Contribuição à Metodologia para Determinação da Pressão de Expansão em Solos e Rochas

Ely Borges Frazão

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto
de Geociências da Uni-
versidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo S. Farjallat

São Paulo

1981

CONTRIBUIÇÃO À METODOLOGIA PARA DETERMINAÇÃO
DA PRESSÃO DE EXPANSÃO EM SOLOS E ROCHAS

ELY BORGES FRAZÃO

Dissertação de Mestrado
apresentada ao Instituto
de Geociências da Uni
versidade de São Paulo

Orientador: Prof. Dr. José Eduardo S. Farjallat

São Paulo

1981

DEDALUS - Acervo - IGC

30900004943

A
Lilian,
minha mulher;
ao Fabio e à Luciana;
meus filhos.

SUMÁRIO

	P.
- RESUMO	01
1. - INTRODUÇÃO	03
2. - OBJETIVOS	05
3. - O FENÔMENO DA EXPANSÃO	05
3.1. - Conceituação	05
3.2. - Aspectos Teóricos do Fenômeno	06
3.3. - Fatores que Influenciam a Expansão	08
4. - METODOLOGIAS UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE	11
4.1. - Critério Baseado na Composição Mineralógica	11
4.2. - Critério Baseado nos Limites de Consistência	12
4.3. - Critérios Baseados em Ensaio de Expansão	14
4.4. - Critérios Baseados em Ensaio de Pressão de Expansão	15
5. - APARELHAGENS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO E DA PRESSÃO DE EXPANSÃO CONSTANTES DA LITERATURA	16
5.1. - Expansão	16
5.2. - Pressão de Expansão	17
6. - METODOLOGIA E APARELHAGEM ADOTADOS PARA MENSURAÇÃO DA PRESSÃO DE EXPANSÃO	18
6.1. - Método de Ensaio "A Volume Constante"	18
6.2. - Aparelhagem	18
6.2.1. - Célula edométrica	18
6.2.2. - Prensa	19
6.2.3. - Servo-controle	20
6.2.4. - Registrador	23
6.3. - Calibração do sistema prensa/servo-controle/registrator	23
6.3.1. - Calibração dos transdutores	24

	P.
6.3.2. - Calibração do registrador	24
7. - MATERIAL	31
8. - PREPARAÇÃO DO MATERIAL	31
9. - CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL	31
9.1. - Análises Químicas	32
9.2. - Análise Mineralógica	32
9.3. - Análise Granulométrica	32
9.4. - Determinação do Peso Específico Real	33
9.5. - Limites de Consistência	33
9.6. - Expansão Livre	33
10. - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA AMOS- TRA	33
11. - DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENSAIO DE PRESSÃO DE EXPANSÃO	37
11.1. - Preparação dos Corpos de Prova	37
11.2. - Teor de Umidade	37
11.2.1. - Procedimento operacional	37
11.2.2. - Cálculo	37
11.3. - Determinação da Densidade do Corpo de Prova	38
11.3.1. - Procedimento operacional	38
11.3.2. - Cálculo	38
11.4. - Massa	39
12. - ENSAIO DE PRESSÃO DE EXPANSÃO	39
12.1. - Procedimento Operacional	39
12.2. - Cálculo	40
13. - EXPERIMENTOS	40
13.1. - Verificação da Influência da Massa na Pressão de Ex- pansão	41
13.1.1. - Procedimentos operacionais	41
13.1.2. - Resultados	42
13.1.3. - Correlação e discussão dos resultados	42

13.1.4.	- Conclusões parciais	44
13.2.	- Verificação da Influência da Densidade Seca na Pres são de Expansão	44
13.2.1.	- Procedimentos operacionais	44
13.2.2.	- Resultados	45
13.2.3.	- Correlação e discussão dos resultados	45
13.2.4.	- Conclusões parciais	46
13.3.	- Verificação da Influência do Teor de Umidade Ini - cial na Pressão de Expansão	46
13.3.1.	- Procedimentos operacionais	46
13.3.2.	- Resultados	47
13.3.3.	- Correlação e discussão dos resultados	47
13.3.4.	- Conclusões parciais	48
13.4.	- Estudo Comparativo do Desempenho do Sistema Adotado Frente a um Sistema Convencional	49
13.4.1.	- Modalidade nº 1	49
13.4.2.	- Modalidade nº 2	50
13.4.3.	- Ensaio "a volume constante" com as amostras de are nitos silto-argilosos	52
13.4.4.	- Discussão dos resultados	52
14.	- CONCLUSÕES	62
	- AGRADECIMENTOS	64
	- BIBLIOGRAFIA	66

L I S T A D A S I L U S T R A Ç Õ E S

Figuras	P.
01 - Corte esquemático da célula edométrica	26
02 - Vista frontal da prensa utilizada na determinação da pressão de expansão	26
03 - Detalhe da prensa com distribuição dos elementos de medição	27
04 - Diagrama de blocos do servo-controle	27
05 - Detalhe do circuito elétrico dos transdutores	28
06 - Distribuição dos valores do transdutor de carga em função do relógio comparador de carga	29
07 - Distribuição dos dados da calibração do registrador em função do relógio comparador de carga	30
08 - Resultados da análise mineralógica da amostra de ar- gila Volclay-SPV	36
09 - Distribuição dos valores das frequências em porcenta- gem das densidades secas	54
10 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de massa	56
11 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de umidade final	56
12 - Distribuição dos valores de umidade final em função dos de massa	57
13 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de densidade seca	58
14 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de umidade final	58
15 - Distribuição dos valores de umidade final em função dos de densidade seca	59
16 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de umidade inicial	60
17 - Distribuição dos resultados do ensaio de pressão de expansão de acordo com a modalidade nº 1	60
18 - Distribuição dos resultados do ensaio de pressão de expansão segundo a modalidade nº 2	61

Tabelas

P.

01	- Resultados da calibração do transdutor de carga em função do relógio comparador de carga	28
02	- Resultados da calibração do registrador em função do relógio comparador de carga	29
03	- Composição química da amostra de argila Volclay-SPV	35
04	- Capacidade de troca de cátions e cátions trocáveis da amostra de argila Volclay-SPV	35
05	- Algumas propriedades físicas da amostra de argila Volclay-SPV	36
06	- Frequências em número e em porcentagem das densidades secas	54
07	- Resultados da verificação da influência da massa na pressão de expansão	55
08	- Resultados da verificação da influência da densidade seca na pressão de expansão	57
09	- Resultados da verificação da influência da umidade inicial na pressão de expansão	59
10	- Resultados dos ensaios de pressão de expansão nos arenitos	61

R E S U M O

A expansão de solos e de rochas, por absorção de água, e a pressão manifestada no curso da expansão têm causado danos a obras civis em várias regiões do Globo e, por esta razão, têm sido objeto de atenção de geólogos e engenheiros que lidam na construção civil.

Existem diversos meios para avaliação e determinação da expansão e da pressão de expansão, sendo que esta é de maior importância na prática da Engenharia Civil.

Para a determinação do valor da pressão de expansão de um solo, ou de uma rocha, é desejável um método e um processo de ensaio que sejam o mais simples, rápido e exato possível e que melhor reflitam as situações pelas quais passará o material com o qual, ou sobre o qual, se edificará uma obra civil.

Escolheu-se, neste estudo, o método "a volume constante", com monitoração automática dos ensaios, por ser o que mais atende aos requisitos acima citados.

A manutenção da constância de volume das amostras foi alcançada através da utilização de um transdutor que, colocado entre os pratos de uma prensa motorizada, envia sinais a um circuito eletrônico que aciona o motor da prensa para aplicar ou retirar carga quando a amostra, entre os pratos, tende a expandir ou a contrair, respectivamente. Os valores das cargas são lidos em um relógio comparador ou num registrador, onde, a partir de sinais enviados por outro transdutor, tem-se os registros convertidos diretamente para valores de pressão.

Utilizando-se de uma amostra de uma argila denominada Volclay-SPV, executaram-se ensaios visando conhecer a influência da massa, da densidade seca e da umidade inicial, de corpos de prova, na pressão de expansão.

Para comparar o desempenho desse sistema realizaram-se ensaios, também com a argila Volclay-SPV, de acordo com um método em que se permitiu a expansão dos corpos de prova sob três valores pré-fixados de pressão, os quais foram aplicados através de uma prensa de alavancas. Realizaram-se, também, ensaios sobre

quatro amostras de arenitos "a volume constante" e com monitoração automática e, de acordo com o mesmo método em que se permite a expansão dos corpos de prova, mas sob pressões com valores que obedecem a escala de uma progressão geométrica, como nos ensaios rotineiros de adensamento.

Este estudo permitiu chegar às seguintes principais conclusões:

- 1) quanto maior a massa dos corpos de prova, maior foi a pressão de expansão; a influência foi maior na faixa de 3 a 15g e decresceu a partir desta;
- 2) quanto maior a densidade seca dos corpos de prova, maior foi a pressão de expansão;
- 3) quanto maior a umidade inicial dos corpos de prova, menor foi a pressão de expansão;
- 4) o sistema de monitoração automática de acordo com o método "a volume constante" foi mais exato e mais rápido que o sistema convencional escolhido para comparação.

1 INTRODUÇÃO

O fenômeno da variação volumétrica em solos e em rochas , devido a modificações em seu teor em água, tem merecido atenção de pesquisadores no mundo inteiro. Isto é demonstrado por inúmeros trabalhos sobre o assunto.

Por variação volumétrica entendem-se a expansão e a contração devido ao ganho e à perda de água, respectivamente. Pode manifestar-se macroscópica ou microscopicamente e ser, em alguns casos, mensurável direta e, em outros, indiretamente.

Se por um lado a variação de volume pela variação de umidade é desejável, como, por exemplo, em argilas empregadas como fluído de perfuração de poços de petróleo, por outro, é nociva, quando se trata de materiais com os quais ou sobre os quais se edifica uma obra civil.

Apesar de o fenômeno ser bem conhecido, os mecanismos que o regem não foram ainda bem compreendidos, malgrado o empenho de pesquisadores de diferentes especialidades na sua elucidação. Isto é constatado pela diversidade de enfoques e pelos diferentes níveis de tratamento dados ao assunto. Chen (1975) ressalta, contudo, que grandes progressos foram alcançados nos últimos 20 anos, apesar de certos danos a obras civis, nos EUA, terem sido admitidos como consequência do fenômeno da expansão, já em fins da década de 30.

A previsão da variação volumétrica de um substrato geolôgico assume, em algumas áreas do Globo, importância relevante para a Engenharia Civil. É o caso de certas regiões da Austrália, Canadá, Índia, Israel, México, África do Sul, Espanha e Venezuela, dentre outros países, onde o comportamento dos solos expansivos tem causado sérios prejuízos econômicos, decorrentes das danificações causadas nas obras civis, pela instabilização provocada em suas fundações (Chen, 1975 e Horta da Silva, 1971 e 1975).

Sobre problemas causados em galerias, destacam-se os trabalhos de Bjerrum, Brekke, Moum e Selmer-Olsen (1964) e Brekke (1965). Relatam desabamentos provocados pela presença de montmorilonita, durante e após a perfuração de túneis, cortando zonas cisalhadas de maciços rochosos pré-cambrianos e paleozóicos da Noruega. Thenoz, Farran e Capdecombe (1966) citam acidentes ocorridos em túneis perfurados em granitos e gnaisses, na França, onde além de ocorrer desabamentos após perfurações dos túneis, houve rompimento do revestimento de concreto, pela expansão de montmorilonitas, em certos trechos.

No Brasil, contudo, poucos são os relatos sobre materiais naturais expansivos, se comparado com os países citados, e raros são os estudos mais detalhados sobre o processo da expansão. Isto se deve, talvez, à, ainda, relativamente pequena ocupação urbana nas áreas onde ocorrem solos já conhecidos como expansivos e à distribuição relativamente restrita dos mesmos em nosso País. Apesar disso, algumas consequências danosas, devido à presença de minerais expansivos em solos e rochas, já foram experimentadas pela Engenharia Civil brasileira, em algumas obras. Ruiz (1963), Farjallat (1969), e Farjallat, Montezzo e Ratti (1972), abordaram a influência da expansibilidade no processo de desagregação de rochas basálticas, contendo esmectitas, com vistas ao seu desempenho como material de construção. Fleury (1978), estudou a expansibilidade de alguns arenitos silto-argilosos do Grupo Tubarão a partir do desempenho insatisfatório apresentado por estes materiais nas fundações de uma obra civil em Sumaré, Estado de São Paulo.

Do ponto de vista prático, tão importante quanto o entendimento do fenômeno, é existirem metodologias e instrumentações adequadas à sua quantificação.

Este trabalho pretende ser uma contribuição à metodologia e ao processo de mensuração da pressão de expansão de solos e de rochas em contato com água, através da proposição de um sistema que permite medir a pressão de expansão, a volume constante. Este sistema consiste, basicamente, de uma prensa, de um servo-controle e de um registrador; permite a monitoração automática dos ensaios e registro contínuo dos resultados.

2 OBJETIVOS

O presente trabalho foi estruturado para atingir dois objetivos básicos:

a) investigar a influência de alguns parâmetros físicos e químicos na pressão de expansão, através de comparação dos resultados obtidos com os constantes da literatura, fornecidos por equipamentos e métodos convencionais ou não, e

b) testar o desempenho do sistema "prensa/servo-controle", de acordo com o método a volume constante, frente a metodologias e equipamentos convencionais.

3 O FENÔMENO DA EXPANSÃO

O fenômeno da expansão em um material natural depende de diversos fatores que serão abordados a seguir.

3.1 CONCEITUAÇÃO

De um modo geral, denomina-se expansão ou inchamento de um solo ou de uma rocha, toda evolução acompanhada de aumento de volume (De Lamballerie, 1962; Karalis, 1971). A capacidade ou potencialidade à expansão é denominada por Brekke (1965), de expansibilidade.

Se um corpo de prova de um solo, sujeito a uma determinada carga, é posto em contato com água, quando se suprime esta carga haverá um aumento de volume concomitante ao aumento de seu teor em água. A água, por sua vez, pode adentrar o corpo de prova por absorção e por adsorção (White, 1958).

Todos os solos têm capacidade de aumentar de volume em presença de água. Dependendo de sua composição mineralógica, entretanto, a amplitude do fenômeno variará amplamente. Se o corpo de prova, nas condições citadas, for de um solo grosseiro constituído, por exemplo, de quartzo e mica, sua expansão será pequena e será devida, principalmente, à restituição elástica das partículas (principalmente das de mica). Se, por outro lado, o corpo de prova for, por exemplo, de um solo fino argiloso contendo esmectita, a expansão será considerável. Neste caso além da restituição elástica, contribuirá na expansão o aumento pro-

gressivo das camadas de água entre as partículas e dentro das próprias partículas de argila (De Lamballerie, 1962).

O fato das esmectitas expandirem em presença de água é relativamente bem conhecido. Dependendo do tipo de esmectita, o volume final atingido será de até 30 vezes o inicial (Delarue, 1953, in De Lamballerie, 1962). Mielenz e King (1955, in Grim, 1962) apresentam dados ilustrativos quando comparam valores de expansão entre esmectitas e outros tipos de argilo-minerais.

As considerações feitas para os solos, através dos exemplos acima mencionados, são válidas também para as rochas sedimentares e cristalinas alteradas, contendo esmectitas.

3.2 ASPECTOS TEÓRICOS DO FENÔMENO

A expansão em solos e rochas em contato com água, tem sido estudada por numerosos pesquisadores, e teorias diversificadas têm evoluído para interpretar o fenômeno. Pode-se citar a teoria da capilaridade, a teoria osmótica, dentre outras (De Lamballerie, 1962).

Devido a controvérsias ainda existentes sobre quais os reais mecanismos da expansão e também por fugir do escopo desse trabalho, passaremos em revista apenas algumas idéias a respeito do assunto.

As teorias existentes caminham para uma explicação quase satisfatória da expansão; nenhuma delas, porém, isoladamente, explica as diferentes constatações do fenômeno.

A teoria da capilaridade, que é a mais utilizada, admite que no curso da dessecação de um solo um estado de tensões se desenvolve na água intersticial, onde a intensidade aumenta à medida que o teor em água diminui. Para o solo tudo se passa como se houvesse uma tensão externa, de valor absoluto igual à tensão interna, que nasce no seio do líquido, mas de sentido contrário. Disso resulta uma contração do material. Se, por outro lado, o teor de água aumentar, tenderá a haver uma anulação da tensão intersticial, com conseqüente separação das partículas, manifestando-se num aumento de volume que é a expansão. Se essa expansão for impedida, haverá o desenvolvimento, por parte do solo, de uma pressão que é denominada de pressão de expansão.

A teoria da capilaridade fornece uma abordagem quantitativa do fenômeno, pois permite conhecer os parâmetros físicos colocados em jogo, sendo que a pressão capilar pode ser determinada em experimentos de laboratório (De Lamballerie, 1962).

Kulchitskij (1962), por sua vez, considera a teoria da capilaridade insuficiente para explicar o fenômeno da expansão, apesar de largamente utilizada. Menciona que a resolução de problemas complexos de construção civil sobre solos argilosos saturados, exige um modelo que leve em conta as características físico-químicas das fases do sistema "argila-água-íons", assim como das soluções eletrolíticas em contato com as lamelas dos argilo-minerais. Admite que durante a interação "água-minerais argilosos", após a dissociação iônica na superfície da partícula, há o aparecimento de um certo número de centros de adsorção não equilibrados, do ponto de vista eletrostático, que criam um campo elétrico. A intensidade de movimentos de cátions dissociados no sentido desse campo excederia a intensidade de movimento em sentido contrário. Então, em torno da partícula argilosa formaria-se uma atmosfera de cátions que favoreceria a migração de moléculas de água na direção da partícula, como num processo osmótico, criando uma pressão osmótica na camada difusa, hidratada e ionizada da partícula. Verwey e Overbeek (1948, in Didier, 1972), defendem também esta concepção e enfatizam que a pressão osmótica é função da concentração de íons no plano interlamelar do argilo-mineral.

Kulchitskij sustenta esta concepção a partir de experimentos com osmômetros com os quais simulou as situações vigentes num solo argiloso saturado. Conclui que para amostras remoldadas, a pressão de expansão, ou seja, a pressão necessária para que não haja expansão, é igual à pressão osmótica, e que para argilas naturalmente compactadas a pressão de expansão é igual a 40% da pressão osmótica.

Delarue (1953, in De Lamballerie, 1962), admitiu que a pressão de expansão de um material é igual à pressão de consolidação que este suportou no curso de sua história geológica e que seria, em valor absoluto, igual à pressão capilar desenvolvida no solo. Esta conclusão foi baseada em medidas de pressão

de expansão, e pressão de consolidação, determinadas em laboratórios, sobre argilas naturais, onde na maioria dos casos as pressões de expansão não diferiam em mais que 10% das pressões de consolidação.

A maioria dos trabalhos que tratam da expansão em solos e rochas ressaltam, contudo, a preponderância da influência mineralógica no processo.

3.3 FATORES QUE INFLUENCIAM A EXPANSÃO

Brekke (1965) agrupa os fatores intervenientes na expansão em fatores internos e externos. São internos aqueles ligados à natureza do solo, ou da rocha, e que definirão a possibilidade de haver expansão. São externos aqueles que definirão se acontecerá a expansão e que características terá esse processo quando se efetivar.

Os fatores internos são: tipo de argilo-mineral presente, quantidade de fração argila, tipo de cátion trocável do argilo-mineral, concentração de íons na fração argila, dimensões das partículas de argila, estrutura do argilo-mineral, teor de umidade e densidade seca no início do processo de expansão e existência, ou não, de cimentação diagenética.

A esses fatores Holtz e Gibbs (1956, in Chen, 1974) acrescentam a constante dielétrica da argila, a "atividade" da argila, o índice de plasticidade e o limite de contração.

Os fatores externos, segundo Brekke (1965), são: possibilidade de acesso de água aos argilo-minerais, concentração e natureza dos íons dissolvidos na água e possibilidade de aumento de volume pela existência, ou não, de "contra-pressão" externa sobre a argila.

Holtz e Gibbs (1956, in Chen, 1975) e Seed, Woodward e Lundgren (1962) denominam esses fatores de "condições in situ", enumerando-os em: pressão de sobrecarga, duração da saturação ou grau de saturação, teor de umidade inicial, espessura do estrato expansivo e densidade seca.

Os fatores internos podem ser analisados ao nível da partícula e das relações entre as partículas. Se o argilo-mineral é esmectítico, este traz consigo uma dada capacidade de troca de

câtions (elevada) que permitirá uma dada concentração de cations ao redor e dentro da partícula. Se o cation presente for, p.ex., o sódio ou o lítio, a expansão será maior do que se, p.ex., for o cálcio ou o magnésio, porque o sódio e o lítio atraem uma maior quantidade de moléculas de água que o cálcio ou o magnésio.

Mielenz e King (1955, in Grim, 1962) apresentam resultados de expansão em diferentes tipos de argilo-minerais, em que uma montmorilonita, contendo sódio como cation trocável, mostrou aumentos relativos de volume da ordem de 1.400 a 1.600%. Entre os diferentes tipos de argilo-minerais, os menores valores foram apresentados pelas caulinitas.

White (1958) efetuou ensaios de adsorção de água em diferentes tipos de minerais, encontrando os maiores valores (1.100 a 1.200% de água adsorvida) para as montmorilonitas com alta capacidade de troca de cations (CTC) e que tinham Na e Li como cations trocáveis (CT). As caulinitas apresentaram valores cerca de 10 vezes menores.

Quanto ao teor em argila, Graft-Johnson, Bhatia e Yeboah (1974), estudando folhelhos argilosos, siltosos e arenosos, encontraram maiores valores de expansão para os argilosos ($\approx 6\%$), médios para os siltosos ($\approx 3\%$) e menores para os arenosos ($\approx 0,5\%$).

A dimensão das partículas está, por sua vez, ligada à própria natureza dos argilo-minerais. Quanto menor a sua dimensão, maior será a superfície específica, maior será a capacidade de adsorção e, portanto, maior será a expansão (Didier, 1972). No caso das esmectitas as dimensões das partículas encontram-se abaixo de 0,1 micron e a superfície específica teórica é de $8 \times 10^6 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Grim, 1958).

Ao nível das relações interparticulares resultam as características de estrutura e de densidade seca, que têm um apreciável efeito na expansão e pressão de expansão. As partículas de argila podem se arranjar em estruturas diversificadas a partir do posicionamento de umas em relação às outras. Daí decorrem diferentes estruturas de acordo com os posicionamentos "face-face", "canto-canto", "canto-face", etc. (Grim, 1958). Essas estruturas se formam em consequência da distribuição, ou densidade, de

cargas na superfície das partículas, que geram atração e repulsão entre elas. Esses efeitos são ainda dependentes da natureza dos eletrólitos do meio. Resultam disso as estruturas ditas floculadas ou dispersas (Lambe, 1958). Essas associações entre as partículas de argila, e entre estas e outras partículas do solo, são denominadas de microestruturas do solo. Kulkarni e Katti (1974) apontam a influência da microestrutura na expansão e pressão de expansão a partir do estabelecimento de modelos físicos baseados na relação espacial entre as partículas de um solo argiloso. Chegam a propor equações que, utilizando valores de certos parâmetros físicos do solo (teor em fração argila, índice de vazios, expansão e pressão de expansão), permitem calcular a expansão e a pressão de expansão de uma partícula individual do solo estudado.

As macroestruturas (laminações, estratificações e outras feições macroscópicas), refletem, por sua vez, as condições de deposição e de compactação e também influenciam a expansibilidade.

Quando se trata de amostras indeformadas, ou intactas, as expansões são mais elevadas quando perpendiculares às estruturas (Murayama e Yagi, 1966; Graft-Johnson, Bathia e Yeboah, 1974; Frazão, Mioto e Santos, 1976).

Para amostras remoldadas as estruturas parecem influenciar a expansão de modo diferente. Satyanarayna (1974), trabalhou com solos expansivos da Índia ("black cotton soils"), compactados estática e dinamicamente, e ensaiados em diferentes direções em relação às direções de compactação. Concluiu que os valores de expansão e de pressão de expansão crescem da direção horizontal até 45° em relação a esta, para decrescer à medida que se aproxima da vertical. Cita, ainda, que os maiores valores foram encontrados para os corpos compactados estaticamente e que, para qualquer dos processos de compactação usados, os maiores valores de expansão e pressão de expansão de deram para maiores densidades secas e menores teores de umidade iniciais.

Viajayvergia e Ghazzaly (1974) chegaram às mesmas conclusões em relação à influência da densidade seca e teor de umidade inicial na expansão para solos expansivos dos EUA. Chen (1974

e 1975), conclui ser a densidade seca o único parâmetro físico realmente significativo na pressão de expansão. Brackley (1974) chegou à mesma conclusão, trabalhando com índice de vazios de solos. Didier (1972) encontrou os maiores valores de pressão de expansão também para maiores densidades secas.

Com relação à cimentação diagenética, Brekke (1965) e Didier (1972) ressaltam que esta diminui a expansão, pela rigidez que cria na estrutura do solo.

Quanto aos fatores externos, estes são fortemente dependentes das características geológicas e climáticas e das atividades antrópicas. As características geológicas e climáticas respondem pela origem dos solos expansivos, pelo histórico das tensões sofridas pelo estrato expansivo e pela flutuação do lençol freático. As atividades antrópicas responderão pelas modificações causadas ao meio, principalmente pela implantação de obras civis de diferentes naturezas, que levam a alterações locais do equilíbrio tenso-deformacional desse meio.

Dessa forma, a manifestação da expansão, ou o desenvolvimento de pressões durante o processo, pode ou não acontecer. Dependem essencialmente do grau de conhecimento sobre a natureza dos materiais naturais sobre os quais ou com os quais se pretende trabalhar, para que o desequilíbrio imposto seja eliminado ou mantido sob controle.

4 METODOLOGIAS UTILIZADAS NA AVALIAÇÃO DA EXPANSIBILIDADE CONSTATADAS DA LITERATURA

A expansibilidade de um solo, ou de uma rocha, pode ser avaliada a partir de diversos critérios. Baseiam-se na composição mineralógica, no teor em fração argila, nos limites de consistência e nos ensaios de expansão e de pressão de expansão (De Lamballerie, 1962 e Horta da Silva, 1975).

4.1 CRITÉRIO BASEADO NA COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA

O critério baseado na composição mineralógica assenta-se na natureza dos argilo-minerais presentes, com atenção especial na queles de rede cristalina expansiva, onde se destacam os do grupo das esmectitas.

Associadas à natureza dos argilo-minerais, e do seu teor na fração argilosa, ocorrem propriedades que muitas vezes auxiliam na avaliação da expansibilidade, por exemplo, a capacidade de troca de cátions (CTC), a quantidade e os tipos de cátions trocáveis (CT), etc.

Apesar da CTC apresentar-se com faixas de valores mais ou menos constantes para cada tipo de argilo-mineral (Grim, 1958 e 1962), a mesma pode ser utilizada como parâmetro auxiliar na avaliação da expansibilidade, por promover maior ou menor concentração de cátions trocáveis na fração argila.

A natureza e o teor em cátions têm influência marcante na expansão, sendo maior, p.ex. para Na e Li do que para Ca e Mg. Fink et al, 1971 (in Horta da Silva, 1975), verificou que a expansão é função da porcentagem de sódio trocável, que denominou de ESP (exchange sodium percentage). Foi determinada pela relação sódio trocável/CTC, chegando a uma escala de valores em que $ESP > 50\%$ definem solos muito expansivos, $10\% < ESP < 50\%$, moderadamente expansivos e $ESP < 10\%$, pouco expansivos.

Basu e Arulanandan (1974), tendo em conta que os solos apresentam constantes dielétricas capazes de serem mensuráveis, propuseram um método para determinação da dispersão dielétrica de solos. Compararam os valores da dispersão dielétrica obtidos, com o gráfico de "atividade" de Skempton (1953) e de Seed, Woodward e Lundgren (1962), concluindo que dois dos principais fatores que controlam as propriedades dos solos (natureza e teor de argila) são os que mais afetam a quantidade da dispersão dielétrica. Considera esse processo como mais conveniente, porque não afeta os parâmetros ligados à estrutura dos solos.

4.2 CRITÉRIO BASEADO NOS LIMITES DE CONSISTÊNCIA

No critério baseado nos limites de consistência analisa-se a expansibilidade a partir dos valores dos limites da plasticidade (LP), de liquidez (LL), de contração (LC) e o índice de plasticidade (IP).

A composição mineralógica serve como propriedade índice, permitindo inferir se um solo é passível ou não de apresentar expansão apreciável, enquanto os valores de limites de consistên-

cia permitem uma avaliação quantitativa de potencialidade de expansão.

Jantey e Brink (1952, in Horta da Silva, 1975) preconizam serem expansivos solos com $LL > 30\%$, $IP > 12\%$ e $LC > 8\%$.

Skempton (1953, in Grim, 1962) propõe o conceito de "atividade" (A) que consiste em relacionar o IP com o teor em partículas $< 2\mu m$ classificando os solos em inativos, normais e ativos para classes de valores entre 0,5 e 2.

Van der Merwe (1964, in Horta da Silva, 1975) compartimentou os solos em graus de potencialidade à expansão, relacionando valores de "atividade" de Skempton, para substratos geológicos divididos em camadas de propriedades idênticas e a diferentes profundidades. Obteve um gráfico onde são definidas áreas limitadas por valores de atividade de 0,5, 1 e 2, para graus de potencialidade à expansão baixo, médio, elevado e muito elevado, nesta ordem.

Holtz e Gibbs (1956) afirmaram que IP e LL são úteis para determinar características de expansibilidade de argilas.

Segundo Seed, Woodward e Lundgren (1962) apenas o IP, isoladamente, pode ser usado como indicação da expansibilidade.

Altmeyer (1955, in Chen, 1975) sugere o limite de contração e a contração linear para determinação do potencial de expansão, em que, de acordo com escala de valores desses dois índices, classifica os solos em graus de expansão denominados de crítico, moderado e não crítico.

Seed, Woodward e Lundgren (1962) estabeleceram experimentalmente correlações entre potencial de expansão (S), teor em fração argila (C) e índice de "atividade" (A), a partir de amostras preparadas artificialmente, chegando a classificar os graus de expansão em: baixo, médio, alto e muito alto, para diferentes classes de valores de S.

Viajavergia e Ghazzaly (1974), propõem a relação entre o teor de umidade inicial e limite de liquidez para avaliação da expansão, denominando essa relação de índice de expansão ($I_S = W/LL$).

4.3 CRITÉRIOS BASEADOS EM ENSAIOS DE EXPANSÃO

Nos ensaios de expansão, procura-se medir as variações de volume do material, com ou sem sobrecarga imposta a ele .

Dentre estes o mais simples é o proposto por Foster (in Zandonadi e Santos, 1972) denominado de teste de inchamento ou de expansão livre. Consiste em mergulhar 1 g do material, na forma de pó, em uma proveta graduada com capacidade de 100 ml , com água destilada, e ler o volume apresentado, após 24h. Thenoz, Farran e Capdecombe (1966) e Chen (1975) citam um processo semelhante ao descrito acima, em que os resultados são apresentados em porcentagem a partir da diferença entre o volume inicial, seco, e o volume final, após a imersão em água.

Chen (1975) cita um procedimento para a determinação do potencial de expansão que consiste em medir a variação de volume de um corpo de prova, confinado lateralmente, com densidade máxima obtida por compactação ao ótimo de umidade, após embebição em água.

Lambe (1960, in Chen, 1975), desenvolveu um processo para medir o potencial da mudança de volume. Neste processo, uma amostra, confinada lateralmente, pré-compactada, com sobrecarga, e à qual é fornecida água, é impedida de expandir por duas horas, pela ação de um anel dinamométrico. A leitura da deformação é convertida em pressão e o valor é denominado índice de expansão (IE). Estabelece categorias de muito crítica e não crítica para diferentes valores de IE. Esse processo foi designado pela sigla PVC ("potential volume change").

Para amostras indeformadas de solos e de rochas, a ISRM (1971) sugere a medida da expansão uniaxial, com sobrecarga, e sem sobrecarga, com resultados apresentados em porcentagens. O primeiro processo foi utilizado por Nascimento, Oliveira e Graça (1966) e Duncan, Dunne e Petty (1968) para diferentes tipos de rochas. O segundo processo foi utilizado por Murayama e Yagi (1966), para argilitos estratificados, e por Frazão, Miotto e Santos (1976) para argilitos, folhelhos argilosos e arenitos argilosos.

4.4 CRITÉRIOS BASEADOS EM ENSAIOS DE PRESSÃO DE EXPANSÃO

Para os propósitos da Geologia de Engenharia, muitas vezes, mais importante que determinar, direta ou indiretamente, a expansão, é conhecer qual a pressão que o material pode manifestar nesse processo. E, dependendo do tipo de obra civil, adota-se o método de ensaio que melhor reflita as condições às quais está submetido o material "in situ".

Assim sendo, a própria definição do que seja pressão de expansão fica dependendo do método de ensaio, ou vice-versa.

Jenning (1963, in Agarwal e Sharma, 1974) cita diferentes definições de pressão de expansão, quais sejam:

a) pressão que deve ser aplicada para que não aconteça nem expansão, nem contração, quando uma amostra, sob pressão, é submetida à inundação;

b) pressão necessária para manter a amostra em seu volume original quando é inundada, sob condições de pressão original;

c) pressão necessária para manter a amostra no seu volume de campo quando é inundada, isto é, sem modificação de volume sob carga igual aquela de soterramento, e

d) pressão necessária para comprimir a amostra ao seu volume original, quando é inundada e deixada expandir livremente sob pequena pressão.

A definição a é a adotada pela ISRM (1971), Brekke (1965), Agarwal e Sharma (1974), Didier (1972 e 1974), em que a amostra, no ensaio, sofre apenas uma pequena pressão de ajuste ou de acomodação do sistema, mas deixa em aberto a questão das condições originais de pressão sobre a amostra; o que não acontece com as definições constantes nos itens b e c.

A questão da manutenção do volume constante de amostra sob situação de pressões original, ou de campo, reflete melhor as situações que prevalecem em fundações de obras civis. Os métodos de ensaio que se baseiam nessas definições são vulgarmente chamadas de métodos "a volume constante".

Horta da Silva (1975) descreve diversos métodos que se baseiam na definição constante do item d, em que é permitida a expansão

pansão das amostras e a pressão de expansão é determinada após aplicações de pressões crescentes, em estágios, e a intervalos de tempo regulares. Quanto às condições de pressão sobre a amostra, contudo, baseiam-se nos conceitos contidos nas definições constantes dos itens b e c. Chen (1974 e 1975) também executou ensaios baseados na definição constante do item d. Estes métodos, são variantes do método de ensaio rotineiro de adensamento.

As condições em que as amostras são ensaiadas dependem, por sua vez, do tipo de obra civil. Se se trata de fundações, o ensaio deve, de preferência, ser efetuado com amostras intactas, ou seja, com suas características intrínsecas mantidas inalteradas e, se for a volume constante, que a pressão inicial reflita as condições reinantes "in situ". Quando se trata de solos que se destinam a aterro, ou à regularização de subleito de estradas, de argilas de preenchimento de fendas, principalmente em zonas fraturadas e cisalhadas em túneis cortados em maciços rochosos, muitas das características originais são fatalmente alteradas. Assim, os parâmetros com os quais as amostras deverão ser ensaiadas serão obtidos a partir de outros ensaios tecnológicos, ditados pelos critérios de projeto.

5 APARELHAGENS UTILIZADAS PARA DETERMINAÇÃO DA EXPANSÃO E DA PRESSÃO DE EXPANSÃO CONSTANTES DA LITERATURA

Como a composição mineralógica, o teor da fração argilosa e os limites de consistência são determinados por aparelhagem e métodos já consagrados, deter-se-á na descrição das aparelhagens mais difundidas para a determinação da expansão e da pressão de expansão.

5.1 EXPANSÃO

A aparelhagem usada para medida da expansão, com exceção da do método de Foster (in Zandonadi e Santos, 1972), não é padronizada; será diferente conforme a amostra seja remoldada ou indeformada, e se esta apresenta ou não estratificações.

Amostras remoldadas necessitam de um anel que as confinem lateralmente, pois precisam ser consolidadas previamente. O anel comumente usado é um componente normal de uma célula edomê-

trica convencional. A indeformada pode ser ensaiada com confinamento lateral, em célula edométrica, ou sem confinamento, tal como em Nascimento, Oliveira e Graça (1966).

As variações de volume são rotineiramente medidas com a utilização de relógios comparadores ou defletômetros. São posicionados na direção vertical quando se usa célula edométrica (Dunncan, Dunne e Petty, 1968 e Nascimento, Oliveira e Graça, 1966), ou colocados em direções triortogonais como em Murayama e Yagi (1966), em Frazão, Mioto e Santos (1976) e em ISRM (1976) e em ISRM (1971), para medidas simultâneas das expansões paralelas e perpendiculares às estratificações.

5.2 PRESSÃO DE EXPANSÃO

A aparelhagem para a determinação da pressão de expansão também não é padronizada. São utilizadas células edométricas convencionais, como em Brekke (1965), Bjerrum, Brekke, Moun e Selmer-Olsen (1963), Agarwal e Sharma (1974), ISRM (1971), Horta da Silva (1975) e outros, ou células modificadas como em Didier (1972 e 1974) Chu e Mou (1974), Aitchinson e Martin (1974) e Escário e Saez (1974).

O suprimento de água ao corpo de prova pode ser por inundação como em Brekke (1965), Bjerrum; Brekke, Moun e Selmer-Olsen (1964), ISRM (1971), Horta da Silva (1975), ou com controle de sucção como em Alpan (1959), Aitchinson e Martin (1974), Chu e Mou (1974), Escário e Saez (1974) e Kassif, Baker e Ovadia (1974). A água pode ainda ser utilizada na forma de vapor, como Didier (1972 e 1974).

Os dispositivos de carga e de medição variam, tal como no caso das células edométricas, conforme os objetivos do estudo. Os mais largamente usados consistem do sistema tradicional de prensas de alavancas; em alguns casos são utilizadas prensas de outros modelos. Os sistemas de medição baseiam-se preponderantemente no uso de relógios comparadores acoplados a anéis dinamométricos.

Os ensaios podem também ter monitoração automática, como em Agarwal e Sharma (1974), Kazda (1957) e Didier (1972 e 1974).

A medição também pode ser efetuada por transdutores e com registro automático dos resultados, como em Didier (1972 e 1974).

6 METODOLOGIA E APARELHAGEM ADOTADAS PARA MENSURAÇÃO DA PRESSÃO DE EXPANSÃO

O método da medida da pressão de expansão "a volume constante" tem sido cada vez mais utilizado. Isto se deve às constatações de que a expansão é inversamente proporcional à "contra-pressão" a que é submetido o material expansivo, e que existe para um dado material uma determinada "contra-pressão" que o impede de expandir. Tão importante quanto estas constatações é a de que a pressão de expansão decai, rapidamente, se uma pequena expansão é permitida (Didier, 1972 e Bjerrum, Brekke, Moun e Selmer-Olsen, 1964). Estes são os principais motivos que sustentaram a adoção do método "a volume constante" neste estudo.

O sistema adotado para mensuração da pressão de expansão foi desenvolvido pelo Agrupamento de Petrologia da Divisão de Minas e Geologia Aplicada do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A. Frazão, Farjallat e Palm (1978) apresentaram resultados preliminares sobre o desempenho desse sistema na determinação da pressão de expansão de algumas amostras de argila.

6.1 MÉTODO DE ENSAIO "A VOLUME CONSTANTE"

O método de determinação da pressão de expansão "a volume constante" consiste em não permitir qualquer variação volumétrica de um corpo de prova durante a absorção de água; isto é, qualquer tentativa de expansão ou de contração, do corpo de prova, é impedida pela aplicação ou retirada de pressão sobre o mesmo, respectivamente. De acordo com este método, a pressão necessária para manter constante o volume do corpo de prova, durante o ensaio, é a sua pressão de expansão.

6.2 APARELHAGEM

A aparelhagem adotada é constituída por uma célula edométrica, uma prensa de pequeno porte com dois relógios comparadores, um servo controle com dois transdutores, e um registrador potenciométrico multicanal.

6.2.1 Célula Edométrica

A célula edométrica é do tipo convencional. Seus componen-

tes podem ser vistos na Figura 1. Foi construída em latão e sua geometria obedeceu às sugestões da Sociedade Internacional de Mecânica de Rochas ISRM (1971).

Seus elementos básicos são: um anel (A) com diâmetro de 5 cm, altura de 2 cm e espessura das paredes de 4 mm que, com bordas biseladas na sua parte inferior, assenta-se sobre a superfície de uma placa porosa, de 3,5 cm de diâmetro (B), que jaz na base da célula; possui ainda um cabeçote (C) ao qual está fixada outra placa porosa (D), de 5 cm de diâmetro, na sua superfície inferior. Dentro do anel e entre as placas porosas é acondicionado o corpo de prova.

Na base do corpo da célula existe um orifício ao qual foi introduzido um tubo de latão (E), por onde é feito o suprimento de líquido ao corpo de prova, que é montado dentro do anel entre as placas porosas superior e inferior.

As bordas biseladas do anel permitem talhar corpos de prova de amostras indeformadas.

O diâmetro do anel permite acondicionar um corpo de prova com a área do topo igual a $19,63 \text{ cm}^2$.

A transmissão de forças sobre o corpo de prova se faz através de uma rótula de aço (F), colocada entre o cabeçote e prato superior da prensa.

6.2.2 Prensa

6.2.2.1 Descrição dos elementos básicos

Os elementos básicos da prensa, conforme a Figura 2, são : uma lâmina dinamométrica de aço (A), capaz de suportar até 1000 kg; dois pratos de aço (B) e (C), um apoiado por meio de dois cutelos na lâmina de aço, e outro solidário a um pistão (D); um motor trifásico (E), reversível, com potência de 1/6 de HP , e uma chave comutadora (F) que, através de uma alavanca (G) acionada manualmente para cima ou para baixo, permite acionar o motor para movimentar o pistão e, conseqüentemente, o prato a ele ligado, para cima ou para baixo, respectivamente.

Entre os pratos da prensa é colocada a célula edométrica (H). Para operação automática, o circuito da chave comutadora é integrado ao do servo-controle, eliminando-se a alternativa

de acionar o motor através da alavanca.

6.2.2.2 Descrição dos elementos de medição

Os elementos de medição são dois relógios comparadores e dois transdutores (vide detalhe na Figura 3).

Um dos relógios está instalado no prato inferior, na sua parte anterior (A), tem capacidade para medir até 30 mm e divisões de 0,01 mm, e a ponta de sua haste fica em contato com um parafuso regulável suportado na placa superior. Nesta forma, o relógio tem condições de medir a altura do corpo de prova. Neste trabalho ele será denominado de relógio comparador de deformação.

O outro relógio comparador (B) está instalado sob a lâmina de aço, tem capacidade para medir até 30 mm e divisões de 0,01 mm, e a ponta de sua haste toca a lâmina no seu centro geométrico. Sua função é acusar as cargas aplicadas sobre a lâmina, e por isso possui um ponteiro de arraste que fixa, a cada momento, o valor máximo de carga atingido. Neste trabalho ele será denominado de relógio comparador de carga.

Quanto aos transdutores, um está instalado no prato inferior (C) nas mesmas condições que o relógio comparador de deformação, mas situado ao lado oposto; o outro (D) está instalado sob a lâmina de aço.

Os transdutores, tal como o relógio comparador de deformação, são ajustáveis por meio de parafusos (E) suportados na placa superior, no caso do de deformação, e na inferior, no caso do de carga.

As posições ajustadas podem ser fixadas através de contraporcas (F).

Como os transdutores são elementos dependentes do servo-controle, a descrição de suas características e funcionamento en contra-se no item a seguir.

6.2.3 Servo-Controle

O servo-controle é constituído por um circuito eletrônico composto de setores com funções específicas que, basicamente, são: um detetor de nível, uma lógica de comutação, uma lógica

de espera e de "drivers" de relês e de dois transdutores. O diagrama de blocos da Figura 4 ilustra integração dos circuitos.

6.2.3.1 Transdutores

O termo transdutor, aqui utilizado, refere-se a um dispositivo eletro-mecânico capaz de transformar variações de deslocamento em variações de tensão elétrica. É do tipo LVDT (Linear Variable Differential Transformer), também chamado de transformador diferencial.

Os exemplares utilizados foram construídos pela Divisão de Engenharia Mecânica do IPT.

São constituídos por um cilindro de aço de 90 mm de comprimento por 19 mm de diâmetro, contendo em seu interior um núcleo de "permalloy" de 30 mm de comprimento por 6 mm de diâmetro, envolvendo o ponto médio de uma haste guia, de 120 mm de comprimento por 2,5 mm de diâmetro, que se movimenta livremente no interior de três enrolamentos. Estes consistem em um primário, na posição central, e alimentado por tensões senoidais na faixa de 1,5 a 8 khz, e em dois secundários, posicionados um de cada lado do primário, que geram tensões também senoidais e proporcionais aos deslocamentos do núcleo. Detalhes dos circuitos eletrônicos dos transdutores encontram-se na Figura 5.

Cada transdutor é operado em conjunto com um circuito eletrônico que gera tensão senoidal de excitação no enrolamento primário e analisa as tensões, de fases opostas, fornecidas pelos secundários, processa-as e fornece um sinal de saída na forma de tensão contínua.

Quando o núcleo ocupa posição central, em relação à posição dos enrolamentos, obtém-se o zero elétrico, para o qual a tensão de saída é nula.

A tensão de saída em um ponto, fora do zero elétrico, é tal que a amplitude e a polaridade representam o valor e a posição do ponto em relação ao zero elétrico. Assim, de um lado do zero elétrico tem-se saídas negativas, e do outro positivas.

Os transdutores utilizados apresentam faixa linear de utilização de -3V a +3V, correspondendo 1V para cada 1 mm deslocado.

Dentre os transdutores utilizados, o que se situa entre os pratos da prensa cuida de informar sobre variações de altura do corpo de prova durante o ensaio. Será, aqui, denominado de transdutor da deformação. O que está alojado sob a lâmina de aço informa sobre as cargas a ela transmitidas. Será denominado de transdutor de carga.

Podem operar em 2 condições alternativas, sendo: (a) o transdutor de deformação emite sinais para manter constante a altura do corpo de prova e o transdutor de carga emite sinais referentes às cargas necessárias para que isto aconteça, ou (b) o transdutor de carga emite sinais para manter carga constante e o de deformação emite sinais referentes às variações de altura.

A alternativa (a) é a que se aplica ao método de ensaio adotado. A (b) é usada quando se deseja compactar o corpo de prova a uma carga constante.

Esse processo, entretanto, só se realiza com a participação do detetor de nível.

6.2.3.2 Detetor de nível

Este tem a finalidade de analisar os sinais emitidos pelo transdutor de deformação, e compará-los com o referencial a ele imposto. Este referencial é um mínimo intervalo de deformação que se permite ao corpo de prova para que o sistema possa ser acionado. Dentro desse intervalo está posicionado o zero elétrico do transdutor de deformação. O intervalo é ajustável e o adotado foi de 10 μm .

Qualquer valor de deformação que ultrapasse o citado intervalo é enviado à lógica de comutação.

6.2.3.3 Lógica de comutação

A lógica de comutação é o setor do servo-controle onde se tem a opção de operar, manual ou automaticamente, pela mudança de posição de uma chave no painel do instrumento.

Se está posicionado para "automático", o sinal vindo do detetor de nível é enviado diretamente para a lógica de espera e de "drivers" de relês.

Se está na posição "manual", o sinal é bloqueado e só é

transmitido por ação do operador ao tocar um dos botões disponíveis.

6.2.3.4 Lógica de espera e de "drivers" de relês

Este setor recebe informações através da lógica de comutação e, por meio de um circuito de potência, gera a corrente necessária para acionar os relês do motor.

Para evitar que ocorram bruscas reversões, que podem danificar o motor, existe um sistema de espera que aguarda por alguns segundos a confirmação do sinal, para então acionar os relês.

Os relês têm a função de, quando acionados, fazer o motor girar num ou outro sentido, a partir de inversão de fases que o alimentam.

Uma fonte de alimentação ligada à rede elétrica (110V-CA) fornece tensões estabilizadas para os circuitos lógicos e para os transdutores.

6.2.4 Registrador

A função do registrador é gravar os registros referentes às pressões desenvolvidas durante o ensaio, a partir dos sinais recebidos dos transdutores.

O registrador utilizado é do tipo potenciométrico, dispondo de 4 canais, modelo KB-48, fabricado pela Rikadenki Kogyo Co. Ltd.

Os registros são efetuados em papel cuja largura é de 10 polegadas (25,40 cm) com divisões de 0,2 polegadas (0,52 mm), que se movimenta com velocidades reguláveis de cm/s e cm/h.

Nos ensaios efetuados operou-se com 2 canais, com um transdutor conectado em cada um, obtendo-se os registros referentes às pressões e às deformações, separada e simultaneamente.

6.3 CALIBRAÇÃO DO SISTEMA PRENSA/SERVO-CONTROLE/REGISTRADOR

Para operação do sistema prensa/servo-controle procedeu-se a uma prévia calibração dos transdutores em função dos relógios comparadores, e para obtenção dos registros procedeu-se a uma prévia calibração do registrador em função do relógio comparador de carga.

6.3.1 Calibração dos Transdutores

A calibração dos transdutores visou posicionar a faixa de linearidade de um deles dentro da faixa de operação de cargas e a de outro dentro da faixa de operação de deformações.

a) Transdutor de carga

Para o transdutor de carga adotou-se o seguinte procedimento:

1) colocou-se um cilindro de aço entre os pratos da prensa;

2) aplicou-se uma carga de 450 kgf sobre o cilindro;

3) conectou-se um voltímetro ao transdutor e, através do parafuso, ajustou-se seu zero elétrico à carga imposta ao cilindro, fixando-se, a seguir, a posição atingida;

4) reduziu-se a carga aplicada a zero e, em seguida, reiniciou-se o carregamento, interrompendo-o a cada intervalo de 50 kgf e lendo-se, no voltímetro, o valor da tensão de saída apresentada pelo transdutor.

O carregamento teve seqüência até a carga de 900 kgf.

Os dados obtidos são apresentados na Tabela 1 e no gráfico da Figura 6.

b) Transdutor de deformação

O ajuste do transdutor de deformação é executado antes de se iniciar cada ensaio, devido às diferentes alturas dos corpos de prova ensaiados. O ajuste é efetuado pelo deslocamento do parafuso até que o zero elétrico do transdutor coincida com a altura do corpo de prova.

6.3.2 Calibração do Registrador

A calibração do registrador visou fazer com que as deformações da placa dinamométrica manifestadas durante os ensaios, fossem convertidas para registro contínuo em papel na forma de valores de pressões.

Para tanto, procurou-se compatibilizar a faixa de linearidade do transdutor com a largura do papel utilizável para registro.

Assim, optou-se por fazer com que a largura do papel equivalesse a 50 kgf/cm^2 e, conseqüentemente, cada menor divisão tornou-se igual a $0,5 \text{ kgf/cm}^2$, para uma área do topo do corpo de prova de $19,63 \text{ cm}^2$.

Para se chegar à calibração procedeu-se da seguinte maneira:

- 1) colocou-se um cilindro de aço entre os pratos da prensa;
- 2) fez-se o prato superior tocar o topo do cilindro aplicando-se $0,25 \text{ kgf/cm}^2$, como carga de ajuste;
- 3) conectou-se o transdutor ao registrador;
- 4) posicionou-se a pena de registro no ponto correspondente ao zero da escala desejada no papel;
- 5) escolheu-se a escala de amplificação no registrador que mais se aproximasse da máxima tensão gerável pelo transdutor em sua faixa linear; que foi de 5V;
- 6) aplicaram-se cargas, de modo contínuo, até que o relógio comparador acusasse $441,6 \text{ kgf}$, o que equivale a $22,5 \text{ kgf/cm}^2$ para a área de $19,63 \text{ cm}^2$;
- 7) como 5V não atendia a escala desejada houve defasagens entre o valor registrado e o acusado no relógio, que foram corrigidas através da utilização do "vernier" do registrador;
- 8) retornou-se à carga a zero e a nova defasagem ocorrida foi corrigida do mesmo modo descrito anteriormente.

Os procedimentos constantes dos itens 6, 7 e 8, foram repetidos até que não mais houvesse defasagem entre as leituras no relógio e as registradas.

A seguir, para verificar a correlação entre as pressões lidas no relógio e as registradas, optou-se por proceder a aplicações de pressões em estágios de $2,5$ em $2,5 \text{ kgf/cm}^2$, desde $0,0$ até $42,5 \text{ kgf/cm}^2$, fixando-se os valores pelo relógio e lendo-se os registros.

Após atingir-se a pressão máxima desejada, procedeu-se ao descarregamento, nas mesmas condições acima mencionadas, fixando-se, agora, o registro e lendo-se os valores obtidos no relógio.

Os resultados encontram-se na Tabela 2 e Figura 7.

Figura 1 - Corte esquemático da célula edométrica utilizada na determinação da pressão de expansão. Principais elementos: anel (A); placas porosas (B e D); cabeçote (C); tubo (E) e rótula (F). Escala 1:1

Figura 2 - Vista frontal da prensa utilizada na determinação da pressão de expansão, com a célula edométrica (H). Principais elementos da prensa: lâmina dinamométrica (A); pratos (B e C); pistão (D); motor (E); chave comutadora (F) e alavanca da chave comutadora (G). Escala 1:5

Figura 3 - Detalhe da prensa com a distribuição dos elementos de medição: relógio comparador de deformação (A); relógio comparador de carga (B); transdutor de deformação (C); transdutor de carga (D); parafusos (E) e contra-porcas (F). Escala 1:3

Figura 4 - Diagrama de blocos do servo-controle

Figura 5 - Detalhes do circuito elétrico dos transdutores.

Tabela 1 - Resultados da calibração do transdutor de carga em função do relógio comparador de carga.

RELÓGIO (kgf)	TRANSDUTOR (V)	(ΔV)
000	-4,00	0,46
050	-3,54	0,45
100	-3,09	0,47
150	-2,62	0,48
200	-2,14	0,49
250	-1,67	0,46
300	-1,21	0,48
350	-0,73	0,47
400	-0,26	0,45
450	+0,19	0,46
500	+0,65	0,46
550	+1,11	0,46
600	+1,57	0,48
650	+2,05	0,46
700	+2,51	0,46
750	+2,97	0,45
800	+3,42	0,46
850	+3,88	0,45
900	+4,33

Figura 6 - Distribuição dos valores apresentados pelo transdutor de carga em função do relógio comparador de carga.

Tabela 2 - Resultados da calibração do registrador em função do relógio comparador de carga.

CARGA (kgf)	PRESSÃO CALCULADA (kgf/cm ²)	PRESSÃO OBTIDA (kgf/cm ²)	
		(1)	(2)
49,07	2,5	2,50	2,83
98,15	5,0	5,00	5,22
147,22	7,5	7,50	7,69
196,30	10,0	10,00	10,19
245,37	12,5	12,60	12,59
294,37	15,0	15,10	15,13
343,53	17,5	17,70	17,58
392,60	20,0	20,10	20,12
441,60	22,5	22,70	22,61
490,75	25,0	25,10	25,10
539,53	27,5	27,60	27,64
588,90	30,0	30,00	30,12
637,97	32,5	32,60	32,65
687,05	35,0	35,00	35,13
736,12	37,5	37,60	37,60
785,20	40,0	40,20	40,07
834,27	42,5	42,80	42,80

Nota: (1) No carregamento

(2) No descarregamento

Figura 7 - Distribuição dos dados da calibração do registrador em função do relógio comparador¹ de carga.

7 MATERIAL

Tendo em conta que são diversos os fatores que influenciam a expansão e a pressão de expansão, optou-se, nesse estudo, por manter constante alguns deles e investigar a influência de outros. Desse modo escolheu-se uma argila que fosse monomineralática e com predominância de partículas na faixa menor que $2\mu\text{m}$, para manter sob controle a influência da natureza mineralógica e da granulometria. Outro requisito é que a argila tivesse capacidade de expansão acentuada de modo a permitir que, mesmo variando os parâmetros dos corpos de prova, a pressão de expansão fosse mensurável dentro da faixa de precisão dos instrumentos usados.

Desta forma, optou-se por utilizar uma argila denominada Volclay-SPV, produzida pela American Colloid Co., Illinois, USA, e que foi adquirida da Cosmoquímica S.A., que a fornece no mercado brasileiro para diversos usos industriais. Essa argila atende aos requisitos anteriormente mencionados, é frequentemente citada na literatura por diversos pesquisadores que a têm utilizado, inclusive como material de referência em estudos comparativos de propriedades tecnológicas de outras argilas (Zandonadi e Santos 1972, 1978, e Zandonadi 1972; Grim, 1962 e 1968).

8 PREPARAÇÃO DO MATERIAL

A amostra Volclay foi inicialmente submetida a um peneiramento na malha nº 270, cuja abertura é de 0,53 mm (ASTM E-11), de modo a eliminar aglomerados de argila constatados e obter-se, assim maior homogeneidade granulométrica.

Do material passante na malha nº 270 foram colhidas as porções necessárias para as diversas análises e ensaios executados.

9 CARACTERIZAÇÃO DO MATERIAL

A caracterização da amostra Volclay-SPV foi executada através de análises químicas, mineralógica e granulométrica, determinação do peso específico real, dos limites de consistência e da expansão livre.

9.1 ANÁLISES QUÍMICAS

As análises químicas visaram conhecer a composição química, a capacidade de troca de cátions (CTC) e os cátions trocáveis (CT) da amostra de argila Volclay-SPV.

A composição química foi determinada por fluorescência de raios-X, e por espectrofotometria de absorção atômica, sendo os resultados apresentados na forma de óxidos (vide Tabela 3).

A CTC foi determinada por saturação da argila com acetato de amônio e medindo-se a quantidade de NH_4^+ absorvido por titulação com hidróxido de sódio, sendo os resultados apresentados em mEq/100 g de material seco (vide Tabela 4).

Os cátions trocáveis foram determinados por espectrofotometria de absorção atômica sobre o líquido extraído da argila, após sua saturação com acetato de amônio no processo de determinação da CTC, sendo os resultados apresentados em mEq/100 g (vide Tabela 4).

Estas análises foram executadas pelo Centro de Análises Químicas e Instrumentais da Divisão de Química e Engenharia Química do IPT.

9.2 ANÁLISE MINERALÓGICA

A análise mineralógica foi executada por difratometria de raios-X sobre material coletado da suspensão utilizada na análise granulométrica, concentrado por centrifugação e aplicado orientadamente sobre lâmina de vidro. Foi analisado no estado natural, com adição de etileno-glicol e após aquecimento a 300°C (durante 2 h). Utilizou-se um difratômetro Rigaku Denki, operando com voltagem de 35 kV, amperagem de 15 mA, $2\theta=10^\circ/\text{min}$, fator de escala de 1/500 e velocidade do papel de 10 mm/min. Usou-se radiação $\text{K}\alpha_1$ do Cu ($\lambda=1,540 \text{ \AA}$).

Os resultados encontram-se na Figura 8.

9.3 ANÁLISE GRANULOMÉTRICA

Nesta análise procedeu-se de acordo com as recomendações feitas por Sugio (1973) para sedimentos inconsolidados.

Adotou-se o processo da pipetagem, dispersando-se, aproximadamente, 25 g do material em 1000 ml de água deionizada, à qual

se adicionou 1 g de pirofosfato de sódio, coletando-se 20 ml da suspensão a uma profundidade de 20 cm, a intervalos de tempo de decantação que obedeceram à lei de Stokes, calculada para temperatura de 20°C, e utilizando-se a escala granulométrica de Wentworth. Nesta escala, são consideradas como fração argila as partículas menores do que 4µm.

A distribuição granulométrica das partículas encontra-se na Tabela 5.

9.4 DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO REAL

O peso específico real foi determinado segundo o método do picnômetro, de acordo com a norma ABNT MB-28/76. Devido à alta hidrofília manifestada pela argila, houve surgimento de intensa aglomeração que impediu a necessária individualização das partículas exigidas nessa análise. Para superar esse inconveniente, substituiu-se a água destilada por "xilol", que mostrou desempenho satisfatório (vide Tabela 5).

A determinação do peso específico real foi executada pela Seção de Cerâmica do Agrupamento de Tecnologia Inorgânica da Divisão de Química e Engenharia Química do IPT.

9.5 LÍMITES DE CONSISTÊNCIA

Os limites de consistência determinados foram o de liquidez e o de plasticidade, obedecendo às recomendações das normas ABNT MB-30 e MB-31, respectivamente.

Os resultados encontram-se na Tabela 5.

Os limites de consistência foram determinados pela Seção de Mecânica de Solos do Agrupamento de Geotecnia da Divisão de Engenharia Civil do IPT.

9.6 EXPANSÃO LIVRE

Para obter-se uma previsão da capacidade de expansão, foi executado o ensaio de expansão livre, de acordo com sugestão de Foster (in Zandonadi e Santos, 1972).

Os resultados encontram-se na Tabela 5.

10 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DA CARACTERIZAÇÃO DA AMOSTRA

Na Tabela 3 nota-se que a amostra de argila Volclay-SPV u-

sada neste estudo apresenta uma composição química muito semelhante à usada por Zandonadi (1972), sendo ligeiramente mais silicosa e ligeiramente menos aluminosa. Os outros óxidos estão em quantidades muito semelhantes.

Na Tabela 4 nota-se um valor de CTC inferior ao determinado por Zandonadi (op.cit.), mas os cátions trocáveis mais frequentes, em ambas as amostras, são os mesmos, ou seja, Na, Ca, e Mg, nesta ordem. A diferença constatada é que a amostra usada neste trabalho é mais sódica e menos magnésica do que a usada por Zandonadi (op.cit.). O cálcio apresenta-se em teores muito semelhantes.

Na Figura 8 nota-se, que o argilo-mineral predominante é uma esmectita, através do comportamento manifestado nos estados natural, com etileno-glicol e com aquecimento, onde as reflexões 001 apresentaram valores de 14,60, 17,31 e 9,60 Å, respectivamente. Ilita ocorre subsidiariamente.

Na Tabela 5 observa-se predominância de partículas menores que 0,004 mm (90,79%).

Na Tabela 5 nota-se que os valores dos limites de consistência são muito próximos aos determinados por Samuels (1950, in Grim, 1962) para uma montmorilonita sódica. Digno de nota é seu alto índice de plasticidade (525%).

O peso específico real ($2,67 \text{ g/cm}^3$), é de valor igual ao determinado por Zandonadi (1972) e está na faixa de valores esperados para uma montmorilonita, segundo Grim (1958) (Tabela 5).

O valor de expansão livre, mostrou-se maior do que o apresentado por Santos e Zandonadi (1972). O valor de 26,5 ml pode ser considerado como extremamente elevado, se comparado com os valores apresentados por Zandonadi (1978) (Tabela 5).

Tabela 3 - Composição química da amostra de argila Volclay-SPV.

Compostos	Teores (%)	
	(1)	(2)
SiO ₂	63,30	60,00
Al ₂ O ₃	20,60	23,30
Fe ₂ O ₃	3,49	3,62
TiO ₂	0,17	0,11
CaO	1,16	1,43
MgO	2,52	2,67
Na ₂ O	2,03	2,01
K ₂ O	0,39	0,19
Perda ao fogo	6,20	6,85

Nota: (1) - Este trabalho
(2) - Zandonadi (1972)

Tabela 4 - Capacidade de troca de cátions e cátions trocáveis da amostra de argila Volclay - SPV.

Capacidade de troca de cátions (mEq/100g)	70,3	124,6
Cátions trocáveis (mEq/100g)	(1)	(2)
Al ³⁺	0,78	2,78
Fe ³⁺	0,16	0,49
Ca ²⁺	35,43	37,80
Mg ²⁺	13,98	23,46
Na ⁺	62,64	57,10
K ⁺	1,79	2,00

Nota: (1) - Este trabalho
(2) - Zandonadi (1972)

Figura 8 - Resultados da análise mineralógica, por difratometria de raios-X, da amostra da argila Volclay - SPV.

Tabela 5 - Algumas propriedades físicas da amostra de argila Volclay-SPV.

Limite de liquidez (%)	570 (1)	623 (2)
Limite de plasticidade (%)	45 (1)	41 (2)
Índice de plasticidade (%)	525 (1)	582 (2)
Peso específico real (g/cm ³)	2,67 (1)	2,67 (3)
Expansão livre (ml)	26,5 (1)	18,5 (4)
Distribuição granulométrica (%)	Silte	9,21
	Argila	90,79

Nota: (1) - Este trabalho
 (2) - Samuels (1950, in Grim, 1962)
 (3) - Zandonadi (1972)
 (4) - Zandonadi e Santos (1972)

11 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE ENSAIO DE PRESSÃO DE EXPANSÃO

Os parâmetros de ensaio relativos ao material, considera - dos neste trabalho foram umidade inicial e final, densidade ini cial e massa dos corpos de prova.

11.1 PREPARAÇÃO DOS CORPOS DE PROVA

Tomou-se a amostra e, dela, pesou-se a quantidade a ser en saída e também uma alíquota de 5 g para determinação do teor de umidade inicial de acordo com o descrito no item 11.2, a se guir.

Montou-se a célula e o material a ser ensaiado foi lançado, porção por porção, com uma espátula, dentro do anel contendo um papel filtro sobre a placa porosa inferior.

A cada porção lançada, batia-se com a palma da mão na base da célula até que ali se acomodasse todo o material. Introduziu -se, a seguir, o cabeçote da célula contendo solidária a ele a placa porosa e o papel filtro.

11.2 TEOR DE UMIDADE

11.2.1 Procedimento Operacional

Para determinação do teor de umidade (U) procedeu-se da se guinte maneira (Caputo, 1974): colocou-se o material sobre um vidro de relógio que foi levado à balança, obtendo-se um valor (P_1) que é a soma dos pesos do vidro relógio (P), da água (P_a) e das partículas sólidas (P_s). Em seguida o material foi levado à estufa, com temperatura de $110 \pm 5^\circ\text{C}$, e deixou-se-o secar até constância de peso, quando se obteve um valor (P_2) que é a soma do peso do vidro de relógio (P) e do peso das partículas soli - das (P_s).

11.2.2 Cálculo

$$P_1 = P + P_a + P_s$$

$$P_2 = P + P_s \quad \text{onde:}$$

$$U(\%) = \frac{P_1 - P_2}{P_2 - P} = \frac{P_a}{P_s} \times 100$$

Após o término de cada ensaio determinou-se também o teor de umidade final (U_f) da mesma maneira descrita acima.

11.3 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE DO CORPO DE PROVA

11.3.1 Procedimento Operacional

A célula edométrica montada, e sem material, foi levada à prensa e movimentou-se o prato superior até que as placas porosas superior e inferior se encostassem. Utilizou-se uma pressão de ajuste igual a $0,25 \text{ kgf/cm}^2$, a qual, por sua vez, é a mesma utilizada no início do ensaio. Em seguida colocou-se o relógio comparador de deformação em zero. Para isto utilizou-se do parafuso suportado na placa superior. Após esse ajuste apertou-se a contraporca, para fixar-se a posição atingida, e movimentou-se o prato superior da prensa para cima, para liberar a célula.

Após a colocação do material dentro da célula, como descrito no item 11.1, levou-se à prensa e procedeu-se ao carregamento até que o ponteiro do relógio comparador atingisse a marca correspondente à altura requerida para que o corpo de prova alcançasse a densidade desejada. Ajustou-se o transdutor de deformação, através da movimentação do parafuso apropriado, para manter constante a altura atingida, e deixou-se o corpo de prova sob pressão até a estabilização das deformações.

Nos casos em que se desejou manter pressão constante, operou-se impondo-se esse requisito ao transdutor de carga através do ajuste no detector de nível do servo-controle.

Findando o tempo de permanência do corpo de prova sob a pressão imposta, procedeu-se ao descarregamento até a pressão de $0,25 \text{ kgf/cm}^2$, quando, após a estabilização das deformações, leu-se a altura obtida.

11.3.2 Cálculo

Calculou-se a densidade através da seguinte relação:

$$D = \frac{M}{HXS} \quad \text{onde:}$$

D = densidade inicial (g/cm^3)

M = massa do corpo de prova (g)

H = altura do corpo de prova (cm)

S = área do topo de corpo de prova (cm²)

A densidade, como acima calculada, é tida, a princípio, como densidade úmida (D_u), ou seja, densidade a um certo valor de umidade. De posse do valor de umidade, calculou-se a densidade seca (D_s) pela seguinte relação:

$$D_s = \frac{D_u}{1 + U_i} \quad \text{onde:}$$

D_s = densidade seca (g/cm³)

D_u = densidade úmida (g/cm³)

U_i = teor de umidade inicial

Na relação acima o valor de U_i é utilizado na forma de proporção, ou seja, de 0 a 1.

11.4 MASSA

Para a determinação da massa do corpo de prova, tomou-se um vidro de relógio, previamente limpo e seco em estufa a 110°C até atingir a constância de peso, o qual foi levado à balança onde foi tarado. Sobre o vidro de relógio foi lançada a amostra. Foram pesados com sensibilidade de 0,01 g.

12 ENSAIO DE PRESSÃO DE EXPANSÃO

O procedimento adotado nesse ensaio e o cálculo da pressão de expansão são descritos a seguir.

12.1 PROCEDIMENTO OPERACIONAL

Com a célula edométrica entre os pratos da prensa, a estabilização da deformação do corpo de prova já alcançada e anotada a altura do mesmo sob pressão de 0,25 kgf/cm², ajustou-se o transdutor de deformação para manter o intervalo de deformação de $\pm 5 \mu\text{m}$ (constante para todos os ensaios). O servo-controle, nesse momento, encontrava-se na condição de operação manual. Introduziu-se a mangueira no tubo da base da célula edométrica, fez-se o nível do líquido, do balão de suprimento, coincidir com o nível do topo do corpo de prova, ligou-se o servo-controle para operar automaticamente e, imediatamente, abriu-se a tor

neira para fornecimento da água ao corpo de prova. Após 24 h o ensaio foi interrompido. Procedeu-se à passagem do servo-controle para a posição manual, ao fechamento da torneira do balão, à retirada da mangueira do tubo da célula edométrica e ao escoamento da água acumulada dentro da célula; leu-se o valor máximo de carga atingida e, a partir daí, impôs-se ao servo-controle o descarregamento automático. Após a liberação da célula edométrica, procedeu-se, imediatamente, a sua desmontagem para liberação do corpo de prova, de modo a evitar que a água remanescente na célula pudesse continuar penetrando no corpo de prova, falhando, assim, seu teor de umidade final. O corpo de prova, e o anel a ele solidário, tiveram suas superfícies enxugadas e foram submetidas ao procedimento para determinação do teor de umidade final como descrito no item 11.2.

12.2 CÁLCULO

O cálculo da pressão de expansão foi executado de acordo com recomendações da ISRM (1971), através da relação:

$$PE = \frac{C_{m\bar{x}}}{S} \quad \text{onde:}$$

PE = pressão de expansão (kgf/cm²)

$C_{m\bar{x}}$ = maior carga registrada (kgf)

S = área do topo do corpo de prova (cm²)

13 EXPERIMENTOS

A parte experimental deste estudo foi subdividida em duas etapas.

Na primeira etapa executaram-se ensaios, com a amostra de argila Volclay-SPV, em corpos de prova:

a) de massas diferentes, quase secas e compactadas estaticamente sob uma pressão constante;

b) de massa constante, quase secos e de densidades secas diferentes, e

c) de mesma massa, de mesma densidade seca e de teores de umidades iniciais diferentes.

Apesar da expansão e da pressão de expansão de um corpo de prova ser dependente do tempo, dentre outros fatores, adotou-se, 24 h como tempo máximo de duração dos ensaios. Esta decisão baseou-se em citações de Brekke (1965), o qual verificou que as maiores mobilizações de pressão ocorrem entre as primeiras 2 ou 3 h, e de Chen (1975), o qual afirmou serem 24 h suficientes para que ocorra 95% do total da expansão de um corpo de prova.

Na segunda etapa executaram-se ensaios por um processo convencional, utilizando-se da amostra de argila Volclay-SPV e de amostras de arenitos argilosos, visando a comparação dos resultados obtidos nas duas etapas. Para se atingir esse propósito, contou-se com a colaboração dos Laboratórios de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Civil da Escola Politécnica da USP e da Divisão de Engenharia Civil do IPT.

13.1 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA MASSA NA PRESSÃO DE EXPANSÃO

13.1.1 Procedimentos Operacionais

Foram separadas 42 alíquotas de amostra de argila Volclay-SPV, com diferentes volumes avaliados visualmente. Após secagem em estufa, a 60°C durante 48 h, suas massas e seus teores de umidade foram determinados de acordo com o descrito nos itens 11.4 e 11.2, respectivamente.

Os corpos de prova, preparados de acordo com o descrito no item 11.1, foram levados à prensa, onde foram submetidos a uma compactação estática sob pressão de 20 kgf/cm^2 , mantida constante, pelo ajuste do transdutor de carga (item 11.3.1), durante 24 h,

O procedimento de se aplicar uma determinada pressão de consolidação constante, seguiu recomendações de Brekke (1965) que assim o fez nos ensaios executados sobre corpos de prova de argilas remoldadas colhidas em túneis na Noruega, onde preenchiam fraturas de um maciço rochoso.

Após 24 h reduziu-se a pressão para $0,25 \text{ kgf/cm}^2$ e, após a estabilização das deformações, o ensaio foi executado de acordo com o procedimento descrito no item 12.

13.1.2 Resultados

Os resultados encontram-se na Tabela 6 e Figura 9, onde se nota que os valores de densidade seca variaram de 1,14 a 1,25 g/cm³. O valor médio foi 1,19 g/cm³, o desvio padrão 0,02 g/cm³ e o coeficiente de variação 1,68%.

Para evitar que houvesse interferência da densidade seca na análise da influência da massa na pressão de expansão, selecionou-se o intervalo em torno da média (1,18 a 1,20 g/cm³), onde se situaram 64,29% dos valores de densidade obtidos. Admitiu-se que as variações de densidade no citado intervalo não afetaram os resultados de pressão de expansão.

Os resultados obtidos no intervalo selecionado encontram-se na Tabela 7, onde se nota que os valores de massa e de umidade inicial adotados variaram de 3,00 a 40,80 g e de 0,63 a 0,90%, respectivamente. Não foram utilizadas massas maiores, porque traziam dificuldades na manutenção da padronização dos procedimentos de preparação dos corpos de prova como descrito no item 11.1. Os valores de expansão oscilaram entre 3,11 e 6,19 kgf/cm² e as umidades finais entre 35,80 e 105,34%. O valor médio da PE foi de 4,68 kgf/cm², desvio padrão de 0,78 kgf/cm² e coeficiente de variação de 16,67%.

13.1.3 Correlação e Discussão dos Resultados

A dispersão dos resultados das densidades não era esperada e deve ter tido como causa uma heterogeneidade na microestrutura do corpo de prova. Não se pôde, contudo, comprovar essa hipótese.

Procurando-se correlacionar os valores de pressão de expansão com os de massa, lançaram-se os dados em um gráfico da forma $PE = f(M)$, como ilustra a Figura 10.

Utilizou-se da função $y = ax/(1+bx)$ adotada por Caprariis, Lindelmann e Collins (1976) para determinar a volume ótimo de amostras em estudos litológicos e paleontológicos. Ajustou-se a curva e verificou-se que os valores de pressão de expansão aumentam à medida que aumentam os valores de massa. A influência da massa na pressão de expansão é maior no intervalo de 3 a aproximadamente 15 g; a partir daí a influência começa a decres-

cer, pois os valores de pressão de expansão tendem à estabilização.

Não constaram, via de regra, da literatura consultada, investigações sobre influência da massa na pressão de expansão. Duas exceções foram constatadas. Chen (1974 e 1975), a partir de diversas determinações sobre corpos de prova de argilito, com densidade seca e teores de umidade iniciais constantes, mas com diferentes espessuras, afirmou que a variação destas, não influencia a pressão de expansão. Em outras palavras: a massa não influi na pressão de expansão. Ruiz (1963), por outro lado, a partir de ensaios com uma argila de preenchimento de fenda de basalto, afirma que a melhor reprodutibilidade dos ensaios de pressão de expansão acontecia quando a massa era igual a 1,5 vezes a área do topo do corpo de prova, ou, o que equivale dizer que a pressão de expansão é influenciada pela massa quando essa proporção não é obedecida. Na presente investigação seria uma massa de cerca de 30 g, uma vez que a área do topo dos corpos de prova foi de $19,63 \text{ cm}^2$. Deve-se ressaltar que estes autores não utilizaram o método a volume constante nas suas investigações, o que impede a comparação com os resultados obtidos neste estudo.

A seguir, para verificar qual a correlação entre umidade final e pressão de expansão, lançaram-se os dados em gráficos do tipo $PE = f(U_f)$, como ilustra a Figura 11. Admitia-se que a relativa dispersão dos valores de pressão de expansão, em função dos de massa, era devido a diferentes teores de água absorvida. Isto não pôde ser constatado devido, novamente, a uma relativa dispersão dos resultados. Chen (1975) afirmou não haver relação entre PE e U_f .

Finalmente lançou-se $U_f = f(M)$ (vide Figura 12). Calcularam-se as regressões obtendo-se melhor ajuste para a regressão potencial, cuja equação é do tipo $y = a \cdot x^b$, onde: $a = 0,400$ e $b = 191,232$. O valor do coeficiente de correlação foi de $-0,791$.

Verifica-se na Figura 12 que corpos de prova de massas menores, que, por sua vez, estão diretamente relacionadas a alturas menores, atingem maiores teores de umidade ao final dos ensaios. Tendo em conta que se fixou um gradiente hidráulico cons

tante, quando do suprimento de água ao corpo de prova, e que se fixou uma duração constante para o ensaio (24 h), os corpos de prova de massas menores devem ter sido favorecidos por uma menor distância para percolação da água, resultando num umedecimento mais eficiente. A distribuição dos dados, que permitiu o ajuste de uma função do tipo potencial, indica, teoricamente, que por mais que se aumentasse a massa, ou a altura do corpo de prova, mantidos inalterados gradiente hidráulico e a duração do ensaio, sempre haverá uma dada taxa de absorção d'água e que, ao diminuir progressivamente a massa, a umidade final tende ao infinito.

13.1.4 Conclusões Parciais

As constatações aqui efetuadas permitem as seguintes conclusões parciais:

1) apesar de mantidas constantes as condições de compactação (consolidação), para diferentes valores de massa, os corpos de prova devem ter assumido microestruturas diferentes, e isto pode ter influenciado nos valores de densidade seca obtidos;

2) à medida que aumentaram os valores de massa, aumentaram os de pressão de expansão; a influência da massa foi maior para valores menores que 15 g;

3) a afirmação de Ruiz (1963) de que a massa deveria ser igual ou maior que 1,5 vezes a área do topo do corpo de prova, para que houvesse a reprodutibilidade desejável nos valores de pressão de expansão, não foi confirmada nesta etapa do estudo;

4) o fato de Chen (1974 e 1975) afirmar que a massa não influi na pressão de expansão também não foi confirmado;

5) para corpos de prova de uma mesma densidade e massa diferentes deve haver um dado gradiente hidráulico ou uma dada duração dos ensaios que compatibilize esses parâmetros.

13.2 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA DENSIDADE SECA NA PRESSÃO DE EXPANSÃO

13.2.1 Procedimentos Operacionais

Nessa investigação adotou-se manter constante a massa e os

teores de umidade inicial próximos de zero e variar as densidades secas.

A determinação dos valores de massa e de umidade inicial para cada corpo de prova obedeceu os procedimentos descritos anteriormente.

Escolheu-se a massa de 30 g por situar-se no intervalo em que decresce a influência da massa na pressão de expansão.

Para se obterem as diferentes densidades submeteu-se um corpo de prova à pressão de 0,25 kgf/cm² e outro a 45 kgf/cm². Os outros valores de densidade foram obtidos com pressões escolhidas entre esses limites.

13.2.2 Resultados

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 8, onde se verifica que os teores de umidade inicial variaram de 0,3 a 0,8 % e as densidades secas obtidas se situaram entre 0,98 e 1,34 g/cm³.

As pressões de expansão variaram de 1,63 a 7,71 kgf/cm², e as umidades finais de 36,80 a 79,80%.

13.2.3 Correlação e Discussão dos Resultados

Nota-se, na Tabela 8, que não houve uma desejável graduação para as densidades secas; crê-se que os motivos sejam os mesmos que foram considerados quando da compactação dos corpos de prova na investigação da influência da massa na pressão de expansão.

A fim de verificar a correlação entre pressão de expansão e densidade seca lançaram-se os resultados em gráfico da forma $PE = f(D_s)$ (Figura 13). Calcularam-se as regressões e a que melhor se ajustou foi a potencial, cuja equação é do tipo $y = a.x^b$, com: $a = 5,246$ e $b = 1,969$. O valor do coeficiente de correlação foi de 0,973. A linear e a exponencial, contudo, apresentaram valores, desse coeficiente, extremamente próximos ao da potencial: 0,970 e 0,966, respectivamente.

Nota-se que existe uma boa correlação entre a densidade seca e pressão de expansão. Apesar da função que melhor se ajusta ser a potencial, pode-se considerar a correlação como linear da faixa estudada. Chen (1974 e 1975) chegou a resultados semelhantes, mas concluiu ser a correlação, entre D_s e PE, da forma ex -

ponencial. Didier (1972), Brackley (1974), Satyanarayana (1974) e Viajayvergia e Ghazzaly (1974) encontraram, também, maiores valores de pressão de expansão em corpos de prova com densidades maiores.

Procurou-se, novamente, correlacionar a pressão de expansão com umidade final lançando-se $PE = f(U_f)$ (vide Figura 14). Os resultados mostraram, novamente, uma dispersão relativamente grande, indicando não ter havido boa correlação entre estes parâmetros.

A seguir lançaram-se as umidades finais contra as densidades secas em gráfico da forma $U_f = f(D_s)$ (vide Figura 15). A correlação mostrou-se fraca, apesar de, inicialmente, crêr-se que os valores de umidade final fossem inversamente proporcionais aos de densidade seca, por admitir-se, "a priori", que corpos de prova mais densos fossem menos permeáveis à água.

13.2.4 Conclusões Parciais

Os resultados obtidos nesta etapa permitem as seguintes conclusões parciais:

1) a densidade seca é um parâmetro de grande influência na pressão de expansão; sua correlação é potencial, mas pode ser considerada como linear na faixa estudada;

2) a umidade final não apresentou correlação com a pressão de expansão;

3) a densidade seca não foi correlacionável com a umidade final.

13.3 VERIFICAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO TEOR DE UMIDADE INICIAL NA PRESSÃO DE EXPANSÃO

13.3.1 Procedimentos Operacionais

Nesta investigação mantiveram-se constantes a massa seca e a densidade seca dos corpos de prova, e variaram-se os teores de umidade iniciais.

Adotou-se um valor de massa igual a 30 g e valores de densidade seca entre 1,18 e 1,20 g/cm³.

Para obtenção dos diferentes teores de umidade colocou-se

a amostra em um recipiente aberto e deixou-se-a exposta à umidade atmosférica de uma sala com umidade relativa de cerca de 100% e temperatura ambiente de 22°C.

A cada 24 h colhia-se uma nova porção da amostra e determinava-se o seu teor de umidade.

De posse do valor do teor de umidade (U_i) calculou-se o valor da massa úmida (M_u) que o corpo de prova deveria ter para satisfazer ao valor da massa seca (M_s) estipulado, através da fórmula $M_u = M_s(1 + U_i)$.

A seguir calculou-se qual a altura (H) que os corpos de prova deveriam apresentar para se obter a densidade seca especificada, através da expressão constante do item 11.3.

Os corpos de prova foram preparados de acordo com o procedimento descrito anteriormente e deixados sob pressão na prensa até que se estabilizassem na altura calculada.

13.3.2 Resultados

Os resultados encontram-se na Tabela 9, onde se nota que os teores de umidade iniciais variaram de 6,20 a 28,48%, as pressões de expansão oscilaram entre 2,70 e 6,21 kgf/cm² e os teores de umidade finais se situaram entre 35,78 e 52,65%.

13.3.3 Correlação e Discussão dos Resultados

Para verificar a influência da umidade inicial na pressão de expansão lançaram-se os valores em gráficos do tipo $PE = f(U_i)$ (vide Figura 16). Calcularam-se as regressões e a que melhor se ajustou foi a linear, cuja equação é do tipo $y = ax + b$, com $a = 0,121$ e $b = 6,498$. O coeficiente de correlação foi de -0,788.

O gráfico mostra que para umidades baixas os valores da pressão de expansão tornam-se mais elevados que para umidades mais altas.

A tendência da curva obtida é intersectar a abcissa em 6,5 kgf/cm², valor pouco superior ao máximo obtido nesta investigação (6,21 kgf/cm²) e a ordenada em 57%, que é próximo ao máximo valor de umidade final (52,65%). Se a regressão de fato for linear, deduz-se que existirá um teor de umidade inicial para o qual não haverá expansão e, portanto, não se manifestaria a

pressão de expansão; no caso, poderia ser em torno de 55%. A julgar pelo valor de limite de plasticidade, que foi de 45% , crê-se que a amostra, nas condições de ensaio a volume constante, não apresentaria pressão de expansão apreciável, pois com umidade inicial de 57% encontrar-se-ia adentrando a faixa de plasticidade (525%), na qual tenderia a se acomodar às "contra-pressões" aplicadas para impedir eventuais expansões. Esta hipótese, contudo, não pôde ser comprovada por razões práticas, ou seja, havia dificuldades para se obterem teores de umidade elevados para a amostra. A grande hidrofília da amostra não permitia uma homogeneização perfeita da umidade, obtendo-se diversos aglomerados quando a água, mesmo vaporizada, tocava a amostra. Haja vista que para a obtenção do teor de umidade de 28,48% a amostra teve que permanecer durante 10 dias em câmara úmida , adsorvendo água da atmosfera ambiente lentamente.

Chen (1975) obteve resultados que contrariam os alcançados nesta investigação, ou seja, nos seus experimentos a pressão de expansão não foi afetada pela variação da umidade inicial, mantendo-se, os valores, quase iguais para diferentes teores de umidade. Satyanarayana (1974) e Viajayvergia e Ghazzaly (1974) , entretanto, obtiveram menores valores de pressão de expansão em corpos de prova com umidades iniciais maiores.

13.3.4 Conclusões Parciais

As constatações aqui efetuadas permitem as seguintes conclusões parciais:

1) umidade inicial influenciou na pressão de expansão de modo linear, ou seja, à medida que cresceu a U_i , decresceu a PE;

2) deve existir um valor de umidade inicial para o qual não há expansão e, conseqüentemente, não se manifesta a pressão de expansão;

3) os resultados aqui alcançados não são compatíveis com os obtidos por Chen (1975), mas o são com os obtidos por Satyanarayana (1974) e Viajayvergia e Ghazzaly (1974).

13.4 ESTUDO COMPARATIVO DO DESEMPENHO DO SISTEMA ADOTADO FRENTE A UM SISTEMA CONVENCIONAL

Para efeito de comparação do desempenho do equipamento adotado neste estudo, executaram-se ensaios de pressão de expansão através de um processo no qual é permitida a expansão dos corpos de prova, sob valores crescentes de pressões. A pressão de expansão é definida como aquela que, se fosse aplicada sobre o corpo de prova, impediria a expansão. O valor da pressão de expansão é inferido em um gráfico onde, na ordenada são lançados os valores de expansão e, na abcissa, os valores dos logaritmos das pressões aplicadas.

Este é um dos métodos mais empregados nos laboratórios de Mecânica de Solos do mundo inteiro. Ruiz (1963) utilizou esse método nas suas investigações. Outro método muito empregado é aquele em que se permite a expansão do corpo de prova e a pressão de expansão é definida como sendo a necessária para recomprimir o corpo de prova ao seu volume inicial. Este foi o método empregado por Chen (1974).

Na presente investigação utilizou-se 2 modalidades do primeiro tipo de ensaio citado. Numa, os corpos de prova foram submetidos diretamente a pressões com valores pré-fixados, a partir dos resultados já obtidos pelo processo adotado pelo autor. Noutra, as pressões obedeceram a escala normalmente adotada nos ensaios de adensamento. Denominaremos essas modalidades de nº 1 e nº 2, respectivamente.

Foram utilizadas células edométricas convencionais e prensas do tipo de alavancas, que são normalmente utilizadas em ensaios de adensamento.

13.4.1 Modalidade nº 1

a) Procedimentos operacionais

Este ensaio foi executado à densidade seca de $1,20 \text{ g/cm}^3$ e teor de umidade inicial de 4,00%, sobre três corpos de prova da amostra de argila Volclay-SPV.

As pressões (p) foram pré-fixadas em 2,00, 4,00 e 8,00 kgf/cm^2 e aplicadas, cada uma, a um corpo de prova. Operou-se com a variação do índice de vazios (e) como parâmetro de expansão.

Determinaram-se o Índice de vazios inicial (e_i) e os Índices de vazios apresentados pelos corpos de prova antes e após a estabilização sob a saturação (Índices de vazios finais).

Os valores dos Índices de vazios finais foram lançados em gráficos do tipo $e = f(\log p)$. A ordenada foi fixada no ponto correspondente ao Índice de vazios inicial.

A pressão de expansão foi determinada a partir da intersecção da reta, que passa pelos valores de Índices de vazios finais, com a ordenada.

Este método é conhecido também pela denominação de "método dos três pontos".

b) Resultados

O gráfico correspondente a este ensaio encontra-se na Figura 17, onde se nota que todos os corpos de prova apresentaram redução nos valores de Índices de vazios em relação ao valor inicial (e_i), quando submetidos a pressões de 2,00, 4,00 e 8,00 kgf/cm², antes do fornecimento de água. Após o fornecimento de água, apenas o corpo de prova que foi submetido à pressão de 2,00 kgf/cm² expandiu com valores de Índice de vazios final superior ao inicial. O que foi submetido a 4,00 kgf/cm² expandiu, mas apresentou valor de Índice de vazios inferior ao inicial. O que foi submetido a 8,00 kgf/cm² contraiu, pois apresentou Índice de vazios final inferior àquele alcançado antes do fornecimento de água.

13.4.2 Modalidade nº 2

a) Procedimentos operacionais

Este ensaio foi executado por Fleury (1978) sobre quatro amostras indeformadas de arenitos silto-argilosos do Grupo Tubarão, colhidos em fundações de uma obra civil em Sumaré, Estado de São Paulo.

Utilizou-se de um mínimo de três corpos de prova por amostra. Os teores de umidade iniciais oscilaram entre 25 e 30% e as densidades secas se situaram em torno de 1,80 g/cm³ (Fleury, informação verbal).

Os corpos de prova foram moldados de modo que seu volume ex

terno coincidissem com o volume interno do anel da célula edométrica.

Como não se conhecia, previamente, a faixa de pressões de expansão que as amostras poderiam apresentar, adotaram-se as aplicações de pressões por estágios, com valores obedecendo a uma progressão geométrica de razão dois, a partir de $0,125 \text{ kgf/cm}^2$. Esta escala não foi obedecida rigorosamente para todas as amostras, pois dependeu dos valores apresentados pelos primeiros corpos de prova ensaiados.

Os corpos de prova permaneceram sob cada uma das pressões durante 24 h. Ao final desse tempo foi fornecida água destilada ao corpo de prova que foi deixado expandir até a estabilização das deformações. A estabilização demorou, na maioria dos casos, sete dias, para cada corpo de prova.

A expansão foi calculada através da relação $\Delta H/H \times 100$, onde: ΔH = acréscimo máximo de altura e H = altura inicial do corpo de prova. Os valores de expansão foram lançados em gráfico do tipo $\Delta H/H \times 100 = f(\log p)$.

A pressão de expansão foi determinada pela intersecção dos segmentos de reta, que unem os valores de expansão, com a ordenada.

b) Resultados

Os resultados encontram-se no gráfico da Figura 18, onde se nota que:

1) na amostra 1 houve expansão nos corpos de prova submetidos às pressões de até $0,500 \text{ kgf/cm}^2$; o que foi submetido a $1,000 \text{ kgf/cm}^2$ contraiu-se; a pressão de expansão foi interpolada em $0,59 \text{ kgf/cm}^2$;

2) na amostra 2 houve expansão nos corpos de prova submetidos a até $0,500 \text{ kgf/cm}^2$; a pressão de expansão foi extrapolada em $2,60 \text{ kgf/cm}^2$;

3) na amostra 3 houve expansão nos corpos de prova submetidos a até $1,000 \text{ kgf/cm}^2$; o que foi submetido a $2,000 \text{ kgf/cm}^2$ contraiu-se; a pressão de expansão foi interpolada em $1,85 \text{ kgf/cm}^2$;

4) na amostra 4 houve expansão nos corpos de prova submeti

dos a até $1,000 \text{ kgf/cm}^2$; o que foi submetido a $8,000 \text{ kgf/cm}^2$ contraíu-se; a pressão de expansão foi interpolada em $3,10 \text{ kgf/cm}^2$.

13.4.3 Ensaio "a Volume Constante" com as Amostras de Arenitos Silto-argilosos

a) Procedimentos Operacionais

O ensaio "a volume constante" foi executado sobre um corpo de prova, indeformado, de cada uma das amostras de arenitos. Os quatro corpos de prova foram moldados de modo que seus volumes externos coincidissem exatamente com o volume interno do anel da célula edométrica. Os teores de umidade inicial e final foram determinados de acordo com os procedimentos descritos anteriormente. Para a determinação da densidade seca, os corpos de prova foram pesados antes do ensaio e, de posse do valor de umidade inicial, calculou-se a massa seca através da expressão do item 13.3.1. O volume considerado no cálculo da densidade foi o do anel da célula edométrica, cujo valor é de $39,26 \text{ cm}^3$.

O ensaio foi executado de acordo com os procedimentos já descritos.

b) Resultados

Os resultados obtidos constam da Tabela 10, onde se nota que as umidades iniciais apresentaram-se muito abaixo e as densidades secas próximas aos dos corpos de prova utilizados no ensaio de acordo com a modalidade nº 2. Os valores de pressão de expansão, por sua vez, foram superiores.

13.4.4 Discussão dos Resultados

Nota-se nas Figuras 17 e 18 e na Tabela 10 que os valores de pressão de expansão obtidos, tanto pela modalidade nº 1, como pela nº 2, são inferiores aos obtidos pelo processo a volume constante, tanto para a amostra Volclay-SPV como para as de arenitos.

Isto se deve, provavelmente, ao fato, já constatado por diversos pesquisadores, de que a pressão de expansão diminui mesmo que uma pequena expansão seja permitida. Esta observação é válida, principalmente para o ensaio sobre a amostra Volclay ,

pois o mínimo valor apresentado no ensaio a volume constante , com corpos de prova de parâmetros semelhantes, foi de 4,33 kgf/cm² (vide Tabela 6, corpos de prova 1D, 8D, 9D e HM, e Tabela 9, corpo de prova VH-1). Nos ensaios sobre os arenitos, além do fato da expansão ser permitida, a umidade inicial deve ter afetado os resultados: no ensaio a volume constante, os teores de umidade iniciais se encontravam cerca de cinco vezes mais baixos que os teores dos corpos de prova ensaiados segundo a modalidade nº 2 (25 a 30%).

Em ambas as modalidades, nota-se que os valores são inferidos graficamente, a partir de resultados de expansão, os quais, por sua vez, estão muito dispersos, principalmente os do arenito. Isto leva a que os resultados da pressão de expansão obtidos por esse método sejam pouco exatos.

Quanto à dificuldade dos ensaios, a modalidade nº 2 foi mais trabalhosa e demorada, levando de 7 a 10 dias para determinação da expansão de um único corpo de prova, o que resultou em até 1 mês para se conhecer a pressão de expansão de uma amostra. A modalidade nº 1 levou de 3 a 10 dias para fornecer resultados de expansão dos corpos de prova. O processo a volume constante, por outro lado, forneceu o resultado de pressão de expansão em apenas 24 h, com a vantagem adicional de dispensar controle manual dos ensaios, e permitir melhor caracterização da amostra a partir da obtenção de diversos valores de pressão de expansão em curto espaço de tempo. Deve-se ressaltar, contudo, que a quantidade de ensaios executados pelo processo convencional adotado foi insuficiente para se chegar a uma conclusão definitiva sobre as vantagens do método a volume constante com monitoração automática dos ensaios.

Tabela 6 - Frequências em número e em porcentagem das densidades secas.

D_s (g/cm ³)	F (nº)	F (%)
1,14	2	4,76
1,15	2	4,76
1,16	2	4,76
1,17	3	7,14
1,18	8	19,05
1,19	12	28,57
1,20	7	16,67
1,21	4	9,52
1,22	0	0,00
1,23	1	4,76
1,24	0	0,00
1,25	1	4,76
TOTAL	42	99,99

Figura 9 - Distribuição dos valores das frequências em porcentagem das densidades secas.

Tabela 7 - Resultados da verificação da influência da massa na pressão de expansão.

CP (nº)	M (g)	U_i (%)	D_s (g/cm ³)	U_f (%)	PE (kgf/cm ²)
02	40,68	0,90	1,20	41,60	4,23
11	13,55	0,90	1,20	89,60	3,46
06	28,26	0,90	1,18	38,60	3,72
05	27,78	0,90	1,20	60,30	5,45
14	16,93	0,90	1,18	72,50	4,23
12	19,52	0,90	1,19	94,40	6,19
16	10,23	0,90	1,20	69,30	5,42
17	18,12	0,90	1,18	72,54	4,51
18	24,95	0,80	1,20	43,20	4,53
21	37,11	0,80	1,19	51,80	4,94
23	13,67	0,80	1,19	74,60	4,38
24	12,89	0,80	1,18	65,30	4,69
25	19,57	0,80	1,18	55,40	4,02
26	16,96	0,80	1,19	55,60	5,27
A-M	20,00	0,80	1,19	56,80	5,30
B-M	15,00	0,80	1,18	60,00	3,82
D-M	25,00	0,80	1,18	35,80	4,13
E-M	23,10	0,80	1,20	43,20	5,02
F-M	35,00	0,80	1,19	51,90	4,69
H-M	30,00	0,80	1,20	47,20	5,50
J-M	35,00	0,80	1,18	45,50	5,35
M-M	25,00	0,80	1,19	54,70	5,40
N-M	30,00	0,80	1,19	46,20	5,55
40-MD	3,00	0,63	1,19	105,34	3,57
41-MD	7,00	0,63	1,19	104,20	5,20
43-MD	7,00	0,63	1,18	80,86	3,11

Figura 10 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de massa, para densidades secas entre 1,18 e 1,20 g/cm³.

Figura 11 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de umidade final, para densidades secas entre 1,18 e 1,20 g/cm³.

Figura 12 - Distribuição dos valores de umidade final em função dos de massa, para densidades secas entre 1,18 e 1,19 g/cm³.

Tabela 8 - Resultados da verificação da influência da densidade seca na pressão de expansão

CP (nº)	M (g)	U _i (%)	D _s (g/cm ³)	U _F (%)	PE (kgf/cm ²)
30	30	0,80	0,98	56,20	1,88
40	30	0,80	0,99	48,20	1,63
50	30	0,80	0,99	58,00	1,67
20	30	0,80	1,00	57,10	1,73
LM	30	0,80	1,15	54,60	5,40
NH	30	0,80	1,19	46,20	5,55
10	30	0,80	1,20	79,80	5,22
80	30	0,80	1,20	38,10	4,33
90	30	0,80	1,20	36,80	5,25
HM	30	0,80	1,20	47,20	5,50
60	30	0,80	1,21	49,90	5,30
70	30	0,80	1,21	38,70	6,06
270	30	0,80	1,26	45,62	7,44
220	30	0,60	1,30	50,13	7,71
250	30	0,32	1,31	45,36	7,28
240	30	0,30	1,34	44,14	7,28

Figura 13 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de densidade seca, para massas iguais a 30 g.

Figura 14 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de umidade final, para massas iguais a 30 g.

Figura 15 - Distribuição dos valores de umidade final em função dos de densidade seca, para massas iguais a 30g.

Tabela 9 - Resultados da verificação da influência da umidade inicial na pressão de expansão, para massas iguais a 30g.

CP (nº)	U _i (%)	D _{s3} (g/cm ³)	U _f (%)	PE (kgf/cm ²)
VH-1	6,20	1,18	36,13	6,21
VH-3	8,43	1,19	37,57	5,58
VH-4	11,04	1,18	36,49	4,48
VH-5	14,37	1,18	36,52	5,23
VH-7	17,72	1,18	35,78	4,58
VH-6	19,37	1,18	52,65	2,70
VH-8	22,52	1,19	36,21	4,38
VH-2	28,48	1,18	45,13	3,31

Figura 16 - Distribuição dos valores de pressão de expansão em função dos de umidade inicial, para densidades secas entre 1,18 e 1,19 g/cm³ e massas iguais a 30 g.

Figura 17 - Distribuição dos resultados do ensaio de pressão de expansão, de acordo com a modalidade nº 1, sobre a amostra de argila Volclay-SPV (curva $e = f(\log p)$)

Tabela 10 - Resultados dos ensaios de pressão de expansão sobre arenitos.

Amostra (nº)	U_i (%)	D_s (g/cm ³)	PE (kgf/cm ²)	
			(1)	(2)
01	3,6	1,96	4,88	0,59
02	7,0	1,89	3,13	2,60
03	6,0	1,87	5,20	1,85
04	8,9	1,85	6,60	3,10

Nota: (1) - Este trabalho

(2) - Fleury (1978)

Figura 18 - Distribuição dos resultados do ensaio de pressão de expansão, segundo a modalidade nº 2, sobre amostras de arenitos (curvas $\frac{\Delta H}{H} \times 100 = f(\log p)$). Modificado de Fleury (1978).

14 CONCLUSÕES

1) a amostra de argila Volclay-SPV revelou-se ligeiramente mais silicosa e ligeiramente menos aluminosa que a utilizada por Zandonadi (1972).

2) a capacidade de troca de cátions da argila Volclay - SPV (70,3 mEq/100 g) é inferior à faixa de valores encontrada na literatura (80 - 100 mEq/100 g).

3) os cátions trocáveis predominantes da argila Volclay-SPV são sódio, cálcio e magnésio, nesta ordem.

4) o argilo-mineral predominante na argila Volclay-SPV é uma esmectita; illita ocorre muito subsidiariamente.

5) as dimensões das partículas predominam na faixa menor que 0,004 mm (4 μ m): 90,79%.

6) a argila Volclay-SPV apresenta alto valor para o limite de liquidez (570%); seu índice de plasticidade é, também, elevado (525%), mas encontra-se na faixa esperada para uma esmectita, de acordo com dados da literatura.

7) o peso específico real da argila Volclay-SPV é 2,67 g/cm³ e encontra-se na faixa esperada para uma montmorilonita, de acordo com dados da literatura.

8) a argila Volclay-SPV mostrou-se acentuadamente expansiva, a julgar pelo resultado apresentado no ensaio de expansão livre: 26,5ml.

9) houve dispersão de valores de densidades secas no processo de consolidação a uma pressão constante; a maior frequência de densidades situou-se entre 1,18 e 1,20 g/cm³.

10) a massa influenciou na pressão de expansão; ou seja, à medida que as massas aumentaram, aumentaram as pressões de expansão; a influência começou a decrescer a partir de 15 g.

11) a umidade final não foi correlacionável com a pressão de expansão, mas foi correlacionável com a massa na forma de uma potência negativa, ou seja, quanto menor a massa, maior foi a umidade final.

12) a densidade seca foi correlacionável com a pressão de

expansão de uma forma potencial positiva; na faixa estudada, en tretanto, pode ser considerada como mantendo uma correlação li-near positiva, ou seja, quanto maior a densidade seca, maior foi a pressão de expansão.

13) a densidade seca não foi correlacionável com a umidade final.

14) a umidade inicial foi correlacionável com a pressão de expansão de uma forma linear negativa, ou seja, quanto menor a umidade inicial, maior foi a pressão de expansão.

15) no método "a volume constante" os valores de pressão de expansão foram maiores que os obtidos pelo método convencional.

16) o método convencional é mais trabalhoso, mais demorado e menos exato que o "a volume constante".

17) a aparelhagem usada neste estudo, apesar de mais complexa na sua concepção e construção, permite a realização de en-saio de modo mais simples e mais rápido, e fornece resultados mais exatos.

18) o método "a volume constante", com o equipamento utilizado neste estudo, permite a obtenção do valor da pressão de expansão diretamente; isto permite, opcionalmente, um maior n^um^ero de ensaios para determinação da pressão de expansão de um material, em menor espaço de tempo.

19) por ser automático e simples, o equipamento usado neste estudo permite a realização de ensaios a custos mais baixos que os convencionais.

20) a julgar pelos resultados alcançados neste estudo, o mêtodo de ensaio "a volume constante", com o sistema de monitoração automática, mostrou melhor desempenho que o método e o processo convencionais escolhidos para comparação. Uma corroboração desta conclusão, contudo, poderá ser atingida com a realização de um maior número de ensaios e com uma variedade maior de amostras, pelo sistema convencional, em investigações futuras.

AGRADECIMENTOS

Desejamos expressar nossos sinceros agradecimentos:

Ao Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo S.A., que, através da Divisão de Minas e Geologia Aplicada (DMGA), forneceu-nos todo apoio material e humano necessário à execução deste trabalho.

Ao Professor Doutor José Eduardo Siqueira Farjallat, que idealizou o instrumental utilizado e forneceu-nos atenciosa e permanente orientação durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Aos Geólogos Nicolau Palm e Fábio Taioli e ao Engenheiro Álvaro B. Gabrielli, pelo planejamento e construção do sistema de monitoração automática dos ensaios e pelo constante interesse demonstrado durante todas as fases deste trabalho.

Ao Geólogo Jorge K. Yamamoto, pelas valiosas sugestões apresentadas no tratamento estatístico dos dados e pelo apoio, incentivo e interesse manifestados durante toda a parte experimental deste trabalho.

Ao Engenheiro José Luis R. Rocha, pela execução dos ensaios pelo processo convencional e pelas valiosas sugestões apresentadas no início deste estudo.

A Engenheira Cassia de Assis Fleury, pelo incentivo dado a este estudo e pelo fornecimento de valiosas informações referentes a sua experiência com solos expansivos.

Ao Professor Doutor José Vicente Valarelli, de quem tive a honra de receber as primeiras orientações no curso de Pós-Graduação do IGUSP, pelo incentivo na condução deste estudo.

Ao Geólogo Jairo de Sant'Anna Taddeo, pelo apoio e atenção sempre presentes e pela revisão criteriosa dos manuscritos.

Ao Professor Doutor Riuti Yoshida, que, quando colega do A grupamento de Petrologia da DMGA, muito nos incentivou à pesquisa no campo da mineralogia das argilas aplicada e pelas suges - tões de roteiro para o trabalho que ora se concretiza.

Ao Geólogo Saul B. Suslick e ao Estatístico José Alberto Quintanilha, pelo auxílio e sugestões no tratamento estatístico dos resultados.

Aos Geólogos Eleno de Paula Rodrigues, Atsushi Suemitsu , Luiz Geraldo Caruso, Maria Cristina de Moraes e Miriam Cruxên B. de Oliveira, que, como colegas de trabalho, deram-nos todo o apoio e incentivos necessários para este estudo.

A Engenheira Eda de Freitas Quadros, pelas valiosas críticas apresentadas na elaboração do texto deste trabalho.

Ao Químico Industrial Amilton G. de Andrade, pela preparação cuidadosa das amostras e pela atenciosa condução dos trabalhos laboratoriais.

Ao técnico Joaquim Ireno, que, sempre com muita dedicação, cuidou da construção e manutenção dos equipamentos utilizados nos ensaios.

A Estagiária-aluna Sandra Noemi Finzi, pelas importantes discussões mantidas sobre aspectos físico-químicos da expansão.

Ao José Roberto Vieira, pela confecção dos gráficos; e ao Arturo Prieto, pela elaboração dos desenhos.

Aos Técnicos André Luiz M. da Silva, Benito O. Rocha, Elaine V. dos Santos, Expedito D. Amorim, Fábio C. de Queiroz, Jilson Cardoso, José Antonio M. dos Santos, Luiz Martins, Nilson de Paula, Paulo Mori e Sonia A.R. Lopes, que, direta ou indiretamente, forneceram as condições laboratoriais necessárias para a execução das diferentes etapas deste trabalho.

A Bibliotecária Marcia M. Saad, pelo valioso auxílio na elaboração das referências bibliográficas deste trabalho.

As Secretárias Dagmar Sartini, Maria de Lourdes Fonseca e Márcia A.P. Maróstica, pelos serviços de datilografia.

BIBLIOGRAFIA

- AGARWAL, K.P. e SHARMA S.C. - 1974 - A method for measuring swelling pressure for an expansive soil. In: CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 39, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.155-159.
- AITCHISON, G.D. e MARTIN, R. - 1974 - A membrane oedometer for complex stress-path studies in expansive clays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 39, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.161-167.
- ALPAN, I. - 1957 - An apparatus for measuring the swelling pressure in expansive soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 49, Paris, 1957. Anais...Paris.p.3-5.
- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS - 1970 - Standard specification for wire-cloth sieves for testing purposes. Philadelphia. (ASTM ELL-70).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - 1977 - Determinação da massa específica dos grãos de solos. Rio de Janeiro.5.p. (ABNT MB-28).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - 1977 - Determinação do limite de liquidez de solos. Rio de Janeiro.6.p. (ABNT MB-30).
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT - 1977 - Determinação do limite de plasticidade e do índice de plasticidade de solos. Rio de Janeiro.4.p. (ABNT MB-31).
- BASU, R. e ARULANANDAN, K. - 1974 - A new approach to the identification of swell potential of soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 39, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.1-11.
- BJERRUM, L.; BREKKE, T.L.; MOUN, J.; SELMER-OLSEN, R. - 1964 - Some Norwegian studies and experiences with swelling materials in rock gouges. Oslo, Geotechnical Institute.9p. (Geotechnical Institute, publication 57).
- BRACKLEY, I.J.A. - 1974 - Swell pressure and free swell in a compacted clay. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE

- SOILS, 39, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.169-176.
- BREKKE, T.L. - 1975 - On the measurement of the relative potential swellability of hidrotermal montmorillonite clay from joints and faults in pre-Cambrian and paleozoic in Norway. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Oxford, 2:156-165.
- CAPRARIIS, P.; LINDELMANN, R.; COLLINS, C.M. - A method for determining optimum sample size in species diversity studies. Journal of the International Association for Matematical Geology. New York, 8(5):575-581.
- CAPUTO, H.P. - 1974 - Índices físicos. In: Mecânica dos Solos e suas aplicações. 3.ed. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos. v.1, p.40-55.
- CHEN, F.H. - 1974 - The basic physical property of expansive soils. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 39, Haifa; 1973. Anais...Haifa.v.1, p.17-25.
- CHEN, F.H. - 1975 - Foundations on expansive soils. Developments in Geotechnical Engineering. Amsterdam, Elsevier, 12:280.
- CHU, T.H.; MOU, C.H. - 1974 - Volume change characteristics of expansive soils determined by controlled suction testd. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 39, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.177-185.
- DE LAMBALLERIE, G.N. - 1962 - Contribution a l'étude des phénomènes de gonflement accompagnat l'hydratation des argiles compactes. Toulouse. 140p. (Tese de Doutorado. Universidade de Toulouse).
- DIDIER, G. - 1972 - Gonflement Cristallin et macroscopique des montmorillonites-Sa prevision. Lyon.110p. (Tese de Doutorado. Universidade Claud Bernard, Lyon).
- DIDIER, G. - 1974 - Swelling pressures of soils-Experimental device Field of utilization. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 39, Haifa, 1973. Anais...Haifa. p.187-193.
- DUNCAN, N.; DUNNE, M.H.; PETTY, S. - 1968 - Swelling characteristics of rock. Water Power, Londres, p.185-192.
- ESCARIO, V.; SAEZ, J. - 1974 - Measurement of the properties of

swelling and colapsing soils under controlles suction. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 3º, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.195-200.

FARJALLAT, J.E.S. - 1969 - Observações sobre desagregação do ba salto compacto utilizado no enrocamento do aterro da ponte do Rio Sucuriu. In: SEMANA PAULISTA DE GEOLOGIA APLICADA, 1ª, São Paulo, 1969. Anais...São Paulo.v.3, p.VI-1-VI-5.

FARJALLAT, J.E.S. - 1971 - Estudos experimentais sobre degradação de rochas basálticas - Basalto da barragem de Capivari-Rio Paranapanema. São Paulo. 125p. (Tese de Doutorado. Instituto de Geociências e Astronomia da USP).

FLEURY, C.A. - 1978 - Estudo do comportamento de argilas expansivas de ocorrência no Estado de São Paulo. São Paulo. 31p. (Relatório FAPESP - Processo nº 76/0394).

FRAZÃO, E.B.; FARJALLAT, J.E.S.; PALM, N. - 1978 - Applications of a simple servo-controlled device in the measurement of swelling pressure of rocks and minerals. In: INTERNATIONAL CONGRESS OF ENGINEERING GEOLOGY, 3º, Madrid, 1978. Anais...Madrid.v.2, section IV, p.132-136.

FRAZÃO, E.B.; MIOTO, J.A.; SANTOS, A.R. - 1976 - O fenômeno da desagregação superficial em rochas argilosas-Sua implicação na estabilidade de taludes viários. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA, 1º, Rio de Janeiro, 1976. Anais... São Paulo, ABGE.v.1, p.211-228.

GRAFT-JOHNSON, J.W.S.; BHATIA, H.A.; YEBOAH, S.L. - 1974 - Some swelling characteristics of the marine shale of Accra. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 3º, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.55-63.

GRIM, R.E. - 1962 - Clay mineralogy in relation to the engineering properties of clay materials. In: APPLIED CLAY MINERALOGY. New York, Mc Graw Hill, p.204-277 (International Series in the Earth and Planetary Sciences).

GRIM, R.E. - 1968 - Miscellaneous Properties. In: CLAY MINERALOGY. 2ª ed. New York, Mac Graw Hill. p.434-478 (International Series

in the Earth and Planetary Sciences).

HORTA DA SILVA, J.A. - 1971 - Geologia e comportamento geotécnico da argila expansiva de Cazenga-Luanda. In: REGIONAL CONFERENCE FOR AFRICA ON SOIL MECHANICS FOUNDATION ENGINEERING, 59, Luanda, 1971. Anais...Luanda. p.1-30-1-40.

HORTA DA SILVA, J.A. - 1975 - Solos expansivos-comportamento, identificação, quantificação da instabilidade volumétrica e projectos de fundações, parte I. Geotecnia, Lisboa, 13:29-63.

INTERNATIONAL SOCIETY FOR ROCK MECHANICS - 1971 - Suggested methods for determining the slaking, swelling, porosity, density and related rock index properties, Lisboa, ISRM Comission on Standardization on laboratory and field tests. 45 p.

KARALIS, T.K. - 1971 - Etude expêrimental des phênomenês de dēformation et d'humidification d'une argile gonflante, Toulouse, Universidade Paul Sabatier. 161 p. (Tese de Doutoramento).

KASSIF, G.; BAKER, R.; OVADIA, Y. - 1974 - Swell pressure relationships at constant suction changes. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SOLOS EXPANSIVOS, 3, Haifa, 1974. Anais...p. 201-202.

KAZDA, J. - 1974 - Study of the swelling pressure of soils. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL EM MECÂNICA DOS SOLOS E ENGENHARIA DE FUNDAÇÕES, 4, Paris, 1974. Anais...p.140-142.

KUL'CHITSKIJ, L.I. - 1970 - Application d'un modele osmotique a l'étude de la compressibilité et du gonflement des argiles saturées. Paris, LCP Ch., Service de Documentation, Cooperation Techniques et Scientifique Franco-Sovietique en Mecanique de Sols. 17p. (Tradução 72 T 30).

KULKARNI, S.K.; KATTI, R.K. - 1974 - A micro-particle and micro-anchor approach to mechanics of swelling soil media. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SOLOS EXPANSIVOS, 3, Haifa, 1974. Anais...p.43-52.

LAMBE, T.W. - 1958 - The structure of compacted clay. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division (1654): 1-33.

- MURAYAMA, S.; YAGI, N. - 1966 - Swelling of mudstone due to sucking of water. In: CONGRESSO INTERNACIONAL DE MECÂNICA DAS ROCHAS, 1ª, Lisboa, 1966. Anais...v.1, p.495-498.
- NASCIMENTO, U.; OLIVEIRA, R.; GRAÇA, R. - 1968 - Rock swelling test. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ROCK MECHANICS, Madrid, 1968.
- RAVINA, I. - 1974 - Swelling of clays: Mineralogical composition and microstructure. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL SOBRE SOLOS EXPANSIVOS, 3ª, Haifa, 1974. Anais...p.61-63.
- RUIZ, M.D. - 1963 - Mecanismos de desagregação de rochas basálticas semi-alteradas. São Paulo, Instituto de Pesquisas Tecnológicas. (Publicação IPT, 696).
- SATYANARAYANA, B. - 1974 - Effect of anisotropy on expansion characteristics. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 3ª, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.217-225.
- SEED, H.B.; WOODWARD, R.J.; LUNDGREN, R. - 1962 - Prediction of swelling potential for compacted clays. Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division. New York, (3169): 53-87.
- SKEMPTON, W. - 1953 - The colloidal "activity" of clays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING, 3ª, Zurich, 1953. Anais...p.57-61.
- SUGUIO, K. - 1973 - Introdução à sedimentologia. São Paulo, Edgar Blucher. 317p.
- THENOUZ, B.; FARRAH, J.; CAPDECOMME, L. - 1966 - Role des Argiles dans le comportement des roches cristallines mises au contact de l'eau. In: INTERNATIONAL CONGRESS ON ROCK MECHANICS, 1ª, Lisboa, 1966. Anais...Lisboa.v.1, p.717-719.
- VIAJAYVERGIA, V.N.; GHAZZALY, O.I. - 1974 - Prediction of swelling potential for natural clays. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON EXPANSIVE SOILS, 3ª, Haifa, 1973. Anais...Haifa.v.1, p.227-236.
- WHITE, A.W. - 1958 - Water sorption properties of homoionic clay minerals. Urbana, Illinois State Geological Survey. 46p. il. (Illinois State Geological Survey Report of Investigation, 208).

- YOSHIDA, R. - 1972 - Contribuição ao conhecimento de características tecnológicas de materiais rochosos. São Paulo. 2v. (Tese de Doutorado. Instituto de Geociências da USP).
- ZANDONADI, A.R. - 1972 - Estudo tecnológico de argilas nontroníticas brasileiras. São Paulo. 234p. (Tese de Doutorado. Instituto de Química da USP).
- ZANDONADI, A.R.; SANTOS, P.S. - 1972 - Pressão de expansão do "Sistema argila + água" em argila montmoriloníticas provenientes de túneis construídos em granitos decompostos. São Paulo. p.738-757. (Relatório FAPESP - processo PTI-70/993).
- ZANDONADI, A.R.; SANTOS, P.S. - 1978 - Propriedades reológicas de montmorilonitas ou esmectitas brasileiras. Cerâmica 25:355-371.