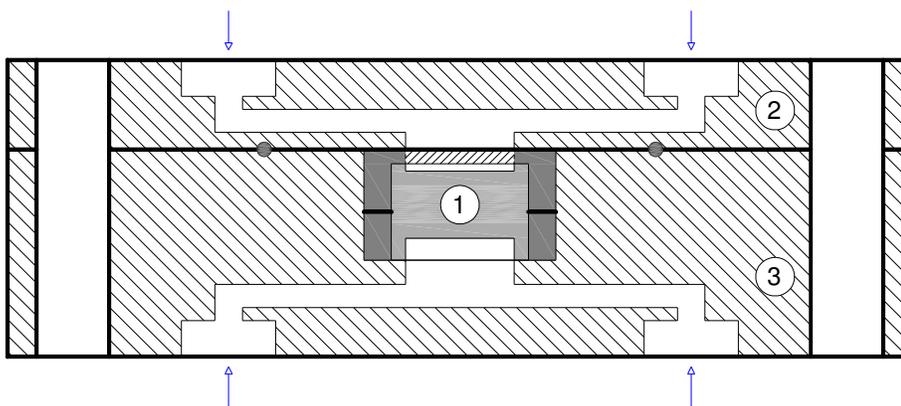


Figura 5.38 – Sistema de saturação Tensiômetro PUC-Rio. (1) Tensiômetro, (2) Peça superior, (3) Peça inferior.

Por problemas externos, não foi possível montar o novo tensiômetro. Os resultados correspondentes ao primeiro modelo estão apresentados no Anexo 2 da presente.

### 5.2.3 Porosimetria por Injeção de Mercúrio

O ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio fornece o tamanho e a distribuição de poros. Estas informações estão intimamente ligadas, entre outros, ao comportamento hidráulico do material. Na geotecnia existem vários trabalhos utilizando os dados de ensaios de porosimetria na previsão das propriedades hidráulicas dos solos, entre eles podem ser citados os trabalhos de Garcia-Bengochea et al. (1979) com permeabilidade saturada, Prapaharan et al. (1985), Romero et al. (1999), Aung et al. (2001) e Simms & Yanful (2002, 2004a) na determinação da curva característica de sucção, entre outros.

A porosimetria se baseia nas leis de capilaridade que governam a intrusão de um fluido. No caso da água, o fenômeno é governado pela equação de Laplace, no caso do mercúrio, pela equação de Washburn. Ambas as equações consideram que os poros são cilíndricos e expressam o diâmetro como uma função da pressão aplicada, do ângulo de contato e da tensão superficial do fluido. O procedimento utilizado na porosimetria pode ser assimilado a uma curva de secagem, ou seja, a injeção de mercúrio (fluido não molhante) no material seco (saturado com ar) é equivalente à expulsão de água dos poros pela injeção de ar, para o mesmo diâmetro de poros.

Como foi mencionado, é possível determinar o diâmetro de poros correspondente a cada sucção aplicada, considerando a água como fluido molhante, a partir da equação de Laplace:

$$u_a - u_w = \frac{4T_w \cos \theta_w}{D} \quad \text{Equação 5-2}$$

com  $\theta_w$  (ângulo de contato) =  $180^\circ$ ,  $T_w$  (tensão superficial) =  $72,75 \times 10^{-3} \text{N/m}$ , e  $D$  diâmetro dos poros.

No caso da porosimetria, onde o mercúrio é considerado o fluido não molhante, o diâmetro de poro correspondente a cada pressão é obtido pela equação de Washburn:

$$p = -\frac{4T_{nw} \cos \theta_{nw}}{D} \quad \text{Equação 5-3}$$

para o mercúrio o valor de  $\theta_{nw}=130^\circ$  e o valor de  $T_{nw}$  é  $485 \times 10^{-3} \text{N/m}$ .

A injeção de um fluido não molhante é equivalente à expulsão de água para o mesmo diâmetro de poros, ou seja,

$$u_a - u_w = -\frac{T_w \cos \theta_w}{T_{nw} \cos \theta_{nw}} p = 0,233 p \quad \text{Equação 5-4}$$

A partir desta equação é possível calcular a sucção equivalente a cada pressão de mercúrio aplicada. O grau de saturação equivalente pode ser calculado como:

$$Sr = 1 - Sr_{nw} \quad \text{Equação 5-5}$$

$$Sr_{nw} = \frac{n}{n_0}$$

com  $n$  = porosidade dos poros com mercúrio e  $n_0$  = porosidade total.

Romero et al. (1999) propõem modificar esta expressão para considerar o conteúdo de água residual, a partir da seguinte expressão:

$$Sr = (1 - Sr_{nw}) + w_r \times Sr_{nw} / w_s \quad \text{Equação 5-6}$$

onde  $w_r$  é a umidade higroscópica e  $w_s$  é a umidade correspondente à saturação.

Para avaliar a aplicabilidade desta técnica na obtenção da curva característica foram comparados os valores experimentais obtidos para diferentes tipos de solos com a previsão baseada na distribuição de poros.