### 4 Medida de variação de volume total em ensaios triaxiais

### 4.1. Introdução

A forma mais realista de se determinar parâmetros de resistência em solos não-saturados é através da execução de ensaios triaxiais com sucção controlada e medida de variação de volume total do corpo de prova. No entanto, a medida de variação de volume total é mais difícil e complicada que em um solo saturado, onde a variação de volume do corpo de prova é igual ao volume de água que entra ou sai da amostra, facilmente medida por um medidor de variação de volume tradicional ou uma bureta. Já em uma amostra não saturada, a variação de volume ocorre como resultado da mudança de volume de ar e água contidos nos vazios.

Neste contexto, é proposto no presente trabalho uma técnica de medida de variação de volume total de corpos de prova em ensaios triaixiais não saturados, que tem como principal diferencial a fácil implantação e o baixo custo. Este equipamento foi empregado posteriormente para medida de variação de volume total na etapa de saturação dos ensaios executados.

A seguir, são apresentados os principais métodos de medição de variação de volume total existentes, dando-se ênfase a técnica que é empregada no presente trabalho. Em seguida, é apresentada a descrição e as dificuldades envolvidas no desenvolvimento do equipamento, bem como as calibrações realizadas.

### 4.2. Métodos existentes para medida de variação de volume total

Geiser *et al.* (2000) apresentam alguns métodos existentes para medida de variação de volume em ensaios não saturados, classificando-os em três grandes categorias:

- (i) Medida da variação de volume do fluido da câmara;
- (ii) Medida dos volumes de ar e água separadamente;
- (iii) Medida direta das dimensões do corpo de prova.

A medida acurada de mudanças de volume de ar (ii) é muito difícil de ser obtida devido ao fato do volume de ar ser muito sensível a variações na pressão atmosférica e temperatura ambiente. Além disso, o vazamento de ar através de tubos e conexões é indetectável e a difusão de ar através das membranas é difícil de ser evitada (Geiser, 1999 *apud* Geiser *et al.*, 2000). Portanto, este método de avaliação de volume do corpo de prova seria problemático e impraticável em ensaios triaxiais não saturados.

Na terceira categoria (iii), a variação de volume é medida por meio de transdutores internos de deformação radial e axial que são montados diretamente no corpo de prova. Para a medida interna de deformação axial, transdutores submersíveis (LVDTs) como os utilizados por Cabarkapa e Cuccovillo (2006) podem ser empregados (Figura 37). Vários métodos para medida direta de deformação radial têm sido desenvolvidos e utilizados tais como: transdutores de proximidade, transdutores de efeito Hall (Clayton e Khatrush, 1986; Thom et al., 2008), transdutores de deformação local lateral (LDTs) (Sun et al., 2006), LVDTs radiais e transdutores de fio de resistência (Skopek e Cyre, 1995). A Figura 38 mostra um transdutor efeito Hall usado para medir a variação de volume (Thom et al., 2008). No entanto, quando uma amostra tende a deformar formando barriga, apenas uma medida de deformação radial no centro do corpo de prova não será representativa o bastante para ensaios que demandem alta acurácia (Ng et al., 2002). Além disso, transdutores de deslocamento locais podem causar um efeito de reforço no solo. Por isso, alguns sensores sem contato como os propostos por Khan e Hoag (1979) e Drumright (1987) têm sido uma alternativa (Figura 39).



Figura 37 – Medidores diretos de deformação axial e radial do corpo de prova (Cabarkapa e Cuccovillo, 2006).



Figura 38 – Transdutores efeito Hall: (a) medidor de variação axial e (b) medidor de variação radial (Thom *et al*, 2008).



Figura 39- Transdutor de deformação radial sem contato (Drumright, 1987).

Gachet *et al.* (2007) baseiam-se no processamento de fotos tiradas de forma contínua através de células Plexiglas durante o ensaio, para obter a forma e o volume do corpo de prova ao longo do ensaio (Figura 40). Para tanto, a câmera é instalada em um braço metálico que é fixado na câmara triaxial. Isto permite manter uma distância constante entre a câmera e o corpo de prova e,

consequentemente, uma calibração constante pixel-mm durante todo o ensaio. O perfil (forma) é medido ao longo de toda a altura da mesma, após calibração (Figura 41). Com esta configuração – emprego de apenas uma câmera – a medida só é possível em amostras simétricas. O método pode ser aprimorado com a instalação de diversas câmeras ou se for possível a rotação da câmera ao redor da amostra.



Figura 40– Câmara triaxial e máquina digital instalada para medida de variação de volume do corpo de prova por meio de análise de fotos (Gachet *et al.*, 2007).



Figura 41– Efeito de perspectiva (Gachet et al., 2007).

A análise dos resultados é feita por meio das imagens que são processadas e tratadas por um software desenvolvido pelos autores. O erro estimado na determinação do volume total por este método ao assumir que o raio e a altura são conhecidos com uma precisão de ± 1 pixel é de cerca de 1,26%. No entanto, não é levada em consideração à interferência de alguns fatores menos importantes tais como a deformação óptica das lentes; a deformação da câmara Plexiglas devido ao aumento de tensão confinante que pode interferir na trajetória dos raios de luz e a admissão de uma amostra axissimétrica.

Outra forma de averiguar a acurácia deste método foi utilizando uma amostra artificial porosa saturada, com a variação de volume da amostra sendo dada pelo volume de água expelido durante carregamento. Durante o adensamento isotrópico, o máximo erro relativo e desvio padrão encontrados foram de 0,25 cm<sup>3</sup> (0,1% do volume total) e 0,08 cm<sup>3</sup> (0,032% do volume total).

### 4.2.1. Medida de variação de volume total por meio da entrada ou saída do fluido da câmara triaxial

Várias abordagens de medidas indiretas de variação de volume têm sido desenvolvidas ao longo dos anos. Dentre estas, destacam-se as realizadas por meio do monitoramento da variação de volume do fluido que entra ou sai da câmara triaxial pressurizada ou por sistemas baseados em medidas de nível (Bishop e Donald, 1961; Wheeler, 1988, Sivakumar, 1993; Agus *et al.* 2000; Geiser *et al.*, 2000; Aversa e Nicotera, 2002; Ng *et al.* 2002 e Sivakumar *et al.*, 2006). No entanto, um problema específico que se tem tentando contornar é a influência da variação de volume do próprio sistema quando submetido a diferentes pressões.

Bishop e Donald (1961) desenvolveram uma célula triaxial modificada que consiste em uma câmara dupla onde a câmara interna é preenchida com mercúrio ao longo da altura do corpo de prova, sendo o restante preenchido com água e conectada a célula externa pelo topo para manter a mesma pressão nas duas câmaras (Figura 42). Uma esfera de aço inoxidável é colocada sobre o mercúrio para indicar a queda ou ascensão do nível do mercúrio e, conseqüentemente, a variação de volume do corpo de prova. No entanto, o uso de mercúrio requer medidas especiais de segurança devido sua toxidade. Cui e Delage (1996) utilizaram uma técnica similar para medir a variação de volume total de uma amostra de solo não saturado, mas água colorida foi empregada ao invés de mercúrio e os níveis d'água foram medidos utilizando um catetômetro de alta precisão.



Figura 42 – Célula triaxial modificada (Bishop e Donald, 1961)

A câmara triaxial dupla desenvolvida por Wheeler (1988) difere da concebida por Bishop e Donald (1961) por não haver abertura no topo conectando a célula interna à externa. A mesma tensão confinante é aplicada nas câmaras para evitar a expansão da câmara interna de acrílico. A mudança de volume do corpo de prova é monitorada por meio do fluxo de água saindo ou entrando na célula interna com o auxílio de um sistema de bureta conectado a um transdutor de pressão. Calibrações foram executadas para tentar corrigir qualquer mudança de volume aparente causada pela magnitude da tensão confinante (resultando na compressão do fluido da câmara, leve curvatura da placa superior, e expansão dos conectores), absorção de água pela parede da câmara de acrílico e deslocamento do corpo de prova.

Outros autores propuseram alterações no equipamento desenvolvido por Bishop e Donald (1961)– Aversa e Nicotera (2002), Ng *et al.*(2002), Yin (2003), Vassalo *et al.* (2007), Papa *et al.* (2008) e Topa Gomes *et al* (2008). A maioria dos estudos está relacionada ao material empregado na fabricação da célula interna, ao tipo de sensor utilizado para a leitura da quantidade de água que entra ou sai da câmara e no fato de se manter ou não o contato entre a câmara interna e externa pelo topo. Além disso, os mesmos têm avaliado a influência de diversos fatores tais como variação de volume do sistema com a tensão confinante, influência da variação de temperatura, absorção d'água pela célula interna e evaporação. A seguir são listados alguns equipamentos desenvolvidos e suas principais características.

Aversa e Nicoreta (2002) desenvolveram um equipamento triaxial com sucção controlada, como apresentado na Figura 43. A variação de volume foi monitorada por meio de transdutores diferenciais de pressão com acurácia de ±1 Pa (±0,1mm de coluna d'água). Além disso, apenas a câmara interna era preenchida com água.



Figura 43– Seção transversal do triaxial com sucção controlada (Aversa e Nicoreta, 2002).

Assim como Aversa e Nicoreta (2002), Ng *et al.* (2002) obtiveram a variação de volume do corpo de prova por meio da diferença de pressão entre a água dentro do tubo de referência e a célula interna. A célula interna da câmara dupla desenvolvida por estes autores possui a extremidade superior aberta, garantindo que a mesma tensão confinante seja aplicada na câmara externa e interna, eliminando qualquer expansão-compressão da câmara interna por diferença de pressão (Figura 44). Além disso, a mesma possui formato de gargalo de garrafa o que reduz sua área transversal (314 mm<sup>2</sup>), fazendo com

que a medida do nível d'água devido a qualquer variação de volume do corpo de prova se torne mais sensível. A câmara dupla foi produzida a partir de uma célula Bishop-Wesley convencional para amostras de 100 mm de diâmetro. No entanto, com as alterações, o equipamento passou a comportar apenas amostras de 38 mm de diâmetro. Alumínio foi empregado na construção da câmara interna com o intuito de minimizar o efeito de creep e histerese e contornar o problema de absorção de água pelo acrílico. Além disso, para minimizar o efeito expansão-compressão de vários tubos conectores devido à aplicação de pressão, tubos de bronze foram utilizados. Água deaerada foi empregada dentro da célula interna e do tubo de referência e uma fina camada de querosene foi adicionada na superfície de ambos para minimizar a evaporação e diminuir a taxa de difusão de ar na água. Ainda para reduzir a difusão de ar, Ng *et al.* (2002) utilizaram uma folha fina de estanho entre duas membranas de borracha envolvendo o corpo de prova.



Figura 44 – Sistema de medição de variação de volume desenvolvido por Ng *et al.* (2002).

Sivakumar (1993) também utilizou querosene para diminuir a evaporação. No entanto, de acordo com o autor, a querosene introduz um erro devido à mudança na forma da interface água-querosene. A forma do menisco pode ser côncava para cima ou para baixo, dependendo da direção do fluxo de água. Com o mesmo objetivo, Aversa e Nicoreta (2002) e Cui e Delage (1996) empregaram silicone líquido.

Agus *et al.* (2000) utilizaram uma câmara de aço inoxidável para evitar problemas de expansão da parede da célula devido ao aumento de pressão minimizando, assim como o alumínio, a absorção de água pela parede da câmara. Sivakumar *et al.* (2006) utilizaram vidro como material da célula interna do equipamento desenvolvido.

Para aumentar a rigidez da célula externa de acrílico da câmara dupla, Sivakumar (1993) reforçou a mesma com fita de fibra de vidro. Já Aversa e Nicoreta (2002), por questões de segurança, reforçaram o cilindro de Perspex envolvendo-o com uma proteção de aço perfurada.

O efeito da temperatura nas medidas de variação de volume total tem sido relatado por Stewart e Wong (1985), Wheeler (1986), Sivakumar (1993), Aversa e Nicoreta (2002), Ng *et al.* (2002). Leong *et al.* (2003) e Sivakumar *et al.* (2006).

Ng *et al.* (2002) encontraram um erro na medida de variação de volume devido à variação de temperatura de 40 mm<sup>3/o</sup>C, equivalente a 0,05%/ <sup>o</sup>C de deformação volumétrica de um corpo de prova de 38mm de diâmetro e 76mm de altura. Os ensaios foram executados em um laboratório cuja variação de temperatura era de  $\pm$  2 <sup>o</sup>C. Aversa e Nicoreta (2002) afirmaram que é difícil quantificar o efeito da variação de temperatura com acurácia no sistema utilizado por eles, por isso, instalaram o equipamento em uma sala termo-regulada em que a temperatura é controlada com variação de  $\pm$  0,5 <sup>o</sup>C.

Agus *et al.* (2000) utlizaram um controlador de pressão/volume GDS (DPVC – *digital pressure/volume controller*) para monitorar a água que entra ou sai da câmara triaxial pressurizada, notando uma forte influência da variação de temperatura do ambiente na medida de variação de volume. Durante o ensaio, o sensor de temperatura foi colocado próximo ao equipamento triaxial. Os autores estabeleceram uma relação matemática entre a variação de volume devido à temperatura e o volume de água contido na câmara no início do ensaio, o coeficiente de expansão do sistema (acessórios, tubulações, câmara, e DPVC), a temperatura de referência e a temperatura ambiente. O erro máximo encontrado foi de 0,17 cm<sup>3</sup> para um corpo de prova de 118,8 cm<sup>3</sup> (71mm de diâmetro e 30 mm de altura), que equivale a uma deformação volumétrica de 0,14%.

O equipamento desenvolvido por Sivakumar *et al.* (2006) assemelha-se ao desenvolvido por Wheeler (1986) por ter a célula interna isolada da externa e ser

completamente preenchida com água. As diferenças estão no material da célula interna – vidro – e por medir o volume de água que entra ou sai da câmara interna por meio de um medidor de variação de volume tradicional (ver Figura 45). Controladores hidráulicos de pressão são utilizados para aplicar pressões e para controlar as alterações de volume. O sistema montado é apresentado na Figura 46

Apesar das células interna e externa serem pressurizadas com o mesmo valor, alterações na medida de variação de volume foram detectadas devido à variação de volume do sistema, como já observado em outros trabalhos.



Figura 45 – Diagrama esquemático de equipamento de tensão controlada com câmara dupla (Sivakumar *et al.*, 2006).



Figura 46 – Sistema para ensaio com tensão controlada montado (Sivakumar *et al.*, 2006 e Murray e Silvakumar, 2010).

### 4.2.2. Técnicas de calibração

Mesmo após haver uma grande evolução nas técnicas de medição da variação de volume em solos não saturados em ensaios traxiais, os fatores citados anteriormente ainda interferem nas medições, mesmo que em menor proporção. Por isso, o emprego de técnicas de calibração para quantificar a variação de volume do sistema de acordo com aspectos inerentes ao ensaio como, por exemplo, a variação de volume devido à variação de temperatura e de tensão confiante, é necessário.

Leong *et al.* (2003) estudaram a variação de volume de água contida na câmara triaxial devido à rigidez da câmara e a flutuação de temperatura. Para tanto, os mesmos utilizaram duas câmaras de acrílico com capacidade de 1561 cm<sup>3</sup> e 5585 cm<sup>3</sup> para amostras de 38 mm e 71 mm de diâmetro, respectivamente, uma câmara de aço inoxidável similar a utilizada por Agus *et al.* (2000) e um corpo de prova deste mesmo material. Em cada ensaio, a câmara triaxial foi prenchida com água destilada e deaerada. Vácuo foi aplicado por uma abertura no topo da câmara para retirar possíveis bolhas de ar. Os ensaios foram executados sob tensões confinantes de 500 e 1000 kPa e se estederam, no mínimo, por 5 dias. O sensor de temperatura era posicionado na parte externa da câmara ou submerso em água numa câmara de referência (Figura 47).



Figura 47– Configuração de ensaio com sensor de temperatura submerso em uma câmara de referência (Leong *et al.,* 2003).

Na Figura 48 constam alguns gráficos típicos de variação de volume do sistema e de temperatura – medida com sensor submerso em água ou próximo a célula triaxial – ao longo do tempo, tanto para ensaios realizados em câmara de acrílico como ensaios realizados em câmara de aço inoxidável. Os gráficos mostram que as curvas de variação de temperatura e de volume possuem forma similar, mas há uma defasagem entre elas, sendo esta menor quando a temperatura é medida através do sensor submerso. Esta defasagem se deve ao fato da resposta do sensor de temperatura ser mais rápida que a do DPVC. Além disso, a água leva um tempo para chegar ao equilíbrio após variação de temperatura. Este tempo de defasagem pode ser estimado por meio da diferença entre os picos. Os autores ainda concluíram que as pressões confinantes aplicadas (500 e 1000 kPa) não interferem nos resultados.



Figura 48 - Gráficos de variação de volume e temperatura ao longo do tempo: a) câmara de acrílico e sensor de temperatura externo; b) câmara de acrílico e sensor de temperatura submerso em água; c) câmara de aço inoxidável e sensor de temperatura externo e d) câmara de aço inoxidável e sensor de temperatura submerso em água (Leong *et al.*, 2003).

Diante dos resultados, onde é observada a forte influência da temperatura nas medidas de variação de volume do sistema, os autores propuseram um método de correção que consiste basicamente na determinação do tempo de defasagem entre as leituras de variação de temperatura e variação de volume, assim como a determinação do coeficiente de expansão do sistema (a) determinado por meio da execução de ensaio com um corpo rígido, como mencionado anteriormente. Em seguida, estes parâmetros são utilizados na equação proposta por Serway (2001) apud Leong et al. (2003), que leva em consideração os mesmos fatores apresentados por Agus et al. (2000), obtendose assim a variação de volume do sistema devido à oscilação de temperatura. Os valores de  $\alpha$  (variação de volume do sistema) diminuem quando o volume de água confinada na câmara diminui, a rigidez da câmara é maior, e quando a temperatura medida é próxima a temperatura da água confinada (Figura 49). Vale ressaltar que, a variação de temperatura imposta pelos autores durante a execução dos ensaios é elevada, atingindo 4 °C. No laboratório de não saturados da PUC-Rio esta variação, normalmente, não ultrapassa ±0,5 °C.



Figura 49 – Determinação da variação volume de água confinada no sistema para corpos de prova de vários tamanhos para um erro admissível de 0,1% (Leong et al., 2003).

Além de calibrar o equipamento para alterações nas leituras do transdutor de pressão diferencial devido ao aumento de tensão confinante, Ng et al. (2002) apresentaram uma metodologia para calibrar o equipamento desenvolvido pelos mesmos - ver Figura 44 - devido à variação de volume total do sistema ocasionada pela pressão confinante, variação da temperatura ambiente, possibilidade de creep da parede da câmara interna e efeito de histerese do fluxo de água.

A calibração foi realizada utilizando um corpo de prova rígido. O procedimento adotado consistia em: (i) aumentar a tensão confinante de forma relativamente rápida; (ii) manter a pressão confinante por cerca de uma semana ou mais. Durante este período, mudanças na saída do transdutor de pressão diferencial eram continuamente monitoradas juntamente com a variação de temperatura da sala. A Figura 50 mostra um resultado típico de calibração correspondente a um incremento da tensão confinante de 100 para 200 kPa. A variação de volume aparente é calculada a partir da saída do transdutor de pressão diferencial, multiplicado por um fator de correção (CF) devido à influência da variação de tensão confinante na leitura do transdutor. Como indicado na Figura 50, a variação de volume total aparente pode ser dividida em 3 componentes: mudança de volume imediata devido à variação de pressão confinante; mudanças devido à variação de temperatura; e aumento de volume relacionado ao creep de membranas e da parede de alumínio. A mudança de volume imediata pode estar relacionada à compressão de bolhas de ar oclusas, compressibilidade da água e da membrana dupla ao redor do corpo de prova, e pequena expansão de tubos, conectores e válvulas. Já as outras duas alterações de volume são dependentes do tempo. Para separar o efeito das mesmas, os autores tracaram uma linha - tracejada, indicada na Figura 50 - que corresponde à variação de volume aparente devido ao creep das membranas e da parede da câmara. Desta forma, a variação de volume devido à flutuação de temperatura pode ser obtida subtraindo-se os valores da referida linha do valor de variação de volume total aparente. A taxa aparente de variação de volume devido ao creep é de 80mm<sup>3</sup>/por semana para uma tensão confinante de 200 kPa, que equivale a uma variação volumétrica de 0,09%/por semana, para uma amostra de 38 mm de diâmetro por 76 mm de altura. Já a variação de volume relacionada à variação de temperatura é estimada em cerca de 40 mm3/ºC, que equivale a 0.05%/ºC de deformação volumétrica.



Figura 50 – Relação entre a variação de volume aparente (AVC) e o tempo decorrido após a aplicação de pressão confinante de 100 para 200 kPa (Ng *et al.*, 2002).

A Figura 51 mostra as variações de volume imediatas no sistema provocadas pelo aumento de pressão. As variações de volume imediatas para um aumento de pressão confinante de 100 para 500 kPa são essencialmente lineares. Uma grande variação de volume ocorre, no entanto, quando há aumento de pressão de 0 para 100 kPa. Os autores sugerem que a correção da variação de volume do sistema devido ao aumento de pressão seja feita com base em uma equação do segundo grau ajustada aos pontos do gráfico da Figura 51.



Figura 51- Relação entre mudança imediata de volume pressão confinante (Ng *et al.*, 2002).

Ng *et al.* (2002) ainda calibraram o equipamento para o movimento relativo da base dentro da câmara interna durante a fase de cisalhamento. Este movimento ocasiona o aumento do nível d'água na câmara interna, que depende da área efetiva da célula de carga. Como a célula de carga é fixa, a mudança imediata de volume aparente pode ser calibrada movimentando-se a base do pedestal com uma taxa controlada de deslocamento. Uma relação típica entre deslocamento da base e variação de volume é mostrada na Figura 52. Baseando-se em várias calibrações executadas com diferentes tensões confinantes, os autores concluíram que o resultado apresentado nesta figura é reprodutível, sendo desprezível a magnitude da tensão confinante nesta parte da calibração.



Figura 52 – Relação entre variação de volume e deslocamento relativo entre a célula de carga e câmara interna (Ng *et al.*, 2002).

Assim como Ng *et al.* (2002), Sivakumar *et al.* (2006) calibraram o equipamento para aumento de pressão, variação de temperatura, creep e deslocamento da base durante o cisalhamento.

A Figura 53 mostra a variação de volume da câmara interna com o aumento de tensão confinante. A pressão na câmara foi aumentada a uma taxa de 15 kPa por minuto, até atingir a pressão de 900 kPa. A calibração foi repetida três vezes com o ensaio sendo remontado em cada uma delas. Os resultados mostraram que a variação de volume é pequena e reprodutível mesmo para altas tensões.



Figura 53 – Variação de volume aparente da câmara interna com o aumento de tensão confinante (Sivakumar *et al.*, 2006; Murray e Sivakumar, 2010).

Para avaliar a histerese do sistema devido ao aumento e diminuição de tensão confinante na câmara, Sivakumar *et al.* (2006) executaram um ensaio onde a pressão confinante foi aumentada de 0 até 900 kPa para em seguida ser reduzida até 200 kPa, sendo novamente recarregada até 900 kPa. A reprodutividade da mudança do sistema mostrou-se boa de acordo com os autores. No entanto, a redução da tensão confinante para valores muito baixos pode desencadear problemas devido à saída de ar da solução, dando origem a medidas sem acurácia de variação de volume mesmo que se tenha utilizado água deaerada na câmara.

O efeito da variação de temperatura na medida de variação de volume da célula interna foi minimizado pelos autores comparando-se a variação de volume da câmara com a variação de temperatura do ambiente. Para tanto, uma tensão confinante de 900 kPa foi mantida por cerca de 10 dias, sendo a temperatura e a variação de volume registradas ao longo do tempo (Figura 54). Durante os 6 primeiros dias a temperatura do laboratório não foi controlada. Já nos últimos dias, um sistema de controle de temperatura foi instalado para manter a temperatura do laboratório em cerca de 20 °C, registrando-se assim uma variação de temperatura de ±0,5°C. Como mostrado na Figura 54, a variação de volume da câmara correlaciona-se de forma clara com a flutuação de temperatura. A curva de calibração obtida é apresentada nesta mesma figura.



Figura 54 - Variação de medida e variação de volume corrigido de acordo com o tempo decorrido (Sivakumar *et al*, 2006)

### 4.3. Câmara triaxial dupla com medida de variação de volume total implementada

A maioria dos equipamentos empregados para determinação da variação de volume total do corpo de prova em ensaios não-saturados são onerosos. Os mais simples não permitem a aquisição contínua de dados ou realizam medidas pontuais. Desta forma, optou-se por adequar a técnica apresentada por Slongo (2008), idealizada pelo professor Tácio Mauro Pereira de Campos e aplicada de forma simplificada por Moncada (2008). A técnica utiliza uma balança analítica de precisão para determinar a variação de volume total da amostra durante ensaios com solos não saturados em câmara triaxial.

Moncada (2008) empregou a balança em ensaios de permeabilidade nãosaturada em solos residuais. O sistema consistia em uma câmara de aço totalmente preenchida com água ligada a um recipiente hermético posicionado sobre uma balança, como mostra o esquema da Figura 55. Desta forma, qualquer variação de volume na câmara triaxial é refletida no registro de massa da balança. A variação de volume total correspondente à variação de massa registrada na balança foi calculada por meio de relações matemáticas.



Figura 55– Sistema de medição de variação de volume utilizado por Moncada (2008).

Slongo (2008) trabalhou no desenvolvimento de um equipamento triaxial servo-controlado que possibilitaria a execução de ensaios com tensão ou deformação controlada em amostras de 10 cm de diâmetro. Além disso, ainda haveria a possibilidade de se trabalhar na condição saturada ou não saturada.

Os conjuntos de controle e de aquisição de dados empregados foram desenvolvidos pelo *Imperial College*. A Figura 56 apresenta o esquema do equipamento. No entanto, a montagem do equipamento não foi concluída, tendo sido desenvolvidas apenas algumas partes do mesmo, sem execução de nenhum ensaio. A parte de maior interesse para esta tese está relacionada ao sistema de medição de variação de volume total – item 12 da respectiva figura.

O princípio do sistema de medição de variação de volume total é semelhante aos empregados desde o trabalho de Bishop e Donald (1961), medindo-se o volume de água que entra ou sai da célula interna. As principais diferenças estão relacionadas à forma e ao material desta e ao fato da mesma possuir a extremidade superior aberta, permitindo que a mesma pressão confinante seja aplicada em ambas as células, evitando assim o efeito de variação de volume devido à diferença de pressão (Ng *et al.*,2002).

O sistema empregado é composto por uma balança de precisão e um reservatório em PVC (Figura 57). O funcionamento do mesmo está baseado no princípio da hidrostática de vasos comunicantes onde, através da Lei de Stevin, pode-se afirmar que, quando se tem um único líquido em equilíbrio contido no recipiente, a altura alcançada por este líquido em equilíbrio em diversos vasos comunicantes é a mesma, qualquer que seja a forma da seção transversal; e que para todos os pontos do líquido que estão na mesma altura obtêm-se também a mesma pressão. Desta forma, a medição da variação de volume total é realizada através da relação quantidade de água que entra ou sai do reservatório disposto sobre a balança de precisão. A balança escolhida por Slongo (2008) e também utilizada por Moncada (2008) é da marca Marte modelo AL500, com três casas decimais e capacidade máxima de 500g. A maior dificuldade na implantação deste sistema de medição foi a escolha do recipiente, que deveria satisfazer as seguintes condições: suportar pressões até 700 kPa, pesar em conjunto com a água menos de 500g e ter o maior diâmetro possível devido à sensibilidade na medida de pequenas variações volumétricas (Moncada 2008). Após pesquisar as características de diversos materiais (acrílico, alumínio, aco inox e resina kevlar), os mesmos foram descartados devido aos seus pesos específicos elevados. Por fim, chegou-se ao recipiente mostrado na Figura 58, que possui massa de cerca de 400g.



 Linha de Ar Comprimido
 Linha de Água Pressurizada Corpo de Prova
 Linha de Água Pressurizada Tensão Desviadora
 Linha de Água Pressurizada Tensão Confinante
 Cabo Transdutores de Pressão
 Cabo Transdutores de Descolamento (LSCDT)
 Cabo Elétroniveis
 Cabo Célula de Carga

- 1. Câmara Dupla em Nylon;
- 2. Top em PVC;
- 3. Câmara externa em acrílico reforçada;
- 4. Conjunto: Top Cap + Base com PCAEA + "solo"
- 5. Tampa da câmara triaxial;
- 6. Base superior da câmara;
- 7. Base inferior da cãmara;
- 8. Base da prensa conexões;
  9. Reservatório de aplicação de tensão axial;
- 10. Pistão da prensa;
- 11. Borracha de fedação da Bellofram;
- 12. Sistema de medição de variação
- de volume total balança;
- 13. Medidor de variação de volume;

- 15. Sistema de aquisição de dados;16. Computador para tratamento dos dados e comando;
- Box 1 sistema de aplicação de pressão de ar no topo da amostra;
- 18. Box 2 sistema de aplicação da tensão desviadora;
- 19. Box 3 sistema de aplicação de contrapressão;
- 20. Transdutor de pressão pressão de ar no topo da amostra;
- 21. Transdutor de pressão contrapressão;
- 22. Transdutor de pressão tensão confinante;
- Célula de carga;
- 24. LSCDT medidor de deformação axial;
- 25. LSCDT medidor de variação de volume do corpo de prova;
- 26. Eletroníveis medidor de deformação axial interno;

27. Válvula reguladora de pressão – responsável pela aplicação de tensão confinante.

14. Interface ar/água;

Figura 56 - Esquema do equipamento idealizado pelo prof. Tácio Mauro Pereira de Campos e apresentado por Slongo (2008).



Figura 57 - Concepção do sistema de variação de volume (Slongo 2008)



Figura 58- Reservatório em PVC (adaptado de Slongo 2008)

### 4.3.1.

# Equipamento triaxial adaptado para medida de variação de volume total

Para realização dos ensaios triaxiais com medida de variação de volume do corpo de prova durante a fase de saturação, foi adaptada uma prensa tipo

Bishop –Wesley fabricada pelo Imperial College (Figuras 59 e 60) onde é possível ensaiar amostras de 38 cm de diâmetro. A seguir são listadas as características deste equipamento sem as alterações para, em seguida, serem apresentadas as adequações feitas para a execução dos ensaios desejados.

A célula de carga que registra a força desviadora aplicada no corpo de prova através da movimentação do pistão encontrado na base (pressão RAM) é do tipo Imperial College. O *design* da câmara e as ligações externas foram projetados para execução de ensaios com a câmara completamente preenchida por água. As medidas de tensão confinante e contrapressão são realizadas por transdutores de pressão Keller de capacidade de 1034 kPa e resolução de 1kPa. O deslocamento axial é monitorado por um instrumento do tipo LVDT da marca Wykeham Farrance Ltda. de 25,4 mm de capacidade e resolução de 0,01 mm. A variação de volume do corpo de prova é determinada por meio de um medidor de variação de volume do tipo *Imperial College* (Figura 61) com capacidade de 50 cm<sup>3</sup> (de Campos 1985).

As pressões – RAM, contra-pressão e pressão confinante – são gerenciadas por motores de passo produzidos no *Imperial College*. Os mesmos possibilitam a aplicação de pressões entre 10 e 820 kPa a partir de incrementos de 0,07kPa. Para ensaios com deformação controlada, o deslocamento do pistão é imposto por uma bomba também produzida no *Imperial College*. O controle interno da bomba é regido por um motor de passo. A capacidade da mesma é de 100 cm<sup>3</sup> e o volume pode ser ajustado com incrementos de 0,0001 cm<sup>3</sup>.

A prensa é controlada pelo programa TRIAX cuja versão utilizada no presente trabalho foi desenvolvida por Toll (2002). Este software permite monitorar os deslocamentos e pressões, controlar tensões e deformações, executar ensaios com deformação controlada e com tensão controlada.



Figura 59– Esquema do equipamento triaxial com prensa tipo Bishop-Wesley produzido pelo Imperial College (sem alterações)



Figura 60- Equipamento triaxial a partir do qual foram realizadas as adaptações (fotos extraídas de Campos, 2006)



Figura 61 – Medidor de variação de volume – M.V.V. (de Campos 1985)

As modificações realizadas no equipamento para utilizá-lo no presente trabalho consistiram de forma geral em trocar a câmara de acrílico por uma câmara dupla, produzida no LGMA da PUC-Rio, acrescentar o sistema de balança para medida de variação de volume total e adaptar o motor de passo da pressão RAM para também ser utilizado na aplicação de contrapressão no topo do corpo de prova. A última alteração foi realizada para possibilitar a percolação de água pelo corpo de prova com gradientes baixos durante a fase de saturação. Na Figura 62 tem-se a foto do equipamento modificado.

A célula externa da câmara dupla foi produzida a partir da usinagem de um tarugo de acrílico. Por questões de segurança, a mesma foi reforçada com uma fita adesiva da marca 3M composta por filamentos de poliéster que possuem alta tensão de ruptura, alta resistência ao impacto e ao corte (Figura 63). Já a célula interna é de duralumínio naval liga 5052 F. Este material foi escolhido devido à sua leveza – possui peso específico de 2,80 g/cm<sup>3</sup>, 1/3 do aço; durabilidade; impermeabilidade; elevado módulo de elasticidade – duas vezes maior que o do acrílico; alta rigidez e baixo coeficiente de expansão – 3 vezes menor que o do acrílico. Desta forma, ao empregar duralumínio ao invés de acrílico na célula interna, tentou-se reduzir o problema de absorção de água e o efeito de creep e histerese, como relatado por Ng *et al.* (2002). Este material também foi empregado nas peças superior e inferiores de fechamento da câmara.



Figura 62 – Foto da prensa triaxial adaptada com a balança para medida de variação de volume total do corpo de prova através da variação de volume da câmara interna.



Figura 63– Câmara triaxial desenvolvida no LGMA da PUC-Rio

Na Figura 64 tem-se a peça de fechamento superior, onde a entrada para aplicação de pressão de ar, o medidor de deslocamento vertical e a célula de carga são visualizados. Um disco de nylon foi acoplado à célula para reduzir a área da seção transversal (22,77 cm<sup>2</sup>) da câmara interna, fazendo com que a medida do nível d'água devido à qualquer variação de volume do corpo de prova se tornasse mais sensível. O nylon possui metade do peso específico do duralumínio.

Na base de duralumínio da câmara, tem-se as entradas para aplicação de contrapressão, duas para a base do corpo de prova e uma para o topo (Figura 65). Além disso, foram projetadas duas outras aberturas para a utilização de medidores de deformação interna.

Para minimizar ao máximo a deformação do sistema devido ao aumento de pressão, principalmente a contrapressão, optou-se por utilizar o tubo WAT026808 da Waters para aplicação de contrapressão e para ligar a câmara interna ao recipiente sobre a balança. Este tubo de PTFE (politetrafluoretileno) apresenta alto módulo de elasticidade, alta resistência a tração e torção e baixa aderência.



Figura 64– Topo da câmara triaxial.



Figura 65 – Base da câmara triaxial.

## 4.3.2. Desenvolvimento e avaliação do conjunto de medida de variação de volume total

O conceito de vasos comunicantes empregado na utilização do conjunto recipiente-balança para medida da variação de volume total do corpo de prova é relativamente simples. Os principais problemas encontrados para implantação deste sistema envolveram a detecção de quais variáveis interferem na medida e como minimizar o efeito das mesmas. Inicialmente, a balança e o recipiente foram os mesmos descritos anteriormente por Slongo (2008) e Moncada (2008).

Antes de dar início à calibração da balança e subsequente execução dos ensaios, foram realizados alguns testes para avaliar a estabilidade da leitura da balança ao longo do tempo. Na primeira avaliação, as tubulações por onde são aplicadas a pressão confinante e a que dá acesso a célula interna foram acopladas diretamente ao recipiente e uma pressão confinante de 100 kPa foi imposta. Além disso, a válvula que conecta o recipiente à célula interna foi fechada sem ser adicionada água ao sistema. As variações de massa da balanca detectadas chegaram à ordem de 1 grama e, claramente, a leitura não tendeu a estabilizar. Desta forma, por acreditar que a variação de massa era ocasionada pela ação do vento proveniente do ar condicionado e da circulação de pessoas, colocou-se uma caixa de plástico para proteger a balança, com a tubulação passando por pequenos orifícios. Novamente, a variação de massa registrada na balança foi da ordem de 1 grama. Logo, trocou-se a caixa plástica, que era leve e cobria apenas a parte superior da balança, por uma caixa de isopor feita a partir de placas de 2cm de espessura e com tamanho apropriado. No entanto, ao invés de conectar as tubulações e aplicar pressão, optou-se por avaliar de antemão a estabilidade da balança apenas com o recipiente. A variação de massa ficou na segunda casa decimal. No entanto, ao conectar as tubulações, a variação passou para a primeira casa decimal, ficando evidente a forte influência de pequenas vibrações das tubulações na estabilidade da medida de massa da balança.

Para minimizar este efeito, foi desenvolvida uma caixa em PVC para proteger o prato da balança e a tubulação que ficaria interna a esta das ações do meio externo. Além disso, pretendia-se também fixar as tubulações à parede por meio de porcas simples com o-ring (Figura 66). O visor da balança ficava exposto por meio de um rasgo na porta de vidro. Uma abertura na parte anterior da caixa foi feita para possibilitar a conexão dos cabos da balança. A tubulação empregada para aplicação da pressão confinante, localizada na parte superior do recipiente, foi a mais flexível encontrada no laboratório. Para torná-la ainda menos rígida, a mesma foi aquecida e torcida em forma de espiral.

Sem aplicar pressão, os registros da balança de um dia para o outro com as conexões engatadas, utilizando a caixa de PVC foram salvos. Os resultados estão na Figura 67. Após 100 minutos, a leitura aumentou até cerca de 1 grama e depois tendeu a ficar estável, mas decaindo ao longo do tempo. Desta forma, a acurácia na medição de volume total do corpo de prova equivaleria a cerca de 2%, considerando os dados desde o início, e cerca de 0,5%, se tomados os dados apenas após 200 minutos. Apesar de parecerem variações pequenas, tem-se que ter em vista que, ao montar o ensaio, são adicionados ao sistema erros causados pela variação volumétrica da célula interna devido à pressão confinante e possivelmente temperatura, expansão da tubulação e fluência do sistema. Desta forma, torna-se necessário reduzir ao máximo variações de medida por esta parte do sistema. Além disso, esta avaliação inicial compreendeu um período inferior a 1 dia enquanto que a fase de saturação pode se estender até 2 dias e os ensaios não-saturados por mais de 1 semana.



Figura 66– Primeira caixa desenvolvida de PVC com porta de vidro e passagem para as tubulações de ar para aplicação de tensão confinante e a de contato com a célula interna. a) vista frontal/lateral e b) vista do fundo.



Figura 67 – Registro de massa da balança Marte utilizando a caixa de PVC da Figura 66 com todas as tubulações conectadas, sem aplicação de pressão.

Ao deixar apenas a caixa em reposuso sobre a balança sem as tubulações, mas protegida pela caixa de PVC, obteve-se o resultado exposto na Figura 68. A variação de massa registrada ao longo de 1 dia foi de apenas 0,01g, o que equivale a 0,02% do volume do corpo de prova. Sendo assim, toda atenção ficou voltada ao efeito da vibração da tubulação na estabilidade do sistema e da ação do vento e temperatura sobre a mesma.



Figura 68– Variação de massa da balança com o recipiente e sem as conexões, mas protegida com a caixa de PVC.

Para tentar amenizar estes efeitos, duas medidas foram tomadas: uma nova caixa de PVC, desta vez hermética, foi desenvolvida e a tubulação, ao invés de ser apenas fixada ao passar pela caixa, passou a ter a parte externa totalmente independente da interna. Placas de alumínio foram colocadas nas extremidades internas e as aberturas para entrada dos fios elétricos da balança foram isoladas após a passagem dos mesmos por massa de calafetar (Figura 69). Além disso, procurou-se para a parte interna da caixa um tubo extremamente flexível que suportasse até 1000 kPa de pressão, selecionando-se, após vasta pesquisa, o tubo de poliuretano PUN-3x0,5-BL da marca Festo que é flexível, resistente a dobras e suporta até 10 bar de pressão.



Figura 69 – Nova caixa de PVC desenvolvida com quinas revestidas por cantoneiras de alumínio e com tamanho suficiente para comportar todas as partes da balança: a) Vista frontal e b) vista do fundo

Enquanto a nova caixa de PVC estava sendo confeccionada, tentou-se avaliar o sistema de fixação da tubulação interna independente da externa na caixa antiga. Para tanto, utilizou-se um tubo de silicone extremamente flexível empregado na retirada de sangue na parte interna, sem aplicação de pressão. Obviamente, esta tubulação não suporta pressões elevadas. Apesar da variação de massa ser bem menor que aos dos demais testes, o resultado ainda não foi satisfatório (Figura 70). Neste período, notou-se que, a balança da marca Marte apresentava uma certa instabilidade no prato de suporte quando qualquer tubulação era conectada ao recipiente, o que, acredita-se, influenciava também na instabilidade e aparente fluência na medida de massa. Este efeito era evidente, principalmente, nas primeiras 12 horas. Este mesmo efeito pôde ser observado ao ser executado o mesmo teste com o tubo da marca Festo (Figura 71). Desta forma, trocou-se a balança por uma Ohaus ARA520, cujo valor da divisão real é de 0,01g, repetibilidade 0,01g e linearidade ± 0,02g. Apesar das configurações serem aparetemente desvantajosas em relação à Marte, que possui divisão real igual a 0,001g, esta balança é mundialmente conhecida por sua qualidade. Como o InMetro só verifica esta classe de balança para medidas de 0,1g, avaliou-se a mesma para medidas na segunda casa decimal com auxílio de uma pipeta de precisão do laboratório de Microbiologia do LGMA. Os valores registrados pela balança na segunda casa decimal e lidos na pipeta foram exatamente os mesmos em 10 testes, com isso, verificou-se que a balança tem uma precisão de 0,01g.



Figura 70 – Variação de massa com a câmara de PVC, tubulação interna completamente independente da externa e sem aplicação de pressão. Empregou-se tubo de silicone nesta avaliação.



Figura 71 – Variação de massa com a câmara de PVC, tubulação interna completamente independente da externa e sem aplicação de pressão. Empregou-se tubo da marca Festo.

As avaliações de medida de variação de volume a partir de então foram realizadas utilizando a nova câmara de PVC, o tubo de poliuretano da marca Festo na parte interna da caixa e a balança Ohaus. O resultado da primeira avaliação do sistema, sem aplicar pressão e sem conectar à câmara triaxial é apresentado na Figura 72. O desvio padrão nos dados foi de apenas 0,05, com a maior variação sendo de 0,11g, equivalente a uma variação de volume de 0,18%, mesmo antes de ser aplicada pressão. Após este teste, a configuração do conjunto prensa triaxial mais sistema de medida de variação de volume foi estabelecida, sendo o esquema do equipamento exposto na Figura 73.



Figura 72– Variação de massa com o sistema de medida de variação de volume composto pela balança Ohaus, caixa de PVC apresentada na Figura 69, tubos de poliuretano da marca Festo internos à caixa, sem aplicação de pressão e sem estar conectado a câmara triaxial.





Figura 73– Layout da prensa triaxial adaptada com a balança para medida de variação de volume total do corpo de prova através da variação de volume da câmara interna.

Para finalizar a análise de estabilidade do sistema de medida de variação de volume total isoladamente, mais um ensaio foi executado. O mesmo consistiu em interligar o recipiente à célula interna da câmara triaxial, ambas preenchidas com água, como mostrado Figura 73, com pressão confinante aplicada, mas sem corpo de prova. Para tanto, a tensão confinante foi elevada rapidamente até 545 kPa. Durante o ensaio a temperatura do ambiente foi monitorada através de uma sonda de temperatura desenvolvida por Moncada (2008) em parceria com o professor Luiz Gusmão do departamento de Engenharia Elétrica da PUC-Rio. O intuito deste ensaio era averiguar a estabilidade do sistema de medição mediante a aplicação de pressão e uma possível influência da variação de temperatura. A válvula que conecta a célula interna ao recipiente foi fechada para que não fossem consideradas variações de massa devido à variação de volume da célula interna e, após 20 minutos, iniciou-se a medida de massa da balança, como mostrado na Figura 74. O desvio padrão foi ainda menor, 0,01g, que o da análise anterior, onde não havia sido aplicada pressão confinante e não havia água para um período de 5 dias. A maior variação encontrada equivale a 0,03% na medida de volume total do corpo de prova, sem nenhuma correção aplicada.



Figura 74– Variação de massa do sistema de medição de variação de volume com pressão de 545 kPa aplicada, mas sem contato, durante as leituras, com a câmara interna.

A avaliação da variação de temperatura foi motivada devido à constatação por alguns autores da influência desta variável nas medidas de variação de volume total. Ng *et al.* (2002) encontraram um erro de 0,05%/<sup>o</sup>C na medição de deformação volumétrica de um corpo de prova de 38 mm x 76 mm. No entanto, a variação de temperatura durante os ensaios era de ±2<sup>o</sup>C, muito superior a

variação do laboratório de não saturados da PUC-Rio que é de cerca de ± 0,5 °C. Outros autores, como Aversa e Nicoreta (2002), optaram por instalar o equipamento em uma sala termo-regulada cuja temperatura é controlada com variação de ± 0,5 °C. As variações de temperatura e massa do ensaio são mostradas na Figura 75. Nota-se que não há relação aparente entre a variação de temperatura e a variação de massa quando o sensor está medindo a temperatura da sala. Já a tensão confinante influencia na medida de massa, como indica a Figura 76. Sendo possível a correção da medida da balança de acordo com a tensão confinante



Figura 75 – Variação de massa e da temperatura ambiente ao longo do tempo com pressão de 545 kPa aplicada, mas sem contato, durante as leituras, com a câmara interna.



Figura 76 – Variação de massa e de tensão confinante ao longo do tempo com pressão de 545 kPa aplicada, mas sem contato, durante as leituras, com a câmara interna.

Para melhor avaliar a influência da tensão confinante no registro de massa da balança, um ensaio com aumento e decréscimo de tensão confinante foi executado, sem permitir, no entanto, o contato com a célula interna da câmara triaxial. Os resultados obtidos podem ser observados na Figura 77. As linhas de tendência tanto para o aumento como para o decréscimo de tensão confinante apresentam o mesmo coeficiente angular. Já o coeficiente linear difere, pois a tensão confinante mais baixa não é a mesma nos dois estágios.



Figura 77 - Variação de massa registrada pela balança com o aumento de tensão confinante sem considerar a variação de volume da célula interna da câmara triaxial

A outra avaliação realizada levou em consideração o sistema como um todo, ou seja, o recipiente sobre a balança estava em contato permanente com a célula interna da prensa triaxial. Uma tensão confinante de cerca de 500 kPa foi aplicada. Não havia corpo de prova durante o ensaio, logo, as drenagens encontravam-se fechadas. Ao atingir a tensão desejada, as leituras começaram a ser registradas após 30 minutos durante o período de uma semana, como mostram os gráficos das Figura 78 e Figura 79.

Assim como observado anteriormente na análise apenas do conjunto de medição de variação de volume, mais uma vez, detectou-se que a variação de temperatura na sala, que neste período não ultrapassou ±0,3°C, não exerceu influência significativa na medida de massa. Já a variação da tensão confinante, mesmo inferior a 1 kPa, exerceu uma forte influência no registro de massa pelo sistema. Mesmo assim, a maior variação obtida no período de aproximadamente uma semana é de 0,35 gramas, que equivale a 0,61% do volume do corpo de prova. Os dados apresentaram um desvio padrão de 0,167 e variância de 0,028. Para um período de 3 dias, estimado como máximo de duração dos experimentos programados, a maior variação na medida de massa foi de 0,19 gramas, que equivale a 0,33% do volume do corpo de prova. Além da variação de tensão confinante, os resultados também podem ter sido influenciados pelo

creep da parede da célula interna (pouco provável pois a mesma é de duroalumínio), do disco de nylon utilizado para diminuir a área da superfície de água, expansão dos tubos e pelo fato de poder haver ar ocluso em partes do equipamento. O último problema foi solucionado, como será mostrado a seguir, através do preenchimento da câmara interna com aplicação de sucção na câmara triaxial.



Figura 78 – Variação de massa e de tensão confinante ao longo do tempo com pressão confinante de 500 kPa aplicada, em contato, durante as leituras, com a câmara interna.



Figura 79 - Variação de massa e de temperatura, com sensor medindo a temperatura ambiente, ao longo do tempo com pressão confinante de 499,5 kPa aplicada, em contato, durante as leituras, com a câmara interna.

Após a execução das calibrações, que são apresentadas no item a seguir e de definir a metodologia de execução, um último teste foi feito com um corpo de prova produzido a partir de um bloco cimentício poroso (Figura 80). Além disso, o sensor de temperatura, que antes se encontrava entre a balança e a câmara, foi fixado à célula externa. O corpo de prova, antes da montagem do ensaio, permaneceu submerso por um período superior a 2 dias. Na montagem do ensaio, a câmara interna foi preenchida com água deaerada, aplicando-se uma sucção na câmara de no máximo 20 kPa. Sucção de mesma magnitude foi aplicada no corpo de prova pelo topo para evitar a expansão da membrana (justificativas e mais detalhes sobre a execução dos ensaios constam no capítulo 8). Para garantir que o corpo de prova estivesse saturado, um volume equivalente a 3 vezes o volume total do CP, aproximadamente 250 cm<sup>3</sup> de água, foi percolado aplicando-se uma confinante de 10 kPa e uma sucção de -7kPa no topo. Em seguida, a confinante foi elevada a uma taxa de 25 kPa/h, concomitantemente com a contrapressão, até 375kPa, impondo-se uma tensão efetiva de 10 kPa. Para verificar se o CP estava saturado, aumentou-se a confinante até 400kPa, obtendo-se um valor de B igual a 0,76. Em virtude da elevada rigidez do corpo de prova utilizado, não se esperava obter um valor de B elevado. Desta forma, a contrapressão foi elevada para 390 kPa e notou-se que água continuava entrando no corpo de prova. Em seguida, uma tensão de 450 kPa de confinante e 440 kPa de contrapressão foram aplicadas e a entrada e saída de água no corpo de prova, bem como a variação de tensão confinante, contrapressão e temperatura foram monitoradas por 15 dias (Figuras 81 a 84).



Figura 80 – Corpo cimentício poroso empregado no ensaio de avaliação do sistema de medição de variação de volume total.

Nota-se na Figura 81 que neste ensaio há uma tendência da massa registrada pela balança decrescer com o aumento da tensão confinante e de diminuir com a queda da mesma. O mesmo ocorre com a contrapressão (ver Figura 82). As mudanças bruscas para t=1500 min e t=13000 min da tensão confinante se devem ao ajuste automático de pressões realizado pelo equipamento.



Figura 81– Variação de massa registrada pela balança e da tensão confinante ao longo do tempo. Ensaio com corpo de prova cimentício poroso.



Figura 82 – Variação de massa registrada pela balança e da contrapressão ao longo do tempo. Ensaio com corpo de prova cimentício.

O processo de saturação estendeu-se ainda por cerca de 9 dias (t=13.000 min), com a entrada de aproximadamente 4 cm<sup>3</sup> de água no CP (ver Figura 83).

Ao comparar a variação de massa registrada pela balança à variação de temperatura, tem-se uma relação clara e direta entre as mesmas (Figura 84). Este comportamento não havia ficado claro nos ensaios anteriores devido a pequena amplitude da temperatura da sala (±0,3 °C) ao ser comparada com a deste ensaio, cujo sensor de temperatura estava acoplada na câmara, que registou queda de até -1,2 °C ao longo de um único dia. No período que foi executado o último, de 22 de dezembro de 2011 até 06 de janeiro de 2012,

verão no Rio de Janeiro, as temperaturas máximas são mais elevadas, a amplitude térmica entre o dia e a noite é maior, com dias quentes que podem ser conjugados com chuvas intensas que baixam a temperatura de forma demasiada.

No dia 26 de dezembro de 2011 (t=14700min), houve uma queda brusca na temperatura máxima diária registrada no Rio de Janeiro passando de 33 °C, no dia anterior, para 26 °C, ocasionando uma variação brusca de temperatura registrada junto à câmara. Evento semelhante teve início no dia 01 de janeiro de 2012 (t=14600min), porém ao longo de dois dias. Ambas as quedas de temperatura foram seguidas de chuvas intensas<sup>1</sup>. Estas duas variações interferiram diretamente na massa registrada pela balança, como nota-se na Figura 84. Variações de temperatura junto à câmara, que giram em torno de ±0,2 °C, devido à amplitude térmica diária (dia e noite), ocasionam variações de massa de ±0,07g, como observa-se nos últimos 3 dias (a partir do tempo 16500min). Esta variação de massa equivale a 0,1% do volume total do corpo de prova.



Figura 83 - Variação de massa registrada pela balança e do volume registrado pelo MVV ao longo do tempo (variação positiva implica em água entrando no CP). Ensaio com corpo de prova cimentício.

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Dados climáticos e pluviométricos retirados do site do Inmet



Figura 84 - Variação de massa registrada pela balança e da temperatura medida junto à célula ao longo do tempo. Ensaio com corpo de prova cimentício.

O efeito da variação da temperatura da câmara é notado também na tensão confinante e na contrapressão, tendo em vista que em processos de calibração dos transdutores de pressão não ter sido observada nenhuma influência significativa da temperatura. Logo, apesar de não ter sido implementado neste trabalho, acredita-se que a melhor forma de minimizar a interferência da temperatura nos resultados é instalando um sensor dentro da câmara ou em uma câmara reduzida, similar a triaxial e submetida à mesma tensão confinante para calibração. Outras medidas de melhor isolamento térmico de tubulações e compressor de ar, que hoje encontra-se do lado externo do laboratório, ajudem a diminuir a variação de temperatura na câmara.

A seguir são apresentadas as calibrações do sistema para variação de tensão confinante, assim como os ensaios para obtenção da relação entre a massa registrada na balança e a variação de volume total do corpo de prova.

### 4.3.3. Calibração do sistema de medição de variação de volume total

Para se ter uma ideia inicial da relação entre a massa registrada pela balança e a variação de volume total do corpo de prova, foram utilizadas relações geométricas, chegando-se à seguinte relação:

$$\Delta Vol = \frac{\Delta m}{Arec} (Arec + Acel)$$

Sendo:

 $\Delta Vol = variação de volume total do corpo de prova;$ 

 $\Delta m$  = variação de massa registrada pela balança;

Arec = área do recipiente de PVC posicionado na balança;

Acel = área de contato entre ar e água na célula interna, imposta pelo disco de nylon.

Substituindo os valores das áreas tem-se que:

$$\Delta Vol = 1,42.\Delta m$$

Para confirmar esta relação, calibrações utilizando uma bureta com resolução de 0,01 cm3 foram realizadas. Os ensaios foram executados sem a utilização de corpos de prova, apenas preenchendo-se a câmara com água. Uma pressão confinante de cerca de 500 kPa foi aplicada. Ligava-se então a bureta à célula interna por meio de uma conexão situada na base, empregada normalmente para o preenchimento da mesma. Para medição, abria-se a válvula e deixava-se a água fluir para a atmosfera passando pela bureta, registrando-se a variação de volume. A balança era monitorada por um período mínimo de 250 minutos após a saída de água da célula, obtendo-se gráficos semelhantes ao da Figura 85. Os dados obtidos após 30 e 240 minutos foram selecionados inicialmente para comparação com a variação de volume verificada na bureta. 30 minutos é o tempo necessário para estabilização dos níveis d'água do recipiente e da câmara após uma variação brusca de tensão, como constatado na Figura 85. Já o tempo de 240 minutos foi utilizado por ser o tempo máximo estipulado inicialmente para se manter uma tensão confinante aplicada durante um estágio de saturação convencional. A Tabela 5 apresenta os dados empregados para obter a relação entre variação de volume total do corpo de prova e massa registrada pela balança, e, em seguida, é exibido o gráfico com a calibração (Figura 86).



Figura 85 – Ensaio de calibração: variação de massa registrada pela balança após uma variação de volume – medida com auxílio de uma bureta – de 0,12 cm<sup>3</sup>.

Tabela 5– Dados empregados para obter a relação entre a variação de volume total do corpo de prova e a variação de massa registrada pela balança sem a utilização de corpo de prova.

Ponto	Variação Bureta	Variação Balança (g)		
	(cm³)	t = 30 min	t = 240 min	
1	0,32	0,21	0,21	
2	0,08	0,05	0,06	
3	0,12	0,09	0,09	
4	0,13	0,09	-	
5	0,28	0,18	0,2	



Figura 86 – Resultado da calibração realizada para obter a relação entre a variação de volume total do corpo de prova e a medida de massa da balança.

O fator de correlação obtido tanto para o tempo de 30 como para o de 240 minutos foi de 0,99 e ambos são próximos do valor obtido por relações geométricas. Porém, adotou-se a correlação obtida no tempo igual a 30 minutos por este sofrer menor interferência de possíveis variações, mesmo que pequenas, do valor da tensão confinante. Logo, a correlação adotada foi:

#### $\Delta Vol = FC * \Delta m$

Onde ΔVol = variação de volume total do corpo de prova;

Δm = variação de massa registrada pela balança;

FC = fator de correlação, que é igual a 1,51.

Uma amostra de argila mole saturada amolgada disponível no laboratório foi empregada em um ensaio de "adensamento isotrópico" para avaliar se o fator de correlação (FC) obtido era coerente. Técnica semelhante foi empregada por Yin (2003) para calibrar o sistema de medição de variação de volume desenvolvido pelo autor.

O ensaio consistiu em elevar a tensão confinante até 400 kPa, mantendo uma tensão efetiva de 5 kPa. Em seguida, foi imposta uma tensão efetiva de 50 kPa para induzir a saída de água do corpo de prova e assim obter a variação de volume através do MVV e a variação de massa registrada pela balança devido à variação de volume de água da célula interna. Quando a tensão confinante atingiu 100 kPa, mediu-se o parâmetro B para verificar se o material empregado estava realmente saturado.

Quatro estágios de adensamento foram executados no material argiloso. Em cada etapa, após 60 minutos, era registrada a variação de volume do MVV e a variação de massa pela balança. Os resultados obtidos constam na Tabela 6. Ao comparar a variação de volume do corpo de prova registrado pelo MVV e a variação de volume obtida por intermédio da balança, tem-se uma diferença máxima de 0,01 cm<sup>3</sup>, que equivale apenas a 0,01% do volume do corpo de prova, mostrando que a calibração está adequada.

Tabela 6 – Comparação entre a variação de volume obtida pelo medidor de variação de volume (MVV) e a variação de volume empregando-se o fator de correlação determinado.

Variação de massa - balança (g)	Variação de volume MVV (cm³)	Variação de volume - (massa x FC) (cm³)*	Diferença MVV e (massa x FC) (cm³)
0,34	0,50	0,51	-0,01
0,35	0,52	0,53	-0,01
0,28	0,41	0,42	-0,01
0,32	0,48	0,48	0,00

\* Produto da massa registrada pela balança e o fator de correlação (FC=1,51)

### Calibração da variação de volume do sistema com o aumento de tensão confinante

Como exposto anteriormente, o sistema sofre uma forte influência da variação da tensão confinante. Vários autores como Ng *et al.* (2002), Yin (2003), Sivakumar *et al.* (2006) e Murray e Sivakumar (2010) lançaram mão de calibrações para estabelecer uma relação entre a tensão confinante e a variação de volume do sistema, viabilizando assim correções na medida de variação de volume total do corpo de prova. Com o mesmo objetivo, foram realizadas algumas calibrações simulando o processo de saturação do ensaio triaxial.

A primeira calibração foi feita com o intuito de avaliar a variação do sistema como um todo devido ao aumento brusco de tensão confinante, como sugerido

por Ng *et al.* (2002), com algumas adaptações. Os ensaios foram executados sem corpos de prova, aumentando-se a pressão confinante até as tensões de 50, 100, 200, 300, 400, 500, 600 e 700kPa, sequencialmente.

Os gráficos com os resultados de três ensaios de calibração são apresentados nas Figuras 87 a 89. Durante a execução do ensaio de calibração 2 (Figura 89), ao aumentar a tensão confinante de 50 para 100 kPa, houve uma medida de variação de volume inconsistente, que pode ter ocorrido devido a alguma perturbação externa na balança, alterando o zero. Vale ressaltar que, para estas calibrações, o ensaio não foi remontando. Anteriormente, havia sido executado o ensaio para obtenção do fator de correlação, com uma tensão confinante de 500 kPa, que colaborou, provavelmente, para a saída de bolhas de ar aprisionadas no sistema, principalmente na câmara interna.



Figura 87 - <u>Ensaio de calibração 1</u>: variação de massa registrada pela balança devido ao aumento progressivo de tensão confinante, permanecendo o corpo de prova submetido a cada estágio durante o período de 4 horas.



Figura 88 - Ensaio de calibração 2: variação de massa registrada pela balança devido ao aumento progressivo de tensão confinante, permanecendo o corpo de prova submetido a cada estágio durante o período de 4 horas. Inconsistência na variação de volume apresentada no acréscimo de tensão de 50 para 100 kPa.



Figura 89 - Ensaio de calibração 3: variação de massa registrada pela balança do sistema devido ao aumento progressivo de tensão confinante, permanecendo o corpo de prova submetido a cada estágio durante o período de 4 horas.

A partir dos gráficos apresentados, foi estimada a variação de volume do sistema devido ao aumento de tensão, considerando o valor registrado pela balança 40 minutos após a tensão de cada estágio ser atingida. O gráfico da Figura 90 apresenta os resultados obtidos para cada ensaio de calibração.



Figura 90 – Curvas dos 3 ensaios de calibração após análise dos dados de cada um considerando como variação a massa registrada pela balança 40 minutos após a tensão de cada estágio ser atingida.

Nota-se que, no ensaio 2, os pontos estão deslocados para baixo em relação aos demais ensaios a partir da tensão de 100 kPa. Isto se deve, provavelmente, a mudança da referência do ensaio devido à interferência de algum fator externo. Por isso, a partir desta tensão, os valores foram corrigidos, adotando-se para este ensaio a média da medida dos dois outros para o aumento de tensão de 50 para 100 (ver Tabela 7). Em seguida, os demais valores foram corrigidos, obtendo-se o gráfico da Figura 91 - Curvas dos 3 ensaios de calibração após correção do ensaio de calibração 2.Figura 91.

Tensões confinantes	Variação de massa registrada pela balança entre os estágios de tensões confinantes (g)					Desvio	Variância
(kPa)					Média	Padrao	
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Média	Acumulado		
10-50	-1,00	-0,72	-0,99	-0,90	-0,90	0,16	0,000
50-100	-0,71	-4,00*	-0,79	-0,75	-1,65	0,06	0,002
100-200	-1,02	-1,27	-1,01	-1,10	-2,75	0,01	0,000
200-300	-1,19	-1,18	-1,13	-1,17	-3,92	0,03	0,001
300-400	-1,11	-1,08	-1,09	-1,09	-5,01	0,02	0,000
400-500	-0,91	-0,87	-0,98	-0,92	-5,93	0,06	0,002
500-600	-0,40	-0,38	-0,48	-0,42	-6,35	0,05	0,002
600-700	-0,37	-0,40	-0,36	-0,38	-6,73	0,02	0,000

Tabela 7– Variação de volume do sistema entre estágios de tensões confinantes para aumento brusco de tensão.

\*Não foi considerado para o cálculo da média, do desvio padrão e da variância.



Figura 91 - Curvas dos 3 ensaios de calibração após correção do ensaio de calibração 2.

A curva de calibração obtida a partir dos resultados dos 3 ensaios é apresentada na Figura 92, sendo a correlação representada pela seguinte equação do 2º grau:

$$\Delta M = 9,85.10^{-6}.\sigma_c^2 - 1,66.10^{-2}.\sigma_c$$

Onde :

 $\Delta M$  = variação de massa registrada pela balança devido à variação de tensão confinante;  $\sigma_c$  = tensão confinante.



Figura 92 – Correlação entre a tensão confinante e a variação de volume obtida a partir dos resultados dos ensaios de calibração 1, 2 e 3.

Ao comparar os valores obtidos nos ensaios de calibração aos obtidos a partir da equação para uma mesma tensão confinante, nota-se que as maiores diferenças entre o valor calculado pela equação de calibração e o obtido no ensaio equivalem às tensões mais baixas (ver Tabela 8).

Ensaio de calibração	Pressão (kPa)	Variação de massa balança (g)	Variação de massa - equação de calibração (g)	Diferença entre o valor calculado e obtido no ensaio (g)
	49,27	-1,00	-0,79	0,21
	99,19	-1,71	-1,55	0,16
	199,24	-2,73	-2,92	-0,19
	299,16	-3,92	-4,08	-0,16
1	399,07	-5,03	-5,06	-0,03
	499,12	-5,94	-5,83	0,11
	599,10	-6,34	-6,41	-0,07
	699,25	-6,71	-6,79	-0,08
	49,21	-0,72	-0,79	-0,07
	99,15	-1,65	-1,55	0,10
	199,14	-2,92	-2,92	0,01
	299,11	-4,10	-4,08	0,02
2	399,12	-5,18	-5,06	0,13
	499,06	-6,05	-5,83	0,22
	599,08	-6,43	-6,41	0,02
	699,25	-6,83	-6,79	0,04
3	49,28	-0,99	-0,79	0,20
	99,19	-1,78	-1,55	0,23
	199,11	-2,79	-2,91	-0,12
	299,09	-3,92	-4,08	-0,16
	399,07	-5,01	-5,06	-0,05
	499,12	-5,99	-5,83	0,16
	599,08	-6,47	-6,41	0,06
	699,08	-6,83	-6,79	0,04

Tabela 8 - Comparação dos valores de variação de volume total do sistema devido ao aumento de tensão confinante obtidos nos ensaios de calibração e aplicando a equação de calibração determinada.

Além desta calibração para determinar a variação de volume do sistema com a tensão confinante, mais uma bateria de ensaios foi executada com o objetivo de determinar a variação de massa registrada pela balança quando se aumenta de forma gradativa a tensão confinante, sem haver estágios. Esta calibração corresponde ao ensaio de saturação com aumento contínuo de contrapressão onde se impõe uma taxa constante de aumento da tensão confinante concomitantemente com a contrapressão. Nesta etapa, foram executadas 6 tentativas de calibração, tentando-se aprimorar a metodologia a ser empregada nos ensaios.

Como mencionado anteriormente, Sivakumar *et al.* (2006) aplicaram uma taxa de 900 kPa/h com o mesmo objetivo, sendo esta taxa considerada elevada

para se obter a resposta do equipamento ao aumento de tensão. Por isso, adotou-se uma taxa de apenas 10 kPa/h para minimizar ao máximo problemas de estabilização entre o nível d'água da célula interna e do recipiente, além de ser o valor adotado nos ensaio triaxiais executados por Boszczowski (2008) ao estudar o comportamento de solos residuais. Neste teste não foi utilizado corpo de prova, assim como não foi aplicada nenhuma sucção na câmara. Os resultados apresentaram uma variação de massa de cerca de 16g para uma tensão confinante de 650 kPa, valor muito superior aos resultados obtidos nas calibrações executadas por estágios. Esta calibração corresponde à curva (a), de cor vermelha, da Figura 93. Quando a tensão confinante atingiu cerca de 650 kPa, houve uma queda de energia por cerca de 24 horas, causando uma defasagem nas medidas.



Figura 93 – Calibrações para os ensaios com incremento contínuo de contrapressão. Sucção forte (±85 kPa).

A partir do segundo ensaio, foi utilizado um corpo de prova de aço para que fosse calibrado em paralelo o medidor de variação de volume (MVV) e por ser esta a configuração de execução de ensaios em solo. Além disso, ao invés de 10 kPa/h, uma taxa de 20 kPa/h foi empregada com o intuito de reduzir pela metade esta fase de saturação que duraria quase 3 dias. A diferença entre as tensões confinante e contrapressão imposta foi de 10 kPa. Da mesma forma que o ensaio anterior, esta calibração apresentou uma variação de massa elevada, cerca de 20 g para uma tensão confinante de 650 kPa, como demonstra a curva (b) da Figura 93. Devido à grande diferença nos resultados obtidos nos dois ensaios, suspeitou-se que poderia haver ar aprisionado em partes do equipamento, principalmente sob a bolacha de náilon. Com o intuito de retirar qualquer bolha de ar, aplicou-se sucção na câmara com uma bomba pequena de baixa potência (±20kPa). No entanto, a magnitude da sucção aplicada não foi suficiente para a retirada de todas as bolhas. Isto fica evidente na curva (c), onde os pontos abaixo da tensão confinante de 120 kPa tiveram que ser descartados devido à grande variabilidade. Além disso, esta curva apresenta uma descontinuidade em torno de 350 kPa, que também pode estar relacionada com bolhas de ar no sistema.

A taxa adotada para o aumento de tensão confinante para os outros 5 ensaios de calibração passou para 25 kPa/h com o único intuito de reduzir o tempo da fase de saturação. Nos três primeiros ensaios desta bateria, durante a aplicação de vácuo, cuja magnitude foi aumentada para ±85kPa (sucção forte no gráfico) via-se a saída de bolhas de ar. Os resultados estão representados na Figura 93 pelas curvas d, e e f. No ensaio representado pela curva d, aplicou-se vácuo por um período de 30 minutos, nos outros dois ensaios, este tempo foi estendido para 1 hora. Nestes ensaios as curvas são praticamente coincidentes até a tensão confinante de 300kPa. O ensaio d apresenta uma descontinuidade próxima à tensão de 425 kPa que pode estar relacionada a algum fator externo. A maior variação de massa não ultrapassou 7g, valor bastante inferior ao obtido nos ensaios anteriores e compatível com o alçando na calibração para os ensaios em estágios.

Mesmo assim, as diferenças de massa entre estes ensaios para tensões superiores a tensão confinante de 300 kPa foram consideradas significativas e acreditava-se que poderiam estar relacionadas ao fato da água da câmara interna não estar completamente deaerada no início do ensaio. Suspeitou-se que a bomba empregada no laboratório para elevação, deaeração e distribuição de água não estava operando de forma eficiente. Por isso, mais dois ensaios, desta vez com água deaerada, foram executados. A água destilada era deaerada em uma câmara auxiliar e mantida com sucção aplicada até a montagem do ensaio. O processo de deaeração do volume de água necessário para preencher a câmara interna levou cerca de 5 horas. Para preencher a célula interna, o fluxo de água deaerada se dava por gravidade. Após atingir a cota desejada, uma sucção elevada (±85 kPa) era aplicada para potencializar a retirada de bolhas de ar que pudessem ficar aprisionadas no sistema, sendo mantida por cerca de uma hora. Ao final do ensaio, a água foi estocada na câmara reservatório e

deaerada novamente para ser empregada no próximo ensaio. Os resultados estão representados na Figura 93 pelas curvas g e h. Como se pode notar, a deaeração da água não gerou mudanças significativas nos resultados de calibração, mesmo assim esta etapa foi incorporada nos ensaios com os solos estudados.

Para melhor avaliar a variação de massa registrada pela balança com a variação de tensão confinante, foi gerado o gráfico variação de massa com a variação de tensão confinante *versus* tensão confinante (Figura 94). Nota-se que os ensaios executados sem aplicação de sucção na câmara ou com sucção leve (±20kPa) apresentam uma taxa muito variável e superior aos demais ensaios até a tensão confinante de 200 kPa. Isto se deve, provavelmente, às bolhas de ar que são comprimidas e dissolvidas com o aumento de tensão, provocando a diminuição do nível d'água na câmara e, consequentemente, saída de água do recipiente sobre a balança. Nos ensaios onde há aplicação significativa de vácuo, esta taxa é reduzida devido à prévia eliminação de bolhas oclusas. O primeiro ensaio executado com aplicação elevada de sucção na câmara (curva d) apresenta a mesma tendência que os outros quatro ensaios executados sobre as mesmas condições, no entanto, nota-se uma maior variabilidade na taxa deste ensaio até 150 kPa em decorrência de um período inferior de aplicação de sucção.



Figura 94 - Taxa variação de massa com a variação de tensão confinante *versus* tensão confinante. Calibração para ensaio com aumento contínuo de contrapressão.

Logo, para corrigir a variação de massa registrada pela balança devido à variação de pressão, foram considerados os 4 ensaios (d, f, g e h) onde aplicouse sucção forte (±85 kPa) por cerca de 1 hora, estando a água da câmara interna deaerada ou não. A equação de calibração obtida para tensão confinante variando de 22,5 kPa até 600 kPa está exposta no gráfico da Figura 95, sendo esta a aplicada na correção da medida de variação de volume total obtida nos ensaios.



Figura 95 – Calibração do ensaio tipo rampa considerando os dados dos ensaios d, f, g e h do gráfico da Figura 93.

### 4.4. Considerações gerais

Diversos métodos são empregados para medir a variação de volume total do corpo de prova durante a execução de ensaios em solos não saturados. Para avaliar a influência do processo de saturação na estrutura do solo por meio da variação de volume do corpo de prova neste estágio do ensaio, buscou-se nas técnicas da Mecânica dos Solos Não Saturados uma forma de se fazer esta medida. Dentre os métodos mais empregados estão os que monitoram a variação de volume do fluido que entra ou sai da câmara triaxial pressurizada ou por sistemas baseados em medidas de nível (Bishop e Donald, 1961; Wheeler, 1988, Sivakumar, 1993; Agus *et al.*, 2000; Geiser *et al.*, 2000; Aversa e Nicotera, 2002; Ng *et al.* 2002 e Sivakumar *et al.*, 2006).

Com base nas informações disponíveis na literatura, custos de instrumentação importada e aspectos específicos da câmara triaxial utilizada, foi desenvolvido um sistema de medição de variação de volume total que monitora a massa de água que entra ou sai da célula interna de uma câmara triaixial dupla por meio de uma balança, onde um recipiente hérmetico conectado à câmara interna da célula triaxial dupla e com a mesma pressão confinante aplicada à câmara triaxial está acomodado.

Após a materialização do equipamento idealizado e a configuração final ser definida, uma série de análises (item 4.3.2) foi realizada para aprimorar e avaliar quais fatores interferem em seu funcionamento. Posteriormente, uma bateria de ensaios de calibração foi executada, como sintetizado a seguir.

A variação nas medidas de variação de volume total monitorada por um período de aproximadamente quatro dias (Figura 76), com tensão confinante constante, obtida após diversas alterações no conjunto balança-caixa hermética, considerando apenas a balança, equivale a 0,03% do volume do corpo de prova, sendo o desvio padrão dos dados de apenas 0,01g. Mesmo assim, esta variação está ligada diretamente a variação de tensão confinante, podendo este erro ser ainda minimizado através de calibrações. O mesmo só foi feito ao se considerar o sistema completo (balança + câmara), como empregado nos ensaios. Com isto, verificou-se ser plenamente satisfatória a utilização da balança como instrumento de medição, muito menos onerosa que trandutores de pressão diferencial e outras técnicas existentes.

Após calibrar o equipamento com o auxílio de uma bureta e obter a relação entre a variação de massa registrada na balança e a variação de volume total do corpo de prova, a mesma foi averiguada mediante a execução de ensaios de adensamento isotrópico em amostras de argila saturada. O erro máximo encontrado foi de 0,01cm<sup>3</sup> que equivale a 0,01% do volume do corpo de prova.

Analisando o sistema como um todo (balança interligada a câmara dupla), nota-se uma relação direta entre a variação de volume total do sistema com a variação de temperatura medida na parede da célula externa, diferentemente da temperatura ambiente. Na última configuração avaliada, onde um corpo de prova cimentício foi empregado para análise, tem-se que para variações de temperatura decorrentes de ciclos diários (dia e noite) de  $\pm 0,2$  °C ocorre uma variação de cerca de  $\pm 0,1$ % na medida de variação de volume total. Mesmo sem correção devido à variação de temperatura, este valor é equivalente ao erro absoluto listado por Delage (2002) para câmaras triaxiais duplas com a câmara triaxial dupla (Wheeler, 1988) e por processamento de imagens.

Este erro pode ainda ser minimizado caso a variação de volume total seja corrigida graficamente ao se plotar gráficos da temperatura e variação de volume

*versus* tempo, como o apresentado na Figura 84. Diversos autores empregam estes gráficos para determinar relações matemáticas entre variação de temperatura e variação de volume total medido (e. g. Ng *et al.*, 2002; Leong *et al.*, 2003; Sivakumar *et al.*, 2006). Acredita-se ainda que a instalação de um sensor de temperatura dentro da célula interna também contribuiria para a diminuição deste erro, como mostrado por Leong *et al.*(2003).

Para calibrar o equipamento devido à variação de volume do sistema ocasionada pela variação de tensão confinante durante o estágio de saturação, ensaios com aumento em estágios e contínuo de contrapressão com e sem corpo rígido foram executados. Ao mesmo tempo, a técnica de execução dos ensaios (montagem, preenchimento da câmara) foi definida. O fator de correlação obtido com os ajustes das equações de calibração, tanto pelo aumento contínuo de contrapressão como em estágios, foi de 0,99.