

# Parâmetros de resistência ao cisalhamento e de permeabilidade de solos pertencentes ao grupo Itararé (Bacia do Paraná)

Geraldo Vanzolini Moretti

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, E-mail: [geraldo@morettiengenharia.com.br](mailto:geraldo@morettiengenharia.com.br)

Maurício Haruo Nogueira Hachiriki

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, E-mail: [mauricio@morettiengenharia.com.br](mailto:mauricio@morettiengenharia.com.br)

João Alexandre Paschoalin Filho

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, E-mail: [joao@morettiengenharia.com.br](mailto:joao@morettiengenharia.com.br)

Fabian Corgnier

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, E-mail: [fabian@morettiengenharia.com.br](mailto:fabian@morettiengenharia.com.br)

Atilio Oliveira Moretti

Moretti Engenharia Consultiva, São Paulo, Brasil, E-mail: [atilio@morettiengenharia.com.br](mailto:atilio@morettiengenharia.com.br)

**RESUMO:** A permeabilidade do solo tem influência tanto na estabilidade dos taludes quanto na vazão d'água percolada em seu interior. O conhecimento da permeabilidade do solo também é útil em análises de recalques, porque, frequentemente, as deformações estão relacionadas com a diminuição do índice de vazios resultante da expulsão de água destes vazios. Outro fator preponderante na estabilidade de taludes são os parâmetros de resistência dos solos. Estes parâmetros podem ser avaliados através da realização de ensaios triaxiais rápidos adensados saturados que permitem a obtenção da resistência não drenada em função da tensão de adensamento. Caso sejam medidas as pressões neutras, a resistência em termos de tensão efetiva também pode ser determinada. Com obtenção destes parâmetros do solo é possível determinar a envoltória de resistência em termos de tensão efetiva, fornecendo os dados necessários para a realização de análises de estabilidade envolvendo o material estudado. Neste artigo serão apresentados parâmetros geotécnicos determinados por meio de ensaios laboratoriais (ensaios de permeabilidade com fluxo vertical e ensaios triaxiais rápidos adensados saturados) para solos da região de Hortolândia, interior do estado de São Paulo, pertencentes ao grupo Itararé (Bacia do Paraná). Estes ensaios foram realizados para caracterização do material a ser utilizado no aterro para execução de uma barragem na cidade de Hortolândia, fornecendo os parâmetros necessários para elaboração dos projetos. Foram realizados além dos ensaios triaxiais e de permeabilidade, sondagens SPT, trados, ensaios de simples caracterização geotécnica - Limites de Atterberg e de compactação.

**PALAVRAS-CHAVE:** Permeabilidade vertical, Parâmetros Geotécnicos, Barragens, Aterros.

## 1 CONTEXTO GEOLÓGICO

### 1.1 Estudo da Geologia Regional – Hortolândia, São Paulo

A região de Hortolândia, interior do estado de São Paulo está localizada sobre os sedimentos do Grupo Itararé. Este grupo constitui a base da sequência do período Permo-

Carbonífero da bacia do Paraná, se destacando por conter registros das glaciações neoproterozóicas gondwânicas.

Uma das maiores questões acerca do Grupo Itararé está na falta de correspondência entre classificações litoestratigráficas concebidas em superfície e em sub-superfície. A falta de uma classificação operacional em âmbito regional impossibilita a divisão desta unidade na maioria

dos mapas geológicos existentes.

O grupo Itararé na porção aflorante no estado de São Paulo é constituído por uma sucessão de depósitos glacio-continentais em sua base e glacio-marinhos em seu topo. São descritas unidades compostas por diamictitos de diversos tipos (matriz pelítica a arenosa, maciços e estratificados) que ocorrem ao longo de todo o perfil de exposição, ora intercalados a litotipos predominantemente pelíticos, ora associados a sedimentos areno-conglomeráticos.

Na região do município de Hortolândia estão expostos sedimentos depositados em ambientes subaquáticos, pertencente à fácies de lamitos do Grupo Itararé, apresentando as litofácies de lamitos maciços, lamitos acamados ritmos e siltitos.

A fácies de lamitos maciços, porção basal da unidade, se apresenta na forma de lamitos cinza escuros, maciços, com ligeiro acamamento marcado por concentrações carbonáticas com pirita. A fácies de lamitos acamados se apresenta na forma de alternâncias de lamitos laminados com bancos decimétricos de siltito e arenitos, variando lateralmente para arenitos maciços. A fácies de ritmos apresenta rochas com alternância rítmica entre camadas de lamitos cinza escuro e siltitos cinza claro, possui nódulos de pirita e algumas camadas isoladas de arenitos. A fácies de siltitos, porção de topo da unidade, apresenta siltitos laminados de cor cinza escura, apresentando teores variados de argila, aparecendo por vezes intercalados com arenitos.

A região onde foram realizados os ensaios é servida pelo Ribeirão Jacuba, pertencente à bacia do Rio Piracicaba, é o principal rio do município de Hortolândia, sendo abastecido por várias micro-bacias.

Nesta região os sedimentos do Grupo Itararé estão encobertos por sedimentos aluvionares, com espessura variando de 1,0 a 9,0m, como observado nos furos de sondagem executados no local da obra. Essa cobertura aluvionar se deve as cheias intensas que o Ribeirão Jacuba sofre durante a época de chuvas. Os aluviões da área são compostos de areias finas argilosas que variam o teor de argila em sua extensão de acordo com o a profundidade dos depósitos e leitos de argila orgânica em alguns pontos.

Na área estudada os aluviões estão recobertos em vários pontos por espessa camada de aterro que parece ter sido mobilizado das proximidades, pois se trata de um material argilo-arenoso, não diferindo muito em composição do material sedimentar encontrado no entorno.

## 1.2 Aspectos Geológicos Locais

As investigações realizadas revelaram que o subsolo é composto por camada superficial de aterro constituído por argila arenosa avermelhada que parece ter sido retirada das redondezas, pois não difere muito em composição dos extratos encontrados em níveis estratigráficos mais profundos. Muitas vezes esses aterros estão executados diretamente sobre uma camada de aluvião. Os solos aluvionares, segundo os resultados das sondagens, são compostos de camadas de argila orgânica intercaladas por bancos de areia fina.

O perfil do subsolo encontrado nesta região pode ser dividido em quatro compartimentos, sendo eles: solo coluvionar, eluvionar, de alteração de rocha e rocha alterada mole.

A seguir é apresentado um perfil Geológico-Geotécnico típico do reservatório da barragem.



Figura 1. Perfil Geológico-Geotécnico típico, reservatório da barragem

Os colúvios são compostos de areia fina, pouco siltosa, nesta região da obra. Os solos eluvionares são predominantemente compostos por argila arenosa, variando o teor de silte pelo trecho. O solo de alteração de rocha é composto de argila siltosa, apresentando leitos mais arenosos em alguns pontos. A camada de rocha alterada mole é composta de silte argiloso com leitos mais arenosos em alguns pontos.

### 1.3 Objetivo do Trabalho

Este trabalho possui por objetivo apresentar e discutir os resultados de ensaios de permeabilidade com fluxo vertical e ensaios triaxiais rápidos adensados saturados da região de Hortolândia, de forma a contribuir com o meio técnico na ampliação do conhecimento acerca do comportamento dos depósitos lá existentes, bem como fornecer parâmetros para fins de projeto preliminar.

## 2 METODOLOGIA E ESTAÇÕES DE ENSAIO

Os ensaios foram distribuídos priorizando a área onde será escavado material para a execução do reservatório da barragem, material este que será aproveitado para execução do barramento.

Foram realizados ensaios de compressão triaxial rápido adensado com verificação de pressão neutra ( $\overline{CU}$  sat) em amostras provenientes de três corpos de prova indeformados. Para cada corpo de prova foram realizados três ensaios totalizando nove séries. Os ensaios foram realizados de acordo com ASTM:D4767/2004 – “Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils” e os corpos de prova utilizados foram compactados de acordo com as características determinadas por meio das curvas de compactação característica obtidas considerando-se os teores de umidade apresentados e posteriormente saturados por contra-pressão. Os ensaios triaxiais foram conduzidos utilizando-se os seguintes valores de tensão de confinamento ( $\sigma_3$ ): 50, 100, 200 e 400kPa.

Também foram retiradas amostras destes três

corpos de prova para realização de ensaios de permeabilidade vertical (ABNT:NBR 14545/2000).

Foram realizados além dos ensaios, trados (ABNT:NBR 9603/1986), sondagens SPT (ABNT:NBR 6484/2001) e simples caracterização geotécnica - Limites de Atterberg (ABNT: NBR6459/1984 e ABNT:NBR 7180/1984), peso específico e umidade natural e de compactação (ABNT: NBR7182/1986).

## 3 PARÂMETROS GEOTÉCNICOS OBTIDOS

### 3.1 Ensaios laboratoriais

A seguir são apresentados parâmetros geotécnicos obtidos por meio dos ensaios laboratoriais conduzidos utilizando-se amostras deformadas provenientes das escavações das sondagens executadas na região do reservatório da barragem.

A Tabela 1 apresenta a distribuição das frações granulométricas das amostras estudadas.

Tabela 1. Frações granulométricas das amostras estudadas

Amostra	Prof. (m)	Argila (%)	Silte (%)	Areia (%)
01	0,40-5,00	29,5	26,9	43,6
02	2,15-5,00	30,8	26,5	42,7
03	1,00-6,00	29,9	27,0	43,1

A Tabela 2 apresenta a caracterização dos ensaios amostras através de seus índices de consistência (Limites de Atterberg), tipo de material constituinte e  $N_{SPT,médio}$  da amostra (em golpes/30cm).

Tabela 2. Índices de consistência, tipo de material e  $N_{SPT,médio}$  (golpes/30cm).

Amostra	LL (%)	IP (%)	LP (%)	Material	$N_{SPT,médio}$
01	36,3	18,3	18,0	Argila arenosa	2
02	17,6	13,5	4,1	Argila arenosa	4
03	16,9	15,6	1,3	Argila arenosa	4

A seguir é apresentada a carta de plasticidade de Casagrande, que fornece a classificação SUCS do solo a partir dos índices de

consistência do solo.

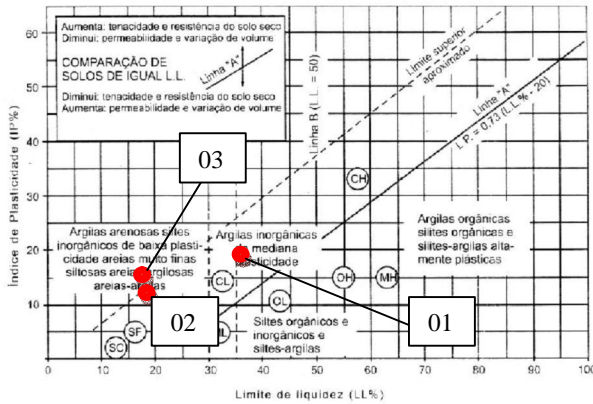


Figura 2. Carta de Plasticidade de Casagrande (classificação SUCS).

A classificação do material ensaiado por meio do Sistema de Classificação Unificado de Solos e o seu índice de atividade coloidal são apresentados a seguir.

Tabela 3. Classificação SUCS e Atividade Coloidal.

Amostra	Prof. (m)	SUCS	AC
01	0,4-5,0	CL	0,63
02	2,15-5,0	CL	0,39
03	1,0-6,0	CL	0,53

Conforme a Tabela 3 pode-se verificar que de acordo com a Classificação Unificada as amostras correspondem a um solo tipo CL, ou seja, uma argila inorgânica de baixa plasticidade e compressibilidade reduzida. Em relação à sua atividade coloidal, o material estudado apresentou índice médio de 0,52, o que denota uma argila inativa e de predominância de argilo-mineral tipo caolinita.

A partir das curvas de compactação para as três amostras foram obtidos os seguintes pesos específicos para umidades com desvios de  $\pm 2\%$  da umidade ótima:

Tabela 4. Peso específico para desvios de  $\pm 2\%$  da  $H_{ótima}$ .

Am.	$H_{ótima}$ (%)	$\gamma_d$ (+2% $H_{ótima}$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ ( $H_{ótima}$ ) (kN/m <sup>3</sup> )	$\gamma_d$ (-2% $H_{ótima}$ ) (kN/m <sup>3</sup> )
01	15,3	17,6	18,0	17,4
02	16,4	17,1	17,8	16,8
03	15,4	17,6	18,0	17,3

A seguir são apresentados os parâmetros de permeabilidade vertical médios obtidos.

Tabela 5. Permeabilidade vertical média a 20°C (cm/s)

Amostra	+2% $H_{ótima}$	$H_{ótima}$	-2% $H_{ótima}$
01	$3,51 \cdot 10^{-7}$	$5,86 \cdot 10^{-8}$	$5,44 \cdot 10^{-8}$
02	$3,44 \cdot 10^{-7}$	$5,72 \cdot 10^{-8}$	$4,29 \cdot 10^{-8}$
03	$3,51 \cdot 10^{-7}$	$5,82 \cdot 10^{-8}$	$5,34 \cdot 10^{-8}$

As envoltórias de resistência obtidas pelos ensaios são apresentadas a seguir.

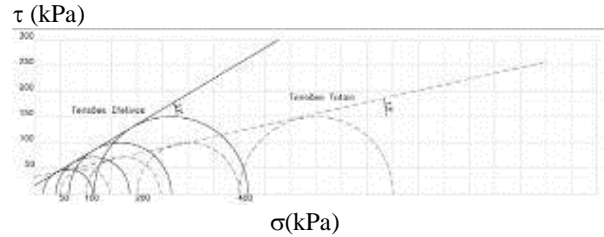


Figura 3. Envoltória de resistência – Amostra 01 (+2%  $H_{ótima}$ )

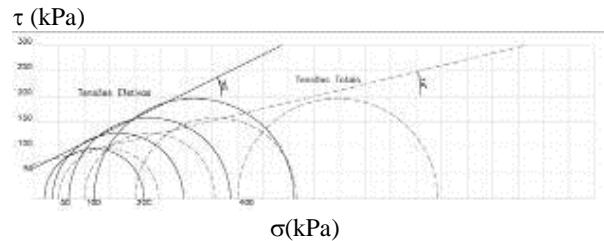


Figura 4. Envoltória de resistência – Amostra 01 ( $H_{ótima}$ )

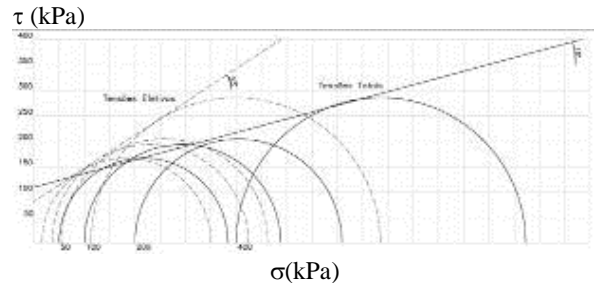


Figura 5. Envoltória de resistência – Amostra 01 (-2%  $H_{ótima}$ )

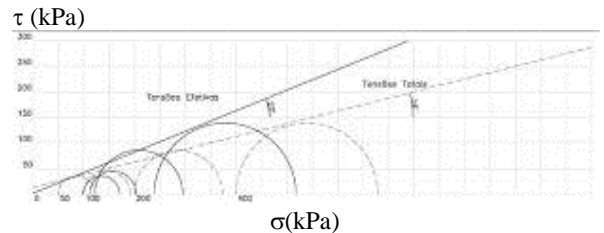


Figura 6. Envoltória de resistência – Amostra 02 (+2%  $H_{ótima}$ )

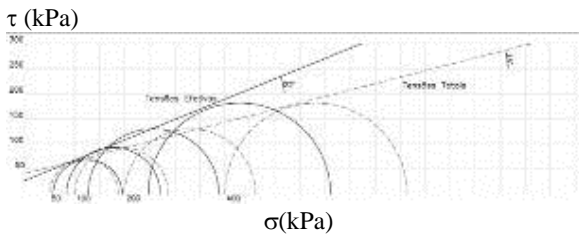


Figura 7. Envoltória de resistência – Amostra O2 ( $H_{ótima}$ )

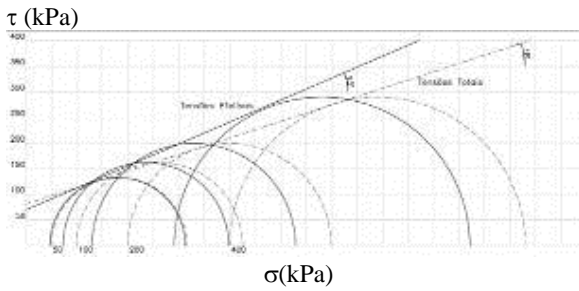


Figura 8. Envoltória de resistência – Amostra O2 (-2%  $H_{ótima}$ )

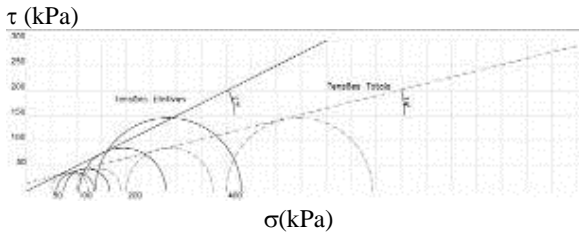


Figura 9. Envoltória de resistência – Amostra O3 (+2%  $H_{ótima}$ )

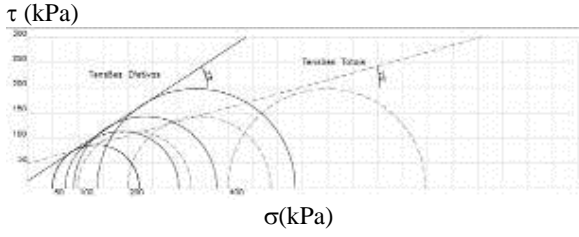


Figura 10. Envoltória de resistência – Amostra O3 ( $H_{ótima}$ )

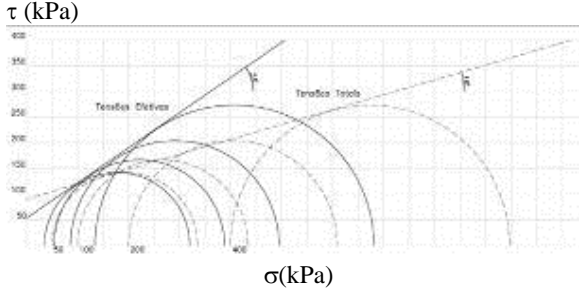


Figura 11. Envoltória de resistência – Amostra O3 (-2%  $H_{ótima}$ )

Os gráficos seguintes apresentam as envoltórias de resistência obtidas considerando-

se máximos valores de tensão normal e de cisalhamento para cada teor de umidade estudado, nas coordenadas p e q, dadas por:

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \quad (1) \quad \text{e} \quad q = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} \quad (2)$$

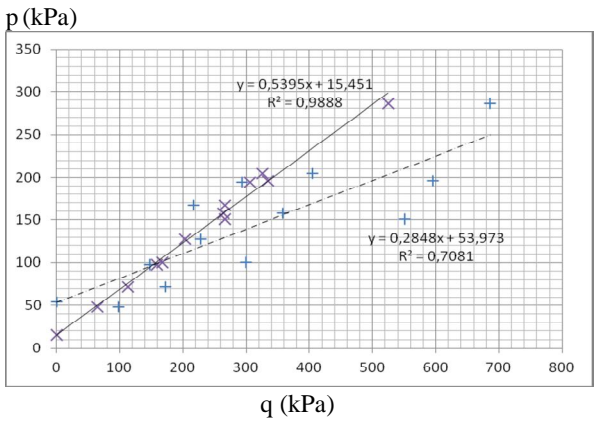


Figura 12. Envoltórias de tensão total e tensão efetiva (+2%  $U_{ótima}$ ) –  $\beta=28,36^\circ/d=15,41$  e  $\beta'=15,90^\circ/d'=53,97$

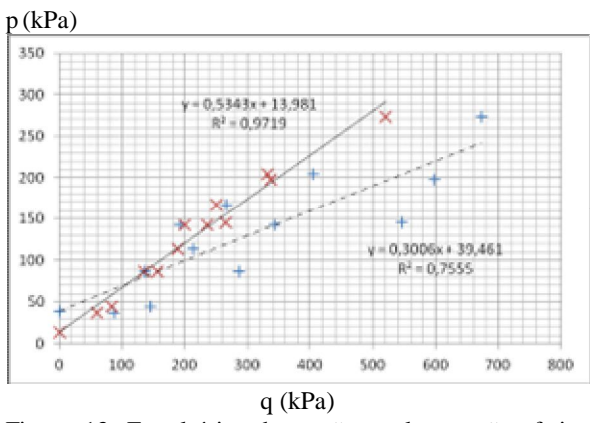


Figura 13. Envoltórias de tensão total e tensão efetiva ( $U_{ótima}$ ) –  $\beta=28,12^\circ/d=13,981$  e  $\beta'=16,72^\circ/d'=39,46$

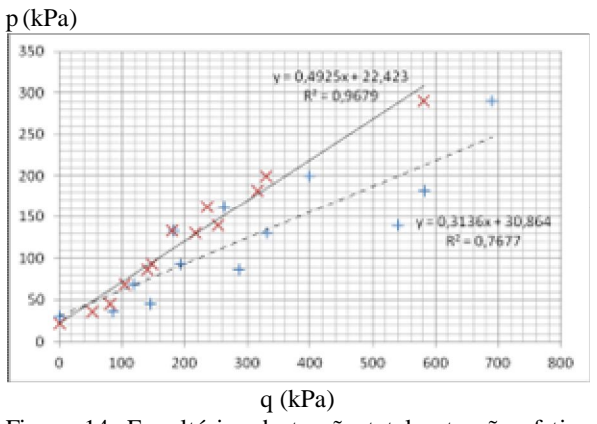


Figura 14. Envoltórias de tensão total e tensão efetiva (-2%  $U_{ótima}$ ) –  $\beta=26,22^\circ/d=22,42$  e  $\beta'=17,41^\circ/d'=30,86$

Após a determinação dos valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento por meio das envoltórias apresentadas nas Figuras 12 a 14, estes foram corrigidos por meio das seguintes equações:

$$\text{sen } \varphi = \text{tg } \beta \quad (3)$$

$$c = \frac{d}{\cos \varphi} \quad (4)$$

Onde:

$\beta$  = ângulo obtido pela envoltória;

$d$  = intercepto entre a envoltória e o eixo das ordenadas.

Nas Tabelas 6 e 7 são apresentados os parâmetros de resistência corrigidos obtidos por meio das envoltórias de resistência anteriormente apresentadas.

Tabela 6. Parâmetros de resistência ao cisalhamento totais médios obtidos pelos ensaios realizados.

Umidade	c (kPa)	$\phi$ (°)	R <sup>2</sup>
+2% H <sub>ótima</sub>	56,3	16,6	0,7081
H <sub>ótima</sub>	41,4	17,5	0,7555
-2% H <sub>ótima</sub>	32,5	18,3	0,7677

Tabela 7. Parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivos médios obtidos pelos ensaios realizados.

Umidade	c' (kPa)	$\phi'$ (°)	R <sup>2</sup>
+2% H <sub>ótima</sub>	18,4	32,7	0,9888
H <sub>ótima</sub>	16,5	32,3	0,9719
-2% H <sub>ótima</sub>	25,8	29,5	0,9679

A seguir na Tabela 8 é apresentado um resumo dos parâmetros obtidos por esta pesquisa por meio dos ensaios de campo e laboratório conduzidos nas estações de ensaios estudadas.

Tabela 8. Resumo dos parâmetros obtidos nesta pesquisa

Parâm.	Unid.	Valor Médio	Faixa de Variação	% de variação
$\gamma_{H,ótima}$	kN/m <sup>3</sup>	17,9	17,8 a 18,0	1,1
$\gamma_{d,+2\%H}$	kN/m <sup>3</sup>	17,3	16,8 a 17,6	4,6
LL	%	23,6	17,6 a 36,3	79,2
IP	%	15,8	13,5 a 18,3	30,4
LP	%	7,8	1,3 a 18,0	214,1
AC	-	0,52	0,39 a 0,63	46,2
H <sub>ótima</sub>	%	15,7	15,3 a 16,4	7,0
c	kPa	41,4	32,5 a 56,3	57,4
c'	kPa	20,2	16,5 a 25,8	46,0

$\phi$	°	17,5	16,6 a 18,3	9,7
$\phi'$	°	31,5	29,5 a 32,7	10,2
k <sub>v</sub>	cm/s	1,52.10 <sup>-7</sup>	3,51.10 <sup>-7</sup> a 4,29.10 <sup>-8</sup>	202,7

#### 4 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos de peso específico para a umidade ótima e também para desvios de  $\pm 2\%$  apresentam reduzida variação, tal como a própria umidade ótima de compactação, com índices de variação não superiores a 7,0%, o que representa boa confiabilidade dos resultados obtidos.

Os índices de consistência (Limites de Atterberg) e de atividade coloidal, por sua vez, apresentaram grande variação, entre 30,4 e 214,1%, principalmente os Limites de Liquidez e de Plasticidade. Estes parâmetros, entretanto, não têm influência direta na determinação dos principais parâmetros de interesse deste estudo, a permeabilidade vertical e os parâmetros de resistência ao cisalhamento destes solos.

Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>) dos resultados obtidos pelos ensaios demonstram que os parâmetros de resistência ao cisalhamento efetivos apresentam menor variância (R<sup>2</sup> mais próximo à unidade), apresentando desta forma maior confiabilidade do que os parâmetros de resistência ao cisalhamento totais (com R<sup>2</sup> próximos a 0,75).

Quanto aos valores obtidos, estes encontram-se dentro do esperado, com os parâmetros de resistência totais apresentando maior valor de coesão e menor ângulo de atrito interno, ocorrendo o inverso para os parâmetros de resistência efetivos (maior ângulo de atrito e menor coesão).

Pôde-se notar também a influência do teor de umidade da amostra na variação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento totais. Conforme apresentado na Tabela 6, reduzindo-se o teor de umidade temos uma redução na coesão e um incremento no ângulo de atrito interno. Com relação aos parâmetros efetivos nota-se que com a redução da umidade há também a redução do ângulo de atrito (ver Tabela 7), entretanto para a coesão não foi possível estabelecer uma tendência.

Os valores obtidos para a permeabilidade

vertical das amostras apresentou um comportamento dentro do esperado, ou seja, a Amostra com maior percentual de finos (Amostra 02) também apresentou menor permeabilidade, enquanto que a Amostra com menor parcela de finos (Amostra 01) apresentou maior permeabilidade.

Também foi possível verificar a influência da variação do teor de umidade das amostras nos valores de permeabilidade vertical obtidos. Conforme apresentado na Tabela 5, notou-se que quanto menor o teor de umidade da amostra, menor a permeabilidade vertical obtida no ensaio.

Deve-se salientar que os parâmetros apresentados são meramente orientativos, devendo estes ser confirmados por meio de realização de campanha de investigação geotécnica nos trechos de interesse.

Entretanto, caso haja em primeira análise, a adoção de quaisquer dos parâmetros relacionados na Tabela 8, deverá ser efetuada uma análise considerando-se a variação observada entre os valores máximos e mínimos obtidos, a fim de se escolher os fatores de segurança mais adequados a serem utilizados, bem como a magnitude dos parâmetros adotados.

## 5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a Moretti Engenharia Consultiva/SP pela colaboração nesta pesquisa.

## 6 REFERÊNCIAS

- ASTM International. *D4767/2004 – “Standard Test Method for Consolidated Undrained Triaxial Compression Test for Cohesive Soils”*, West Conshohocken, PA, 2003.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-6459/1984. Solo - Determinação do Limite de Liquidez*. Rio de Janeiro, 1984. 6p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-7180/1984. Solo - Determinação do Limite de Plasticidade*. Rio de Janeiro, 1984. 3p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-7181/1984. Solo – Análise Granulométrica*. Rio de Janeiro, 1984. 8p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-6484/2001. Solo - Sondagem de Simples Reconhecimento com SPT-Método de Ensaio*. Rio de Janeiro, 2001. 17p.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR-9603/1986. Sondagem a trado - Procedimento*. Rio de Janeiro, 1986.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 14545/2000. “Solo – determinação do coeficiente de permeabilidade de solos argilosos a carga variável”*. Rio de Janeiro, 2000.

Pinto, C.S., (2006). *Curso básico de mecânica dos solos*. 3ª Edição. Oficina de Textos, São Paulo, 295p.