



**Alena Vitková Calheiros**

**Análise do Comportamento de Solos Reforçados  
com Poliestireno Expandido**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil da PUC-Rio.

Orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro  
Novembro de 2013



**Alena Vitková Calheiros**

**Análise do Comportamento de Solos Reforçados  
com Poliestireno Expandido**

Dissertação apresentada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Departamento de Engenharia Civil do Centro Técnico Científico da PUC-Rio. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Profa. Michéle Dal Toé Casagrande**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Euripedes do Amaral Vargas Jr**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Profa. Raquel Quadros Veloso**

Universidade Federal de Ouro Preto

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 28 de Novembro de 2013

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e da orientadora.

### **Alena Vitková Calheiros**

Graduou-se em Engenharia Ambiental pela Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2010. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2011, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a solos reforçados.

#### Ficha Catalográfica

Calheiros, Alena Vitková

Análise do comportamento de solos reforçados com poliestireno expandido / Alena Vitková Calheiros ; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2013.

104 f. il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2013.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Solos

CDD: 624

*Aos meus pais, Luiz Augusto e  
Alena e ao meu irmão, Alex pelos  
momentos em que estive ausente.*

*Dedico à eles essa e todas as  
vitórias que eu venha obter, pois  
eles são o maior presente que  
Deus colocou em minha vida.*

## Agradecimentos

A Deus pela vida, pela oportunidade e por ter conseguido chegar até aqui com sucesso, vencendo todas as dificuldades.

Aos meus pais, Luiz Augusto e Alena, e irmão, Alex, por todo apoio, dedicação, amor e incentivo durante todos os passos da minha vida. Devo tudo isso a vocês.

A todos os meus familiares e amigos por todos os incentivos prestados durante toda a minha vida e pelo apoio na realização deste curso.

A professora Michéle Dal Tóe Casagrande pela orientação do meu trabalho, por todo o conhecimento transmitido e por apoiar integralmente na realização deste trabalho, sempre disposta a ensinar e tirar dúvidas.

A todos meus amigos da PUC-Rio, aos amigos da sala 607B, aos amigos que fiz ao longo do mestrado e em especial a Camyla Oliveira e Daniel Gomes da Costa, por fazerem do meu Mestrado um momento especial.

Aos professores da Engenharia Civil da PUC-Rio, pelas excelentes aulas ministradas.

Ao pessoal de Iniciação Científica pela ajuda e realização de parte dos ensaios de caracterização desta dissertação.

À Monica Moncada, pela ajuda e auxílio fornecido no laboratório de Geotecnia da PUC-Rio. Aos técnicos do laboratório Amaury e Josué pelo apoio para realizar os ensaios.

À CAPES e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais este trabalho não poderia ter sido realizado.

## Resumo

Calheiros, Alena Vitková; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Análise do comportamento de Solos Reforçados com Poliestireno Expandido.** Rio de Janeiro, 2013. 103 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo apresenta o comportamento de solos reforçados com adição de pérolas de EPS (Poliestireno Expandido) através de estudo experimental. Os solos utilizados foram: um solo argiloso de origem coluvionar, uma areia limpa, mal graduada e bentonita. Foram realizados ensaios de caracterização física e de caracterização mecânica, como ensaios de compactação Proctor Normal, ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID) e ensaios de cisalhamento direto para buscar estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição de pérolas de EPS, relacionando-a com os parâmetros de resistência ao cisalhamento. Os ensaios triaxiais CID foram realizados em amostras de solo argiloso compactadas na densidade máxima seca e umidade ótima, com teores de pérolas de EPS de 0%, 0,25%, 0,50%, 0,75% e 1%, em relação ao peso seco do solo e os ensaios triaxiais CID em amostras de areia foram realizados para uma densidade relativa de 50% e umidade de 10%, com teores de pérolas de EPS de 0%, 0,50% e 0,75%, em relação ao peso seco do solo. Os ensaios de cisalhamento direto com bentonita foram realizados com teores de pérolas de EPS de 0%, 0,50% e 0,75%, em relação ao peso seco do solo. Os resultados mostraram que o tipo de solo, o teor de pérolas de EPS e o nível de tensão confinante influenciam positivamente o comportamento mecânico final dos compósitos com relação aos parâmetros de resistência, porém não há uma tendência de comportamento bem definida ao analisar cada fator independentemente. Portanto, o uso de pérolas de EPS em obras geotécnicas de carregamento estático contribuiria com o menor consumo de material natural e a consequente redução dos custos de transporte e volume de material mobilizado.

## Palavras-chave

Solos reforçados; poliestireno expandido; ensaio triaxial; ensaio de cisalhamento direto.

## Abstract

Calheiros, Alena Vitková; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Analysis of the Behavior of Reinforced Soil with Expanded Polystyrene**. Rio de Janeiro, 2013. 103 p. MSc. Dissertation. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study presents the behavior of soils reinforced with EPS (Expanded Polystyrene) beads through experimental study. The soils used were a coluvionar soil, a clean and barely graduated sand and bentonite. Physical characterization, Standard Proctor, consolidated drained triaxial and direct shear tests were performed to establish patterns of behavior that may explain the influence of the addition of expanded polystyrene beads, linking it with shear strength parameters. The CID triaxial was performed on samples of clayey soil compacted within the maximum dry density and optimum moisture content with expanded polystyrene beads ratios of 0%, 0.25%, 0.50%, 0.75% and 1% by dry weight of soil. CID triaxial tests on sand samples were made to a relative density of 50% and 10% of moisture content, with EPS beads ratios of 0%, 0.50% and 0.75% by dry weight of soil. The direct shear tests with bentonite were made with EPS beads ratios of 0%, 0.50% and 0.75% by dry weight of soil. The results showed that the kind of soil, the EPS content and level of confining stress level influence positively on the final mechanical behavior of the composites with respect to strength parameters, but there is no well-defined pattern of behavior to examine each factor independently. Therefore, the use of EPS beads in geotechnical works, contribute to lower consumption of natural material and the consequent reduction in transport costs and volume of mobilized material.

## Keywords

Reinforced soils; expanded polystyrene; triaxial tests; direct shear tests.

## Sumário

1	Introdução	17
1.1.	Relevância e Justificativa da Pesquisa	17
1.2.	Objetivos	18
1.3.	Organização do Trabalho	18
2	Revisão Bibliográfica	20
2.1.	Poliestireno Expandido (EPS)	20
2.1.1.	Aspectos Gerais do EPS	20
2.1.2.	Características de Mercado do EPS	22
2.1.3.	EPS e seu Impacto ao Meio Ambiente	25
2.2.	Solo Reforçado	26
2.3	Ensaio Experimentais com Uso de EPS	29
3	Programa Experimental	33
3.1.	Materiais utilizados na pesquisa	33
3.1.1.	Solo Argiloso	33
3.1.2.	Solo Arenoso	37
3.1.3.	Bentonita	38
3.1.4.	Poliestireno Expandido (EPS)	39
3.1.5.	Água	40
3.1.6.	Mistura Solo-EPS	40
3.2.	Métodos e Procedimentos de Ensaio	41
3.2.1.	Ensaio de Caracterização Física	42
3.2.2.	Ensaio de Caracterização Mecânica	46
4	Resultados e Análises	58
4.1.	Ensaio de Caracterização Física	58
4.1.1.	Solo Argiloso	58
4.1.2.	Solo Arenoso	59
4.1.3.	Bentonita	61

4.2. Ensaio de Caracterização Mecânica	62
4.2.1. Solo Argiloso	62
4.2.2. Solo Arenoso	79
4.2.3. Bentonita	88
5 Considerações Finais	98
5.1. Conclusões	98
5.2. Sugestões para pesquisas futuras	100
6 Referências Bibliográficas	101

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Produção Mundial de EPS em 2000: 2,95 milhões de toneladas. ....	23
Figura 2.2 - Distribuição do EPS por segmento no mundo em 2000. ....	23
Figura 2.3 - Transformação de EPS no Brasil em 2000, principais municípios....	24
Figura 2.4 - Curvas de compactação das misturas de areia com diferentes teores de PS na densidade de EPS de 0,16 kN/m <sup>3</sup> .z.....	30
Figura 2.5 - Curva de expansão livre do solo com Índice de Plasticidade de 38% e com diferentes teores de EPS. ....	31
Figura 2.6 - Efeito da adição de pérolas de EPS na contração volumétrica. ....	31
Figura 2.7 - Efeito da adição de pérolas de EPS na contração volumétrica. ....	32
Figura 3.1 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares, 2005). ....	34
Figura 3.2 - Solo coluvionar utilizado. ....	35
Figura 3.3 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Daylac, 1994) .....	36
Figura 3.4 - Localização do ponto de coleta de areia na Barra da Tijuca – RJ. ....	38
Figura 3.5 - Areia utilizada na pesquisa. ....	38
Figura 3.6 - Bentonita utilizada na pesquisa. ....	39
Figura 3.7 - Pérola de EPS utilizada na pesquisa. ....	39
Figura 3.8 - (a) Procedimento de dispersão em aparelho de ultra-som e (b) Bomba a vácuo.....	44
Figura 3.9 - Prensa triaxial da marca Wykeham-Ferrance .....	49
Figura 3.10 - Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College.....	49
Figura 3.11 - (a) Software CatmanEasy; (b) Sistema de aquisição de dados (Ramirez, 2012). ....	49
Figura 3.12 - Corpo cilíndrico compactado.....	50
Figura 3.13 - Corpo de prova após moldagem. ....	50
Figura 3.14 - Corpo de prova com pérolas de 3mm de diâmetro. ....	51
Figura 3.15 - Montagem do corpo de prova arenoso.....	52
Figura 3.16 - Corpo de prova Bentonita-EPS.....	56
Figura 3.17 - Prensa de cisalhamento direto. ....	57
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo argiloso (Ramírez, 2012).....	59

Figura 4.2 - Curva granulométrica do solo arenoso. ....	60
Figura 4.3 - Distribuição granulométrica da bentonita.....	61
Figura 4.4 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo argiloso e misturas. .....	62
Figura 4.5 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o solo argiloso em ensaios triaxiais.....	64
Figura 4.6 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99,75/EPS0,25 em ensaios triaxiais. ....	65
Figura 4.7 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais. ....	66
Figura 4.8 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais. ....	67
Figura 4.9 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura S99/EPS1 em ensaios triaxiais. ....	68
Figura 4.10 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99,75/EPS0,25 em ensaios triaxiais.....	69
Figura 4.11 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais.....	71
Figura 4.12 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais.....	73
Figura 4.13 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras S100 e S99/EPS1 em ensaios triaxiais. ....	74
Figura 4.14 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso S100. ....	76
Figura 4.15 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99,75/EPS0,25.....	76
Figura 4.16 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99,50/EPS0,50.....	77
Figura 4.17 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99,25/EPS0,75.....	77
Figura 4.18 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S99/EPS1.....	78
Figura 4.19 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo puro e das misturas.....	78

Figura 4.20 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para o solo arenoso em ensaios triaxiais. ....	80
Figura 4.21 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura A99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais. ....	81
Figura 4.22 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial para a mistura A99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais. ....	82
Figura 4.23 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A100 e A99,50/EPS0,50 em ensaios triaxiais. ....	83
Figura 4.24 - Curvas da tensão desviadora e deformação volumétrica versus deformação axial das amostras A100 e A99,25/EPS0,75 em ensaios triaxiais. ....	84
Figura 4.25 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento .....	85
Figura 4.26 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento .....	86
Figura 4.27 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento .....	86
Figura 4.28 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo puro e das misturas.....	87
Figura 4.29 - Curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deformação axial para a bentonita em ensaio de cisalhamento direto.....	89
Figura 4.30 - Curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deformação axial para a mistura B99,50/EPS0,50 em ensaio de cisalhamento direto.....	90
Figura 4.31 - Curvas da tensão desviadora e deslocamento vertical versus deformação axial para a mistura B99,25/EPS0,75 em ensaio de cisalhamento direto.....	91
Figura 4.32 - Curvas da tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal das amostras B100 e B99,50/EPS0,50 em ensaios de cisalhamento direto.....	92
Figura 4.33 - Curvas da tensão cisalhante e deslocamento vertical versus deslocamento horizontal das amostras B100 e B99,25/EPS0,75 em ensaios de cisalhamento direto.....	93
Figura 4.34 - Envoltória de resistência da bentonita. ....	95
Figura 4.35 - Envoltória de resistência da mistura B99,50/EPS0,50. ....	95
Figura 4.36 - Envoltória de resistência da mistura B99,25/EPS0,75. ....	96

## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Características exigíveis para o EPS na NBR 11752:1993. ....	22
Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986). ....	37
Tabela 3.2 - Símbolos utilizados para os solos e misturas. ....	41
Tabela 4.1 - Índices físicos do solo arenoso. ....	59
Tabela 4.2 - Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo argiloso e misturas. ....	63
Tabela 4.3 - Resumo do ângulo de atrito e coesão do solo argiloso e de cada mistura solo-EPS. ....	79
Tabela 4.4 - Resumo ângulo de atrito e coesão do solo arenoso e de cada mistura solo-EPS. ....	87
Tabela 4.5 - Resumo ângulo de atrito e coesão da bentonita e de cada mistura solo-EPS. ....	97

## Lista de Abreviaturas

ABRAPEX	Associação Brasileira de Poliestireno Expandido
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CID	Consolidado Isotropicamente Drenado
CFC	Clorofluorcarboneto
CH	Argila arenosa de média plasticidade
EPS	Poliestireno Expandido
IP	Índice de Plasticidade
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MVV	Medidores de Variação Volumétrica
NBR	Norma Brasileira
PET	Polietileno Tereftalato
PUC	Pontifícia Universidade Católica
XPS	Poliestireno Extrusado

## Lista de Símbolos

$\omega_{\text{ótimo}}$	Teor de umidade ótimo de compactação
$\gamma_d \text{ máx}$	Peso específico seco máximo
$\gamma_d$	Peso específico seco
$\gamma_s$	Peso específico dos grãos
$\omega$	Teor de umidade
$\rho$	Massa específica do solo
$G_s$	Peso específico
$e$	Índice de vazios
$e_{\text{máximo}}$	Índice de vazios máximo
$e_{\text{mínimo}}$	Índice de vazios mínimo
$C_u$	Coefficiente de uniformidade
$C_c$	Coefficiente de curvatura
$D_{10}$	Diâmetro efetivo
$D_{50}$	Diâmetro médio
$t_f$	Tempo mínimo de ruptura
$L$	Altura do corpo de prova
$v$	Velocidade de cisalhamento
‘	Relativo a tensões efetivas
”	Polegadas
#	Número
$\epsilon_s$	Deformação axial
$\epsilon_v$	Deformação volumétrica
$\tau$	Tensão de cisalhamento
$\sigma_1, \sigma_3$	Tensões principais, maior e menor
$\sigma'_c$	Tensão de confinamento efetiva
$\sigma_v$	Tensão desviadora
$S_u$	Resistência não Drenada
$\phi'$	Ângulo de atrito
$c'$	Coesão

$p'$	$(\sigma'_1 + \sigma'_3)/2$ (Tensão efetiva média normal)
$q$	$(\sigma'_1 - \sigma'_3) / 2$ (Tensão de Desvio)
$H$	Altura final do corpo de prova.
$h_i$	Altura inicial do corpo de prova.
%	Porcentagem
ml	Mililitro
mm	Milímetro
cm	Centímetros
m	Metro
t	Tonelada
t/ano	Tonelada por ano
mm/min	Milímetro por minuto
min	Minuto
g	Gramas
$g/cm^3$	Gramas por centímetro cúbico
kg	Quilograma
$kg/m^3$	Quilograma por metro cúbico
$kgf/m^2$	Quilograma força por metro quadrado
kN	Quilo Newton
kPa	Quilo Pascal
°C	Graus centígrados