

Investigação de Campo e Laboratório de um Aterro Em Pernambuco

Roberto Quental Coutinho

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, rqc@ufpe.br

Danisete Pereira de Souza Neto

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, daniseteneto@gmail.com

Tahyara Barbalho Fontoura

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, tahyara_barbalho@hotmail.com

Bruno Pereira Fernandes de Castro

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, bpfcastro@gmail.com

Wezio Lisboa Sousa dos Anjos

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, weziolisboa@hotmail.com

Monalyssa Caroline Lira da Silva Ramos

Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, mona.ramos@hotmail.com

RESUMO: Este trabalho apresenta resultados e discussões parciais de uma investigação de campo e laboratório realizados em um aterro localizado na região metropolitana do Recife. Durante a investigação de campo foram realizadas sondagens de simples reconhecimento, retirada de amostras indeformadas (bloco) e amolgadas representativas e ensaios de permeabilidade. Na campanha de laboratório foram realizados ensaios de granulometria, limites de consistência, densidade real dos grãos, compactação, edométricos duplos e triaxiais drenados e não drenados. A composição granulométrica mostrou que o aterro pode ser classificado, em sua maior parte, como areia argilosa (SC). Entretanto, também foi encontrada argila arenosa pouco plástica (CL). Os valores de N_{SPT} nos trechos das sondagens correspondentes ao aterro variaram entre 2 e 15 golpes. A permeabilidade do solo do aterro apresentou-se relativamente baixa (na ordem de 10^{-8} m/s). Este valor de permeabilidade permite a infiltração de água no corpo do aterro, porém deve ocorrer dificuldade na completa penetração da mesma. A análise da compressibilidade mostrou que o aterro (compactado em campo) é mais compressível que o material compactado em laboratório. Quanto aos parâmetros de resistência, obtidos através de ensaios triaxiais, o ângulo de atrito variou de $31,4^\circ$ a $35,5^\circ$ e a coesão de 2,8 a 4,3 kPa.

PALAVRAS-CHAVE: Aterro, Compactação, Investigação de Campo, Ensaios de Laboratório.

1 INTRODUÇÃO

O projeto de extensão utilizado como base do trabalho de investigação de campo e campanha de laboratório contou com um estudo elaborado em diversas áreas do aterro em estudo. O

presente trabalho discorre acerca do estudo do comportamento geotécnico de uma área específica do aterro da Formação Barreiras, localizado na Região Metropolitana do Recife-PE.

Trindade et al. (2008) citam que a

estabilização do solo por meio de compactação é a técnica de estabilização de maior aplicação na engenharia geotécnica.

A compactação do solo visa atender as condições necessárias de segurança para um determinado projeto. Entre os parâmetros analisados para atender as condições adequadas para o projeto, podemos destacar: peso específico, coesão, ângulo de atrito, compressibilidade e condutividade hidráulica.

Para um adequado valor de resistência mecânica, compressibilidade e permeabilidade, a compactação do solo deve ser executada conforme exigências de projeto. Quando a compactação do solo é executada de forma indevida ou ineficiente, a obra pode não apresentar um funcionamento adequado, gerando custos de manutenção.

O presente trabalho faz parte dos projetos de extensão realizados na área de geotecnia pelo Grupo de Engenharia Geotécnica de Encostas, Planícies e Desastres – GEGEP, consistindo na análise de parâmetros de solo da Formação Barreiras compactado em campo e em laboratório na umidade ótima e densidade específica seca máxima utilizando a energia Proctor Normal.

2 ÁREA DE ESTUDO E METODOLOGIA DAS ATIVIDADES DE CAMPO E LABORATÓRIO

A área de estudo está localizada na região metropolitana do Recife (RMR). O terreno natural, antes da execução do aterro, tratava-se de uma encosta com cota aproximadamente de 72,0 metros. Para atender as especificações do projeto, cortou-se em torno de 8,0 metros a partir do topo da encosta e utilizou esse material na construção de dois aterros. Ressalta-se que o volume de corte foi suficiente para atender o volume de aterro.

Com o corte de 8 metros do terreno natural, criou-se uma área plana na cota de 64 metros. Sendo assim, executaram-se dois aterros partindo da base do terreno natural até atingir a cota de 64 metros, conforme Figura 1.

A altura máxima do aterro pode ser de aproximadamente 27,50 metros, podendo ter 3 ou 4 patamares e inclinação de 1:1,5.

A Figura 1 apresenta as atividades realizadas durante a investigação de campo. A linha azul destacada representa a fronteira entre o terreno natural e os aterros.

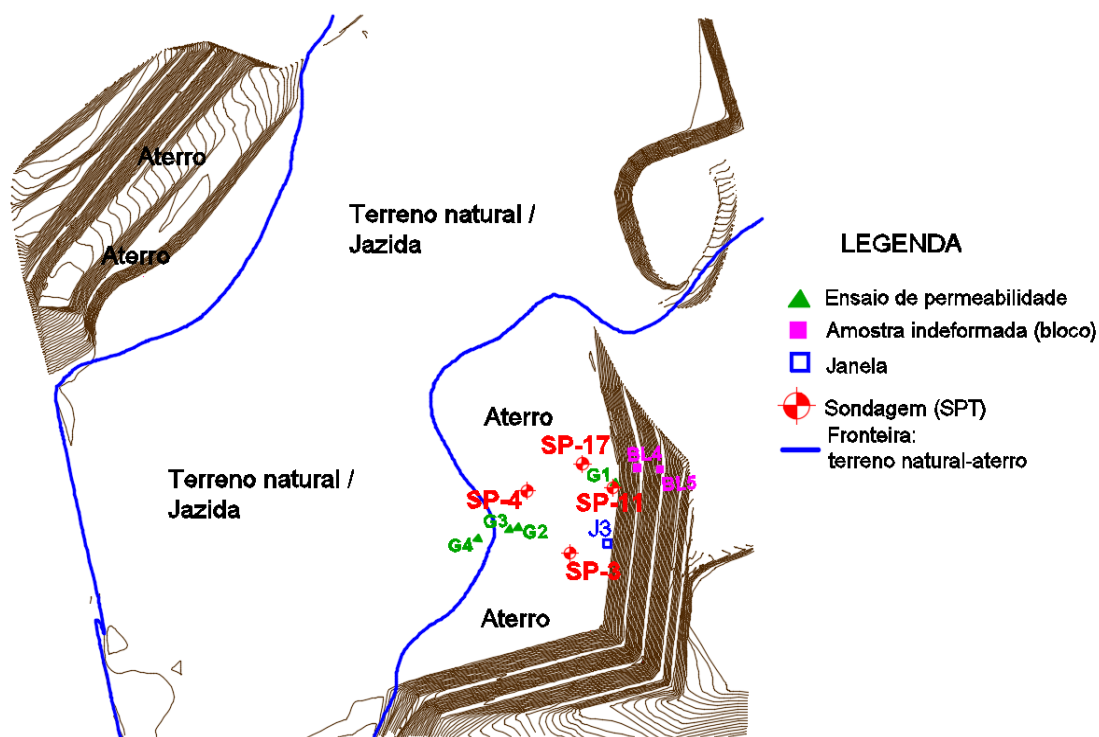


Figura 1 - Localização da investigação de campo (Souza Neto, 2016)

2.1 Caracterização geológica

A área de interesse encontra-se inserida na unidade geológica Formação Barreiras – arenitos grossos a conglomeráticos, intercalados por níveis conglomeráticos e camadas siltico-argilas – pertencente à era cenozoica.

Na região encontra-se também a Formação Itamaracá - siltitos argilosos intercalados com arenitos médios a finos calcíferos e fosforitos – pertencente à era mesozoica.

A fim de ratificar a unidade geológica presente no local em estudo, foi feito um reconhecimento da geologia com escala de detalhe na área estudada, o que permitiu confirmar a unidade geológica presente na área em estudo.

Ácido clorídrico (HCl) foi gotejado no solo (Figura 2) para comprovar a existência, ou não, de carbonato presente na Formação Itamaracá. Após observar em campo que não houve reação química entre o ácido clorídrico e o carbonato presente no solo da Formação Itamaracá,

confirmou-se que a unidade geológica corresponde a Formação Barreiras.

2.2 Caracterização geotécnica

Foram realizadas sondagens de simples reconhecimento com medidas de N_{SPT} a cada metro. Essas sondagens foram realizadas no aterro até atingir o impenetrável a percussão, que sempre ocorreu no terreno natural. No total foram realizados 4 furos à percussão no trecho deste trabalho. As sondagens seguiram as especificações da NBR 6484/2001 (ABNT, 2001) para execução das sondagens de simples reconhecimento e a classificação do solo de acordo com sua compacidade ou consistência seguiu as especificações contidas na NBR 7250/82 (ABNT, 1982).

Representa-se na Figura 3 um perfil geotécnico típico do trecho do aterro apresentado neste trabalho, cuja localização está apresentada na Figura 1.



Figura 2 - Ácido clorídrico sendo gotejado no solo

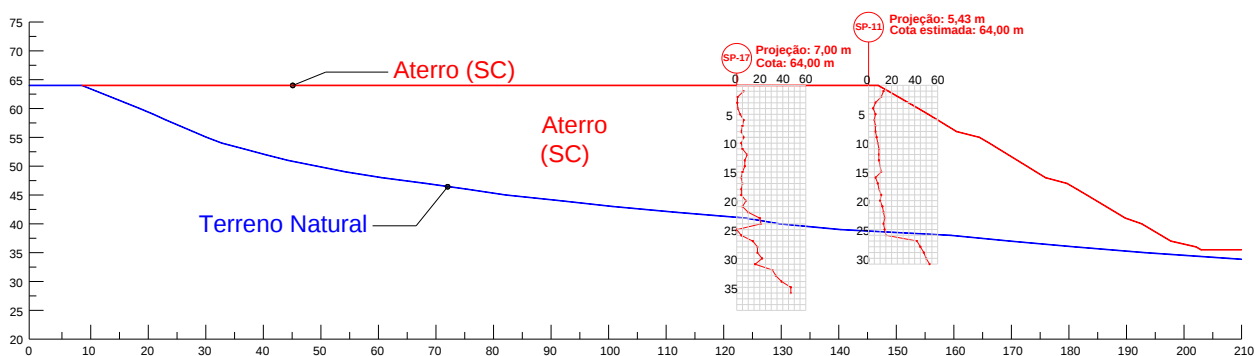


Figura 3 – Perfil geotécnico típico (Coutinho, 2015)

Duas trincheiras foram abertas no aterro para coleta de amostras indeformadas (bloco) e amostras amolgadas representativas em cada trincheira. Para a retirada das amostras, seguiu-se a NBR 9604/86 (ABNT, 1986).

Durante a investigação de campo, uma janela (poço de inspeção) foi escavada no trecho em estudo do aterro. As amostras amolgadas retiradas nessa janela foram compactadas em laboratório na energia Proctor Normal, umidade ótima e peso específico seco máximo.

Para a determinação da condutividade hidráulica saturada “in situ”, foi utilizado o permeâmetro Guelph. A metodologia adotada no presente trabalho para o cálculo dos parâmetros K_{fs} (permeabilidade) e ϕ_m (potencial mátrico de fluxo) seguiu o procedimento padronizado constante no manual do usuário do Permeâmetro Guelph (Soilmoisture, 1991).

A avaliação da condutividade hidráulica saturada foi realizada em 4 verticais, com profundidade máxima de 4 metros devido as limitações do equipamento utilizado. Tais verticais foram realizadas no terreno natural e no aterro. A cada metro (1 m, 2 m, 3 m e 4 m) da vertical em execução foi realizado um ensaio para obtenção de K_{fs} e ϕ_m , totalizando 4 ensaios por vertical.

A composição granulométrica, os limites de consistência e os ensaios de compactação foram realizados em todas as amostras coletadas, segundo procedimentos previstos nas normas técnicas brasileiras.

Os ensaios edométricos duplos foram realizados de modo a avaliar a compressibilidade do material e verificar o potencial de colapso do mesmo. Foram utilizados pares de amostras indeformadas e pares de amostras compactadas em laboratório.

As amostras amolgadas coletadas nas janelas foram compactadas na energia Proctor Normal, umidade ótima e peso específico seco máximo (obtidos nos ensaios de compactação), sendo um corpo de prova ensaiado na umidade ótima e o outro na condição inundada. Para as amostras indeformadas moldadas dos blocos, os corpos de prova foram ensaiados na condição de umidade natural e na condição inundada.

Os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo foram obtidos em amostras saturadas

por contrapressão através do ensaio de compressão triaxial. As primeiras amostras ensaiadas no ensaio de compressão triaxial foram as amostras amolgadas coletadas nas janelas e compactadas na energia Proctor Normal. Os ensaios realizados nessas amostras foram do tipo CIU-C. A fim de melhor representar a condição de campo, optou-se por realizar os demais ensaios triaxiais do tipo CID-C. Os corpos de prova moldados a partir dos blocos indeformados, coletados no aterro, foram moldados na condição de umidade natural. Nesses casos os ensaios foram do tipo CID-C.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de N_{SPT} nos trechos das sondagens correspondentes ao aterro variaram entre 2 e 15, aumentando a partir do contato com o terreno natural (base do aterro). Muito frequentemente foram observados segmentos de 4 a 5 metros com N_{SPT} baixos (<10) para o que se espera de um aterro bem compactado.

Os valores de N_{SPT} da sondagem 11 (SP-11) apresentaram-se menores ou iguais a 10 em quase todo perfil até 21 m de profundidade (exceto 17 m - $N_{SPT} = 11$). O trecho entre 6 e 7 metros apresentou perda de lama bentonítica na razão de 80 L/m, o que pode indicar a presença de vazios no corpo do aterro. No trecho entre 25 e 26 metros, onde se localiza o contato estimado entre o aterro e o terreno natural, o N_{SPT} variou de 12 a 33 golpes, aumentando com a profundidade até o limite da sondagem.

Os resultados dos coeficientes de permeabilidade saturados estão sumarizados na Tabela 1. A permeabilidade no aterro variou entre $4,25 \times 10^{-7}$ e $1,70 \times 10^{-8}$ m/s (menores permeabilidades encontradas). O terreno natural apresentou valores de permeabilidades no intervalo de $8,5 \times 10^{-8}$ a $6,7 \times 10^{-7}$ m/s (maiores permeabilidades encontradas).

A permeabilidade do material do aterro apresentou-se relativamente baixa (na ordem de 10^{-8} m/s). Este valor de permeabilidade permite a infiltração de água no terreno, entretanto deve ocorrer dificuldade na completa penetração da água ao longo de todo o aterro, devido a sua grande espessura.

Tabela 1 - valores da permeabilidade (K_{fs}), potencial mátrico de fluxo do solo (ϕ_m), teor de umidade inicial e final

G1 – Vertical 1 - Aterro				
Prof. (m)	K_{fs} (m/s) $\times 10^{-8}$	ϕ_m (m ² /s) $\times 10^{-11}$	$w_{inicial}$	w_{final}
1	4,25	5,90	14,1	27,0
2	2,61	3,63	19,1	30,1
3	1,70	2,36	14,0	22,8
4	1,73	2,41	12,1	26,0
G2 – Vertical 2 - Aterro				
Prof. (m)	K_{fs} (m/s) $\times 10^{-7}$	ϕ_m (m ² /s) $\times 10^{-11}$	$w_{inicial}$	w_{final}
1	4,25	5,90	13,4	26,3
2	2,12	2,95	13,3	27,4
3	0,39	0,54	15,0	24,3
4	0,26	0,35	12,6	26,0
G3 – Vertical 3 - Aterro				
Prof. (m)	K_{fs} (m/s) $\times 10^{-8}$	ϕ_m (m ² /s) $\times 10^{-11}$	$w_{inicial}$	w_{final}
1	3,92	5,44	21,6	24,6
2	4,57	6,35	16,0	24,1
3	4,25	5,90	14,1	26,8
4	2,35	3,27	9,9	24,6
G4 – Vertical 4 – Terreno Natural				
Prof. (m)	K_{fs} (m/s) $\times 10^{-7}$	ϕ_m (m ² /s) $\times 10^{-10}$	$w_{inicial}$	w_{final}
1	1,99	2,8	14,04	23,2
2	5,40	7,5	13,57	22,9
3	6,70	9,3	11,09	21,8
4	0,85	1,2	19,38	26,6

Coutinho e Severo (2009) citam que solos da Formação Barreiras em seu estado natural variam quanto ao coeficiente de permeabilidade saturado na ordem de 10^{-5} a 10^{-7} m/s. Essa variação de resultado depende dos teores de materiais finos presentes no solo.

O índice de vazios para os blocos apresentaram intervalo entre 0,73 e 0,83 (maiores índices de vazios). O material compactado da janela em sua umidade ótima e densidade seca máxima apresentou um índice de vazios de 0,51 (menor índice de vazios). Isso indica que o aterro encontra-se com menor compactidade do que seria esperado ao se compactar na densidade específica seca máxima e teor de umidade ótimo.

Os materiais dos blocos coletados correspondem a areias argilosas (SC) e a argilas de baixa plasticidade (CL). O material coletado na janela foi classificado como sendo areia argilosa (SC). Isto indica a existência de pelo menos dois materiais existentes no aterro. Esses

resultados estão sumarizados na Tabela 2.

Os valores de índices de plasticidade dos blocos ficaram no intervalo de 12,9 a 18,7 %. O material da janela apresentou índice de plasticidade de 9,5%. Observa-se que os maiores índices de plasticidade estão no material dos blocos. As maiores porcentagens de argila também são encontradas nos blocos, o que condiz com a classificação granulométrica.

Na retirada dos blocos foram feitos ensaios de funil de areia para obter a densidade natural do material em campo. A partir desses resultados, foram analisados os dados do controle de compactação dos aterros em termos de “grau de compactação”, para as condições atuais do aterro e de localização da amostragem.

A massa específica seca de campo foi calculada utilizando a densidade natural “in situ” determinada no momento da coleta do bloco e a umidade foi obtida no ensaio de adensamento. A Tabela 3 apresenta esses resultados.

Observando os resultados apresentados na Tabela 3, é possível constatar que os blocos retirados no aterro apresentam graus de compactação muito abaixo do mínimo permitido (95%) de acordo com a exigência da DNER-ES 282/97 para material de aterro. Nota-se que a densidade seca obtida em campo ($\rho_{d,campo}$) e a densidade seca obtida na realização do ensaio edométrico ($\rho_{d,adens}$) tem valores aproximados e muito menores que a densidade seca máxima ($\rho_{d,máx}$) obtida nos ensaios de compactação realizados na energia Proctor Normal, teor de umidade ótimo e peso específico máximo.

Tabela 2 - Valores de índice de vazios, limite de consistência, porcentagem de argila e classificação do solo segundo SUCS

Amostra	e_0	LL (%)	IP (%)	Argila (%)	SUCS
BL4	0,83	32,0	12,9	34	CL
BL5	0,73	41,3	18,7	36	SC
Janela 3	0,51	33,3	9,5	23	SC

Tabela 3 – Resultados de grau de compactação para as condições atuais do aterro e da localização da amostra

Bloco	$\rho_{d,adens}$ (g/cm ³)	$\rho_{d,campo}$ (g/cm ³)	$\rho_{d,max}$ (g/cm ³)	GC (%)	$w_{adensam}$ (%)
4	1,452	1,452	1,760	82,50	13,643
5	1,545	1,292	1,795	71,98	15,979

As Figura 4 e 5 apresentam os gráficos de deformação volumétrica (E_v) x tensão vertical efetiva (σ'_v), com as amostras na condição não inundada e inundada, respectivamente. Observa-se que o material da janela (compactado em laboratório com $\rho_{d,max}$ e $w_{ótima}$) é menos compressível que o material dos blocos indeformados (compactado em campo).

A Tabela 4 apresenta o coeficiente de colapsibilidade (C) para os dois blocos, segundo proposta de Reginatto e Ferrero (1973). As amostras foram classificadas como sendo condicionalmente colapsível (CC), onde o colapso ocorre quando se aplica uma tensão adicional maior do que σ_{v0} . Entretanto, o solo suporta um acréscimo de tensão ($\sigma_{vps} - \sigma_{v0}$) sem apresentar colapso.

Figura 4 – Deformação volumétrica (E_v) x tensão vertical efetiva (σ'_v) – corpo de prova não inundado

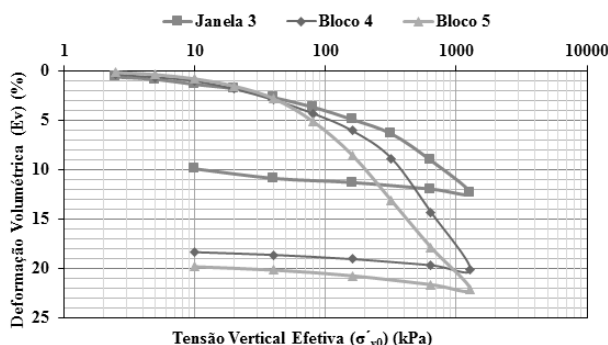


Figura 5 - Deformação volumétrica (E_v) x tensão vertical efetiva (σ'_v) – corpo de prova inundado

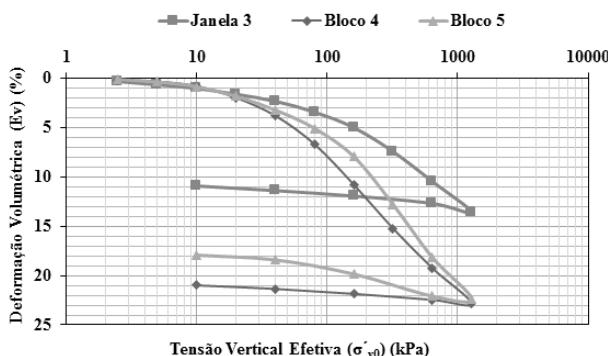


Tabela 4- Potencial de colapso do solo segundo classificação de Reginatto e Ferrero (1973)

Amostra	Reginatto e Ferrero (1973)	
	C	Classificação
BL4	0,122	CC
BL5	0,748	CC

A Figura 6 mostra os gráficos de colapso x tensão vertical efetiva. Observa-se que o material compactado da janela, em geral, apresenta uma menor porcentagem de colapso para tensões maiores do que 80 kPa.

A Tabela 5 apresenta os resultados de ângulo de atrito e coesão obtidos nos ensaios triaxiais, tanto para as amostras indeformadas dos blocos quanto para a amostra compactada coletada na janela. O parâmetro de ângulo de atrito do material compactado em laboratório apresentou maior valor ($35,6^\circ$) do que os ângulos de atritos do material dos blocos indeformados (média de $31,75^\circ$). Da mesma forma, o valor da coesão do material compactado em laboratório deu maior (4,3 kPa) que os valores de coesão dos blocos (média de 3,4 kPa).

Figura 6 – Colapso x tensão vertical

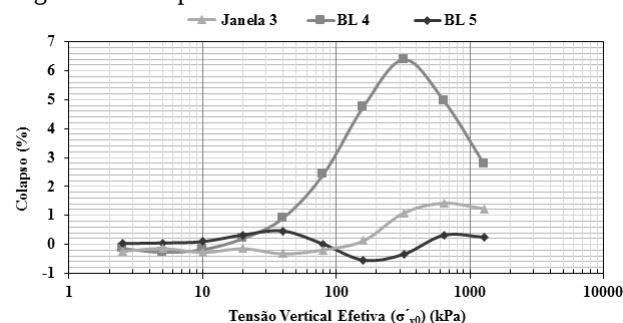


Tabela 5 – Resultados de ângulo de atrito e coesão

Amostra	Tipo do ensaio	Coesão (saturada) (kPa)	Ângulo de atrito (saturado) ϕ ($^\circ$)
Bloco 4	CID	2,8	31,4
Bloco 5	CID	4,0	32,1
Janela 3	CIU	4,3	35,6

4 CONCLUSÕES

Os valores de N_{SPT} do material do aterro mostram uma ocorrência de valores muito baixo de resistência a penetração ($N_{SPT} < 10$), mesmo em profundidades significativas (maiores de 10 metros). Em geral, tais resultados não são compatíveis com solos bem compactados, evidenciando uma deficiência na compactação.

Os ensaios de permeabilidade feitos no aterro apresentaram valores baixos de condutividade (na ordem de 10^{-8} m/s). A condutividade hidráulica do terreno natural apresentou-se na

ordem de até dez vezes maior que a do aterro. Diante disso, pode ocorrer a existência de percolação de água do solo natural (que tem maior permeabilidade) para a zona de aterro fragilizando o contato entre esses dois materiais.

A classificação do solo pelo sistema unificado de classificação dos solos apresentou resultados que mostram uma heterogeneidade do material do aterro, o que evidencia a existência de pelo menos dois materiais no aterro (areia argilosa e argila de baixa plasticidade).

As amostras indeformadas dos blocos no aterro são mais compressíveis do que a amostra compactada em laboratório. Esse comportamento foi observado tanto para as amostras inundadas como não inundadas.

Outro aspecto importante é o potencial de colapso do solo. Para um valor de tensão vertical efetiva de 320 kPa, o material indeformado do bloco 4 apresentou o maior potencial de colapso (6,4 %). Esse potencial de colapso pode ser bastante expressivo quando a altura do aterro é significativa.

Os parâmetros de resistência dos blocos coletados no aterro apresentaram valor médio de 31,75° (ângulo de atrito) e 3,4 kPa (coesão). Já a amostra compactada em laboratório apresentou valor de 35,6° (ângulo de atrito) e 4,3 kPa (coesão). Sendo assim, o aterro, nas condições atuais, apresenta uma menor resistência.

REFERÊNCIAS

- ABNT. NBR 7250/82. *Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento dos solos*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1982. 3 p.
- ABNT. NBR 9604/86. *Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas*. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1986b. 9 p.
- ABNT. NBR 6484/2001. *Solo - sondagens de simples reconhecimento com SPT – método de ensaio*. Rio de Janeiro. Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001. 17 p.
- Coutinho, R. Q. e Severo, R. N. F. (2009). Conferência: *Investigação Geotécnica para Projeto de estabilidade de Encostas*. In: V COBRAE. Anais, São Paulo–SP.

- Coutinho, R. Q. (2015). *Relatório de investigação de campo e ensaios de laboratórios*. GEGEP, 233p.
- DNER-ES 282/97. *Terraplenagem – aterros*. MT – Departamento nacional de estradas de rodagem. Rio de Janeiro, 1997. 8p.
- Reginatto, A. R. e Ferrero (1973) - *Collapse Potential of Soils and Water Chemistry*. Proceedings of the VIII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Moscow, Vol. 2, pp. 177-183.
- Soilmoisture (1991). *Guelph Permeameter 2800. Operating Instructions*. Soilmoisture Equipment Corp. Santa Bárbara, USA.
- Souza Neto. D. P. de. (2016) *Estudos geotécnicos de um aterro de solos da Formação Barreira na região metropolitana do Recife*. Dissertação de mestrado, UFPE. Recife, 167p.
- Trindade, T. P. da.; et al. (2008). *Compactação dos solos - fundamentos teóricos e práticos*. 1ª Edição. Viçosa: UFV, 2008.