



**Gary Gary Durán Ramírez**

**Estudo Experimental de Solos Reforçados com  
Borracha Moída de Pneus Inservíveis**

**Dissertação de Mestrado**

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

Orientadora: Profa. Michéle Dal Toé Casagrande

Rio de Janeiro  
Julho de 2012



**Gary Gary Durán Ramírez**

## **Estudo Experimental de Solos Reforçados com Borracha Moída de Pneus Inservíveis**

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

**Profa. Michéle Dal Toé Casagrande**

Orientadora

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Celso Romanel**

Departamento de Engenharia Civil - PUC-Rio

**Prof. Ben-Hur de Albuquerque e Silva**

IME-RJ

**Prof. José Eugenio Leal**

Coordenador Setorial do Centro

Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 21 de Julho de 2012

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

### **Gary Gary Durán Ramírez**

Graduou-se em Engenharia Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Peru (Lima-Peru) em 2008. Trabalhou em projetos e obras geotécnicas no Peru no período 2008–2010. Ingressou no mestrado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro em 2010, desenvolvendo Dissertação na linha de pesquisa de Geotecnia Experimental aplicada a solos reforçados.

#### Ficha Catalográfica

Durán Ramírez, Gary Gary

Estudo experimental de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis / Gary Gary Durán Ramírez; orientadora: Michéle Dal Toé Casagrande. – 2012.

146 f. : il. (color.) ; 30 cm

Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Civil, 2012.

Inclui bibliografia

1. Engenharia civil – Teses. 2. Ensaio triaxiais. 3. Borracha de Pneu. 4. Resíduos. 5. Solo Reforçado. I. Casagrande, Michéle Dal Toé. II. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Civil. III. Título.

CDD: 624

Dedico esta Dissertação aos meus pais  
Alberto Augusto e Norma Haydee,  
e aos meus irmãos Yerson e Carmen Rosa,  
pelo amor, compreensão e incentivo.

## Agradecimentos

A Deus, por tudo.

Aos meus pais, Alberto e Norma, que dedicam suas vidas a mim e meus irmãos, nos brindando seu amor e dedicação. A meus irmãos Yerson e Carmen, por seu apoio e carinho.

A meus tios e tias Rubén, Norma, Ela, Juan, Lili, Raúl, Miguel Ángel, Carlos, Norberta que sempre me aconselharam e apoiaram.

A meus primos e primas Verónica, Conrad, Pilar, Percy, Gina, Carolina, Roberto, Cecilia, Ángel, Carlitos, Luchito, Mónica, Evelyn, Julissa, Juan, Miguel que compartilharam tantos momentos inesquecíveis comigo.

A meus amigos de toda a vida Oscar, Ronald e Jonathan por seus contínuos mensagens de apoio e amizade durante estes dois anos que estive longe de casa.

A todos meus amigos da sala 614 e da Pós, pelos momentos de conversa e amizade.

A professora Michéle Dal Tóe Casagrande pela orientação do meu trabalho, por todo o conhecimento transmitido, sobretudo a toda dedicação e paciência em me atender. E principalmente por sua amizade neste último ano do mestrado.

Aos professores da Engenharia Civil da PUC-Rio pelas aulas ditadas e os conhecimentos transmitidos durante estes dois anos de mestrado.

À empresa Ecobalbo Reciclagem de Pneus S.A. e ao Prof Ben-Hur de Albuquerque por terem nos cedido a borracha moída de pneu para o desenvolvimento deste estudo.

A Perlita Esaine por sua amizade incondicional e as muitas vezes que me ajudou e aconselhou. A Lidia Pacheco por sua alegria e amizade.

A Monica Moncada pela ajuda, auxílio e disposição fornecida no laboratório de geotecnia. 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

Ramírez, Gary Gary Durán; Casagrande, Michéle Dal Toé. **Estudo Experimental de Solos Reforçados com Borracha Moída de Pneus Inservíveis**. Rio de Janeiro, 2012. 146 p. Dissertação de Mestrado. Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Este estudo apresenta o comportamento de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis, através de estudo experimental. Os solos utilizados foram: um solo maduro argiloso de origem coluvionar e uma areia fina, limpa e mal graduada. Foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica, compactação Proctor Normal e ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID) para buscar estabelecer padrões de comportamento que possam explicar a influência da adição de borracha moída de pneu, 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 borracha moída de 0%, 5%, 10%, 20%, 30% e 40%, em relação ao peso seco do solo. Os ensaios triaxiais CID em amostras de areia foram realizadas para uma densidade relativa de 50% e umidade de 10%, com teores de borracha moída de 0%, 5% e 10%, em relação ao peso seco do solo. Os resultados mostraram que o teor de borracha e o nível de tensão confinante influenciam o comportamento mecânico final dos compósitos, sendo que não há uma tendência de comportamento bem definida ao analisar cada fator independentemente. Assim, para os compósitos de solo argiloso a inserção de borracha é mais efetiva para tensões de confinamento até 200 kPa, sendo que para tensões maiores a presença de borracha é prejudicial. O teor de borracha ótimo situa-se entre 10% e 20%. Para os compósitos de solo arenoso a inserção de borracha é mais efetiva para tensões de confinamento entre 100 e 200 kPa e o teor de borracha ótimo está entre 0% e 5%. Todos os compósitos possuem características de resistência que poderiam cumprir as exigências de determinadas obras geotécnicas, como por exemplo, em camadas de aterros sanitários, taludes e aterros sobre solos moles.

## Palavras-chave

Ensaio triaxial; borracha de pneu; resíduos; solo reforçado.

## Abstract

Ramírez, Gary Gary Durán; Casagrande, Michéle Dal Toé (Advisor). **Experimental Study of Reinforced Soils with Ground Rubber of Scrap Tires**. Rio de Janeiro, 2012. 146 p. MSc. Dissertation – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

This study presents the behavior of soils reinforced with ground rubber from waste tires through experimental study. Two types of soils were used: a colluvionar and lateritic soil and a fine, clean and barely graduated sand. Physical characterization, Standard Proctor and consolidated drained triaxial tests were performed to establish patterns of behavior that may explain the influence of the addition of tire ground rubber, linking it with shear strength parameters. The CD triaxial was performed on samples of clayey soil compacted within the maximum dry density and optimum moisture content with ground rubber ratios of 0%, 5%, 10%, 20%, 30% and 40% by dry weight of soil. CD triaxial tests on sand samples were made to a relative density of 50% and 10% of moisture content, with ground rubber ratios of 0%, 5% and 10% by dry weight of soil. The results showed the rubber content and level of confining pressure influence on the final mechanical behavior of the composite. There is not a define behavior when the composites are analyzed individually. Thus, for the clay composites the ground rubber is more effective for confinement stresses up to 200 kPa, for higher confinement stresses the presence of rubber is detrimental. The optimum rubber content is between 10% and 20%. For sand composites rubber inclusions are more effective confinement stresses between 100 and 200 kPa and the optimum rubber content is between 0% and 5%. All composites have strength characteristics that could accomplish the requirements of certain geotechnical projects like landfills, slopes and embankments on soft soil. Therefore, the use of ground rubber, in these works, contributes with the reduction of consumption of natural resources and consequently reduce the costs of transportation and earthmoving.

## Keywords

Triaxial tests; tire rubber; waste; reinforced soil.



# Sumário

1 Introdução	20
1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa	20
1.2. Objetivos	21
1.3. Organização do Trabalho	22
2 Revisão Bibliográfica	23
2.1. Pneumáticos	23
2.1.1. Composição e Estrutura dos Pneumáticos. Materiais recicláveis.	23
2.1.2. Vida útil e Ciclo de vida dos Pneus	26
2.1.3. Impacto ao Meio Ambiente e Legislação Vigente no Brasil	28
2.1.4. Tecnologias e Tratamentos de Reciclagem	34
2.1.4.1. Tratamentos do nível 1: Destruição da estrutura do pneu	35
2.1.4.2. Tratamentos do nível 2: Liberação e separação dos elementos do pneu	35
2.1.4.3. Tratamentos do Nível 3: Tecnologias multi-tratamentos	36
2.1.4.4. Tratamentos do nível 4: Materiais melhorados	37
2.2. Solos Reforçados - Histórico	38
2.3. Solos reforçados com borracha	39
2.3.1. Solo arenoso reforçado com borracha	39
2.3.2. Solo argiloso reforçado com borracha	42
3 Programa Experimental	44
3.1. Materiais Utilizados	44
3.1.1. Solo Arenoso	44
3.1.2. Solo Argiloso	45
3.1.3. Borracha Moída de pneus	49
3.1.4. Água	50
3.1.5. Mistura Solo-Borracha	50
3.2. Métodos e Procedimentos de Ensaio	51

3.2.1. Ensaaios de Caracterização Física	51
3.2.1.1. Densidade Real dos Grãos	52
3.2.1.2. Limites de Atterberg	52
3.2.1.3. Análise Granulométrica	52
3.2.2. Ensaaios de Caracterização Mecânica	53
3.2.2.1. Ensaaios de Compactação Proctor Standard	53
3.2.2.2. Ensaaios Triaxiais CID	54
4 Resultados e Análises	69
4.1. Ensaaios de Caracterização Física	69
4.1.1. Solo Argiloso	69
4.1.1.1. Densidade Relativa dos Grãos (Gs)	69
4.1.1.2. Análise Granulométrica	69
4.1.1.3. Limites de Atterberg	71
4.1.2. Solo Arenoso	71
4.1.2.1. Índices Físicos	71
4.1.2.2. Análise Granulométrica	72
4.1.3. Borracha	73
4.1.3.1. Densidade Relativa dos Grãos (Gs)	73
4.1.3.2. Análise Granulométrica	73
4.2. Ensaaios de Caracterização Mecânica	75
4.2.1. Solo Argiloso	75
4.2.1.1. Ensaaios de Compactação Proctor Normal	75
4.2.1.2. Ensaaios Triaxiais CID	77
4.2.2. Solo Arenoso	115
4.2.2.1. Ensaaios Triaxiais CID	115
5 Considerações Finais	139
6 Referencias Bibliográfica	143

## Lista de Figuras

Figura 2.1 - Estrutura do Pneu (Brazil Tires Maxxis, 2012) .....	23
Figura 2.2 - Ciclo de vida do pneu. (Fonte: Van Beukering & Jannen (2001 <i>apud</i> Szeliga, 2011)). .....	28
Figura 2.3 - Mercado para os pneus novos, no período de 2002 a 2010. Fonte: adaptado de Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (2011 <i>apud</i> Lagarinhos, 2011)). .....	30
Figura 2.4 - Quantidade destinada no Brasil pelos fabricantes de pneus no período 2000 a 2010, e aprevisão para a reciclagem em 2011 e 2012. Fonte: adaptado de Faccio (2010 <i>apud</i> Lagarinhos, 2011)). .....	32
Figura 2.5 - Produção mundial de pneus em 2008, por país (milhões). Fonte: Japan Automotive Tyre Manufactures Association (2010 <i>apud</i> Lagarinhos, 2011)). .....	33
Figura 3.1 - Areia utilizada.....	44
Figura 3.2 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares 2005). .....	45
Figura 3.3 – Argila utilizada - solo residual maduro.....	46
Figura 3.4 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Dylac, 1994) .....	47
Figura 3.5 - Borracha moída utilizada .....	49
Figura 3.6 - Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College .....	56
Figura 3.7 – (a) Software CatmanEasy; (b) Sistema de aquisição de dados.....	56
Figura 3.8 - Corpo cilíndrico compactado.....	57
Figura 3.9 - Corpo de prova após moldagem .....	58
Figura 3.10 - Molde tripartido .....	59
Figura 3.11 - Membrana e o-rings na base .....	59
Figura 3.12 - Tripartido e membrana no interior .....	60

Figura 3.13 - Tripartido fixo .....	60
Figura 3.14 - Molde vedado e membrana acomodada .....	61
Figura 3.15 - Bomba instalada .....	61
Figura 3.16 - Membrana colada na parede interior do molde .....	62
Figura 3.17 - Areia colocada dentro do molde.....	62
Figura 3.18 - Areia dentro do molde .....	63
Figura 3.19 - Compactação da areia .....	63
Figura 3.20 – Molde preenchido com a areia .....	64
Figura 3.21 - Cap instalado .....	64
Figura 3.22 - Corpo de prova montado.....	65
Figura 3.23 - Corpo de prova dentro da câmara triaxial .....	65
Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo argiloso.....	70
Figura 4.2 - Curva granulométrica do solo arenoso (Casagrande, 2005).72	
Figura 4.3 - Curva granulométrica da borracha moída .....	74
Figura 4.4 - Curvas granulométricas comparadas dos materiais usados na presente pesquisa. ....	74
Figura 4.5 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo argiloso e misturas.....	75
Figura 4.6 - Curva de compactação Proctor Normal (Beneveli, 2002) .....	76
Figura 4.7 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para o solo argiloso (S100) em triaxiais de compressão axial. ....	78
Figura 4.8 - Amostras rompidas do solo argiloso (S100). Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa. ....	79
Figura 4.9 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S95/B5 em triaxiais em compressão axial.....	80
Figura 4.10 - Amostras rompidas da mistura S95/B5. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa. ....	81
Figura 4.11 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S90/B10 em triaxiais em compressão axial.....	82
Figura 4.12 - Amostras rompidas da mistura S90/B10. Tensão confinante de: (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 400 kPa.....	83

Figura 4.13 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S80/B20 em triaxiais em compressão axial.....	84
Figura 4.14 - Amostras rompidas da mistura S80/B20. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa. ....	85
Figura 4.15 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S70/B30 em triaxiais em compressão axial.....	86
Figura 4.16 - Amostras rompidas da mistura S70/B30. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa. ....	87
Figura 4.17 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S60/B40 em triaxiais em compressão axial.....	88
Figura 4.18 - Amostras rompidas da mistura S60/B40 para a tensão confinante de 200 kPa.....	89
Figura 4.19 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 50 kPa de tensão confinante efetiva.....	91
Figura 4.20 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 100 kPa de tensão confinante efetiva.....	94
Figura 4.21 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 200 kPa de tensão confinante efetiva.....	96
Figura 4.22 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 400 kPa de tensão confinante efetiva.....	98
Figura 4.23 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S95/B5 em ensaios triaxiais de compressão axial. ....	100
Figura 4.24 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S90/B10 em ensaios triaxiais de compressão axial. ....	101
Figura 4.25 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x	

deformação axial das amostras S100 e S80/B20 em ensaios triaxiais de compressão axial. ....	102
Figura 4.26 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S70/B30 em ensaios triaxiais de compressão axial. ....	103
Figura 4.27 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S60/B40 em ensaios triaxiais de compressão axial. ....	104
Figura 4.28 - Relação de Resistência de Pico x Tensão Confinante Efetiva. Misturas solo argiloso - borracha.....	106
Figura 4.29 - Relação de Resistência Pós-Pico x Tensão Confinante Efetiva. Misturas solo argiloso - borracha.....	107
Figura 4.30 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso S100.....	108
Figura 4.31 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S95/B5.....	108
Figura 4.32 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S90/B10.....	109
Figura 4.33 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S80/B20.....	109
Figura 4.34 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S70/B30.....	110
Figura 4.35 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S60/B40.....	110
Figura 4.36 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S95/B5.....	111
Figura 4.37 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S90/B10.....	112
Figura 4.38 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S80/B20.....	113
Figura 4.39 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S70/B30.....	113
Figura 4.40 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S60/B40.....	114

Figura 4.41 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para o solo arenoso (A100) em triaxiais em compressão axial. ....	116
Figura 4.42 - Amostras rompidas de areia (A100). Tensão confinante de: (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 400 kPa. ....	117
Figura 4.43 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura A95/B5 em triaxiais em compressão axial. ....	118
Figura 4.44 - Amostras rompidas da mistura A95/B5. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa. ....	119
Figura 4.45 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura A90/B10 em triaxiais em compressão axial. ....	120
Figura 4.46 - Amostras rompidas da mistura A90/B10. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa. ....	121
Figura 4.47 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 50 kPa de tensão confinante efetiva. ....	123
Figura 4.48 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 100 kPa de tensão confinante efetiva. ....	125
Figura 4.49 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 200 kPa de tensão confinante efetiva. ....	127
Figura 4.50 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 400 kPa de tensão confinante efetiva. ....	130
Figura 4.51 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras A100 e A95/B5 em ensaios triaxiais de compressão axial. ....	131
Figura 4.52 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras A100 e A90/B10 em ensaios triaxiais de compressão axial. ....	132
Figura 4.53 - Relação de Resistência de Pico x Tensão Confinante	

Efetiva. Mistura solo arenoso - borracha.....	134
Figura 4.54 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo arenoso A100.....	135
Figura 4.55 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura A95/B5.....	135
Figura 4.56 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura A90/B10.....	136
Figura 4.57 - Comparação entre as envoltórias do solo arenoso A100 e da mistura A95/B5.....	137
Figura 4.58 - Comparação entre as envoltórias do solo arenoso A100 e da mistura A90/B10.....	137



## Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Composição por peso de pneus de carro e caminhão. (Fonte: Adaptado de Shulman V. L., 2004). .....	25
Tabela 2.2 - Vida útil dos pneus. (Fonte: Lagarinhos, 2011). .....	27
Tabela 2.3 - Produção de pneus no Brasil, no período de 2006 a 2010 (milhões). Fuente: Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (2011 <i>apud</i> Lagarinhos, 2011). .....	31
Tabela 2.4 - Venda de pneus no Brasil, no período de 2006 a 2010 (milhões). Fuente: Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (2011 <i>apud</i> Lagarinhos, 2011). .....	32
Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986) .....	48
Tabela 3.2 - Símbolos utilizados para os solos e misturas.....	51
Tabela 4.1 - Caracterização Física do solo residual maduro do Campo Experimental II da PUC-Rio .....	70
Tabela 4.2 - Índices físicos do solo arenoso. Fonte: Casagrande (2005 <i>apud</i> Szeliga, 2011) .....	72
Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo argiloso e misturas.....	76
Tabela 4.4 - Resumo ângulo de atrito e coesão (kPa) de cada mistura solo argiloso-borracha e nível de tensão confinante. ....	114
Tabela 4.5 - Resumo ângulo de atrito e coesão (kPa) de cada mistura solo arenoso-borracha e nível de tensão confinante.....	138

## Lista de Símbolos

$\omega_{\text{ót}}m$	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
$C_u$	Coeficiente de uniformidade
$C_c$	Coeficiente 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
$\epsilon_f$	Deformação axial na ruptura
$\epsilon_v$	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
mm	Milímetro
cm	Centímetros
°C	Graus centígrados
$R_{pico}$	Relação de Resistência de Pico
$R_{pós}$	Relação de Resistência Pós-Pico

# 1

## Introdução

### 1.1. Relevância e Justificativa da Pesquisa

A disposição final de pneus inservíveis representa um problema de difícil solução, pois são resíduos que ocupam grande volume e que precisam ser armazenados em condições apropriadas. A disposição inadequada dos pneus inservíveis produz um impacto duradouro no meio ambiente, já que a degradação destes resíduos é muito lenta. São considerados pneus inservíveis aqueles que, após produção, contenham algum defeito que os impossibilite de serem utilizados, ou aqueles que não possuem mais condição de rodagem após processo de reforma. A permanência dos pneus no meio ambiente gera focos de infecção, proliferação de insetos e roedores, sendo prejudicial para a saúde humana. A primeira resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (Resolução nº258/99 do CONAMA) sobre a disposição final de pneus inservíveis, estabeleceu que os fabricantes e importadores de pneus deveriam coletar e dar uma destinação adequada a pneus inservíveis. As empresas recicladoras de pneus formam parte do sistema criado para satisfazer este requerimento. Estas empresas adotaram como alternativa de gestão a diminuição do volume dos pneus inservíveis através da técnica da trituração, produzindo resíduos de borracha em diversas granulometrias, que poderão ser utilizados em diversas aplicações.

Com a presente pesquisa procura-se conhecer a viabilidade do emprego deste resíduo triturado (especificamente a borracha moída) como material de reforço em obras de terra, através de ensaios experimentais de laboratório. A utilização deste como material alternativo pode potencializar a diminuição da exploração de recursos naturais, contribuir com a minimização de passivos ambientais, agregar valor ao resíduo e evitar problemas ambientais, tais como poluição do ar e o assoreamento de rios e lagos, eliminando problemas atuais de disposição de resíduos em lixões e aterros sanitários.

A técnica de inserção de materiais alternativos em obras geotécnicas auxilia na diminuição dos custos das obras, incentivando o investimento neste tipo de infraestrutura e atendendo assim parcelas da sociedade que são menos favorecidas. A eliminação de pneus inservíveis do meio ambiente contribui para a melhoria da saúde pública, uma vez que os pneus são ambientes propícios para desenvolvimento de vetores causadores de doenças. No Brasil, onde o clima por si só já contribui para o desenvolvimento natural destes vetores, procurar um uso adicional para os pneus inservíveis se torna ainda mais relevante.

Este trabalho aborda os primeiros conhecimentos sobre o comportamento de solos reforçados com este resíduo (borracha moída de pneus inservíveis), sendo que ao verificar que a borracha moída dos pneus inservíveis pode ser utilizada para potencializar os projetos de obras geotécnicas (camadas de aterros sanitários, aterros sobre solos moles e aterros temporários) se estaria contribuindo para melhorar o equilíbrio entre o meio ambiente e a sociedade.

## **1.2. Objetivos**

O objetivo principal desta pesquisa é avaliar a influência da borracha moída de pneus inservíveis como reforço de dois tipos de solos.

Este objetivo será alcançado através da avaliação do comportamento físico e mecânico dos solos e das misturas, estabelecendo parâmetros de comportamento que possam medir a influência da adição da borracha moída.

De acordo com o objetivo principal descrito, foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

- Realizar ensaios de caracterização física dos solos e do resíduo envolvido na pesquisa, através de ensaios de laboratório normatizados;
- Avaliar o comportamento mecânico dos solos puros e em misturas com diversos teores de borracha moída de pneu, através de ensaios de compactação e ensaios triaxiais consolidados isotropicamente drenados (CID), a fim de se obter os parâmetros de resistência ao cisalhamento;

- Analisar os parâmetros de resistência e o comportamento em relação ao nível de deformação dos solos e misturas;
- Analisar a influência do teor de borracha inserido em misturas com cada tipo de solo;
- Analisar a influência do nível de tensão no comportamento das misturas;
- Através dos resultados obtidos, propor futuras pesquisas para incrementar o conhecimento do comportamento das misturas solo-borracha.

### 1.3.

#### **Organização do Trabalho**

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, iniciando com este capítulo introdutório (Capítulo 1), seguido do Capítulo 2, onde é apresentada uma revisão da literatura existente sobre os pneumáticos, sua composição, fabricação, vida útil, impacto ao meio ambiente e tecnologias existentes de reciclagem. Também é abordado de forma concisa o reforço de solos com outros tipos de materiais e pesquisas anteriores que já utilizaram a borracha de pneus inservíveis como reforço de solos.

No Capítulo 3 é descrito detalhadamente o programa experimental seguido neste trabalho. Descrevem-se também os materiais utilizados, os equipamentos e os métodos de ensaios.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização física e mecânica realizados. Estes resultados são analisados com o fim de procurar uma tendência de comportamento das misturas em função da borracha moída de pneu adicionada nos solos.

Finalmente no Capítulo 5 são apresentadas as considerações finais baseadas no conhecimento obtido da realização deste trabalho e da análise dos resultados.

## 2

### Revisão Bibliográfica

#### 2.1. Pneumáticos

##### 2.1.1. Composição e Estrutura dos Pneumáticos. Materiais recicláveis.

O pneu é formado por um conjunto de características que o torna há décadas uma fonte de pesquisa predominante na engenharia. Formado por uma estrutura complexa, pode suportar mais de 50 vezes seu peso próprio, sendo basicamente uma grande armação oca, preta, circular e enchido com ar comprimido. Os diversos materiais que o compõem proporcionam as características necessárias para garantir o máximo lazer e segurança sobre superfícies úmidas, secas, escorregadias e com muito atrito.

Atualmente os pneus possuem uma estrutura formada por diferentes materiais. Na Figura 2.1 apresentam-se as partes mais importantes da estrutura de um pneu.

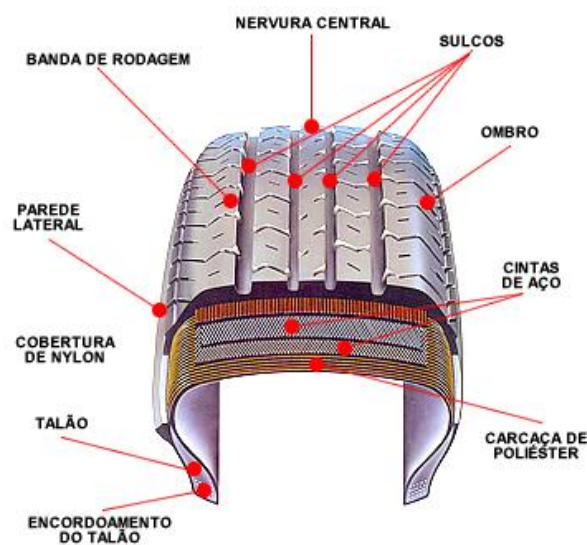


Figura 2.1 - Estrutura do Pneu (Brazil Tires Maxxis, 2012)

A **banda de rodagem** é a parte do pneu que está em contato direto com a superfície da estrada. Está composta por uma alta concentração de borracha natural, a qual varia segundo o tipo de pneu.

As **cintas** proporcionam suporte estrutural à banda de rodagem, ajudando a manter a forma do pneu. É feita com bandas de borracha contendo latão coberto com fios de aço de alto teor de carbono.

A **carcaça** de poliéster brinda a forma e estrutura interna do pneu. Geralmente é fabricada com tecido de metal, cordas de raio natural, nylon ou poliéster, sendo estas posteriormente cobertas com uma substância de borracha natural.

O **encordoamento do talão** é um aço de alta resistência coberto por borracha. Tem uma função estrutural, ajudando na ancoragem entre o pneu e a roda de metal.

Das descrições das partes da estrutura do pneu, pode-se apreciar que este é o resultado da combinação de materiais tais como a borracha natural e sintética, cordões de aço ou nylon, e durante o processo de fabricação tem-se o uso de derivados de petróleo como o negro de fumo, e produtos químicos como o enxofre. A quantidade de cada matéria na composição varia de acordo com o uso que será dado ao produto final, como em automóveis de passeio, veículos industriais, caminhões de carga, e outros.

De forma geral, todas as categorias de pneus são elaboradas com quatro grupos fundamentais de materiais: borrachas, negro de fumo, materiais de reforço e facilitadores.

O grupo das borrachas natural e sintética são os principais componentes estruturais do pneu, aportando entre 40% e 45% do peso do pneu. A relação entre a borracha natural e a borracha sintética é aproximadamente 2:1 em pneus de caminhão e 4:3 em pneus de carros. O segundo material de maior presença é o negro de fumo, cuja quantidade varia entre 23% e 27% do peso. O terceiro grupo são os materiais de reforço (metais e têxteis). O metal no encordoamento do talão, nas cintas e na carcaça pode proporcionar aproximadamente 25% do peso de um pneu de caminhão, em contra mão, em um pneu de carro pode significar somente 11% devido à maior quantidade de têxteis na carcaça. O quarto grupo de materiais são usados como facilitadores durante os estágios de produção do pneu. Para melhorar o desempenho, incrementar a eficiência da fabricação e facilitar a cura



do pneu é adicionado pequenas quantidades de óleos de diluição, ceras, antioxidantes, antiozonantes e outros ingredientes. Para facilitar o processo de vulcanização são usados também diferentes tipos de negro de fumo como o dióxido de titânio, óxido de zinco e enxofre. A Tabela 2.1 apresenta um perfil geral da composição dos pneus de carros e caminhões.

Tabela 2.1 - Composição por peso de pneus de carro e caminhão. (Fonte: Adaptado de Shulman V. L., 2004).

<b>Material</b>	<b>Carro %</b>	<b>Caminhão %</b>
Borracha natural e sintética	±43	±45
Negro de fumo	±27	±20
Metais	±11	±22
Têxteis	±5	±1
Vulcanizadores	±3	±3
Aditivos	±3	±3
Óleos	±8	±8

O processo para misturar os ingredientes de um pneu modifica a dureza, a resistência da borracha e acrescenta-se a resistência à abrasão, ao oxigênio, aos óleos, aos solventes químicos e ao meio ambiente. Uma vez que todos os materiais são processados e a estrutura definida, o pneu é vulcanizado. A vulcanização é um processo de cura pelo qual a borracha é levada a um estado de fortaleza, elasticidade e dureza. É um processo irreversível, no qual uma vez alteradas as moléculas de borracha estas não podem retornar a sua forma original.

Da informação apresentada neste item, alguns aspectos devem ser levados em consideração. A maior presença de borracha nos pneus e a impossibilidade de reconversão da borracha vulcanizada em sua forma original nos remetem a procurar alternativas de reutilização deste material após o processo de reciclagem.

### 2.1.2.

#### Vida útil e Ciclo de vida dos Pneus

Segundo a Tire Industry Association – TIA, (Lagarinhos, 2011), os fatores que influenciam a vida útil dos pneus são:

- A pressão baixa gera deflexão excessiva do pneu provocando desgaste, trincas superficiais na área do talão, aumento no consumo do combustível, reduzindo a vida útil do pneu e, no final da vida útil, os pneus são classificados como inservíveis, diminuindo a quantidade disponível para o processo de reforma;
- A pressão alta reduz a capacidade de flexão do pneu, deixando de amortecer os impactos e causando rupturas na carcaça do pneu com maior facilidade. O pneu tem desgaste nas raia da banda de rodagem nos pneus diagonais / convencionais e desgaste nos ombros nos pneus radiais;
- Tipo de estrada em que roda o veículo, com ou sem asfalto;
- Posicionamento da carga, acelerações bruscas e frenagens súbitas;
- Impacto em guias e buracos, temperatura ambiente, entre outros.

Existem vários fatores que reduzem a vida útil dos pneus, diminuindo o tempo de entrada destes no processo de recauchutagem ou no estado de desuso.

A Tabela 2.2, apresenta a vida útil dos pneus de automóveis, de carga, industriais, aviões e fora de estrada.

Segundo Jassen & Beukering (2001 *apud* Szeliga, 2011) o ciclo de vida do pneu é composto por cinco estágios: extração, produção, consumo, coleta dos pneus descartados e gerenciamento da destinação final do resíduo.

Na primeira fase, tem-se a fabricação dos componentes básicos do pneu, como a borracha natural e sintética, têxteis, aço e aditivos químicos. Segundo o tipo de pneu vão variar as proporções de cada componente.

Tabela 2.2 - Vida útil dos pneus. (Fonte: Lagarinhos, 2011).

<b>Tipo de Pneu</b>	<b>Vida Útil (1)</b>
Trator	10 a 12 anos
Transbordo Canavieiro	4 a 5 anos (2)
Empilhadeiras	4.000 a 5.000 horas
Automóveis	até 80.000 km (3)
Ônibus e Caminhões	até 200.000 km (4)
Motos	30.000 km
Aviões	200 pousos e decolagens (5)
Agrícolas	8.000 a 10.000 horas

(1) Considerações a 1ra vida do pneu, com utilização do pneu em condições normais e devidamente controlado.

(2) Existe uma grande diversidade de pneus fora de estrada "Off the Road - OTR", a vida útil depende do tamanho do pneu e severidade do serviço prestado.

(3) Os pneus de automóveis podem ser reformados uma única vez.

(4) Os pneus de carga (ônibus e caminhões) podem ser reformados de duas a três vezes.

(5) Depende da frequência de uso dos aviões e número de escalas, entre outros.

A fase de consumo pode acontecer pela aquisição de pneus novos, recauchutados ou reutilizados. Novos pneus precisam de alto consumo de energia, recursos e mão de obra. A recauchutagem é um método simples e económico, consistindo somente na recolocação da parte de borracha gasta na banda de rodagem, utilizando unicamente 20% dos recursos necessários para a fabricação de um pneu novo. A reutilização é um processo de prolongamento da vida útil do pneu, aplicada normalmente para pneus de caminhões, devido à estrutura do pneu ser mais apropriada.

A coleta de pneus é um estágio separado da vida útil do produto e acontece junto com o gerenciamento da destinação final. Em muitos países, após o descarte, os pneus são levados para centros de coleta, onde serão analisadas alternativas para utilização do material. Os destinos são a recauchutagem, fontes de energia, reciclagem de matérias primas, etc. A Figura 2.2 apresenta as etapas gerais do ciclo de vida do pneu.

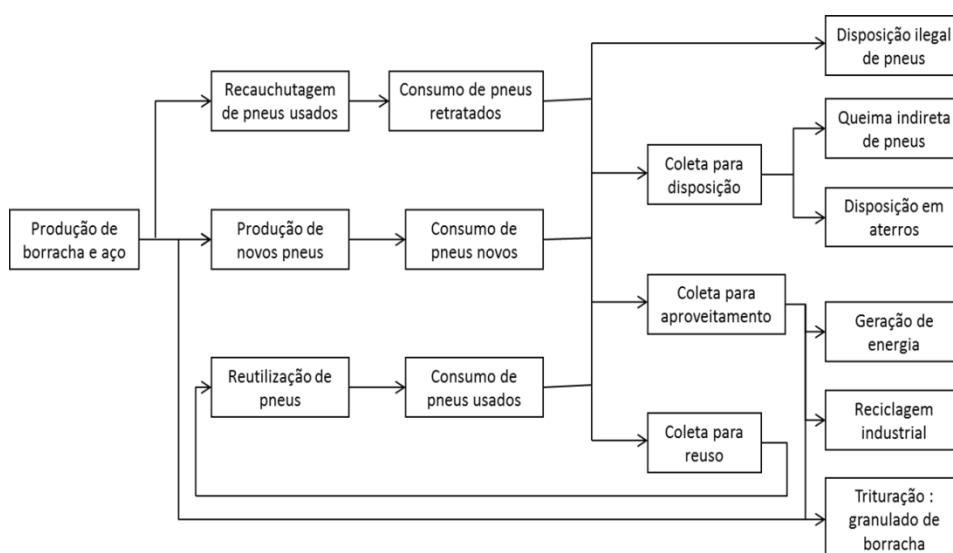


Figura 2.2 - Ciclo de vida do pneu. (Fonte: Van Beukering & Jannen (2001 *apud* Szeliga, 2011)).

### 2.1.3.

#### Impacto ao Meio Ambiente e Legislação Vigente no Brasil

“Os problemas ambientais estão relacionados à instalação de grandes depósitos de pneus inservíveis, que ocupam áreas extensas e ficam sujeitos à queima acidental ou provocada, causando prejuízos à qualidade do ar, devido à liberação de substâncias tóxicas. Esses depósitos são igualmente danosos por se constituírem em criadouros de mosquitos, especialmente o *Aedes aegypti*, que é o transmissor da dengue e da febre amarela; e o *Anopholes*, que é o transmissor da malária, pelas condições climáticas favoráveis ao mosquito, principalmente no período de janeiro a maio, quando ocorre a sua reprodução” (Lagarinhos, 2011). Segundo a Secretaria de Vigilância e Saúde (2009), os vetores se criam, normalmente, em águas profundas, límpidas, sombreadas e com pouco aporte de matéria orgânica e sais; criadouros temporários, água salobra; também podem utilizar a água acumulada em vasos, latas, pneus e plantas com depósitos de água, como por exemplo, bromélias. Um estudo feito por esta Secretaria, afirmou que 3,5% dos depósitos favoráveis para a reprodução do *Aedes aegypti* eram pneus usados SVS (2009 *apud* Lagarinhos, 2011).

“De acordo com Zilda Maria Veloso, gerente de resíduos perigosos do MMA, ao transportar os pneus inservíveis para a destinação final, que muitas vezes ocorre em estados diferentes daquele que gerou o resíduo, há a

movimentação de vetores de várias doenças, entre elas a dengue e a febre amarela” Veloso (2010 *apud* Lagarinhos, 2011).

A disposição de pneus inservíveis em aterros torna-se pouco recomendada, devido à dificuldade de compactação, sua forma e composição, e redução da vida útil do aterro. O pneu tende a ir para a superfície do aterro, rompendo a camada de cobertura, por causa da retenção de ar e gases no interior dos mesmos. Assim, com a abertura da camada de cobertura, os resíduos ficam expostos ao meio ambiente, criando-se um foco de doenças e permitindo que os gases escapem do aterro. Para piorar o panorama, se cria uma via livre para a infiltração da água das chuvas aumentando com isso a formação de chorume Blumental (1993 *apud* Lagarinhos, 2011).

A Resolução Conama nº 258/99, aprovada em 26 de agosto de 1999, fixava as metas e obrigava aos fabricantes e importadores a darem destinação final adequada aos pneus inservíveis. Este processo iria ocorrer de forma escalonada durante os anos seguintes. Assim, desde 2002, os fabricantes e importadores de pneus devem coletar e dar destinação final aos pneus inservíveis. A coleta e destinação final ambientalmente adequada dos pneus inservíveis existentes no território nacional, deveria ser na proporção relativa às quantidades fabricadas e importadas. Segundo a lei, os fabricantes e importadores devem dar uma destinação adequada a um pneu inservível para cada pneu novo comercializado no mercado de reposição.

Por iniciativa própria, em 2010, os fabricantes e importadores de pneus novos elaboraram um plano de gerenciamento de coleta, armazenamento e destinação final dos pneus inservíveis. Junto com isso, deviam implementar pelo menos um ponto de coleta nos municípios com mais de 100.000 habitantes.

Antes da aprovação da legislação que regula a destinação dos pneus inservíveis, somente 10% destes pneus eram reciclados. Logo após a aprovação da legislação, o número de empresas para recolher e destinar os pneus inservíveis aumentou quase quinze vezes e já para 2010 eram 124 empresas cadastradas para a reciclagem, laminação e valorização energética dos pneus inservíveis. Além disso, foi montada uma estrutura de coleta, pré-tratamento e destinação final, pelos fabricantes, enquanto os importadores de pneus novos conseguiram implantar uma estrutura de coleta em setembro de 2009.

O crescimento econômico que Brasil possui leva consigo um aumento na demanda de diferentes produtos. Um deles o pneu, necessário para os veículos de transporte de outros produtos manufaturados ou matéria prima. Na Tabela 2.3 e na Tabela 2.4 apresentam-se a evolução da produção e vendas por categorias de pneus no período de 2006 a 2010.

Segundo a Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (2011), uma causa importante para o aumento da produção da indústria de pneus em 2010, foi o crescimento da indústria automobilística em 2010, sendo o crescimento de 12% em relação a 2009. Foram importados 660 mil veículos, significando o 18,8% dos veículos vendidos no Brasil, Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores (2011 *apud* Lagarinhos, 2011).

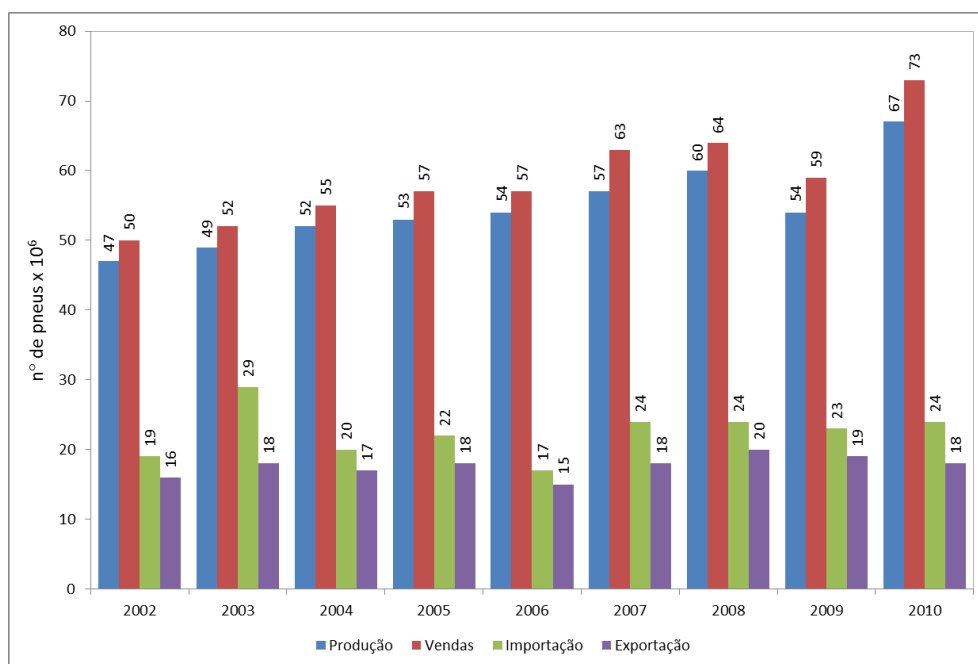


Figura 2.3 - Mercado para os pneus novos, no período de 2002 a 2010. Fonte: adaptado de Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (2011 *apud* Lagarinhos, 2011).

Os pneus novos que entram no mercado possuem diferentes origens, podendo ser produzidos no país e importados. Uma parte dos pneus produzidos no Brasil é exportada. Segundo Fácio (2011, *apud* Lagarinhos, 2011), em 2010 foram vendidos pelos fabricantes no mercado de reposição 32,9 milhões de pneus, o equivalente a 301.000 toneladas. Conforme o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (2011), entre outubro de 2009 e

dezembro de 2010, os importadores de pneus usados colocaram no mercado de reposição 202.594,52 toneladas, o que significa aproximadamente 40,52 milhões de pneus de automóveis (Lagarinhos, 2011).

Na Figura 2.3 se apresenta a evolução da produção, vendas, exportação e importação de pneus novos no período de 2002 a 2010, sendo que neste período foram produzidos em total 493,7 milhões de pneus no Brasil.

O Brasil vem apresentando um crescimento econômico sustentado por vários anos, conseqüentemente surgem novas necessidades e as existentes aumentam. Assim como em outras indústrias a produção tem que crescer para cobrir a nova demanda do mercado, na indústria de produção de pneus também acontece este efeito, sendo que o maior crescimento nos últimos cinco anos da década anterior, foram dos pneus de veículos industriais, motos e automóveis. Na Tabela 2.3 e na Tabela 2.4 se apresentam a evolução da produção e vendas por categorias de pneus no período de 2006 a 2010, no Brasil.

Tabela 2.3 - Produção de pneus no Brasil, no período de 2006 a 2010 (milhões).

Fuente: Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (2011 *apud* Lagarinhos, 2011).

<b>Categoria</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
Caminhões e ônibus	6,9	7,3	7,3	6	7,7
Caminhonetas	5,9	6	5,8	5,6	7,9
Automóveis	28,9	28,8	29,6	27,5	33,8
Motos	11,4	13,8	15,2	13	15,2
Agricultura / Terraplanagem	0,688	0,8301	0,9032	0,679	0,917
Veículos Industriais	0,508	0,4621	0,7164	0,963	1,6
Aviões	0,051	0,061	0,0476	0,0418	0,06

Tabela 2.4 - Venda de pneus no Brasil, no período de 2006 a 2010 (milhões).

Fuente: Associação Nacional das Indústrias de Pneumáticos (2011 *apud* Lagarinhos, 2011).

<b>Categoria</b>	<b>2006</b>	<b>2007</b>	<b>2008</b>	<b>2009</b>	<b>2010</b>
Caminhões e ônibus	7,1	7,8	7,6	6,6	8,4
Caminhonetas	6	6,5	6,2	5,9	8,3
Automóveis	31,2	33,7	33,3	32	38,1
Motos	11,6	13,7	15,4	13,6	15,5
Agricultura / Terraplanagem	0,7191	0,883	0,9622	0,7182	0,9773
Veículos Industriais	0,4971	0,498	0,6867	1,3	1,6
Aviões	0,0601	0,0716	0,0614	0,0531	0,0737

A adequada destinação dos pneus inservíveis por parte dos produtores vem melhorando cada vez mais, quanto à quantidade coletada e destinada como a melhora do gerenciamento do destino final dos pneus descartados. Na década passada o volume de pneus destinados pelos fabricantes foi incrementado quase dez vezes, tendo com previsão para 2012 chega à quantidade de 343.000 toneladas de pneus inservíveis, o equivalente a 68,60 milhões de pneus de automóvel. A Figura 2.4 apresenta a quantidade do produto coletado e destinado no período 2002 a 2010, e a previsão para 2011 e 2012.

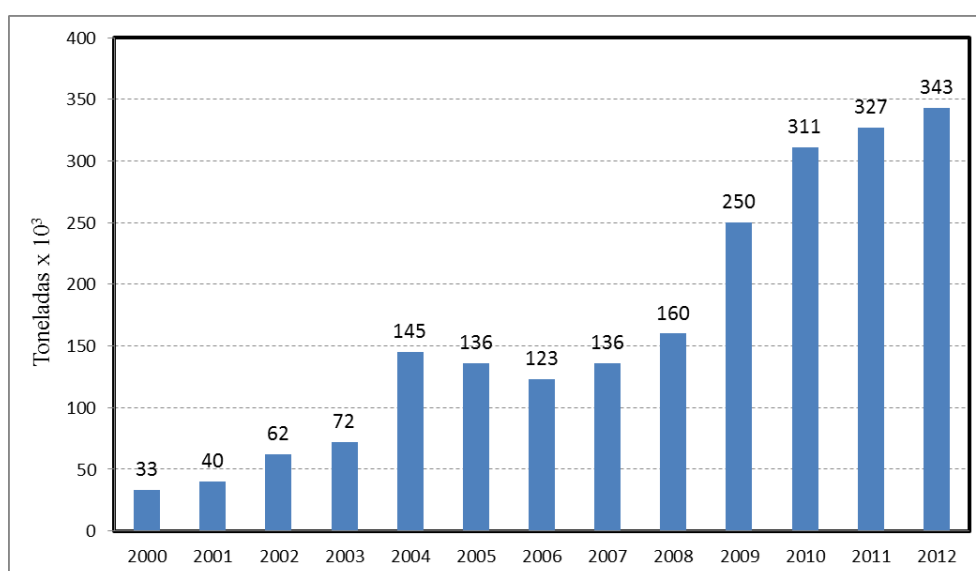


Figura 2.4 - Quantidade destinada no Brasil pelos fabricantes de pneus no período 2000 a 2010, e a previsão para a reciclagem em 2011 e 2012. Fonte: adaptado de Fácio (2010 *apud* Lagarinhos, 2011).



Assumindo que a vida útil de um pneu está por volta dos quatro anos e fazendo umas contas simples das vendas de pneus no Brasil ocorridas entre os anos 2006 e 2009, um total 243 milhões de pneus, comparada à quantidade que será destinada pelos fabricantes em 2012, 68,6 milhões de pneus, pode-se apreciar que existe uma diferença de 174,4 milhões de pneus que não serão coletados, dos quais uma quantidade será recauchutada. Supondo no melhor dos casos que são recauchutados três quartos dos pneus, ficaria ainda quase 60 milhões de pneus descartados inapropriadamente. Esta quantidade tem que ser adicionada aos pneus já descartados nos anos anteriores, apresenta-se um cenário que merece muita atenção, em função do impacto ambiental e na saúde pública.

É assim que o surgimento de novas aplicações dos materiais componentes dos pneus incentivaria o crescimento de pontos de coleta e a implantação de novas plantas de tratamento e reciclagem de pneus. Deste modo se geraria a necessidade de coletar uma maior quantidade de pneus inservíveis para anteder a demanda de novas aplicações dos materiais reciclados do pneu.

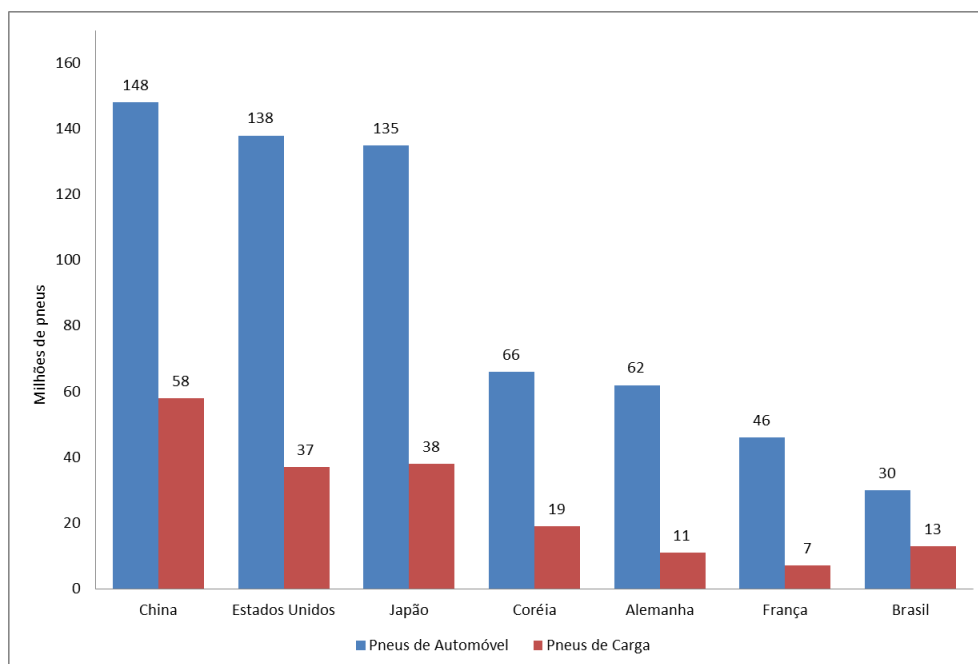


Figura 2.5 - Produção mundial de pneus em 2008, por país (milhões). Fonte: Japan Automotive Tyre Manufacturers Association (2010 *apud* Lagarinhos, 2011).

O Brasil tem a quinta economia do mundo, apresentando um crescimento promissor para o futuro. Junto com o crescimento econômico virá também o

crescimento da produção dos pneus e a necessidade de ter um maior número de aplicações para quando estes forem descartados. Na Figura 2.5, se apresenta a produção de pneus de alguns países do mundo, com economias maiores que a brasileira, mas que nos próximos anos o Brasil poderia atingir. Então surge a necessidade de se preparar para os anos subsequentes e diminuir o impacto que causará no meio ambiente, a prosperidade econômica e industrial.

#### **2.1.4. Tecnologias e Tratamentos de Reciclagem**

Os tratamentos usados para a reciclagem de pneus inservíveis abrangem desde técnicas de corte mecânicos simples até complexos processos térmicos e químicos. Existem quatro níveis de tratamento. (Shulman, V. L., 2004).

- Nível 1: Destruição da estrutura do pneu. Processo mecânico pelo qual se destrói um ou mais dos atributos físicos do pneu como a forma, a capacidade de suporte, a rigidez, entre outros. Os métodos comuns são compressão ou corte;
- Nível 2: Liberação e separação dos elementos do pneu. Processos pelos quais são segregados os principais componentes do pneu como a borracha, metais, têxteis, etc. Sendo as tecnologias mais comuns as de redução de tamanho criogênico e ambiental. O produto do nível um é usado normalmente como matéria prima para o nível dois;
- Nível 3: Tratamentos e tecnologias multi-fase. As borrachas liberadas durante o nível 2 são usadas com matéria prima para esta fase, onde modificam-se uma o mais das suas propriedades. As tecnologias e tratamento predominantes são a desvulcanização, recuperação, modificação da superfície e a pirólise;
- Nível 4: Tratamentos de melhoramento do material. Os materiais modificados durante o Nível três vão proporcionar a matéria prima necessária para este nível. Diferentes tecnologias são usadas no melhoramento de determinadas características e propriedades.

#### **2.1.4.1.**

##### **Tratamentos do nível 1: Destruição da estrutura do pneu**

Neste nível destrói-se um ou mais dos atributos físicos do pneu como a forma, a capacidade de suportar peso, a rigidez, entre outros. A remoção do encordoamento do talão, remoção da banda de rodagem e dos flancos, a compressão e o corte são os procedimentos mais comuns. A borracha é o principal material obtido nesta fase, sendo extraída dos flancos do pneu, da banda de rodagem e do talão. Outro produto obtido é o resultado de comprimir os pneus com grandes tensões e cortá-lo. A maior parte dos materiais resultantes são usados diretamente em aplicações na construção e na engenharia civil. O restante é usado como matéria prima nos próximos tratamentos.

#### **2.1.4.2.**

##### **Tratamentos do nível 2: Liberação e separação dos elementos do pneu**

Neste nível se realiza a separação dos materiais que conformam o pneu como a borracha, metais ou têxteis. Os processos de trituração à temperatura ambiente e trituração por resfriamento criogênico são as duas tecnologias comumente usadas, assim como outras que conseguem obter pedaços com cerca de 15 mm.

Inicialmente os elementos resultantes do nível 1 são despedaçados (“*shredding*”) usando um grupo de facas, produzindo materiais entre 50 mm e 300 mm. Posteriormente estes pedaços são processados (“*chipping*”) até obter materiais entre 10 mm e 50 mm.

Durante o processo chamado de trituração à temperatura ambiente podem ser usados os pneus inteiros ou pneus pre-tratados ou o material resultante dos processos “*shredding*” ou “*chipping*”. Este processo é realizado à temperatura ambiente. A borracha, os metais e os têxteis são separados sequencialmente. Primeiro o material é despedaçado por facas e durante este processo de granulação os metais são separados magneticamente. De acordo com os resultados que se quer obter, o material poder seguir processos sucessivos de trituração até atingir tamanhos ainda menores. Finalmente o material resultante passa através de uma série de telas e peneiras para remover totalmente qualquer vestígio de impureza e

garantir o tamanho do material. Durante a fase final os resíduos têxteis são removidos com separadores de ar.

No processo de trituração criogênico são usados geralmente pneus pré-tratados como matéria prima. Utiliza-se comumente as partículas produzidas durante o processo “*chipping*” ou o material granular produzido com a trituração à temperatura ambiente. O processo é realizado a baixas temperaturas usando nitrogênio líquido ou refrigerantes comerciais para fragilizar a borracha. Pode ser usado um sistema de quatro fases o qual inclui a redução inicial de tamanho, o resfriamento, a separação e o desbaste. O material ingressa a uma câmara gelada onde o nitrogênio líquido leva a temperatura entre -80 e -120 °C, fazendo com que a borracha deixe de se comportar como um material flexível. O processo de resfriamento fragiliza a borracha, permitindo que esta se fragmente até o tamanho desejado e obtenha uma forma lisa e regular. Devido ao estado fragilizado dos materiais, as fibras e os metais são facilmente removidos com moinho de martelos. O material granular passa finalmente através de telas magnéticas e peneiras para eliminar as impurezas restantes.

#### **2.1.4.3.**

#### **Tratamentos do Nível 3: Tecnologias multi-tratamentos**

Os tratamentos deste nível modificam uma o mais das características dos materiais através de processos mecânicos, térmicos, químicos, mecânico-químicos ou processos combinados. A recuperação da borracha, ativação ou modificação da superfície, a desvulcanização e a pirólise são alguns dos tratamentos utilizados.

São diversos os tratamentos utilizados neste nível como os tipos de matérias primas e materiais resultantes.

O processo de recuperação da borracha é feito a partir do material granular proveniente da trituração à temperatura ambiente. Logo, o resultado de tratamentos térmicos e mecânicos, deste material, é a quebra da estrutura vulcanizada, restaurando-se assim as características da borracha virgem. O material resultante tem um diâmetro médio de partícula de 0,360 mm e diâmetro máximo de 0,425 mm.

Na ativação ou modificação da superfície é usado normalmente o material granular obtido da banda de rodagem dos pneus de caminhão. Inicialmente o

material é reduzido por trituração até atingir um tamanho de aproximadamente 0,04 mm e é feita a remoção de metais e têxtis. Seguidamente a borracha em pó é ativada cobrindo-a com polímeros não saturados de alto peso molecular. Na ultima fase é executado o processo de vulcanização, gerando-se novas ligações químicas. Como resultado as partículas de borracha ativadas pela cobertura estão unidas a uma nova estrutura tridimensional. Assim, as propriedades originais da borracha são mantidas.

Na desvulcanização é usado o material obtido na trituração à temperatura ambiente ou criogênica ou pó de borracha. Como no tratamento anterior, no início é reduzido o tamanho do material para depois destruir as ligações geradas na vulcanização, usando processos mecânicos, químicos ou térmicos. Deste modo são recuperadas algumas das características originais da borracha. Posteriormente são usados agentes químicos ativantes para mudar algumas das propriedades físicas ou químicas.

O material resultante do processo “*chipping*” é usado comumente no tratamento de pirólise. Aqui a borracha é decomposta termicamente aquecendo-a em ausência de oxigênio, atingindo progressivamente uma temperatura entre 450 e 500 °C. Durante este período a borracha é desintegrada em seus constituintes como óleo, gás e carvão. Um dos produtos resultantes é um pó de borracha muito fino cujo tamanho varia entre 0,4 µm e 1000 µm de diâmetro.

#### **2.1.4.4.**

#### **Tratamentos do nível 4: Materiais melhorados**

Os tratamentos deste nível refinam, melhoram, modificam ou geram características específicas ou propriedades em materiais produzidos no nível 3. Um material com características similares ao negro de fumo é gerado, utilizando processos de redução de tamanho, remoção de impurezas e desintegração por ressonância. A produção de elastômeros termoplásticos usando material granular de borracha, polipropileno, compatibilizantes e aditivos é realizada normalmente neste nível, resultado materiais que podem fornecer determinadas propriedades segundo a função destinada a este.

## 2.2. Solos Reforçados - Histórico

A técnica de reforçar o solo para sua utilização em diversas obras feitas pelo homem vem de muito tempo atrás. Segundo Palmeira (1992 *apud* Casagrande, 2005), na Antiguidade, haste de bambu e junco eram empregados no reforço de tijolos de barro e solos granulares para auxiliar na construção de diversas obras de terra. Na Mesopotâmia (1400 A.C.) a pirâmide Ziggurat e a torre Agar Quf, foram construídas empregando-se camadas intercaladas de solo e mantas de raízes. Aplicações destas técnicas similares são encontradas em partes da Grande Muralha China e em estradas construídas pelos Incas, no Peru, através do emprego de lã de lhama como reforço, as quais existem até os dias atuais.

Na atualidade existem diversas formas de melhorar ou reforçar o solo através de processos físicos e/ou químicos, sendo que as técnicas utilizadas podem abranger o uso de diferentes materiais como fibras, geossintéticos, estabilizantes químicos, etc.

Segundo Casagrande (2005), “Entende-se por melhoria ou reforço de solos a utilização de processos físicos e/ou químicos que visem o melhoramento das propriedades mecânicas dos solos. Procura-se o aumento da resistência do solo tratado e a diminuição de sua compressibilidade e de sua permeabilidade. O termo melhoria de solos está associado ao tratamento através de processos químicos, enquanto que o termo reforço está associado à utilização de inclusões em aterros ou taludes”.

Os geossintéticos vêm sendo usados nas obras geotécnicas a várias décadas, para proporcionar ao solo algumas características como drenagem, proteção à erosão, reforço do mesmo, entre outras. Existem diversos tipos de geossintéticos, sendo estes classificados em geotêxteis, geogrelhas, geomalhas, geomenbranas, tiras, fibras e geocompostos. Os geotêxteis são mais utilizados, estes são conformados por fibras têxteis ordenadas aleatoriamente e empregados como elementos de reforço, separação, drenagem, filtração, e proteção. As geogrelhas são grelhas plásticas utilizadas como elementos de reforço, principalmente contra as solicitações de tração e melhora na distribuição das tensões. As geomalhas são estruturas planas com elevado volume de vazios para utilização como meio drenante. As geomembranas conformam elementos de baixíssima permeabilidade

para utilização como barreiras impermeáveis em obras de engenharia civil. Da combinação de dois ou mais geossintéticos surgem os geocompostos, utilizados para cumprir diversas funções Palmeira (1995 *apud* Casagrande, 2011).

O reforço do solo pela adição de fibras tem sido estudado ultimamente, gerando-se um maior entendimento do comportamento destes compósitos. Em Casagrande (2005) aborda-se o comportamento de solos reforçados com fibras, observando-se o acréscimo constante da resistência com o aumento das deformações distorcionais em uma matriz arenosa reforçada com fibras de polipropileno. São diferentes tipos de fibras usadas em reforços de solos, além do tipo de fibra utilizada por Casagrande (2005), de polipropileno, podem ser utilizadas fibras naturais, as quais podem ser usadas na formação de compósitos de bambu, juta, cana de açúcar, etc. As fibras de polietileno, de poliéster e de poliamida, junto com as fibras de polipropileno são classificadas como fibras poliméricas. Cada uma destas apresenta diferentes características em função da sua estrutura química, dando origem, segundo Casagrande (2005), a diferentes estudos (Al Wahab & Al-Qurna, 1995; Al Wahab & El-Kedrah, 1995 e Nataraj *et al.*, 1996).

### **2.3.**

#### **Solos reforçados com borracha**

A seguir são descritas algumas alterações que ocorrem no solo devido à inclusão de borracha de pneus inservíveis, tanto para solos argilosos como para solos arenosos. Existem diversos autores que já relataram em seus trabalhos as mudanças que acontecem no comportamento mecânico dos solos reforçados com borracha. Estas mudanças dependem principalmente do teor de borracha da mistura, do tamanho da borracha e do nível de confinamento.

#### **2.3.1.**

##### **Solo arenoso reforçado com borracha**

Envoltórias de resistência ao cisalhamento não lineares em areias foram registradas por Fosse *et. al.* (1996) que adotaram envoltórias de resistência bilineares. Estas envoltórias de resistência correspondem a ensaios de cisalhamento direto com um equipamento de grande escala. Utilizaram areia e pedaços de

borracha de tamanhos entre 50 e 150 mm. Todas as envoltórias de resistência das misturas (10% e 30% de borracha em relação ao peso seco do solo) apresentaram maiores resistências ao cisalhamento que da envoltória da areia pura. Os parâmetros de resistência das envoltórias (ângulo de atrito e coesão) variaram em função do nível da tensão normal. Para tensões normais baixas (0 – 50 kPa) a melhoria aconteceu no ângulo de atrito e para tensões altas (50 kPa – 120 kPa) a coesão apresentou melhoria em relação à coesão da areia pura.

O tamanho da borracha utilizada nas pesquisas é um fator importante nos resultados obtidos. Tatlisoz *et. al.* (1997) realizaram ensaios de cisalhamento direto em um equipamento de maior escala com pedaços de borracha de tamanhos entre 30 e 110 mm. As misturas com 10%, 20% e 30% de borracha apresentaram maior resistência que da areia, sendo que os valores máximos aconteceram no final do ensaio, ou seja, a curva tensão cisalhante x deslocamento horizontal não apresentou pico. A maior melhora devido à adição de borracha foi registrada na coesão. O comportamento das envoltórias obtidas foi linear ficando praticamente iguais as envoltórias das misturas de 20% e 30% de borracha.

Youwai e Bergado (2003) realizaram ensaios triaxiais drenados em compressão axial em amostras de areia misturadas com borracha de tamanho 12 e 50 mm. A resistência ao cisalhamento de pico diminuiu com o aumento de teor de borracha nas misturas, mas a queda foi insignificante. A resistência pós-pico mostrou um melhor comportamento, sendo que para misturas com teores de borracha maiores que 30% a presença deste material foi totalmente prejudicial.

Ghazavi (2004) realizou ensaio de cisalhamento direto para misturas com 0%, 10%, 15%, 20%, 50%, 70% e 100% de borracha. A borracha utilizada tinha tamanho médio de 4,0 mm. Em geral as melhorias na resistência ao cisalhamento não foram significativas, contudo as resistências de pico das misturas aconteceram para deslocamentos horizontais maiores que no caso da areia pura, sendo que as curvas de tensão cisalhante x deslocamento horizontal não apresentaram um pico muito bem definido com relação à curva da areia pura. Nas envoltórias observa-se que para as misturas que têm entre 10% e 20% de borracha o valor do ângulo de atrito atingiu seus maiores valores.

Zornberg *et. al.* (2004) avaliaram o comportamento de misturas de areia com borracha de pneu através de ensaios triaxiais drenados. Para este fim foram utilizados retalhos retangulares de borracha de 12,5 mm e 25,4 mm de lado.



Devido ao tamanho da borracha se utilizou uma célula triaxial de grande escala, sendo que os corpos de prova tiveram 153 mm de diâmetro e 305 mm de altura. A resistência ao cisalhamento melhorou com o incremento do teor de borracha na mistura, atingindo valores máximos para o teor de 35% de borracha, sendo que para teores maiores a resistência começa a decrescer. Também se observou a influência do nível de tensão confinante. Para tensões de confinamento baixa a resistência ao cisalhamento apresentou melhoras muito significantes em comparação a tensões de confinamento altas.

Na pesquisa realizada por Attom (2006), a adição de borracha aumentou o ângulo de atrito interno e a resistência de pico das misturas em relação à areia pura. Os melhores resultados foram para a mistura com teor de borracha 40%. Neste trabalho executaram-se ensaios de cisalhamento direto com três tipos de areia e borracha moída passante da peneira No. 4.

Venkatappa e Dutta (2006) utilizaram pedaços de borracha de três tipos: 1 x 1 cm, 2 x 2 cm e 1 x 2 cm. Executaram ensaios triaxiais drenados com carregamento axial, sendo que os corpos de prova foram de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro devido ao tamanho da borracha adicionada. A resistência de pico se incrementou com o aumento do teor de borracha na mistura (0%, 5%, 10%, 15%, 20%, 80% e 100%), sendo que a melhoria máxima aconteceu para o teor de 20%. As distorções axiais correspondentes à resistência de pico das misturas foram maiores do que da areia. A presença de borracha melhora significativamente a coesão, enquanto que o ângulo de atrito tem uma melhora de um ou dois graus.

A borracha moída (tamanho médio 1,0 mm) e a areia utilizadas nesta pesquisa também foram usadas por Szeliga (2011) para realizar ensaios de cisalhamento direto em amostras de solo puro e misturas de 20%, 30% e 40% de borracha em relação ao peso seco do solo. Os ensaios foram executados até se obter deslocamentos horizontais entre 14 e 16 mm. Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento varia com o nível de tensão normal. Todas as misturas ensaiadas sob a tensão normal de 50 kPa apresentaram maior resistência ao cisalhamento do que da amostra de areia pura. Quando as misturas foram ensaiadas usando as tensões normais de 160 kPa e 300 kPa a resistência ao cisalhamento de todas as amostras foi menor do que da areia pura. Assim, para tensões normais altas a adição da borracha moída de pneus prejudica o

comportamento mecânico da areia. Embora a resistência tenha sido reduzida pela presença da borracha moída, as curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal continuaram apresentando crescimento da tensão cisalhante com o deslocamento horizontal, sendo que na última parte dos ensaios as inclinações das curvas das misturas foram maiores que da curva da areia pura. Portanto, observando a tendência das curvas para deslocamentos horizontais superiores a 16 mm as misturas teriam maiores valores de resistência ao cisalhamento do que da própria areia. A influência da tensão normal no comportamento mecânico da areia indicaria a obtenção de envoltórias de resistência não lineares.

### 2.3.2.

#### **Solo argiloso reforçado com borracha**

Cetin *et. al.* (2006) realizaram ensaios de cisalhamento direto com misturas feitas com uma argila coesiva e dois tipos de borracha, uma fina ( $D_{50} = 0,12$  mm) e uma grossa ( $D_{50} = 2,30$  mm). Os resultados mostraram que a resistência ao cisalhamento aumentou até em 30% para as misturas com borracha fina e até 20% para as misturas com presença de borracha grossa. As envoltórias correspondentes às misturas feitas com borracha grossa apresentaram menor resistência ao cisalhamento do que da argila pura para tensões normais altas. Para tensões normais baixas a resistência foi maior do que das amostras de argila pura.

Özkul e Baykal (2006) estudaram o efeito da adição de tiras de borracha (4 – 15 mm) a uma argila caolinítica de baixa plasticidade. Realizaram ensaio de cisalhamento direto em amostras de misturas com teor de borracha de 10%. Os ensaios deram como resultado um leve incremento da resistência ao cisalhamento. As curvas tensão cisalhante x deslocamento horizontal dos compósitos não apresentaram um valor máximo, sendo que até o final do ensaio (10 mm de deslocamento horizontal) a tensão cisalhante continuava crescendo.

Attom *et. al.* (2007) além de trabalhar com areia, utilizaram solo argiloso para fazer ensaios de cisalhamento direto em misturas com borracha passante da peneira No. 4. Os ensaios foram realizados com amostras de diferentes teores de borracha (5%, 10%, 15% e 20%), sendo que a resistência ao cisalhamento aumentou em todas as misturas.

Özkul e Baykal (2007) realizaram ensaios triaxiais drenados com uma argila caolinítica de baixa plasticidade. As tiras de borracha adicionadas tinham maiores dimensões (2 – 25 mm) em relação às tiras usadas na pesquisa anterior Özkul e Baykal (2006). O teor de borracha utilizado foi 10%. Os ensaios mostraram que a resistência de pico da mistura é comparável ou maior do que da argila pura quando testada com tensões de confinamento entre 200 e 300 kPa. Acima destes valores, a presença das inclusões degrada a resistência da argila. Assim, a contribuição das tiras de borracha à resistência ao cisalhamento das argilas diminuiu com o incremento do nível de confinamento. Os autores sugerem a existência de uma pressão limite de confinamento, logo após da qual a presença da borracha é prejudicial no comportamento mecânico do compósito. Para este tipo de material a tensão confinante limite situa-se entre 200 e 300 kPa. Outra característica recorrente no comportamento destes compósitos durante o cisalhamento é que a resistência de pico acontece para deformações axiais maiores do que do solo puro. Foi analisada também a resistência pós-pico, a qual foi maior que da argila pura para tensões de confinamento baixas e apresentou valores menores que da argila pura para tensões de confinamento altas.

Costa *et. al.* (2011) ensaiaram misturas compostas por solo laterítico e tiras de borracha de tamanho médio de 1,40 mm. Executaram ensaios de cisalhamento direto em amostras com 0%, 10%, 20%, 40% e 50% de borracha. As envoltórias de resistência de todas as misturas apresentaram maiores valores de resistência ao cisalhamento do que do solo puro. O máximo incremento aconteceu para a mistura com um teor de borracha de 40%. O deslocamento horizontal onde acontece a tensão cisalhante máxima das misturas é maior do que do solo puro. Estes deslocamentos horizontais correspondentes à tensão cisalhante máxima aumentam com o maior o teor de borracha da mistura.

Szeliga (2011) realizou ensaio de cisalhamento direto com o mesmo solo argiloso utilizado neste trabalho. As misturas testadas foram com 20%, 30% e 40% de borracha moída. De todos os teores estudados aquele que apresentou a máxima melhoria foi de 40%, sendo que as envoltórias de resistência das amostras com teores de 30 e 40% ficaram muito próximas. O parâmetro de resistência que apresentou uma melhoria significativa foi o ângulo de atrito. A coesão aumentou levemente. Para todas as misturas observou-se que a tensão cisalhante mantinha um comportamento crescente no final dos ensaios.

### **3**

## **Programa Experimental**

### **3.1.**

#### **Materiais Utilizados**

#### **3.1.1.**

##### **Solo Arenoso**

A areia (Figura 3.1) utilizada no presente estudo provém de uma jazida localizada no município de Osório-RS. É uma areia fina, limpa e mal graduada, também utilizada por Casagrande (2005), Palacios (2012) e outros autores em pesquisas desenvolvidas na UFRGS. O quartzo corresponde a 99% da sua composição mineralógica e os minerais acessórios são a glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita (Spinelli, 1999). Esta areia foi utilizada por Casagrande (2005) na sua tese doutoral, realizando-se, entre outros, ensaios de caracterização física e obtenção dos índices físicos no Laboratório de Mecânica dos Solos da Universidade de Passo Fundo. Os resultados são apresentados no item 4.1.2.



Figura 3.1 - Areia utilizada

### 3.1.2. Solo Argiloso

A argila utilizada neste trabalho é um solo maduro, coluvionar, argilo-arenoso, não saturado (Soares, 2005). Este foi coletado no Campo Experimental II, localizado no interior do campus da Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, conforme o esquema mostrado na Figura 3.2. O material foi retirado entre 0,0 m e 2,00 m de profundidade, desde a superfície da encosta.

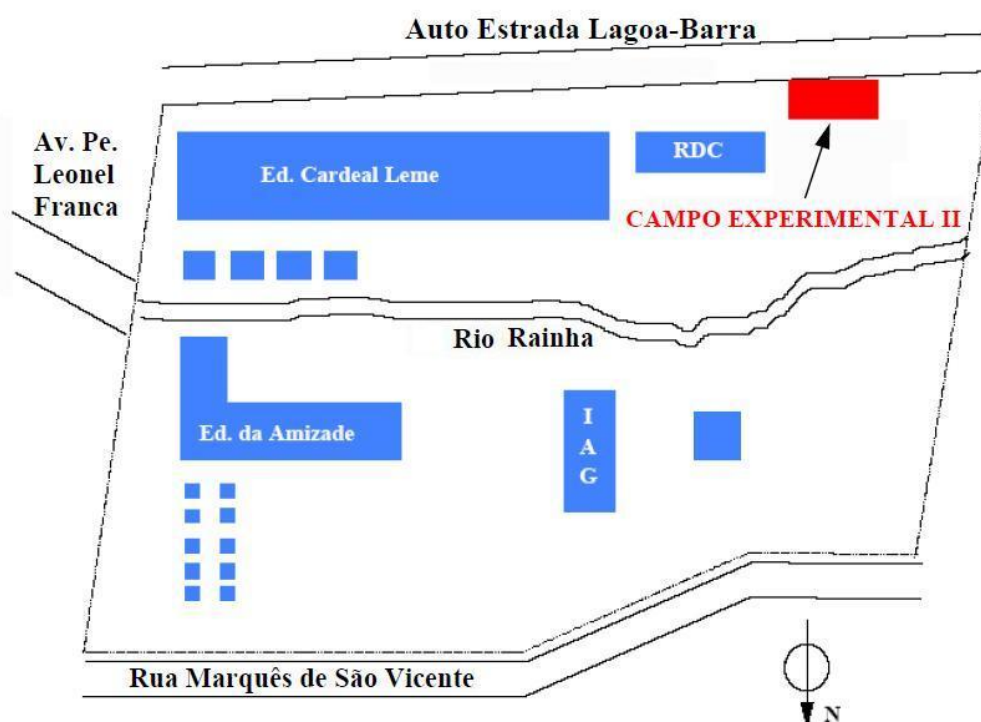


Figura 3.2 - Localização do Campo Experimental II PUC-Rio (Soares 2005).

Este solo possui características de tonalidade vermelha amarelada, textura micro-granular e com aspecto homogêneo, sendo constituído basicamente por quartzo, granada alterada, argilominerais (essencialmente caulinita) e óxidos de ferro e alumínio, como produto do intemperismo dos minerais primários da biotita gnaiss (Soares, 2005). A Figura 3.3 apresenta uma foto do solo residual utilizado.

As características geotécnicas físicas deste material, como a granulometria, os limites líquido e plástico e o peso específico ( $G_s$ ) são apresentadas e analisadas no item 4.1.

O material foi retirado manualmente e depositado em baldes cilíndricos de plástico, em um dia ensolarado. Aproximadamente 100 kg deste solo foram levados para o laboratório e colocados na estufa a 60 °C. Depois de atingir uma umidade constante, foi colocado em sacolas de plástico lacradas e guardado na câmara úmida.

Este tipo de solo já foi utilizado anteriormente em outras pesquisas desenvolvidas na PUC-Rio e na COPPE/UFRJ. Sertã (1986) fez um estudo dos aspectos geológicos e geotécnicos do solo residual do Campo Experimental II, deixando um amplo conhecimento das suas características. Outros autores como Marinho (1986), Lins (1991), Daylac (1994), Beneveli (2002) e Soares (2005) utilizaram este solo para realizar ensaios especiais e testar equipamentos desenvolvidos na PUC-Rio. A grande quantidade de informação disponível foi um dos motivos pelos quais foi escolhido este material para a presente pesquisa, além da localização e do fácil acesso.



Figura 3.3 – Argila utilizada - solo residual maduro

Segundo o perfil morfológico feito por Dylac (1994) apresentado na Figura 3.4, o solo utilizado está situado na camada superior do perfil, conformada por colúvio. No lugar da coleta, se observou presença de alguns pedregulhos de quartzo. Durante o processo de preparação do solo para os ensaios (destorroamento), se retiraram as raízes presentes no material.

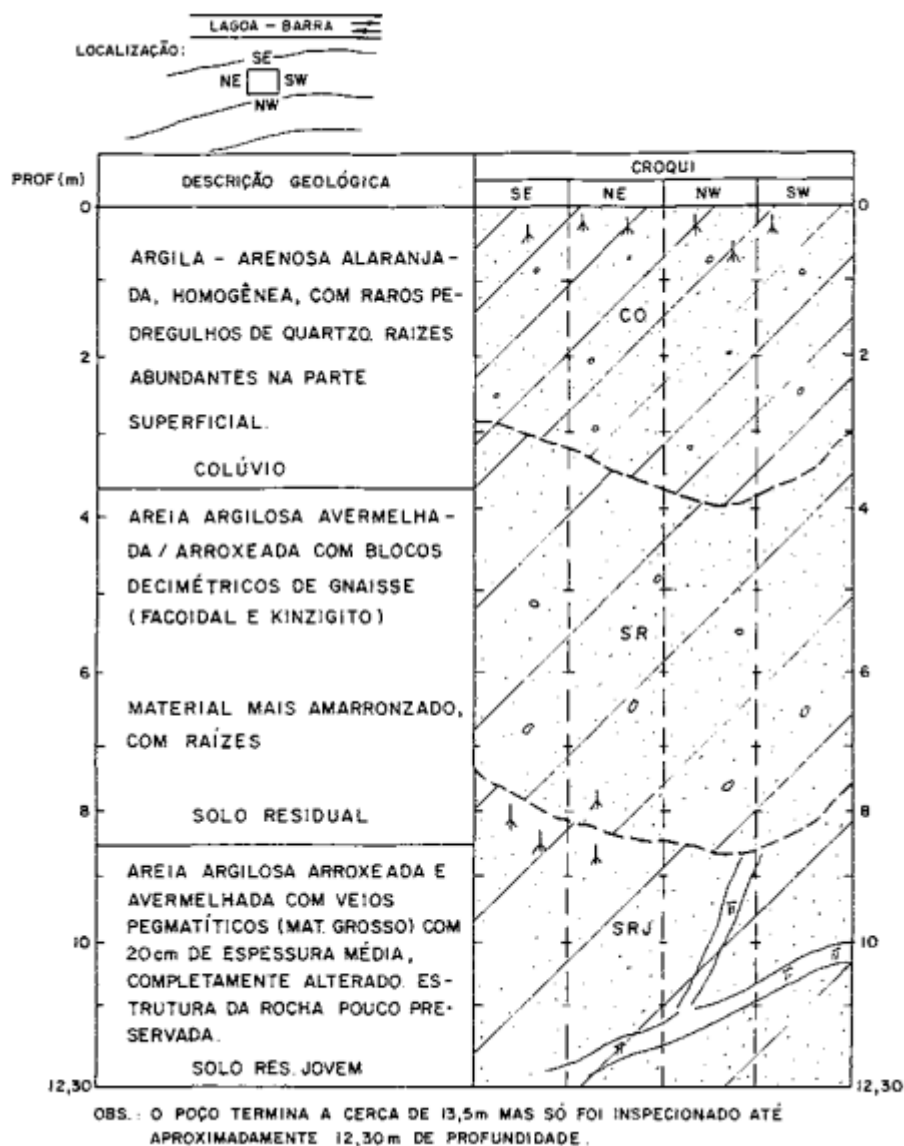


Figura 3.4 - Descrição morfológica do perfil do Campo Experimental II da PUC-Rio (Dylac, 1994)

Sertã (1986) fez uma análise mineralógica do solo presente no Campo Experimental II. A Tabela 3.1, elaborada por Dylac (1994), resume os resultados obtidos por Sertã para amostras retiradas entre 3,00 m e 3,50 m de profundidade. A presença imperante de certos minerais como a caulinita, a gibsitita e a goetita, e o perfil morfológico apresentado anteriormente sugerem que o solo tem um alto grau de intemperismo.

Tabela 3.1 - Análise mineralógica (Sertã, 1986)

Fração do solo	Mineral	Quantidade / observações
Pedregulho	Quartzo	grãos arestados de coloração transparente a leitosos
	Granada alterada	alguns fragmentos
Areia	Quartzo	grãos arestados
	Granda muito alterada	correspondem a aproximadamente 5% da amostra total
	Agregados Ferruginosos	
	Magnetita	pequenos traços
Silte	Quartzo	presença
	Caulinita	presença
	Goetita	presença
Argila	Caulinita	presença marcante
	Goetita	alguns traços



### 3.1.3. Borracha Moída de Pneus

A borracha moída (ou pó de borracha, Figura 3.5) utilizada nesta pesquisa é proveniente da trituração de pneus inservíveis na composição de 50% em peso de veículos de passeio e 50% de pneus de veículos de carga. Este material foi obtido através da empresa de reciclagem de pneus Ecobalbo Reciclagem de Pneus S.A, situada na região de Cravinhos, interior de São Paulo. O pó de borracha de pneu utilizado na presente pesquisa é classificado como “pó de borracha malha 20”, obtido por moagem e selecionado em peneiras apropriadas (Szeliga, 2011), sendo este preto, com um diâmetro médio de 1,0 mm, variando de 0,2 mm a 2,0 mm. A curva granulométrica deste material é apresentada no item 4.1.3, bem como as características físicas da areia e da argila.



Figura 3.5 - Borracha moída utilizada

#### **3.1.4. Água**

A água utilizada na preparação dos corpos de prova (solo puro e misturas) para os ensaios triaxiais e ensaios de compactação com o solo residual foi proveniente da rede pública de abastecimento da cidade do Rio de Janeiro. Nos ensaios de caracterização física foi utilizada água destilada.

#### **3.1.5. Mistura Solo-Borracha**

Utilizando-se cada tipo de solo foram preparadas misturas com diferentes teores de borracha, com o objetivo de determinar o teor ótimo para a inserção deste material como reforço. As misturas utilizadas com o solo argiloso foram 5%, 10%, 20%, 30% e 40% de borracha moída de pneu, calculados em relação ao peso do solo seco. No caso do solo arenoso, foram preparadas duas misturas, com 5% e 10% de borracha moída em relação ao peso do solo seco. A escolha destes teores foi feita com o intuito de se analisar a evolução ou retrocesso da melhoria dos parâmetros de resistência de cada tipo de solo e misturas, a fim de se estabelecer uma melhoria máxima com o maior volume de resíduo, já que, um dos objetivos do uso deste material como reforço, é dar uma destinação ambientalmente correta para a maior quantidade possível.

A borracha moída de pneu, utilizada em cada mistura, foi calculada em relação ao peso total do solo seco. A água foi adicionada em função da umidade ótima obtida nos ensaio de Compactação Proctor Normal no caso do solo argiloso, e no caso do solo arenoso, as misturas eram preparadas com umidade de 10% (teor ótimo utilizados por Casagrande, 2005).

Na Tabela 3.2 são apresentadas as siglas utilizadas para identificar cada tipo de solo e as misturas.

Tabela 3.2 - Símbolos utilizados para os solos e misturas

Material / Mistura	Solo (%)	Borracha Moída (%)	Símbolo
Solo Argiloso	100	0	S100
Mistura 1	95	5	S95/B5
Mistura 2	90	10	S90/B10
Mistura 3	80	20	S80/B20
Mistura 4	70	30	S70/B30
Mistura 5	60	40	S60/B40
Solo Arenoso	100	0	A100
Mistura 6	95	5	A95/B5
Mistura 7	90	10	A90/B10

### 3.2. Métodos e Procedimentos de Ensaio

#### 3.2.1. Ensaio de Caracterização Física

Com o fim de se determinar as propriedades índice das amostras de solo argiloso proveniente do Campo Experimental II do campus da PUC-Rio foram executados ensaios de caracterização física no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. O solo foi preparado segundo o normatizado nas normas técnicas brasileiras (Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT). As características físicas do solo arenoso são apresentadas no item 4.1.2, obtidos na pesquisa de Casagrande (2005). Os ensaios realizados seguiram os métodos indicados pelas seguintes normas:

- NBR 6457/1986 – Amostras de Solos – Preparação para ensaios de compactação e caracterização;
- NBR 7181/1984 – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6508/1984 – Solo – Determinação da densidade real dos grãos;
- NBR 6459/1984 – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180/1984 – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade.

### **3.2.1.1.**

#### **Densidade Real dos Grãos**

A densidade real dos grãos, do solo argiloso, foi determinada utilizando o material que passou na peneira #40 (0,425 mm), segundo a norma NBR 6508/1984 da ABNT.

Do material passante da peneira #40, seco em estufa a 105 °C, se utilizou aproximadamente 100 gramas. Posteriormente foram colocados 25 gramas deste material em quatro picnômetros de 250 ml e se cobriu o material dentro dos picnômetros com água destilada. Em seguida procedeu-se à extração do ar contido entre as partículas, utilizando uma bomba de vácuo. Esse procedimento é realizado durante 15 minutos aproximadamente, que é o tempo que demora extrair todo o ar em forma de bolhas. No passo seguinte foram cheios com água destilada os quatro picnômetros e pesados. Os resultados obtidos, para o solo argiloso, nesta pesquisa e em pesquisas anteriores são apresentados no item 4.1.1.1.

### **3.2.1.2.**

#### **Limites de Atterberg**

Os limites de Atterberg, limite de liquidez e limite de plasticidade, foram determinados utilizando-se o material passante na peneira #40 (0,425 mm), segundo as normas NBR 6459/1984 e NBR 7180/1984 da ABNT. Os resultados desta pesquisa e de pesquisas precedentes são apresentados no item 4.1.1.3.

### **3.2.1.3.**

#### **Análise Granulométrica**

Para a determinação da curva granulométrica do solo argiloso, peneirou-se 1000 gramas do material na peneira #40 (0,425 mm), seguindo a norma NBR 7181/1984 da ABNT.

O material retido na peneira foi lavado e posteriormente secado na estufa a 105 °C. Depois de 24 horas se realizou o peneiramento grosso com este material.

Do material passante na peneira #40, utilizou-se 50,39 gramas para a sedimentação, sendo este misturado com 125 ml de uma solução de hexametáfosfato de sódio e deixado em repouso durante 24 horas.

Depois de realizada a sedimentação, todo o material foi lavado na peneira #200 e o retido levado à estufa, para quando seco proceder com o peneiramento fino. Os resultados e a curva granulométrica do solo argiloso são apresentados no item 4.1.1.2.

### **3.2.2.**

#### **Ensaio de Caracterização Mecânica**

##### **3.2.2.1.**

#### **Ensaio de Compactação Proctor Standard**

Os ensaios de compactação foram realizados para o solo argiloso puro e em misturas com 5%, 10%, 20%, 30% e 40% de borracha moída de pneu, com o intuito de se determinar a umidade ótima de compactação ( $w_{ótima}$ ) e o peso específico aparente seco máximo ( $\gamma_{dmáx}$ ) dos materiais. Estes ensaios foram realizados segundo as diretrizes da norma NBR 7182 da ABNT, utilizando-se a energia de compactação Proctor Normal e com reuso de material.

Após secagem do solo em estufa a 60°C, iniciou-se o processo de destorroamento deste, passando-o posteriormente pela peneira #4, adotando-se o procedimento descrito pela norma NBR 6457 (ABNT, 1986) - preparação com secagem prévia até a umidade higroscópica. Em seguida, adicionou-se uma determinada quantidade de água ao material, a fim de que este ficasse com cerca de 5% de umidade abaixo da umidade ótima. Este valor pode ser estimado inicialmente através do limite de plasticidade, cujo valor pode se aproximar ao da umidade ótima. Após mistura do solo argiloso (puro e com as diversas porcentagens de borracha) com o volume de água calculado, homogeneizou-se bem o material.

Após preparação das misturas, colocou-se o material dentro do molde cilíndrico pequeno (cilindro Proctor), de dimensões 10 cm x 12,7 cm (diâmetro x altura). Aplicou-se 26 golpes com um soquete pequeno, de peso igual a 2,5 kg, que se deixa cair na camada de solo a uma altura de 30,5 cm aproximadamente. As porções de solo compactadas devem ocupar cerca de 1/3 da altura total do molde (compactação em três camadas). Para se conseguir uma boa aderência entre as camadas compactadas, escarificou-se bem cada uma delas antes de se compactar a camada sobrejacente. Em geral, depois de completadas as três

camadas, atinge-se uma altura maior que a do molde, o que ocorre devido a utilização de um anel complementar, o qual garante a altura total necessária. Este excesso é removido ao final do ensaio, acertando-se o volume de solo em relação à altura do molde.

Completado o processo de compactação, pesa-se o cilindro juntamente com o solo. Com o peso total do corpo de prova e o volume do cilindro, é possível se calcular seu peso específico úmido. Através da retirada de três amostras do interior do corpo de prova (em sua parte média), determina-se sua umidade média após secagem em estufa. Calcula-se, então, o peso específico seco do material.

Finalizado todo o procedimento, um novo corpo de prova é preparado, com uma quantidade maior de água, aumentando-se a umidade da mistura em aproximadamente 2%. A partir daí, realiza-se uma nova compactação e obtém-se dessa forma um novo par de valores de umidade ( $w$ ) e peso específico seco ( $\gamma_d$ ).

Com todos os pontos obtidos, plota-se um gráfico de peso específico seco versus umidade, tendo-se então a curva de compactação. Os valores de  $w_{ótima}$  e  $\gamma_{dmax}$  obtidos correspondem ao ponto máximo das curvas, e foram utilizados para moldagem dos corpos de prova utilizados nos ensaios triaxiais CID. Todo o processo foi repetido cinco vezes para cada mistura, a fim de se obter cinco pares de valores, sendo ao menos dois no ramo seco e dois no ramo úmido da curva de compactação.

Concluiu-se que todo o processo poderia ser realizado com reuso de material após feito um teste com o solo argiloso puro, compactando-o com e sem reuso, onde a curva de compactação para ambos os casos deram aproximadamente os mesmos resultados. Cabe ressaltar que este ensaio foi realizado somente para o solo argiloso (S100), proveniente do campo experimental da PUC-Rio e as misturas preparadas com este solo.

Os resultados e curvas de compactação são apresentados no item 4.2.1.1.

### **3.2.2.2. Ensaio Triaxiais CID**

Os ensaios triaxiais realizados no presente trabalho são do tipo consolidado isotropicamente e drenado durante a fase de cisalhamento (CID). Todos os ensaios

foram executados no Laboratório de Geotecnia e Meio Ambiente da PUC-Rio. Descreve-se a seguir os equipamentos utilizados nestes ensaios, bem como as metodologias empregadas, na preparação dos corpos de prova, processo de saturação e cisalhamento.

#### **3.2.2.2.1.**

##### **Equipamento utilizado**

A três prensas utilizadas são da marca Wykeham-Ferrance, de velocidade de deslocamento controlada, com capacidade de 10 toneladas. O ajuste das velocidades de deslocamento do pistão é determinado mediante a seleção adequada de pares de engrenagens e a respectiva marcha.

As câmaras triaxiais empregadas são próprias para corpos de prova com diâmetro de 1,5". Possuem um corpo de acrílico que suporta uma pressão confinante máxima de 1000 kPa.

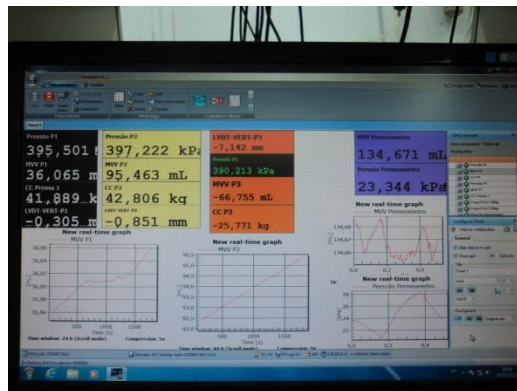
As células de carga utilizadas são do fabricante ELE International Ltd., com capacidade máxima de 5000 kN e precisão de 0,1 kN. Para a obtenção dos deslocamentos foram utilizados LSCDT's da marca Wykeham Farrance, com cursos de 25 mm e resolução de precisão de 0,01 mm. Os transdutores usados na medida das pressões na câmara, no medidor de variação de volume e das poropressões são da marca Schaevitz, com variações de  $\pm 2,0$  kPa e capacidade máxima de 1700 kPa.

As variações de volume são obtidas através de medidores de variação volumétrica (MVV), fabricados na PUC-Rio, segundo o modelo do Imperial College (Figura 3.6).

Para a gravação dos dados, obtidos por intermédio dos transdutores, foi utilizado o sistema de aquisição de dados composto pelo hardware QuantumX de oito canais da empresa alemã HBM e pelo software CatmanEasy (Figura 3.7.) Assim, se conseguiu monitorar continuamente a informação do comportamento dos corpos de prova durante todo o ensaio.



Figura 3.6 - Medidor de Variação de Volume tipo Imperial College



(a)



(b)

Figura 3.7 – (a) Software CatmanEasy; (b) Sistema de aquisição de dados.



### 3.2.2.2.

#### Preparação dos corpos de prova do solo argiloso

Para a confecção dos corpos de prova do solo argiloso puro e as misturas deste com os diversos teores de borracha, inicialmente compactou-se um corpo cilíndrico, na energia Proctor Normal, utilizando a umidade ótima e peso específico seco máximo obtido para cada tipo de mistura e o solo puro (descrição apresentada no item 3.2.2.1). Obtido o material compactado (Figura 3.8), molda-se o corpo de prova utilizando um aparelho de fabricação própria do laboratório (Figura 3.9). As dimensões dos corpos de prova de solo argiloso e misturas foram 7,82 cm de altura e 3,80 cm de diâmetro.



Figura 3.8 - Corpo cilíndrico compactado



Figura 3.9 - Corpo de prova após moldagem

#### **3.2.2.2.3.**

##### **Preparação dos corpos de prova do solo arenoso**

A confecção dos corpos de prova do solo arenoso puro (A100) e misturas deste com os diversos teores de borracha moída, foi realizado por compactação, diretamente num molde cilíndrico tripartido (Figura 3.10). Esta compactação foi realizada manualmente em oito camadas. Tanto na areia pura como nas misturas, a umidade e peso específico adotados foram de 10% e  $1,50 \text{ gr/cm}^3$ , respectivamente. Estes valores correspondem a uma densidade relativa de 50% e índice de vazios de 0,75. Os parâmetros de compactação mencionados anteriormente foram os mesmos adotados por Casagrande (2005), que realizou ensaios triaxiais e ring shear com esta areia.

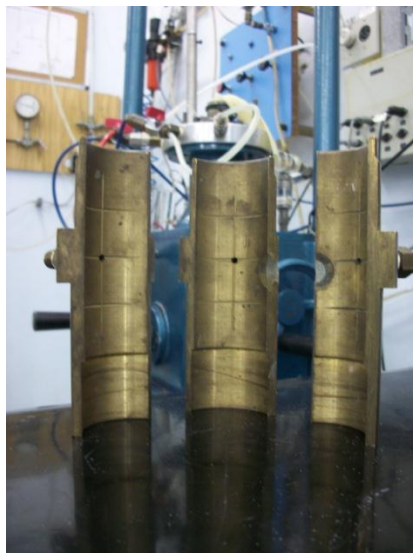


Figura 3.10 - Molde tripartido

A seguir detalha-se passo a passo a montagem dos corpos de prova de areia pura A100 e misturas:

- Antes da montagem de cada corpo de prova se calculou a quantidade (peso com umidade 10%) de areia pura ou mistura necessária para preencher o molde cilíndrico e obter os parâmetros de compactação indicados no parágrafo anterior;
- A montagem se inicia colocando a membrana na base, onde descansa o corpo de prova e segurando-a com os o-rings (Figura 3.11);

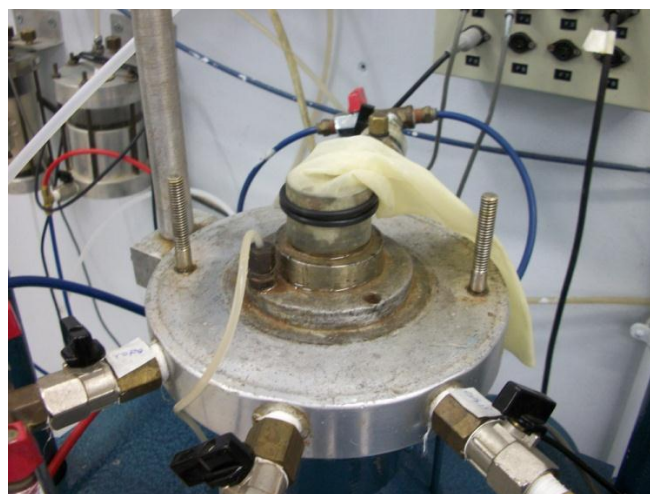


Figura 3.11 - Membrana e o-rings na base

- Seguidamente se coloca o molde tripartido, o qual se segura com uma abraçadeira metálica (Figura 3.12 e Figura 3.13);



Figura 3.12 - Tripartido e membrana no interior



Figura 3.13 - Tripartido fixo

- Depois se colocam os o-rings na parte superior do molde tripartido, se vedam as juntas com uma fita cinza, para deixar isolada a parte interna entre a membrana e o molde tripartido. Também se vedam dois dos três furos de acesso ao interior do molde. Finalmente a membrana é acomodada adequadamente (Figura 3.14);





Figura 3.14 - Molde vedado e membrana acomodada

- Instala-se uma mangueira para conectar a bomba com o espaço que há entre a membrana e a molde tripartido (Figura 3.15);



Figura 3.15 - Bomba instalada

- A bomba é ligada para exercer sucção à membrana e esta se cole contra as paredes do tripartido. Seguidamente se coloca o papel filtro sobre a pedra porosa da base (Figura 3.16);

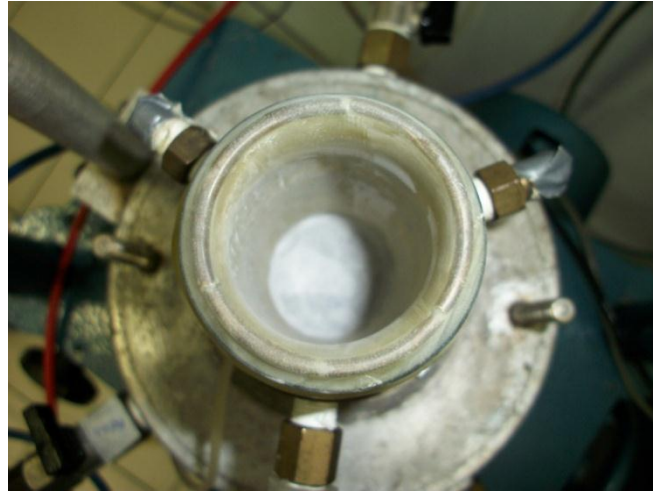


Figura 3.16 - Membrana colada na parede interior do molde

- Logo depois, ainda com a bomba aplicando sucção se coloca o material dentro do molde (Figura 3.17 e Figura 3.18);

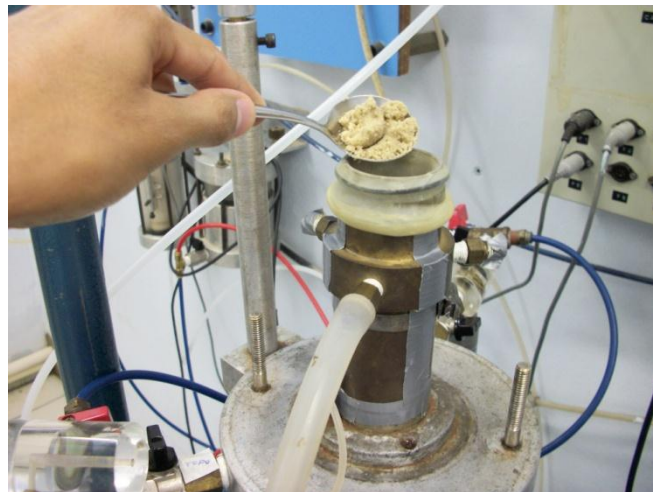


Figura 3.17 - Areia colocada dentro do molde

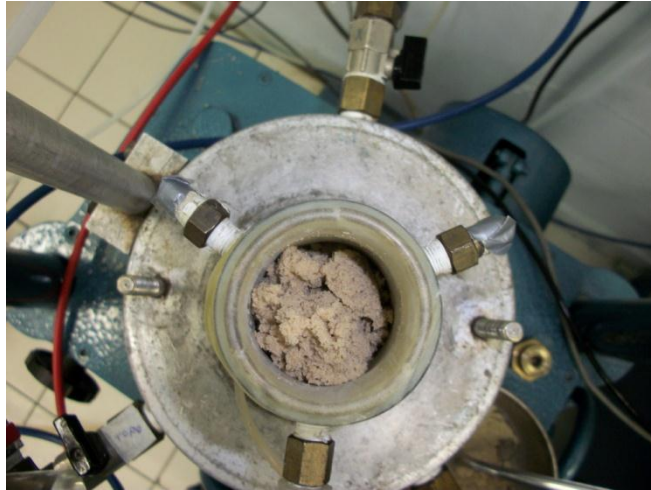


Figura 3.18 - Areia dentro do molde

- Foram usadas aproximadamente oito camadas, compactadas manualmente, para preencher o molde até o nível necessário para colocar a pedra porosa e completar a altura do molde (Figura 3.19 e Figura 3.20);



Figura 3.19 - Compactação da areia



Figura 3.20 – Molde preenchido com a areia

- Em seguida se coloca o papel filtro, a pedra porosa e o *cap* na parte superior do corpo de prova. A membrana se acomoda ao redor do *cap* e se fixa com os o-rings (Figura 3.21);



Figura 3.21 - *Cap* instalado

- Desmontam-se todos os elementos utilizados para moldar o corpo de prova e se acomoda a membrana cobrindo os o-rings da parte superior e inferior (Figura 3.22);





Figura 3.22 - Corpo de prova montado

- Finalmente se coloca a câmara triaxial e se inicia com o enchimento de água destilada (Figura 3.23).



Figura 3.23 - Corpo de prova dentro da câmara triaxial

#### **3.2.2.2.4.**

##### **Procedimento de saturação dos corpos de prova**

As técnicas de saturação utilizadas, quanto para os corpos de prova de argila como de areia e misturas, foram de saturação por percolação de água através da amostra e de saturação por contrapressão. No caso da percolação a diferença da contrapressão entre o topo e a base do corpo de prova foi de 5 kPa, sendo que a água fluía da base para o topo do corpo de prova. Na saturação por contrapressão

a pressão confinante, aplicada ao corpo de prova, excedia a contrapressão em 10 kPa, onde o fluxo de água era permitido pelo topo e base.

Para verificar se o grau de saturação era satisfatório, calculava-se o parâmetro B de Skempton, sendo:

$$B = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_c} \quad \text{Equação 1}$$

onde:

$\Delta u$ : excesso de poropressão gerado,

$\Delta \sigma_c$ : acréscimo de tensão confinante aplicado.

Para as amostras elaboradas com argila foram considerados aceitáveis valores de B maiores ou iguais a 0,97.

Para os corpos de prova confeccionados com areia os valores de parâmetro B aceitáveis foram entre 0,83 e 0,86. Sendo que a obtenção de valores do parâmetro B de Skempton maiores que 0,90 implicava que o processo de saturação, por percolação, tivesse uma duração de quatro dias. Além de medir o parâmetro B era monitorada a quantidade de água que percolava através da amostra, considerando-se saturada quando se atingia um volume percolado de duas vezes o volume de vazios do corpo de prova.

### 3.2.2.2.5.

#### **Cálculo da velocidade de cisalhamento**

Após a saturação do corpo de prova, iniciava-se a fase de adensamento isotrópico. Durante 24 horas coletavam-se dados de variação de volume.

Com estes dados se traçava o gráfico variação volumétrica (ml) x raiz do tempo ( $\text{min}^{0,5}$ ). Segundo a recomendação de Head (1986), prolongava-se o trecho retilíneo inicial até encontrar a prolongação horizontal do trecho final. Este último trecho corresponde à estabilização das variações de volume. O ponto de interseção destas duas linhas prolongadas fornecia a raiz de  $t_{100}$  ( $\text{min}^{0,5}$ ) no eixo das abscissas. Logo com o valor de  $t_{100}$  (min) se calculava a velocidade de cisalhamento.

Neste caso, como os ensaios triaxiais foram drenados, a expressão utilizada proposta por Head, 1986) foi a seguinte:

$$v = \frac{\epsilon_f . L}{100 . t_f} \quad \text{Equação 2}$$

onde:

v: velocidade máxima de cisalhamento em mm/min,

L: altura do corpo de prova em mm,

$\epsilon_f$ : deformação axial estimada na ruptura em %,

$t_f$ : tempo mínimo de ruptura em minutos.

O valor de  $t_f$  para este tipo de ensaio triaxial (CID – sem drenagem radial) é de 8,5 vezes o valor de  $t_{100}$ . Contudo, o Head (1986) propõe um valor mínimo para  $t_f$  de 120 min.

O objetivo de definir uma velocidade suficientemente lenta para a aplicação da compressão axial é permitir a total drenagem da água do corpo de prova sem gerar excesso de poropressão.

Todos os valores obtidos de  $t_f$ , para os corpos de prova de solo argiloso, de areia e das misturas, foram menores que 120 minutos. Por tanto se adotou  $t_f = 120$  minutos. Para os corpos de prova elaborados com o solo argiloso e misturas argila-borracha se definiu que a ruptura ocorreria para uma deformação axial de 5%. Assim, a velocidade máxima (v) calculada foi a mesma para todos os ensaios (0,033 mm/min), sendo a velocidade adotada igual a 0,030 mm/min. Para os corpos de prova elaborados com a areia se admitiu que a ruptura ocorreria para uma deformação axial de 3%. Desta forma, a velocidade máxima obtida foi igual para todos os ensaios (0,022 mm/min). Neste caso para as amostras de areia e misturas areia-borracha se adotou 0,020 mm/min como velocidade de cisalhamento.

### 3.2.2.2.6. Cisalhamento

Com a velocidade de cisalhamento definida, procedia-se à colocação na prensa de um par de engrenagens com a respectiva marcha, a qual define a velocidade desejada. Os corpos de prova de solo argiloso e misturas foram levados até uma deformação axial de 28 %, extrapolando as curvas até a deformação de 30 %. A extrapolação foi realizada com o software MATLAB. Para a extrapolação foram usados os valores correspondentes aos últimos 4% de distorção da amostra. Desta forma era continuada a tendência final da curva tensão-deformação. Por outro lado, as amostras de areia pura (A100), foram levadas até uma deformação axial de 8%. E aquelas feitas com a mistura, areia mais borracha, até uma deformação axial de 18%. Para os ensaios triaxiais, os variantes de tensão  $q$  (tensão de desvio) e  $p'$  (tensão efetiva média normal) foram calculados com as formulações de Lambe, para os parâmetros de resistência do solo utilizou-se os valores da envoltória de resistência ( $\alpha'$ ) e da coesão ( $a'$ ) obtida no espaço  $p':q$  para calcular os parâmetros de resistência no espaço Mohr Coulomb ( $\phi' - c'$ ). As formulações de Lambe e os parâmetros que são apresentados nos gráficos dos resultados definem-se como:

$$q = \frac{(\sigma'_1 - \sigma'_3)}{2} \quad \text{Equação 3}$$

$$p' = \frac{(\sigma'_1 + \sigma'_3)}{2} \quad \text{Equação 4}$$

$$\tan(\alpha') = \text{sen}(\phi') \quad \text{Equação 5}$$

$$a' = c' \cdot \cos(\phi') \quad \text{Equação 6}$$

Onde:  $\alpha'$ : inclinação da envoltória de resistência no espaço  $p':q$ .

$a'$ : intercepto com o eixo  $q$  da envoltória de resistência no espaço  $p':q$ .

$\phi'$ : inclinação da envoltória de resistência do espaço  $\sigma:\tau$  (Mohr Coulomb).

$c'$ : intercepto da envoltória de resistência do espaço  $\sigma:\tau$  (Mohr Coulomb).

## **4**

## **Resultados e Análises**

### **4.1.**

### **Ensaio de Caracterização Física**

#### **4.1.1.**

#### **Solo Argiloso**

##### **4.1.1.1.**

##### **Peso Específico (Gs)**

O valor do Gs para o solo argiloso foi obtido através da média aritmética de quatro determinações, sendo que a variação máxima foi de 1,1 %. O valor do Gs foi 2,72. O solo do Campo Experimental II da PUC-Rio, já foi objeto de pesquisas anteriores, sendo que os valores de Gs obtidos para amostras retiradas a diferentes profundidades estão na mesma ordem de grandeza que o obtido neste trabalho (Tabela 4.1).

##### **4.1.1.2.**

##### **Análise Granulométrica**

O ensaio de análise granulométrica do solo argiloso forneceu um comportamento comparável com o obtido em pesquisas precedentes. Assim, para amostras situadas em profundidades parecidas as porcentagens de material passantes na peneira #200 e retidas nesta, são parecidas. Na Tabela 4.1 apresenta-se um resumo da distribuição granulométrica obtida em pesquisas anteriores e na presente pesquisa. A curva granulométrica do solo argiloso utilizado neste trabalho se apresenta na Figura 4.1.

Tabela 4.1 - Caracterização Física do solo residual maduro do Campo  
Experimental II da PUC-Rio

Autor	Prof. (m)	Gs	Ped. + Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	LL	LP	IP	SUCS
Sertã (1986)	1.00 - 1.45	2.75	26.25	73.75		71	35	36	MH
	2.00 - 2.45	2.73	28.13	71.87		75	49	26	MH
	3.00 - 3.45	2.74	45.63	54.37		72	45	27	MH
Marinho (1986)	3.60	2.75	35.00	3.00	62.00	65	38	27	MH
Lins (1991)	2.00 - 2.40	2.74	34.00	4.00	62.00	78	32	46	MH
	3.00 - 3.40	2.74	34.00	4.00	62.00	73	34	39	MH
Dylac (1994)	3.00	2.77	24.00	5.00	71.00	70	30	40	MH
	6.00	2.76	31.00	6.00	63.00	82	43	39	MH
Beneveli (2002)	1.50	2.76	33.00	9.00	59.00	56	31	25	CH
Soares (2005)	1.00	2.74	41.00	5.50	53.50	54	28	26	CH
<b>Duran (2012)</b>	<b>2.00</b>	<b>2.72</b>	<b>36.40</b>	<b>10.80</b>	<b>52.70</b>	<b>53</b>	<b>39</b>	<b>14</b>	<b>CH</b>

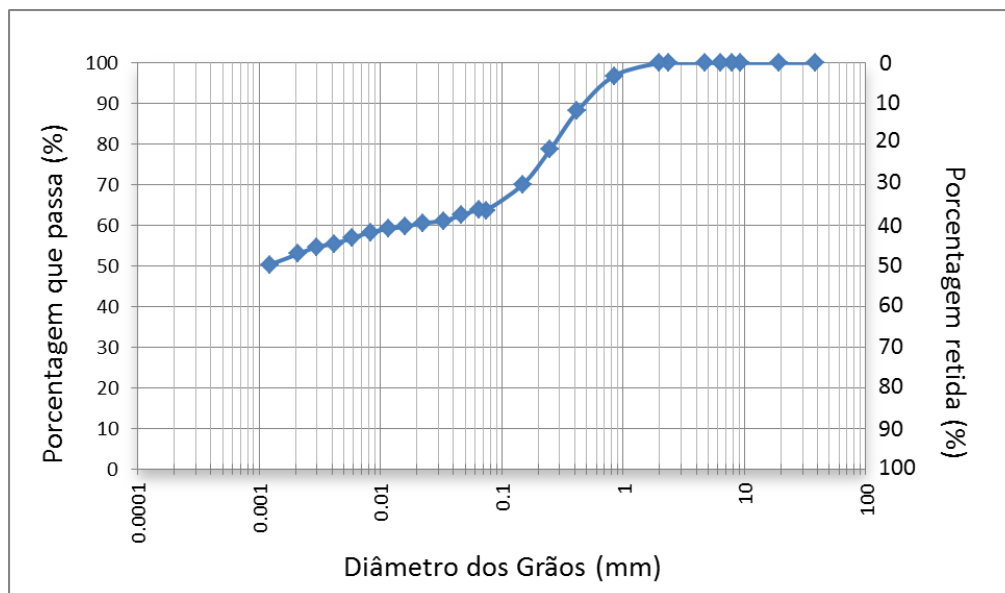


Figura 4.1 - Distribuição granulométrica do solo argiloso

#### **4.1.1.3. Limites de Atterberg**

Através dos resultados obtidos no laboratório, tem-se que o Limite de Liquidez do solo argiloso é igual a 53% e o Limite de Plasticidade igual a 39%, resultando em um Índice de Plasticidade ( $IP = LL - LP$ ), igual a 14%. Segundo o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), o solo em estudo é classificado como CH, correspondendo a uma argila arenosa de média plasticidade. Na Tabela 4.1 se observa os limites de Atterberg obtidos para amostras de outras profundidades e a diferença na classificação, com exceção de Beneveli (2002) e Soares (2005) que usaram material de entre 1,00 e 2,00 metros de profundidade.

#### **4.1.2. Solo Arenoso**

##### **4.1.2.1. Índices Físicos**

A caracterização física do solo arenoso utilizado no presente estudo foi obtida por Casagrande (2005), que utilizou o mesmo em sua pesquisa. Segundo a autora, este material caracteriza-se por ser uma areia fina, limpa e de granulometria uniforme. De acordo com Spinelli (1999 *apud* Casagrande, 2005), o material apresenta o mineral quartzo em 99% de sua composição mineralógica, sendo o restante composto por glauconita, ilmenita, turmalina e magnetita. Durante a caracterização do material não se observou a presença de matéria orgânica (Szeliga, 2011). Os índices físicos do material são apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 - Índices físicos do solo arenoso. Fonte: Casagrande (2005).

Índices Físicos	Solo Arenoso
Densidade real dos grãos ( $G_s$ )	2,63
Coefficiente de uniformidade ( $C_u$ )	2,1
Coefficiente de curvatura ( $C_c$ )	1,0
Diâmetro efetivo ( $D_{10}$ )	0,09 mm
Diâmetro médio ( $D_{50}$ )	0,16 mm
Índice de vazios ( $e_{\text{mínimo}}$ )	0,6
Índice de vazios ( $e_{\text{máximo}}$ )	0,9

#### 4.1.2.2. Análise Granulométrica

Na Figura 4.2 se apresenta a curva granulométrica obtida para o solo puro. De acordo com o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS), as areias com menos de 5% de finos, apresentando  $C_u < 6$  e  $1 < C_c < 3$ , como o material em questão, são classificadas como SP, se tratando então de uma Areia mal-graduada.

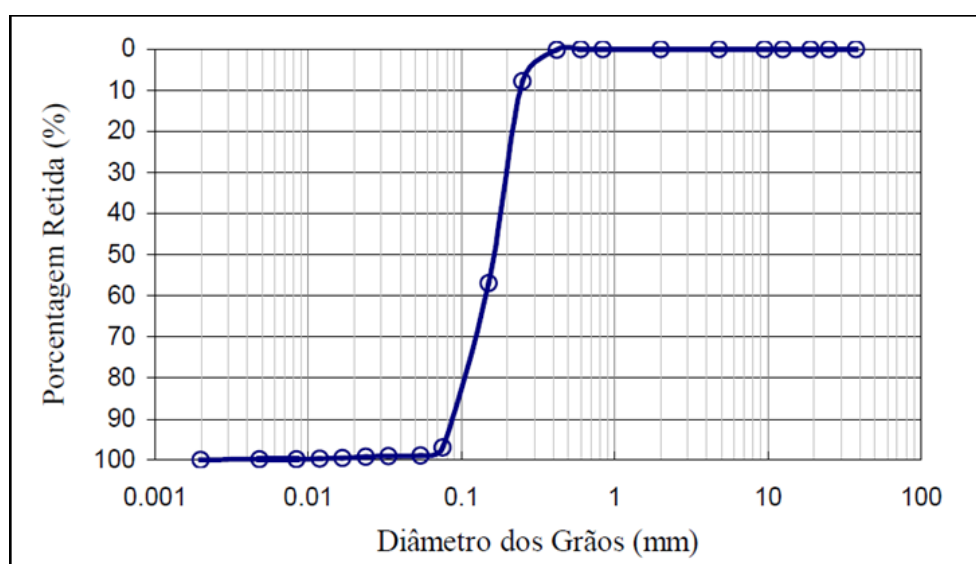


Figura 4.2 - Curva granulométrica do solo arenoso (Casagrande, 2005)



### **4.1.3. Borracha**

#### **4.1.3.1. Peso Específico (Gs)**

De acordo como Venkatappa & Dutta, 2006; Ahmed, 1993; Edil & Bosscher, 1994; Foose *et al.*, 1996), o peso específico de tiras de pneus varia entre 1,02 e 1,26, dependendo da quantidade de resíduo de aço presente no material. Para borracha com conteúdo de metal, tem-se um valor médio igual a aproximadamente 1,22, e para o material puro, este se aproxima de 1,15 (Szeliga, 2011).

Yang *et al.* (2002) realizou ensaios para determinar o peso específico de partículas de borracha que possuíam tamanho entre 2,0 e 10,0 mm, sendo 1,15 o valor médio.

Wu *et al.* (1997) utilizou partículas de borracha de diferentes tamanhos para determinar a resistência ao cisalhamento através de ensaios triaxiais. Para as partículas de borracha de tamanho máximo 2,0 mm (da empresa The Baker Rubber Co) o peso específico foi de 1,12.

Os valores do peso específico das partículas de borracha apresentados por estes autores se situam dentro de um pequeno intervalo, sendo a variação máxima para a borracha pura de 0,03.

Devido ao tamanho máximo da borracha moída utilizada neste trabalho ser 2,0 mm, o valor do peso específico adotado foi 1,12.

#### **4.1.3.2. Análise Granulométrica**

A Figura 4.3 apresenta a curva granulométrica da borracha moída obtida por Szeliga (2011). Assim, 81,1% tem tamanho de areia grossa, 16,5% de areia média e 2,2% de areia fina, sendo que somente 0,2% do material possui tamanho de pedregulho. Observa-se uma predominância de partículas correspondentes ao tamanho da fração areia de solos, confirmando a aparência granular do material.

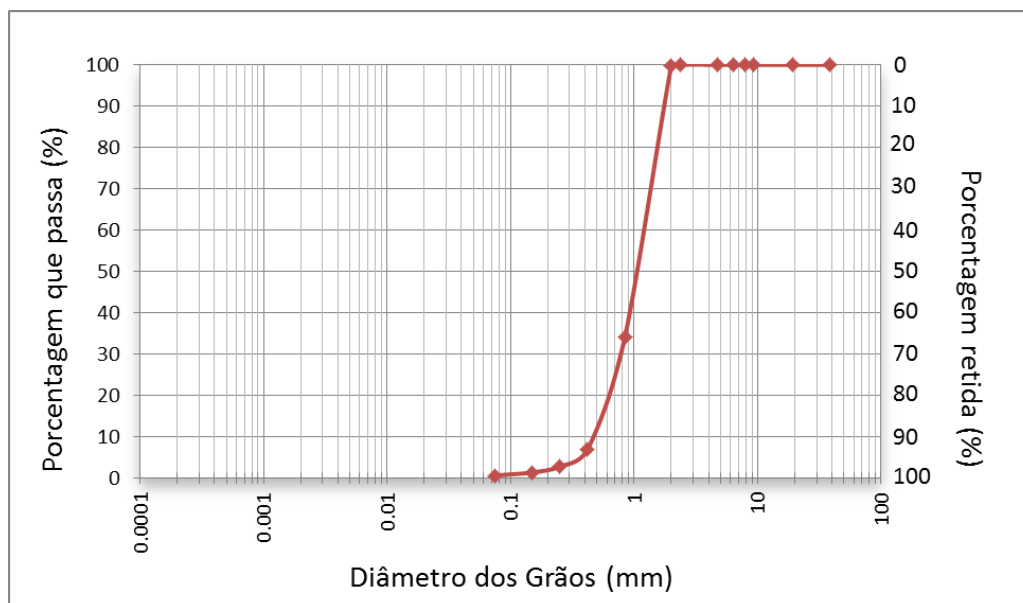


Figura 4.3 - Curva granulométrica da borracha moída

Na Figura 4.4 se apresentam a comparação das curvas granulométricas dos três materiais usados nesta pesquisa.

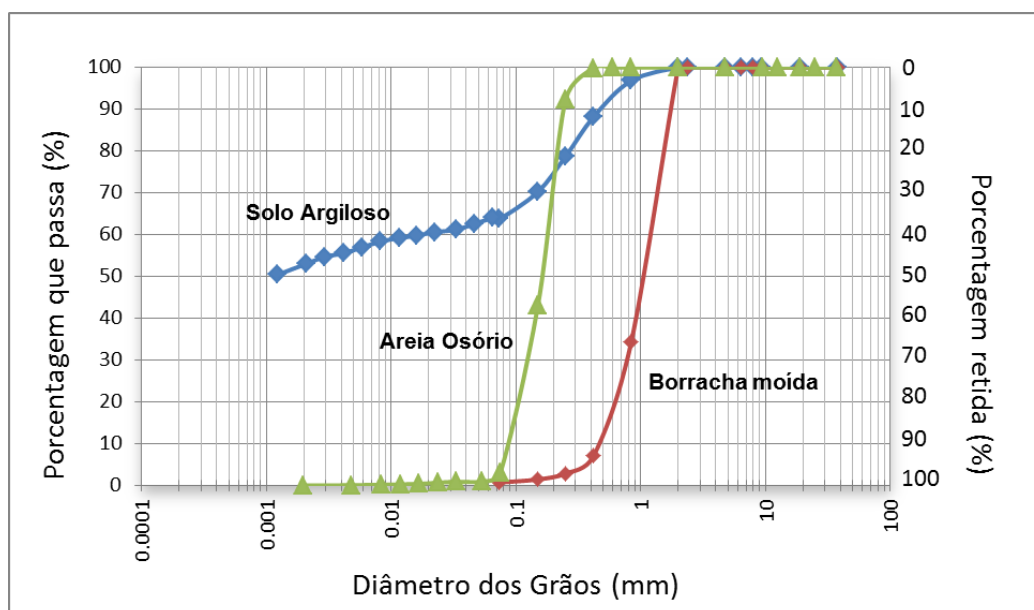


Figura 4.4 - Curvas granulométricas comparadas dos materiais usados na presente pesquisa.

## 4.2. Ensaio de Caracterização Mecânica

### 4.2.1. Solo Argiloso

#### 4.2.1.1. Ensaio de Compactação Proctor Normal

Na Figura 4.5, apresentam-se as curvas de compactação Proctor Normal obtidas para o solo argiloso e misturas. Pode-se observar que a inserção da borracha diminui o peso específico seco máximo do material, e que esse valor decresce à medida que o teor de borracha das misturas aumenta. A umidade ótima possui o mesmo comportamento. Este comportamento em misturas de solo argiloso e tiras de borracha já foi registrado em pesquisas anteriores por Al-Tabbaa *et al.* (1997), Cetin *et al.* (2006), Özkul *et al.* (2007) e Attom *et al.* (2007).

Na Tabela 4.3 apresenta-se um resumo dos valores de umidades ótimas ( $w_{ót}$ ) e pesos específicos secos máximos ( $\gamma_{dmáx}$ ).

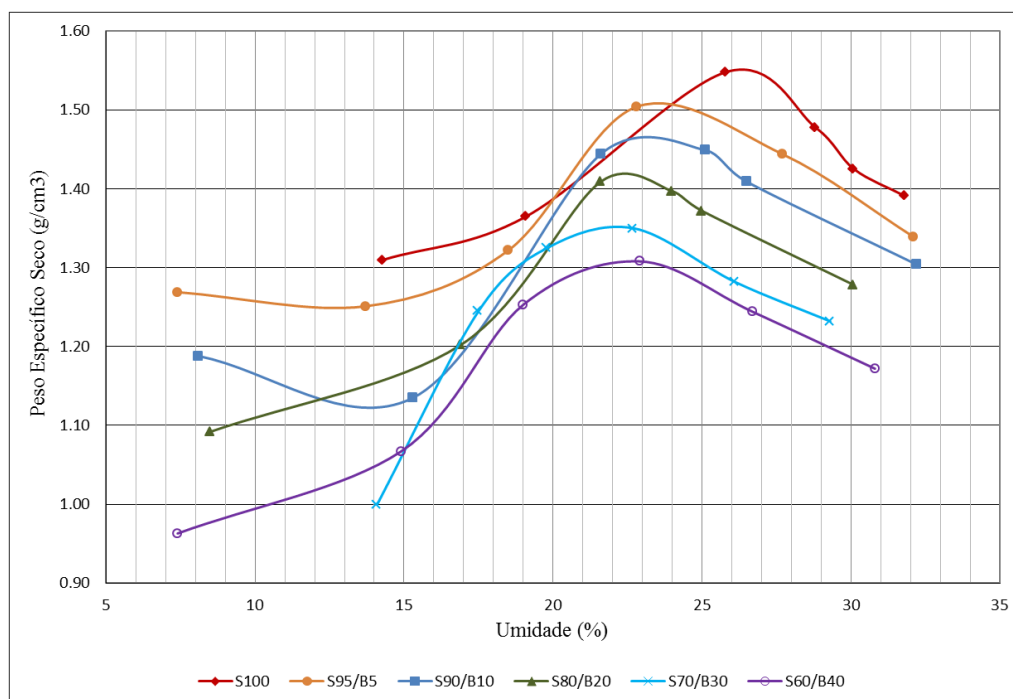


Figura 4.5 - Curvas de compactação Proctor Normal do solo argiloso e misturas.

Tabela 4.3 - Resultados dos ensaios de compactação Proctor Normal para o solo argiloso e misturas.

Material/Mistura	$W_{ót}$ (%)	$\gamma_{dmáx}$ (g/cm <sup>3</sup> )
S100	26,3	1,555
S95/B5	23,5	1,509
S90/B10	23,1	1,467
S80/B20	22,5	1,420
S70/B30	22,0	1,343
S60/B40	22,3	1,310

Nas curvas de compactação obtidas para o solo argiloso e misturas, pode-se observar que o peso específico seco tem uma queda ou modifica-se a tendência a crescer para umidades menores a 20%. Contudo, esta característica já foi registrada por Beneveli (2002), confirmando que este é um comportamento deste material, o qual foi extraído entre os primeiro dois metros de profundidade do Campo Experimental II da PUC-Rio. A Figura 4.6 apresenta a curva de compactação obtida por Beneveli.

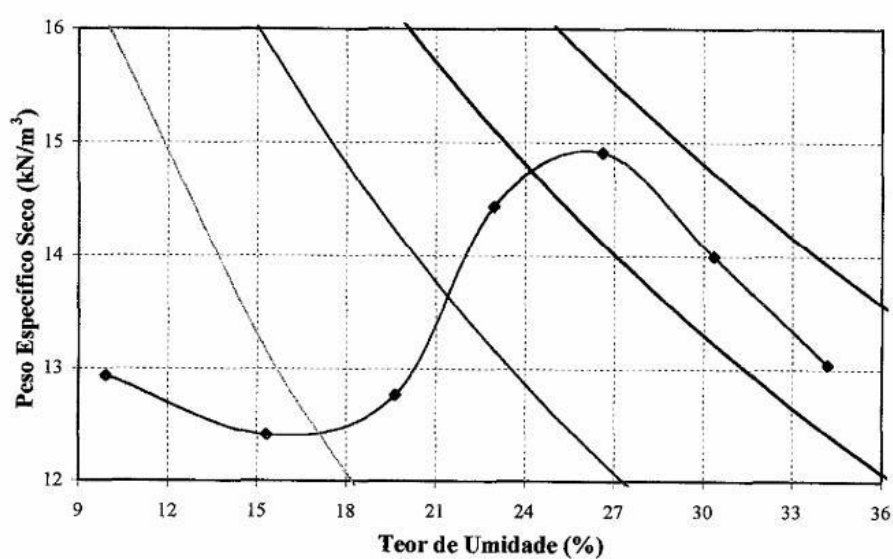


Figura 4.6 - Curva de compactação Proctor Normal (Beneveli, 2002)

#### **4.2.1.2. Ensaio Triaxiais CID**

Este item abrange os resultados dos ensaios triaxiais CID, em compressão axial, executados em amostras do solo argiloso (S100) e misturas com teores de borracha de 5%, 10%, 20%, 30% e 40% em relação ao peso do solo seco. Foram aplicadas tensões efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa em todos os casos. As trajetórias, envoltórias de resistência e os parâmetros de resistência ao cisalhamento são apresentados neste item.

Apresenta-se também uma análise da influência da tensão de confinamento e do teor de borracha no comportamento das amostras durante o cisalhamento.

São apresentadas também as fotografias dos corpos de prova ao final do cisalhamento de solo argiloso e das misturas para os diferentes níveis de tensões. O corpo de prova da mistura S90B10 ensaiada em 50 kPa de tensão confinante não foi colocado devido a que o corpo de prova se deteriorou durante o desmontagem. Os corpos de prova da mistura S60B40 ensaiadas em 50, 100 e 400 kPa de tensão confinante não foram apresentadas já que o registro fotográfico se perdeu devido a uma falha informática.

##### **4.2.1.2.1. Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica x Distorção**

Na Figura 4.7 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a matriz de solo argiloso, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

A Figura 4.8 apresenta as fotografias das amostras rompidas do solo argiloso para cada nível de tensão.

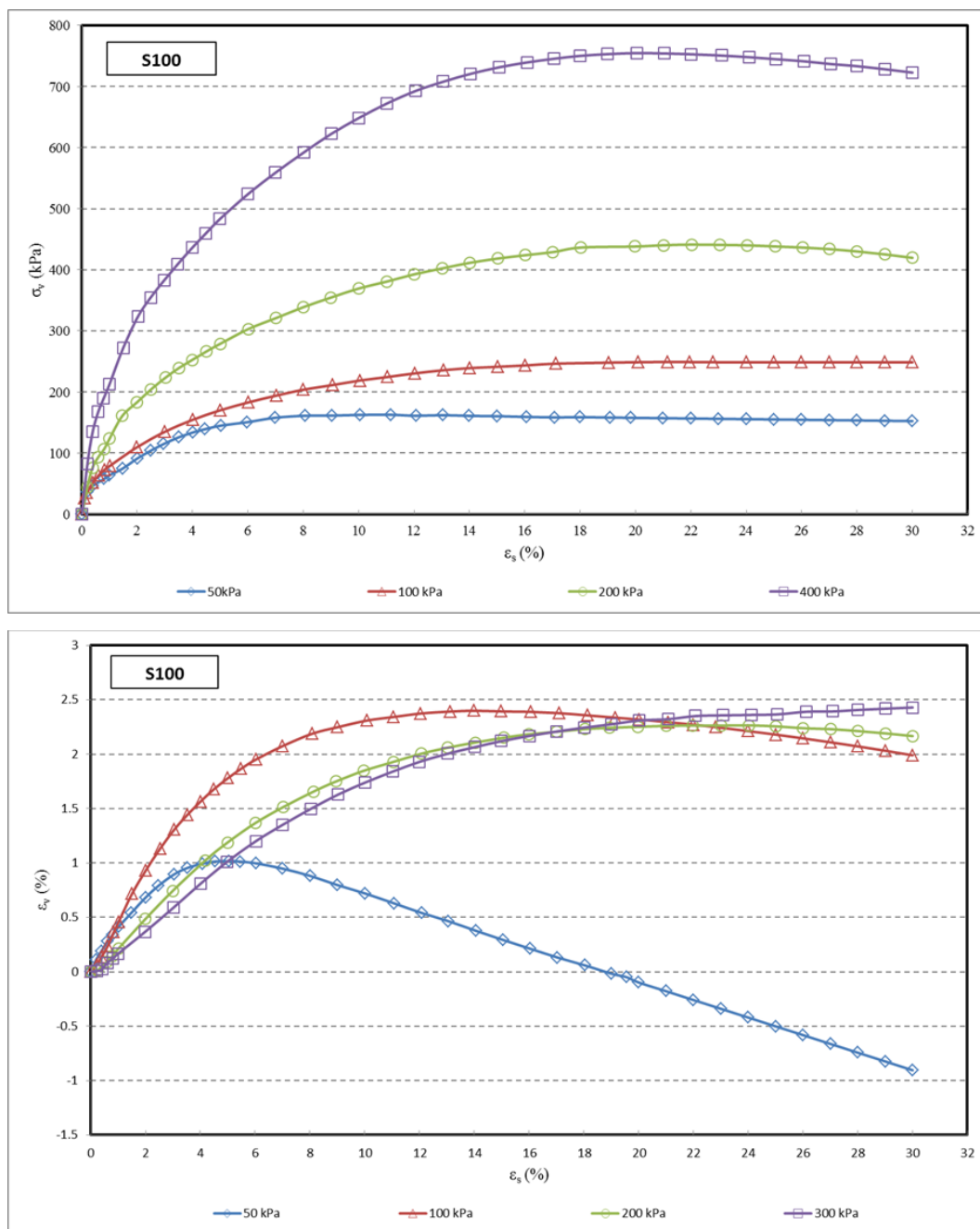


Figura 4.7 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para o solo argiloso (S100) em triaxiais de compressão axial.

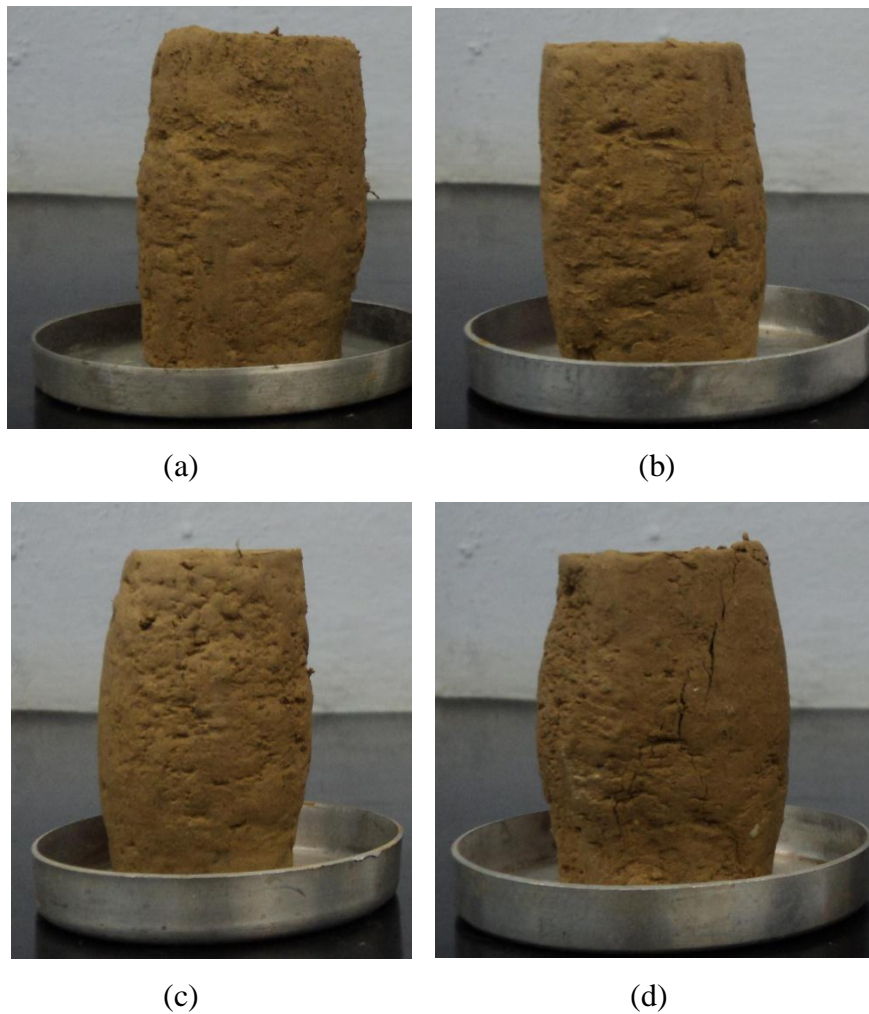


Figura 4.8 - Amostras rompidas do solo argiloso (S100). Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa.

Na Figura 4.9 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S95/B5, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

A Figura 4.10 apresenta as fotografias das amostras rompidas da mistura S95/B5 para cada nível de tensão.

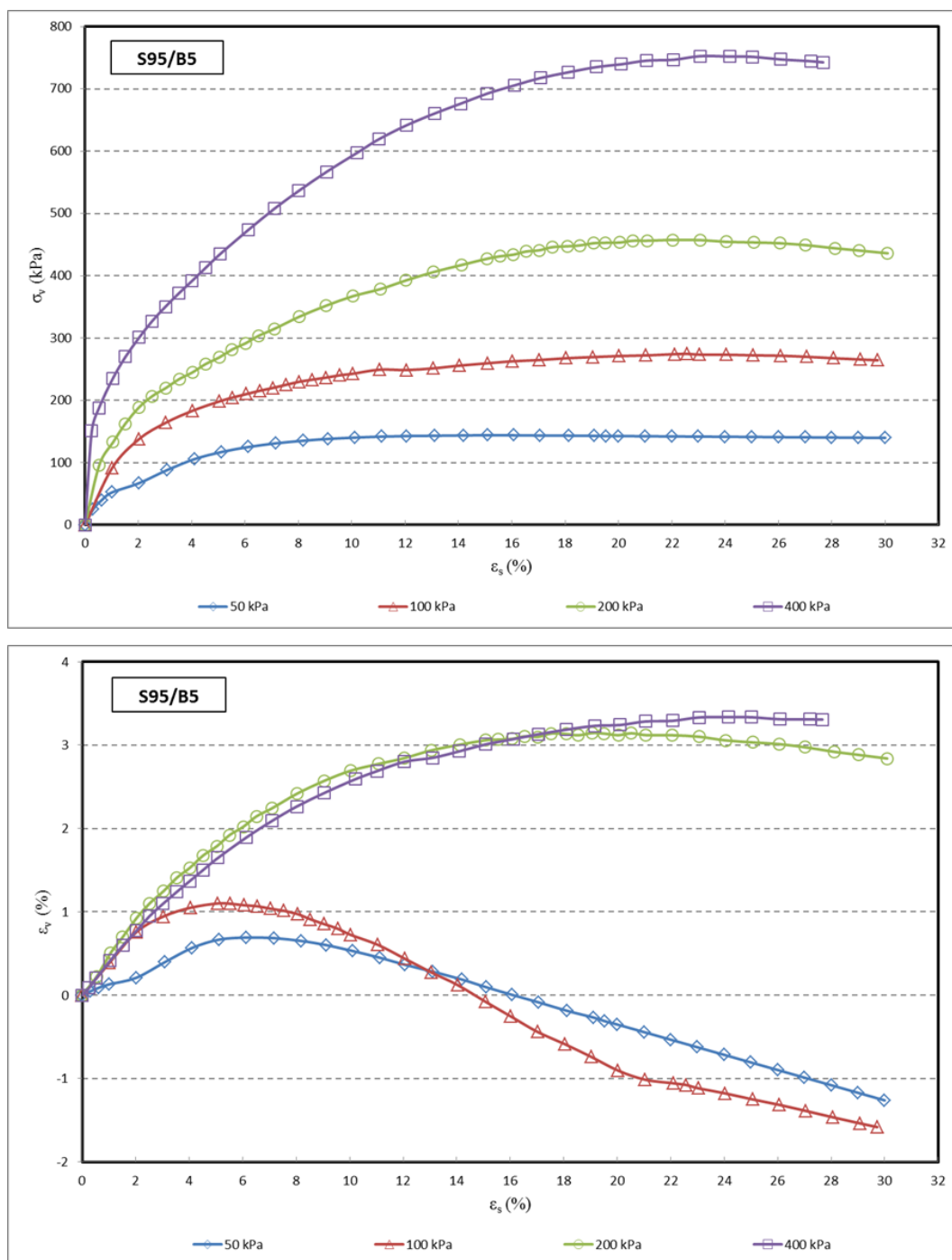


Figura 4.9 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S95/B5 em triaxiais em compressão axial.



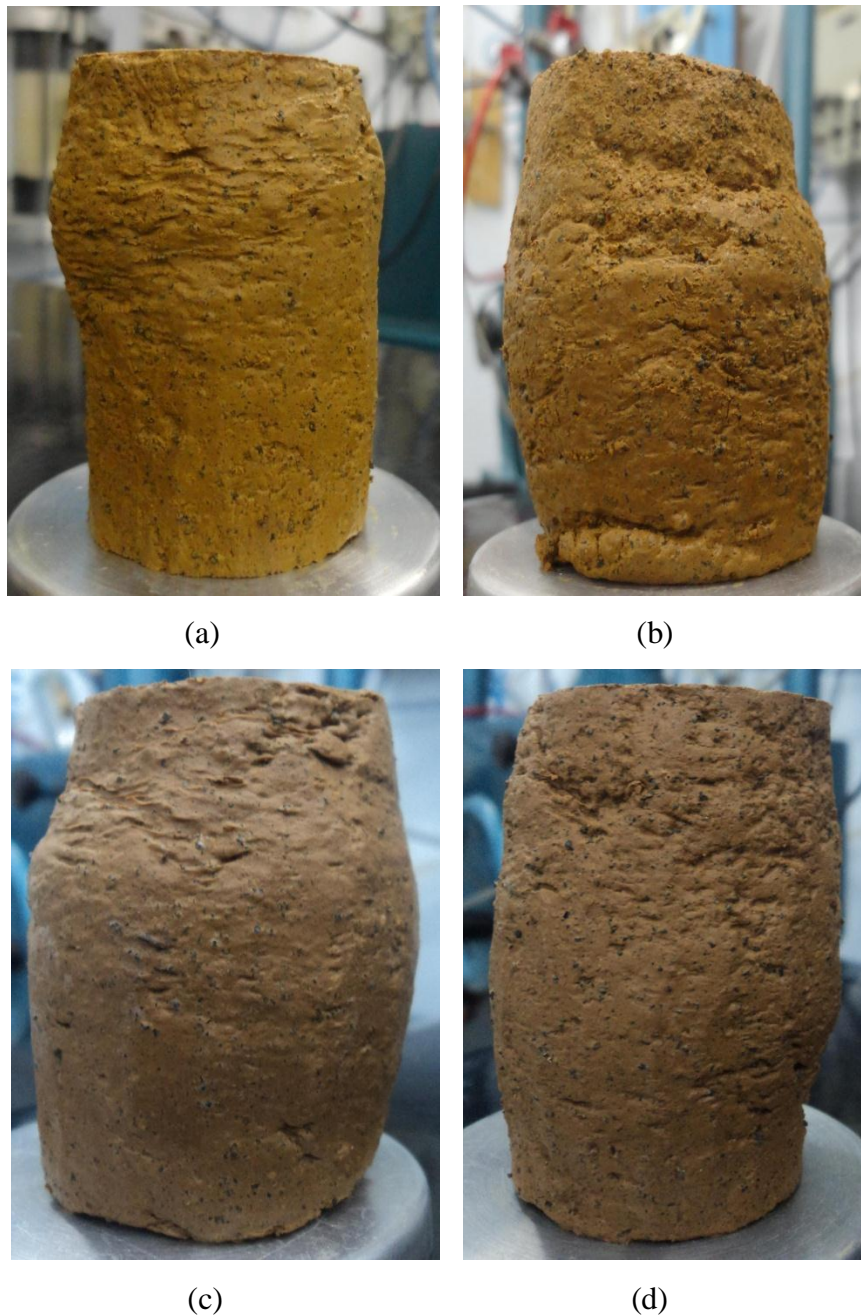


Figura 4.10 - Amostras rompidas da mistura S95/B5. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa.

Na Figura 4.11 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S90/B10, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa. A Figura 4.12 apresenta as fotografias das amostras rompidas da mistura S90/B10 para cada nível de tensão.

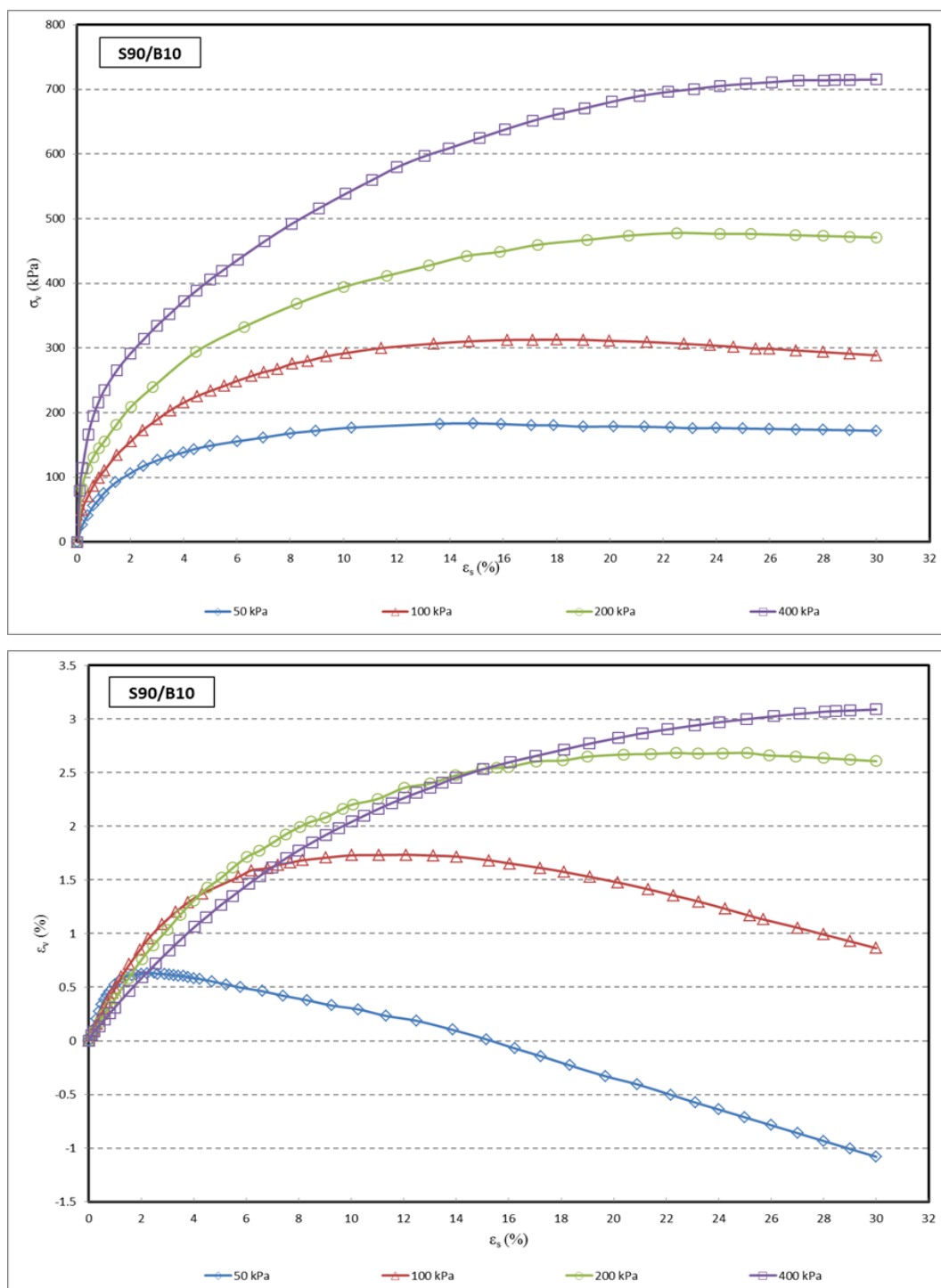


Figura 4.11 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S90/B10 em triaxiais em compressão axial.

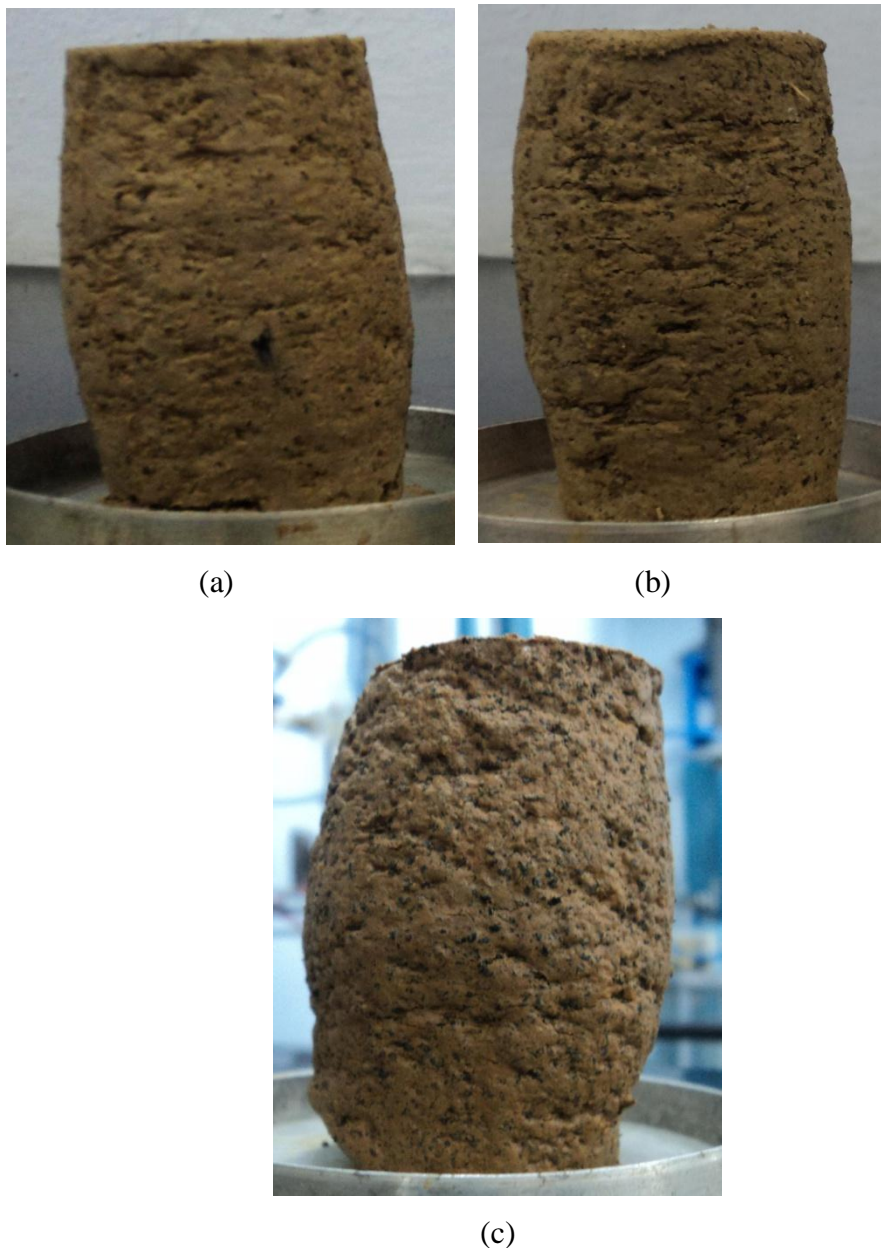


Figura 4.12 - Amostras rompidas da mistura S90/B10. Tensão confinante de: (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 400 kPa.

Na Figura 4.13 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S80/B20, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa. A Figura 4.14 apresenta as fotografias das amostras rompidas da mistura S80/B20 para cada nível de tensão.

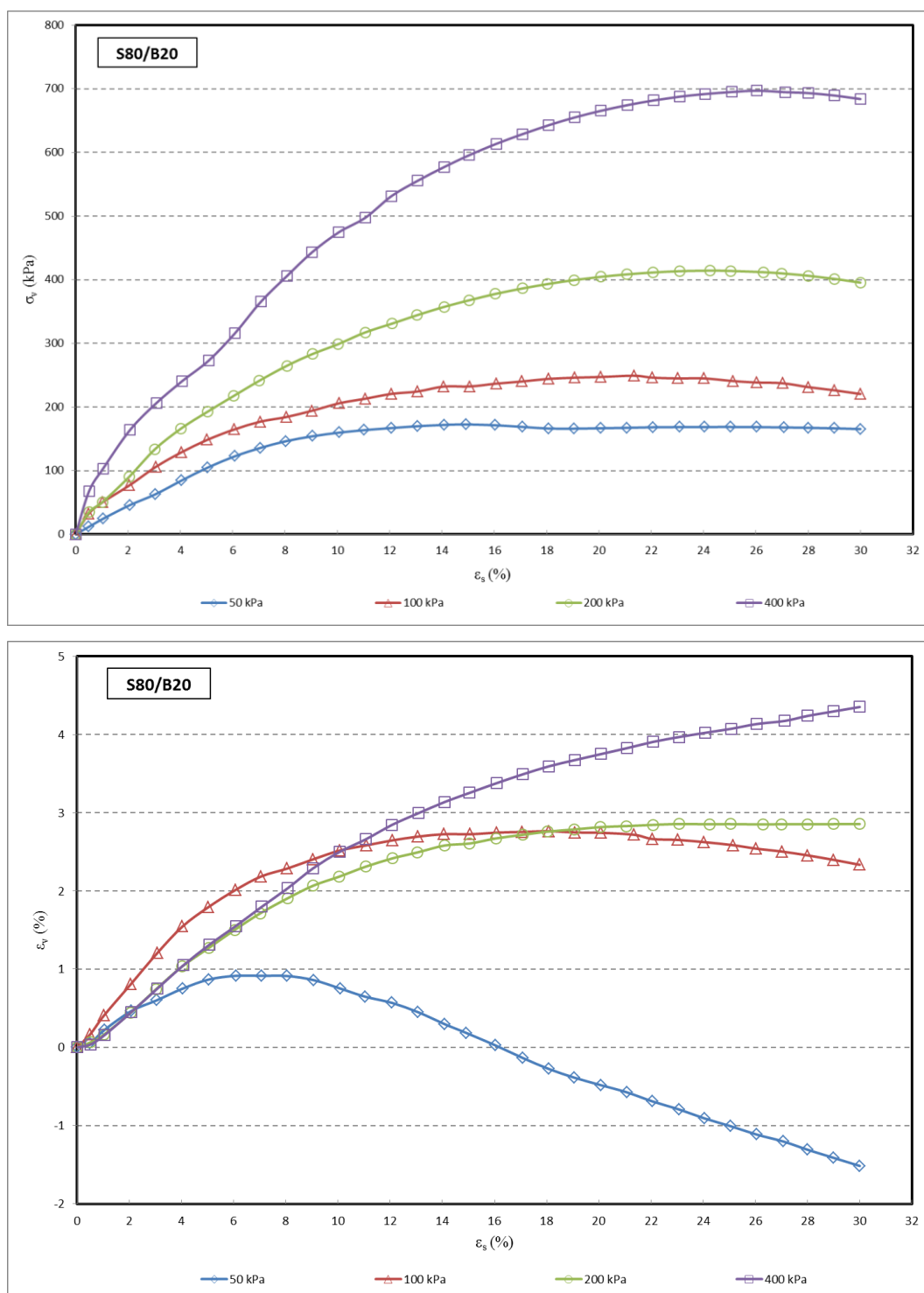


Figura 4.13 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S80/B20 em triaxiais em compressão axial.



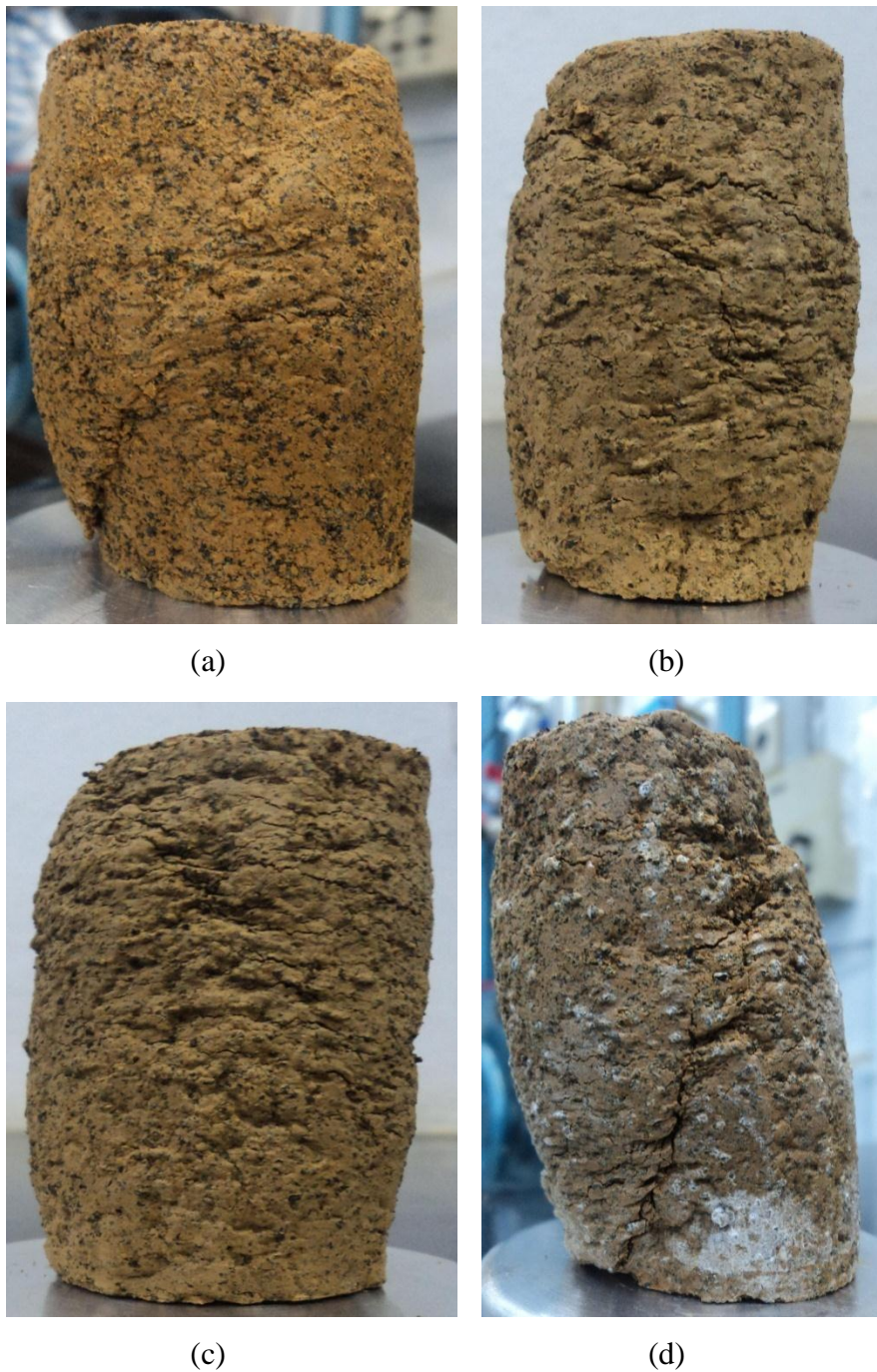


Figura 4.14 - Amostras rompidas da mistura S80/B20. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa.

Na Figura 4.15 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S70/B30, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa. A Figura 4.16 apresenta as fotografias das amostras rompidas da mistura S70/B30 para cada nível de tensão.

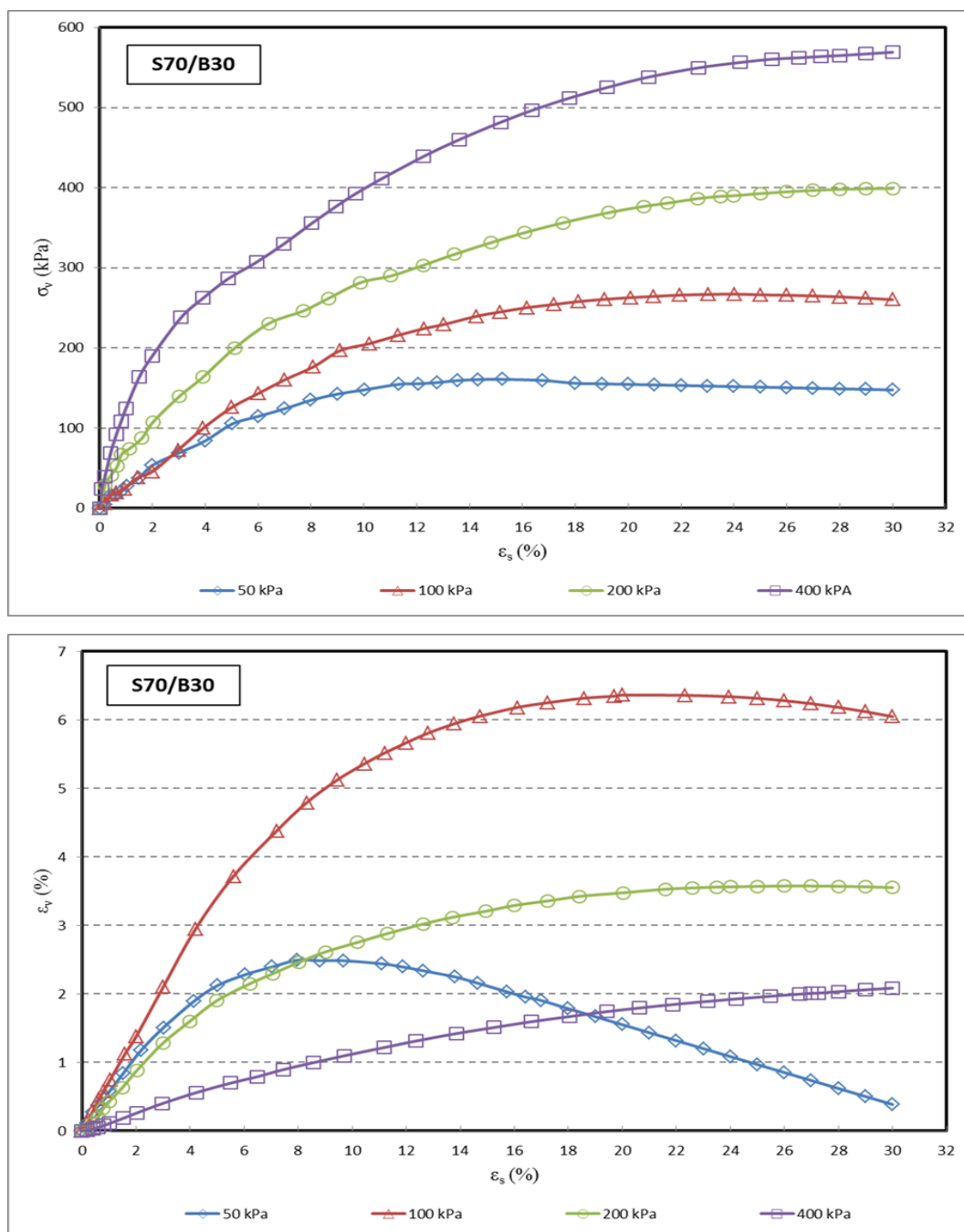


Figura 4.15 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S70/B30 em triaxiais em compressão axial.

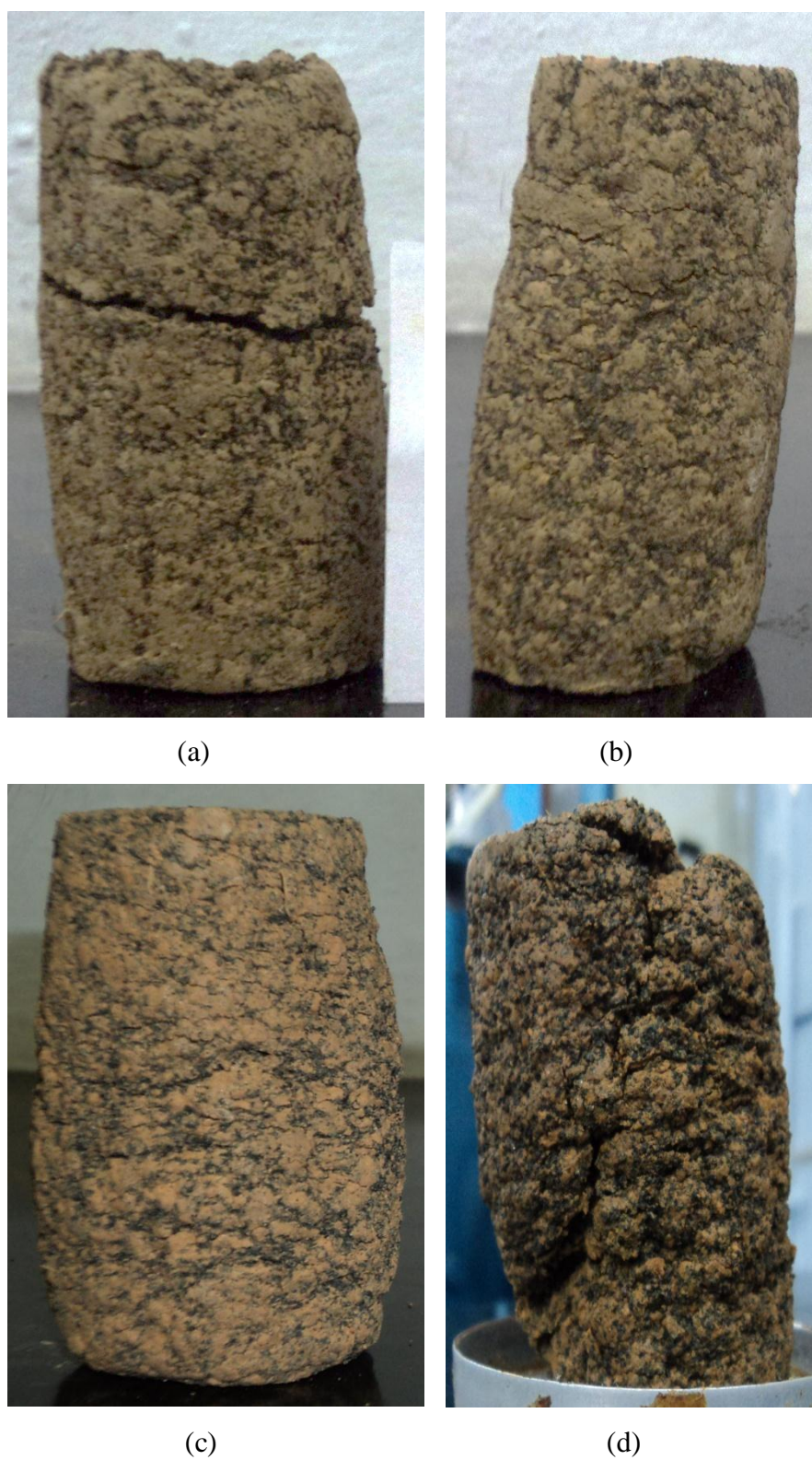


Figura 4.16 - Amostras rompidas da mistura S70/B30. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa.



Na Figura 4.17 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura S60/B40, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa. A Figura 4.18 apresenta as fotografias das amostras rompidas da mistura S60/B40 para cada nível de tensão.

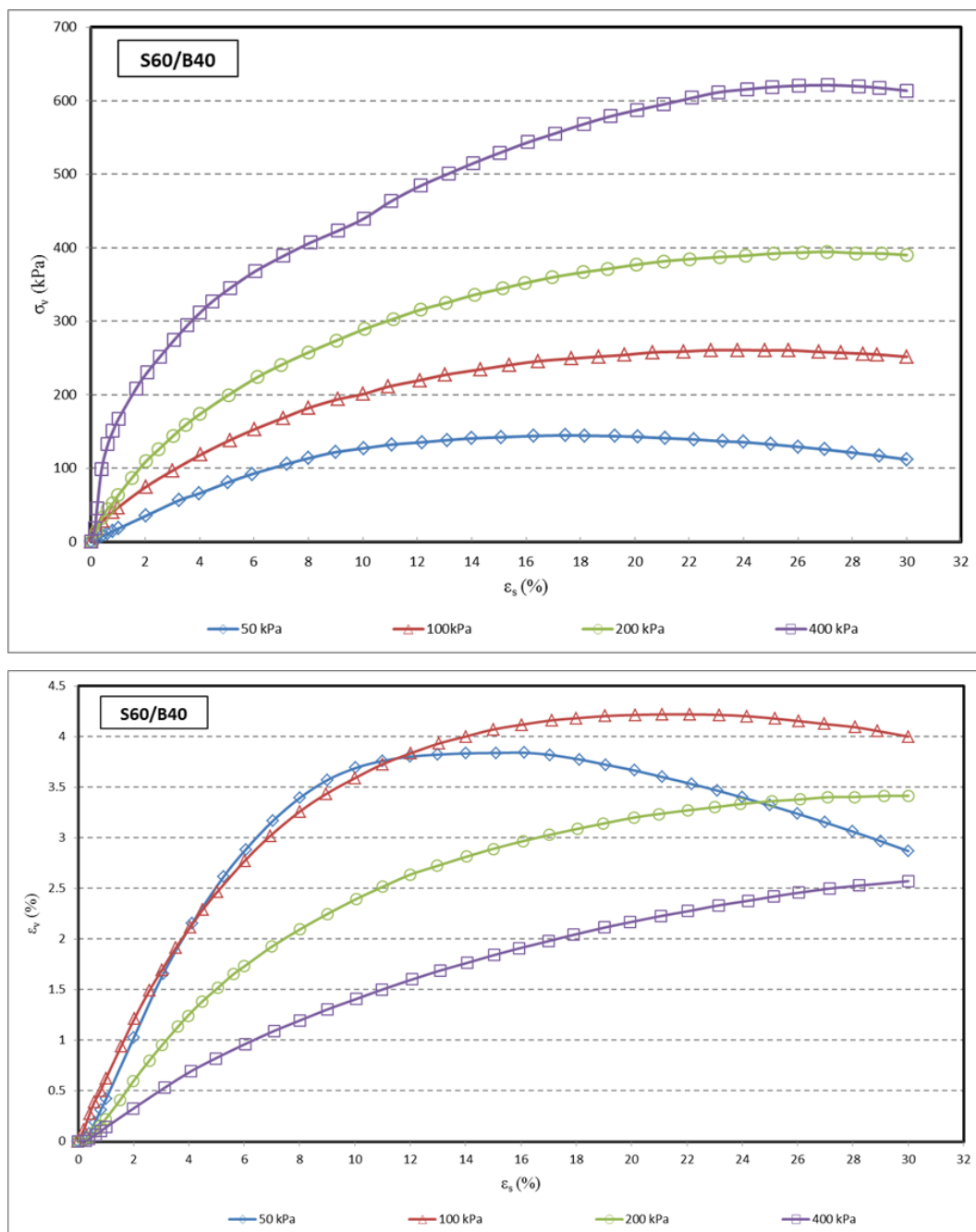


Figura 4.17 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura S60/B40 em triaxiais em compressão axial.





Figura 4.18 - Amostras rompidas da mistura S60/B40 para a tensão confinante de 200 kPa.

#### 4.2.1.2.2.

##### **Influência do nível de confinamento**

Para o nível de tensão confinante efetiva de 50 kPa (Figura 4.19), somente o corpo de prova da mistura S90/B10 apresenta melhor comportamento que do corpo de prova de solo puro, sendo que para qualquer deformação axial a resistência ao cisalhamento desta mistura é sempre maior que do solo puro. A mistura S80/B20 apresenta maior resistência ao cisalhamento para deformações axiais superiores a 10%, antes a resistência é menor que do solo puro. O valor da resistência de pico das misturas S90/B10 e S80/B20 é maior do que do solo argiloso e acontece para uma deformação axial maior do que a deformação onde o solo argiloso (S100) atinge seu valor de resistência de pico. A resistência última ou pós-pico das misturas S90/B10 e S80/B20 é maior do que a atingida pelo corpo de prova do solo argiloso (S100).

Outra característica que varia com a adição da borracha no solo argiloso é o crescimento da resistência ao cisalhamento com as deformações, sendo que para a

mistura S90/B10 a resistência ao cisalhamento cresce mais rápido que do solo argiloso (S100).

Embora, no início do cisalhamento, a mistura S80/B20 tenha menor crescimento da resistência com as deformações que do solo argiloso (S100), este chega a atingir maiores valores de resistência em relação a S100 para deformações axiais superiores a 10%.

Os corpos de prova das misturas S95/B5, S70/B30 e S60/B40 têm resistência de pico, resistência pós-pico e crescimento da resistência com a deformação menores em relação ao solo argiloso. Contudo, as resistências de pico destas misturas acontecem em deformações axiais maiores, comparadas com a deformação axial da amostra do solo puro onde este atinge seu máximo valor de resistência ao cisalhamento.

Assim, para a mistura S90/B10, o efeito da inserção da borracha moída se reflete no aumento da resistência de pico, da resistência pós-pico, da deformação axial correspondente à resistência de pico e do crescimento da resistência com a deformação. Para as misturas S95/B5, S70/B30 e S60/B40 acontece o contrário, estes valores são menores, com exceção da deformação axial correspondente à resistência de pico que é maior quando comparada com a deformação onde o solo puro atinge a resistência de pico.

O corpo de prova do solo argiloso (S100), ensaiado com 50 kPa de tensão confinante efetiva apresenta uma diminuição de volume durante o início do cisalhamento. Esta diminuição de volume acontece em paralelo com uma deformação axial de aproximadamente 5%. A partir deste ponto o corpo de prova começa a se expandir, sendo que, para retornar ao volume inicial, a deformação axial que sofre o corpo de prova é cerca de 13%.

As misturas S95/B5, S90/B10 e S80/B20 tiveram um comportamento similar na variação volumétrica quando comparado ao solo puro (S100), com a diferença de que os volumes de água que saíram destes três corpos de prova foram menores do que na amostra de solo argiloso. Além disso, ao final do cisalhamento as misturas S95/B5, S90/B10 e S80/B20 apresentaram um volume maior que do corpo de prova sem inclusão de borracha moída. Em contra partida, se observou uma maior diminuição de volume, durante o início do cisalhamento, dos corpos de prova S70/B30 e S60/B40, comparado com a diminuição de volume do solo puro (S100). Da mesma forma que a amostra de solo argiloso, estes corpos de prova

apresentam diminuição de volume ao início do cisalhamento, precisando de uma deformação axial ainda maior para voltar a ter seu volume inicial.

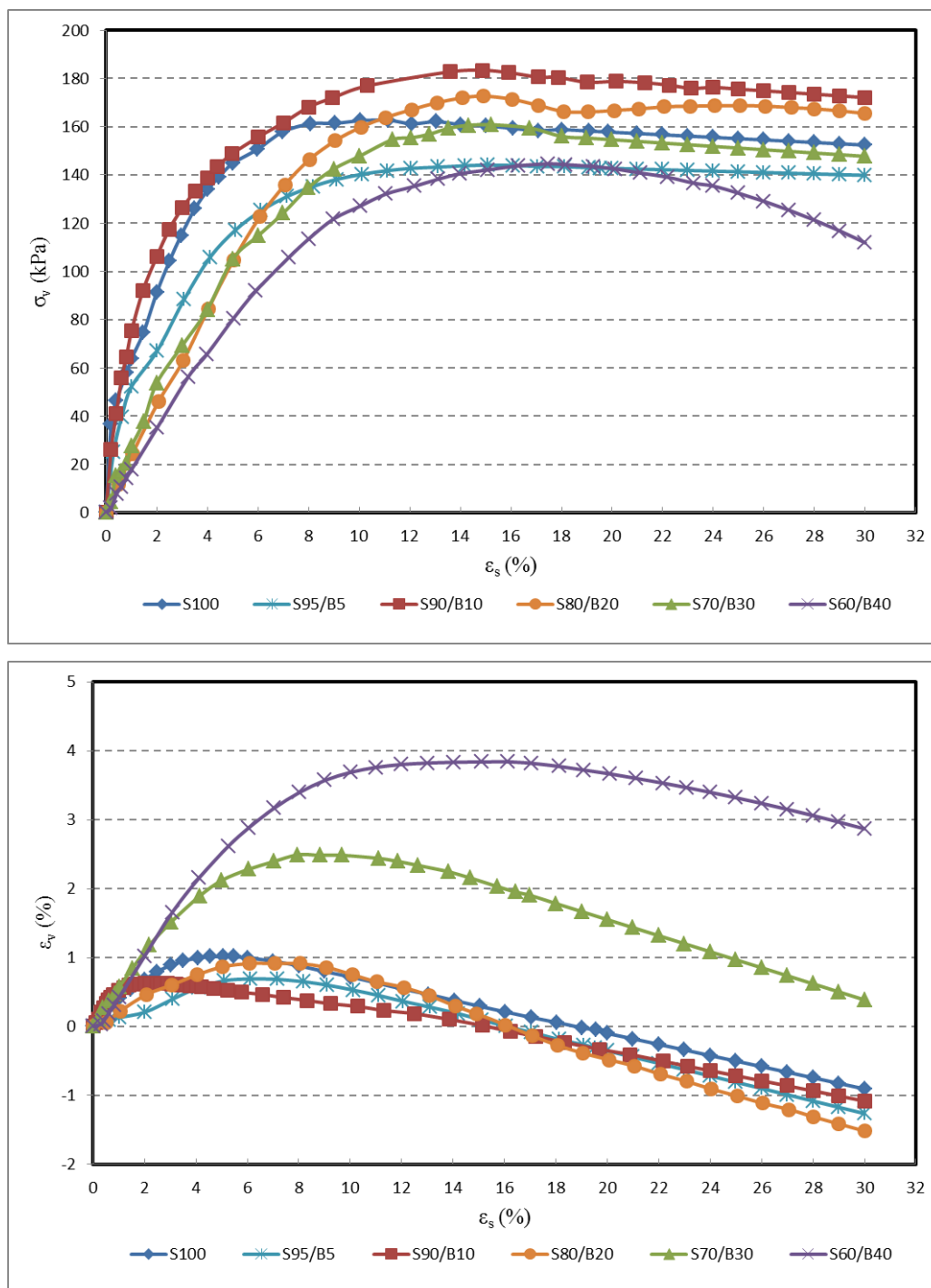


Figura 4.19 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 50 kPa de tensão confinante efetiva.

As inclinações das curvas de deformação volumétrica durante a expansão dos corpos de prova de todas as misturas (S95/B5, S90/B10, S80/B20, S70/B30 e

S60/B40) são muito parecidas com a inclinação da curva de deformação volumétrica durante a expansão do solo argiloso.

O corpo de prova S100, ao atingir a resistência de pico, apresenta maior volume do que no início do carregamento. Já nas misturas S95/B5, S90/B10 e S80/B20 a resistência de pico aconteceu quando o volume do corpo de prova é praticamente igual ao inicial. Os corpos de prova de S70/B30 e S60/B40 chegaram à ruptura quando os volumes destes foram menores do que no início do carregamento. No final do ensaio ficam com volumes ainda menores, apresentado um comportamento expansivo.

Para tensão confinante efetiva de 100 kPa (Figura 4.20) observa-se um melhor comportamento, durante o cisalhamento, dos corpos de prova das misturas S95/B5 e S90/B10. A resistência de pico atingida por estas amostras foi maior do que do corpo de prova de solo argiloso (S100), sendo que para grandes deformações a resistência última ou pós-pico também foi maior. Pode-se apreciar também que para grandes deformações os corpos de prova das misturas S70/B30 e S60/B40 atingiram valores de resistência ao cisalhamento ainda maiores que do S100, o contrário acontece durante a primeira metade do cisalhamento, desde 0% até 15% de distorção. O corpo de prova S80/B20 apresentou menores valores de resistência do que do solo argiloso.

O crescimento da resistência ao cisalhamento com a deformação é maior nos corpos de prova das misturas S95/B5 e S90/B10, sendo que a resistência destes permaneceu maior do que da mistura S100 durante todo o cisalhamento. Devido ao menor crescimento da resistência com a deformação dos corpos de prova das misturas S70/B30 e S60/B40, estas atingem sua resistência de pico depois de ter-se deformado bastante. Assim, a melhoria com a inserção da borracha moída, para estas porcentagens, se apresenta quando o corpo de prova sofre uma distorção considerável.

Finalmente, para este nível de tensão a melhoria da resistência ao cisalhamento acontece para todas as misturas, com exceção de S80/B20, diferenciando-se no nível de cisalhamento em que acontece esta melhoria. Ou seja, para as misturas S95/B5 e S90/B10 a resistência é maior, em relação a S100, durante todo o cisalhamento. Enquanto para as misturas S70/B30 e S60/B40 a

resistência somente melhora a partir de 15% de distorção, na parcela anterior estas misturas têm menor resistência do que o solo argiloso (S100).

A diminuição de volume do solo argiloso para este nível de tensão confinante efetiva (100 kPa) foi maior, diminuindo 2,4 %. Sendo que para 50 kPa de tensão confinante efetiva a diminuição foi somente de 1,0 %. A inclinação da curva deformação volumétrica durante a expansão é muito menor do que a inclinação da curva de deformação volumétrica durante a contração da amostra S100. Como consequência deste último, o volume ao final do cisalhamento foi menor do que no início.

O corpo de prova da mistura S95/B5 apresentou uma contração menor do que da amostra S100, mas a inclinação da curva de deformação volumétrica na expansão foi alta, causando um volume maior no final do cisalhamento. A amostra da mistura S90/B10 também mostrou menor contração que S100, contudo a inclinação da curva de deformação volumétrica na expansão foi baixa e o volume no final do cisalhamento foi menor do que no início. Os corpos de prova das misturas S80/B20, S70/B30 e S60/B40 apresentaram contrações maiores do que do S100 e seus volumes finais no final do cisalhamento foram maiores do que no início.

As trajetórias das curvas de deformação volumétrica das misturas S95/B5 e S90/B10 permaneceram abaixo da curva de S100 e das misturas S70/B30 e S60/B40 permaneceram acima. Este comportamento também se observa nas curvas de deformação volumétrica para a tensão confinante efetiva de 50 kPa, com a diferença de que a mistura S70/B30 apresenta maior contração do que a mistura S60/B40, quando a tensão confinante efetiva é 100 kPa.

Para todas as misturas, exceto para S95/B5, a resistência de pico acontece quando o corpo de prova tem um volume menor do que no início do cisalhamento.

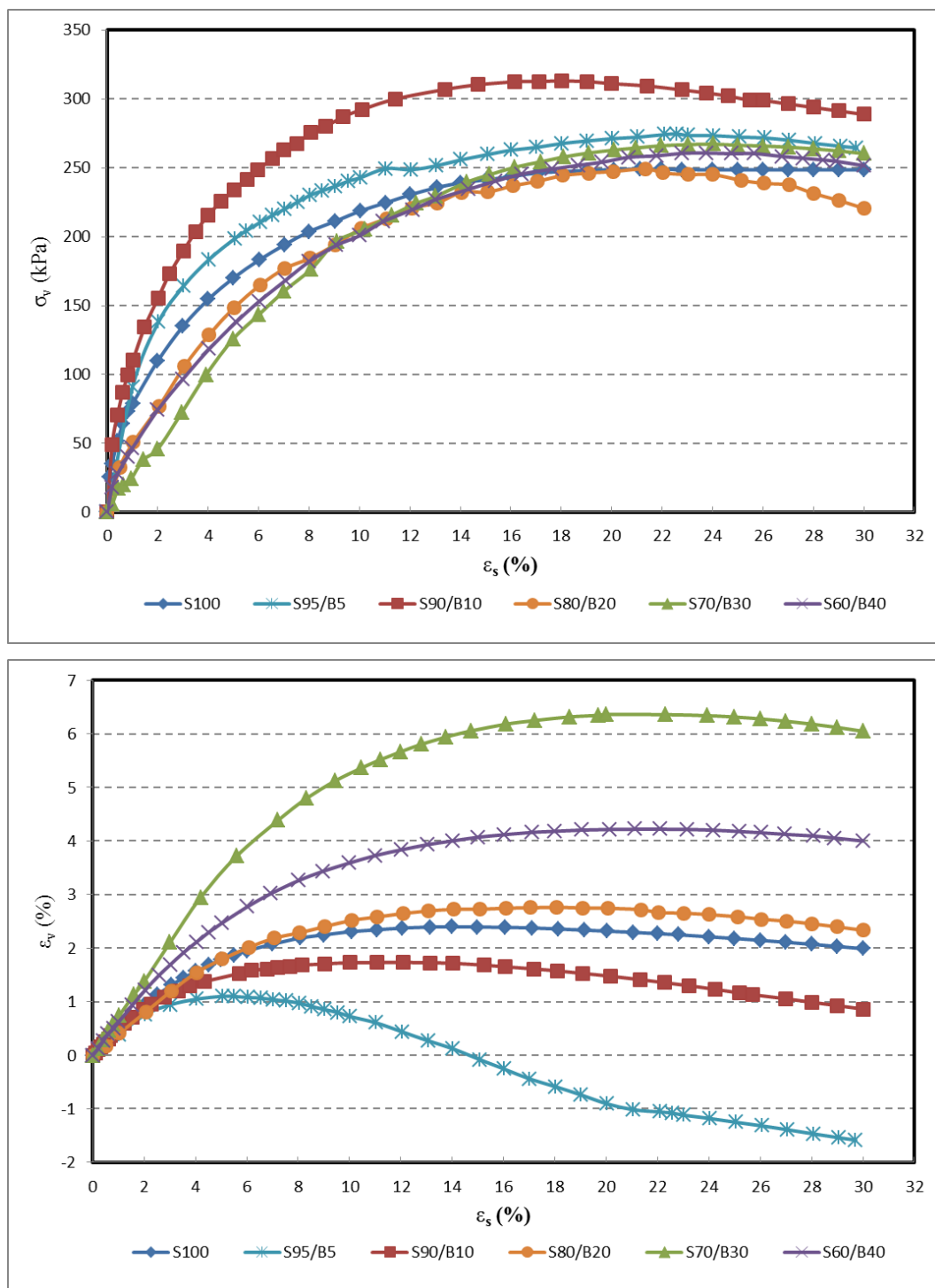


Figura 4.20 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 100 kPa de tensão confinante efetiva.

Os resultados obtidos para a tensão confinante de 200 kPa (Figura 4.21), mostraram que as resistências de pico dos corpos de prova das misturas S95/B5 e S90/B10 são ligeiramente maiores do que da amostra S100, sendo que a curva

tensão-deformação da mistura S95/B5 percorre o mesmo caminho que S100 até 14% de distorção, a partir de este ponto a resistência começa a aumentar. As amostras de solo argiloso e das misturas anteriormente mencionadas apresentam a resistência ao cisalhamento de pico em aproximadamente 22% de deformação axial. Logo após atingir a resistência de pico, estas misturas apresentam resistências ao cisalhamento ainda maiores do que do S100. O crescimento da resistência ao cisalhamento com a deformação é maior na mistura S90/B10, enquanto que a mistura S95/B5 tem um crescimento da resistência com a deformação idêntica do S100.

Os corpos de prova das misturas S80/B20, S70/B30 e S60/B40 ensaiadas mostraram resistências de pico e resistências pós-pico menores que do S100. As curvas tensão-deformação destas duas misturas são praticamente idênticas entre si e o crescimento da resistência com a deformação é menor do que das amostras S100, S95/B5 e S90/B10.

Neste caso, para tensão confinante efetiva de 200 kPa, a inserção de borracha moída ao solo argiloso é positiva para as misturas S95/B5 e S90/B10, sendo que a resistência ao cisalhamento de pico e a resistência pós-pico aumentam, mas não em forma significativa, como acontece nos níveis de tensões confinantes efetivas de 50kPa (somente para S90/B10) e 100 kPa (S95/B5 e S90/B10). Para as misturas com 20%, 30% e 40% de borracha moída a inserção do material prejudica o comportamento do solo argiloso, causando uma diminuição da resistência ao cisalhamento de pico e pós-pico.

A contração máxima do corpo de prova S100 é 2,3% para a tensão confinante efetiva de 200 kPa, maior quando confinado a 50kPa, mas igual quando confinado a 100 kPa. Todas as amostras de misturas apresentam maior contração do que a amostra do solo argiloso, sendo que as trajetórias de deformação volumétrica destas misturas se localizam acima da trajetória percorrida pelo solo sem inserção de borracha. Para atingir o máximo valor de contração, todos os corpos de prova precisam atingir grandes valores de deformação axial. Ao final do cisalhamento todas as amostras continuam tendo um volume menor do que no início do cisalhamento, encontrando-se estas no início do processo de expansão.

Por outro lado, pode-se observar uma mudança no comportamento da variação volumétrica dos corpos de prova segundo o nível de confinamento,

notando-se que agora não somente as trajetórias das curvas de deformação volumétrica de S70/B30 e S60/B40 situam-se acima de S100, mas também as curvas de S95/B5, S90/B10 e S80/B20.

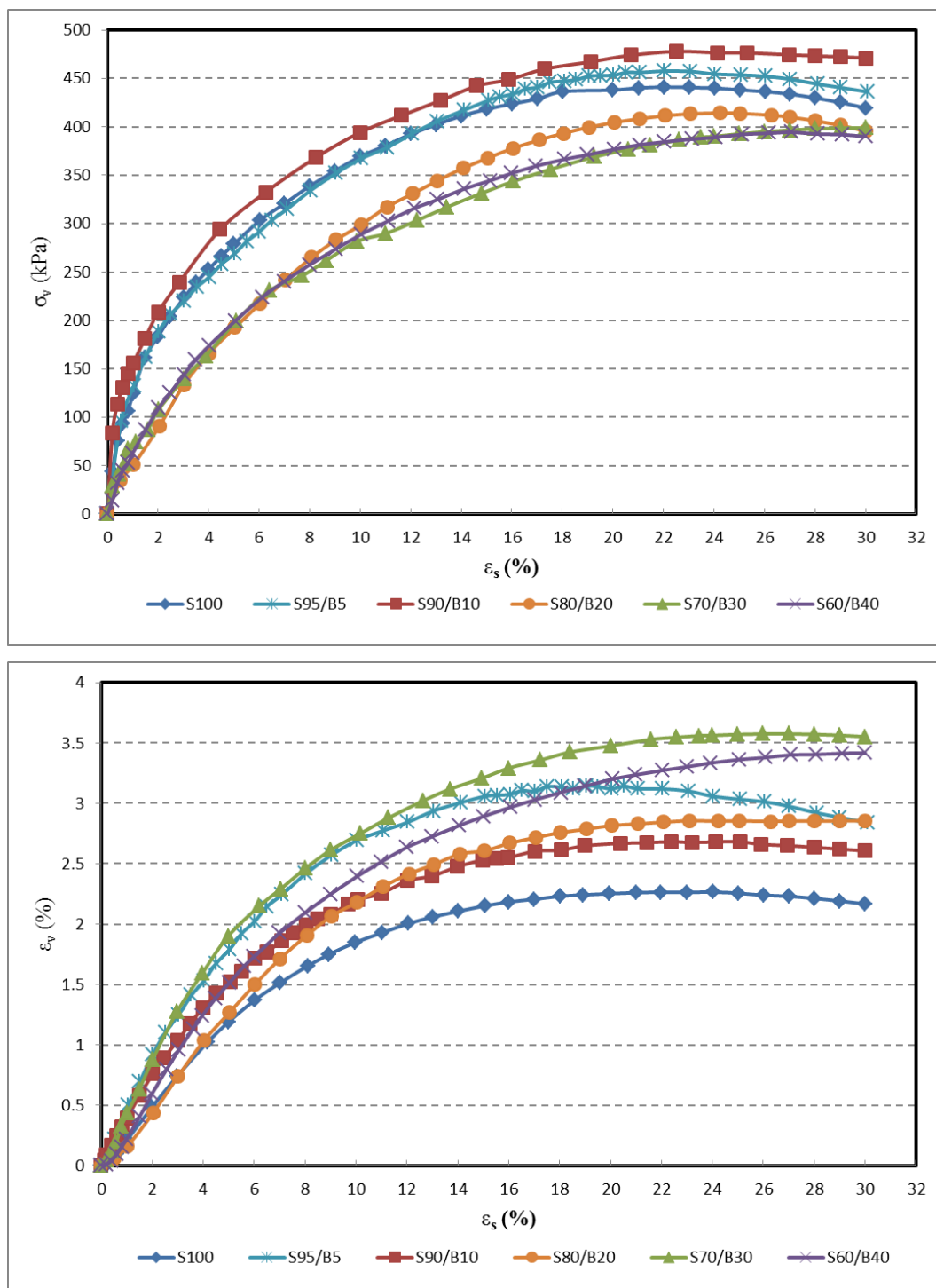


Figura 4.21 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 200 kPa de tensão confinante efetiva.



A resistência ao cisalhamento de pico é atingida quando o volume é menor do que no início do cisalhamento, este fato acontece para todos os corpos de prova. As razões do crescimento da deformação volumétrica (contração) com a deformação das misturas são maiores que a razão do corpo de prova de solo argiloso sem borracha moída.

Para 400 kPa de tensão confinante efetiva o comportamento das misturas em relação o solo argiloso sem borracha (Figura 4.22) é negativo. As resistências picos de todas as misturas são menores do que do solo argiloso S100, com exceção da mistura S95/B5 que apresenta resistência pico parecida com S100. quanto maior for a quantidade de borracha na mistura, menor será a resistência ao cisalhamento, sendo que a resistência a grandes deformações, de todas as misturas, é menor do que do S100, salvo a mistura S95/B5, que tem resistência pós-pico similar ao solo puro.

A deformação axial na qual os corpos de prova S100 e S95/B5 atingem a resistência ao cisalhamento de pico é aproximadamente 22%, enquanto que as amostras de S90/B10, S70/B30 não chegam a apresentar uma resistência máxima, pois até o final do ensaio a resistência ainda segue aumentando. Os corpos de prova das misturas S80/B20 e S60/B40 atingiram a resistência de pico em 27% da deformação axial.

O crescimento da resistência ao cisalhamento com a deformação de todas as misturas é menor do que o crescimento que possui a amostra S100.

Portanto, neste nível de tensões a inserção de borracha moída ao solo argiloso não aporta melhoria, pelo contrário, prejudica o desenvolvimento da resistência ao cisalhamento, mesmo que para grandes deformações.

O corpo de prova S100 apresentou uma contração máxima de 2,4%, sendo que para as tensões de confinamento de 100 kPa e 200 kPa a contração foi a mesma. Assim, pode-se ver que o nível de tensão não afetou a quantidade de água que saiu destes corpos de prova, salvo para 50 kPa onde a contração foi menor (1,0%).

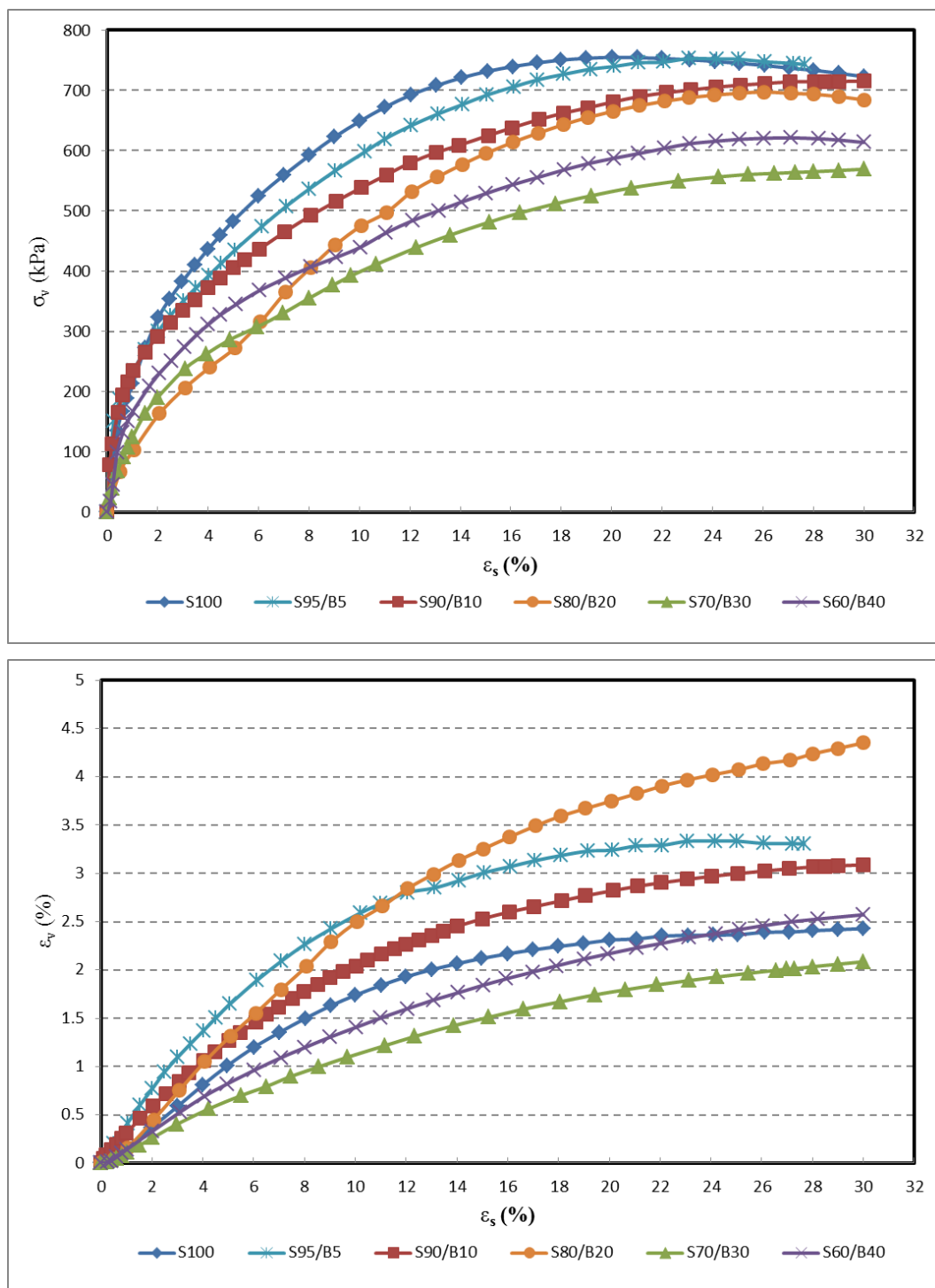


Figura 4.22 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para S100 e misturas em ensaios triaxiais de compressão axial para 400 kPa de tensão confinante efetiva.

Neste nível de tensão confinante (400 kPa) se observa novamente uma mudança no comportamento das trajetórias das curvas de deformação volumétricas. Enquanto que para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa as

curvas de deformação volumétrica das misturas S70/B30 e S60/B40 se localizam sobre a curva de deformação volumétrica do S100 e as curvas de S95/B5 e S90/B10 abaixo desta. Neste nível de tensão, as curvas de deformação volumétricas das misturas trocam de lugar. Sendo que as curvas das misturas com menores porcentagens de borracha se encontram sobre a curva de deformação volumétrica de S100 e as curvas das misturas com maiores porcentagens de borracha se localizam abaixo.

As resistências ao cisalhamento máximas, de todos os corpos de provas, acontecem quando os volumes são menores do que no início do cisalhamento. A contração das amostras é contínua durante todo o ensaio.

A influência do nível de tensão confinante no comportamento dos compósitos solo argiloso-borracha foi observado por Cetin et. al. (2006) e Özkul e Baykal (2007). Estes últimos mostraram que a resistência de pico da mistura é comparável ou maior do que da argila pura quando testada com tensões de confinamento entre 200 e 300 kPa. Acima destes valores, a presença das inclusões degrada a resistência da argila.

#### **4.2.1.2.3.**

##### **Influência do Teor de Borracha da Mistura**

Neste item são apresentadas as curvas de tensão desviadora e variação volumétrica x distorção do solo puro e das misturas, sendo que agora se faz a comparação em relação ao teor de borracha. Assim, logo após apresentar as curvas comparativas é feita uma análise da influência do teor de borracha no comportamento mecânico dos compósitos.

Finalmente se apresenta a definição de dois parâmetros comparativos (*“relação de resistência de pico”* e *“relação de resistência pós-pico”*) da resistência de pico e pós-pico do solo puro e das misturas. Desta forma se consegue visualizar melhor o comportamento dos compósitos em relação ao teor de borracha e ao nível de tensão confinante.

Cabe ressaltar que os parâmetros comparativos, antes mencionados, foram criados para fins didáticos nesta pesquisa. Embora possam existir outras denominações para este mesmo tipo de comparação, os nomes designados a estes parâmetros simplesmente têm uma função descritiva.

Na Figura 4.23 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo argiloso S100 e mistura S95/B5, nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

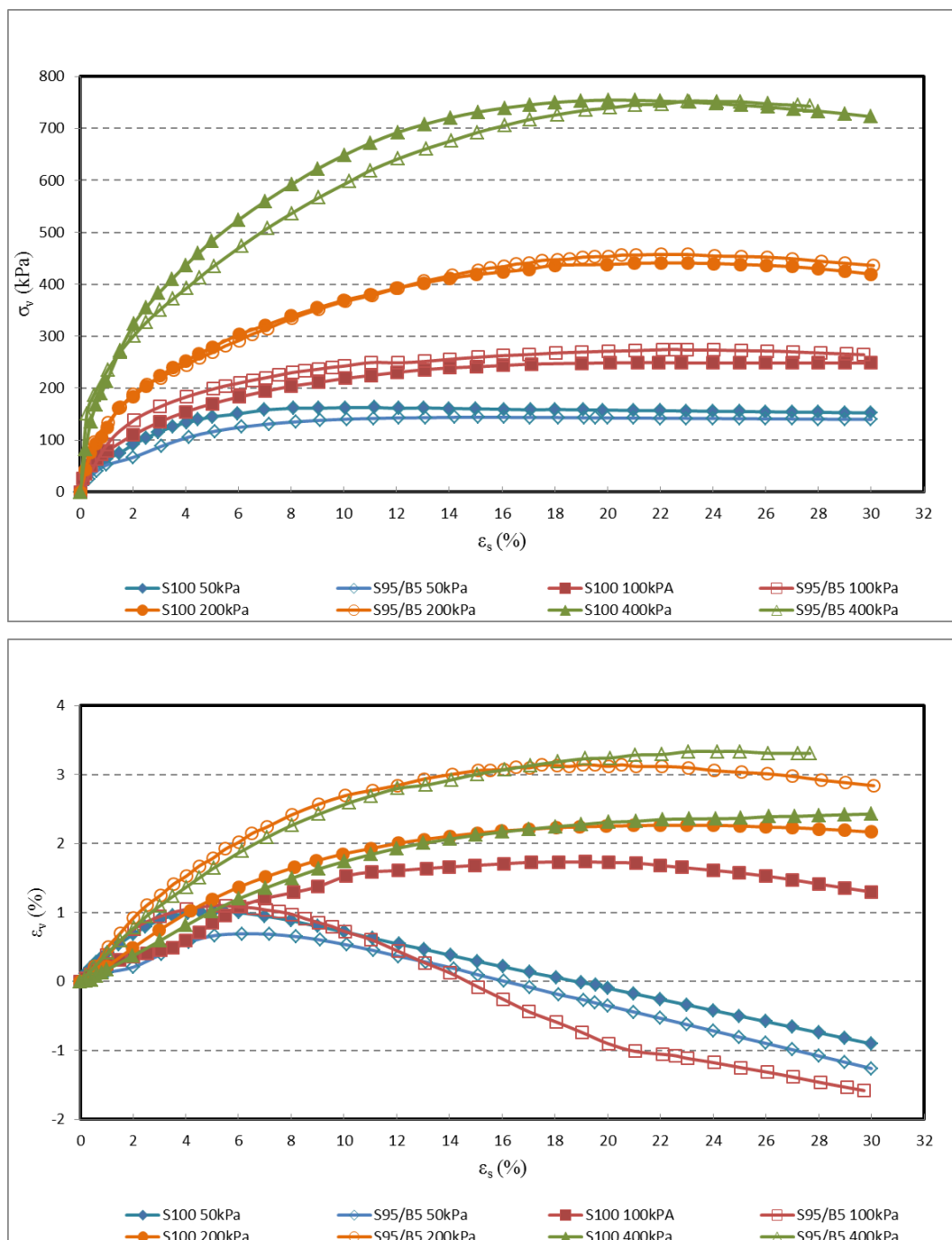


Figura 4.23 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S95/B5 em ensaios triaxiais de compressão axial.

Na Figura 4.24 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo argiloso S100 e mistura S90/B10, nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

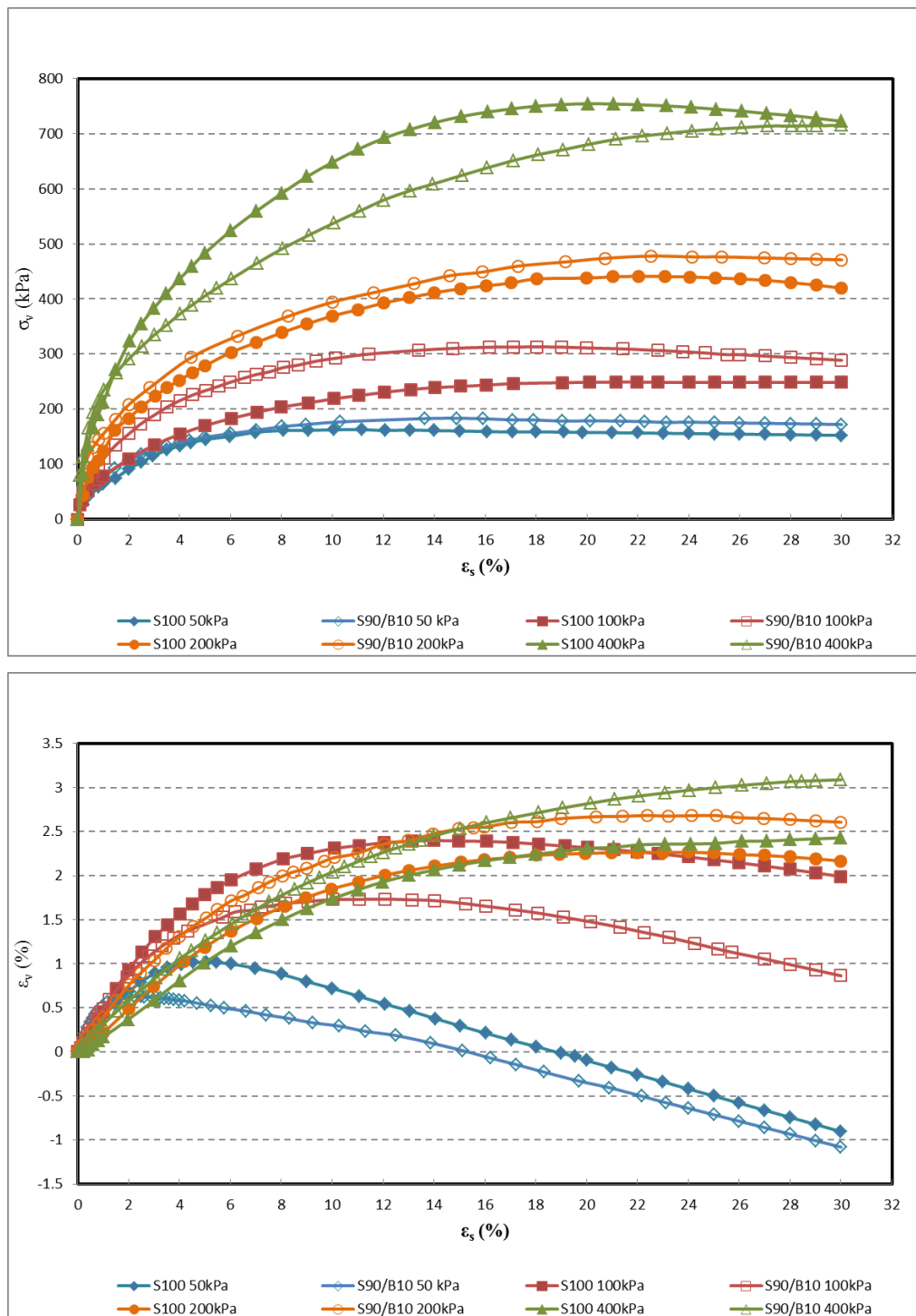


Figura 4.24 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S90/B10 em ensaios triaxiais de compressão axial.

Na Figura 4.25 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo argiloso S100 e mistura S80/B20, nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

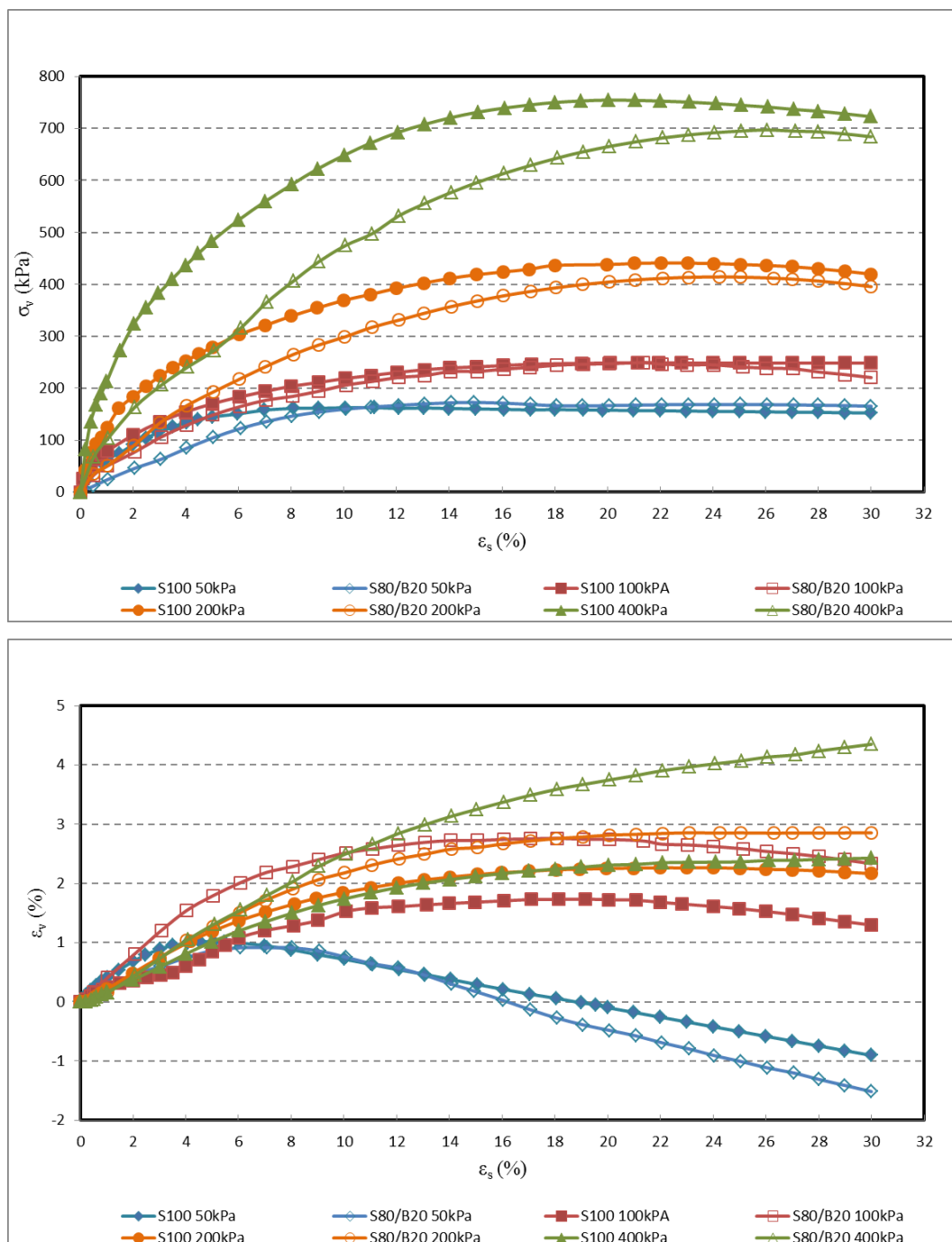


Figura 4.25 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S80/B20 em ensaios triaxiais de compressão axial.

Na Figura 4.26 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo argiloso S100 e mistura S70/B30, nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

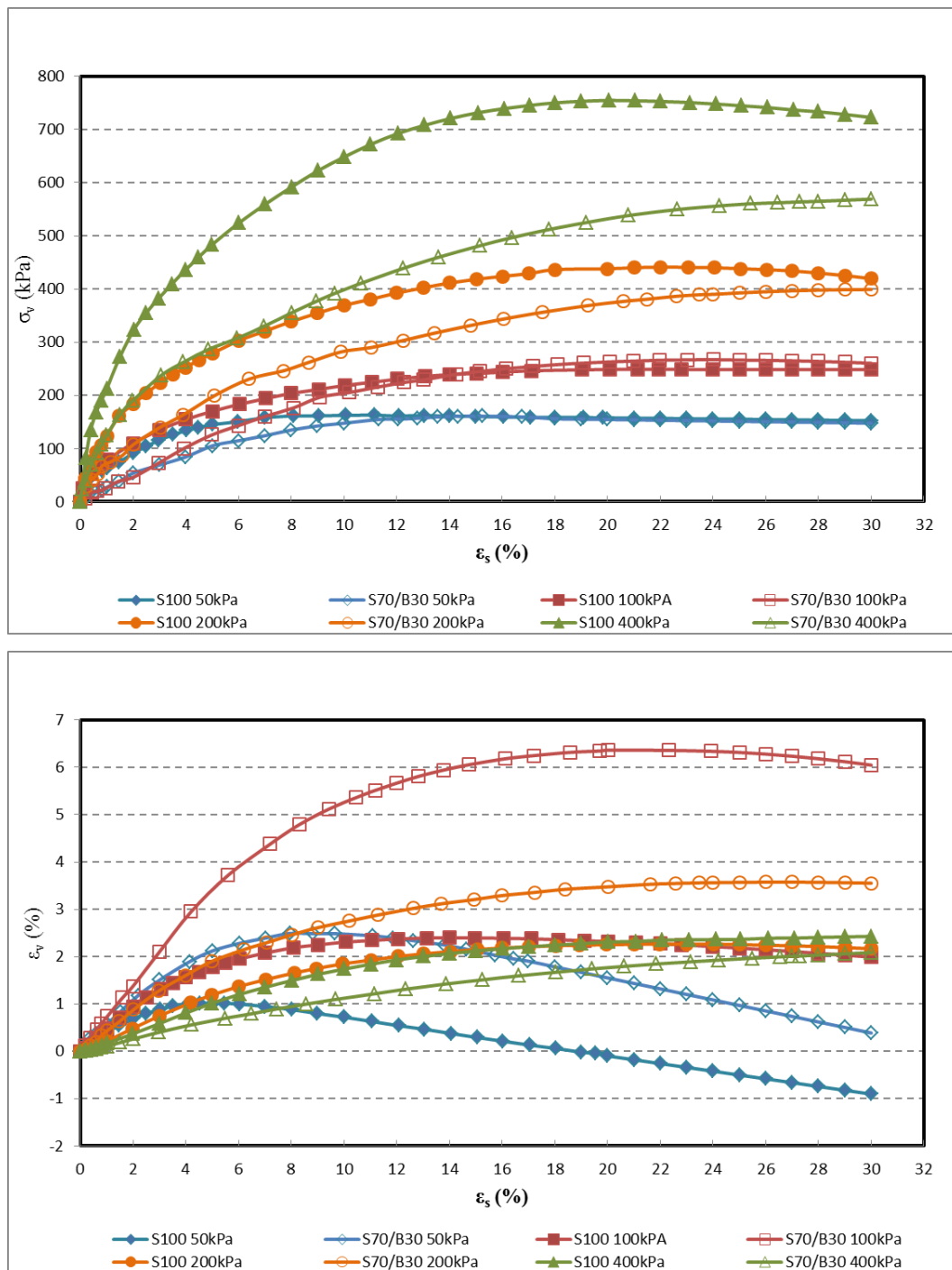


Figura 4.26 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S70/B30 em ensaios triaxiais de compressão axial.

Na Figura 4.27 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo argiloso S100 e mistura S60/B40, nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

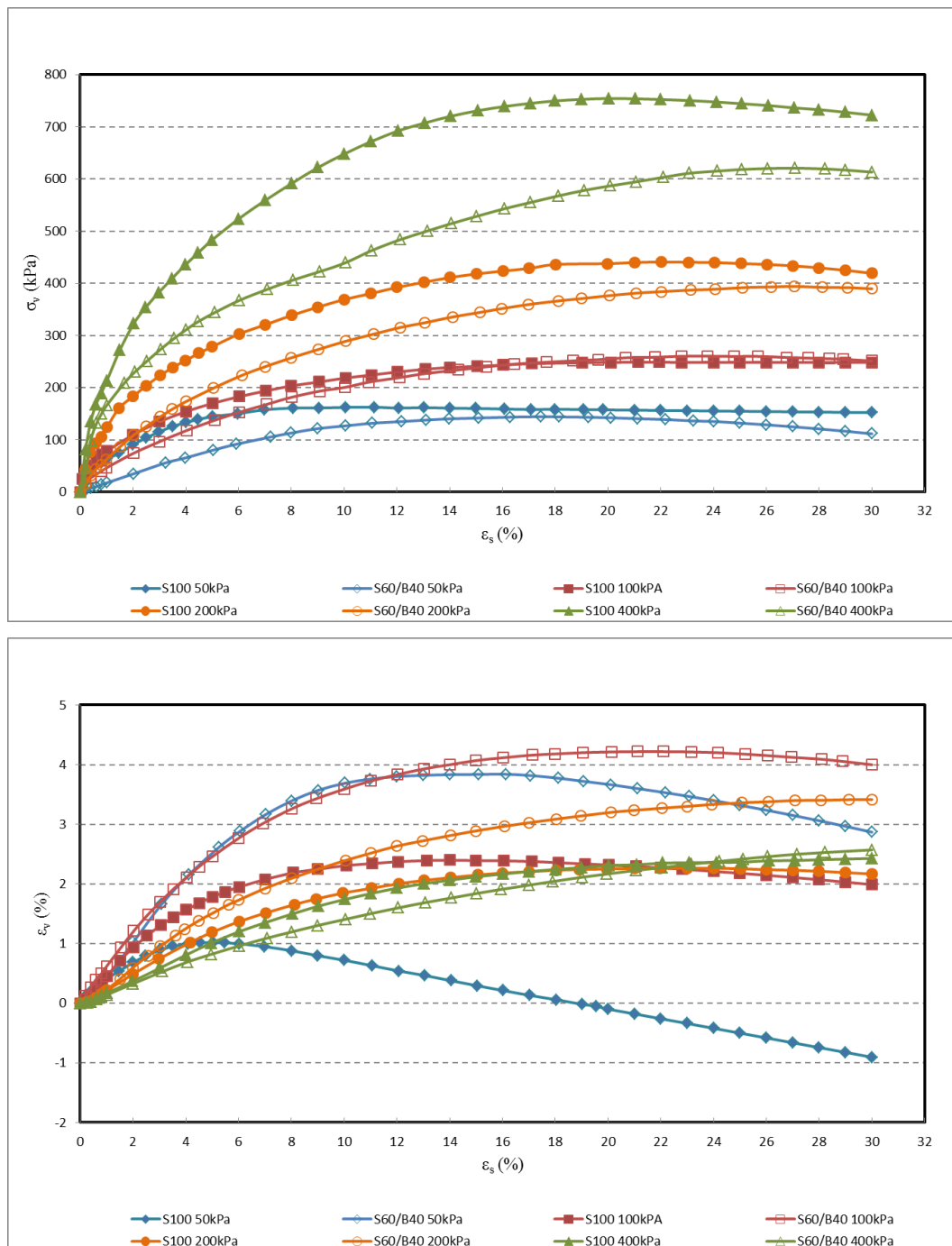


Figura 4.27 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras S100 e S60/B40 em ensaios triaxiais de compressão axial.



Pode-se observar a influência que o teor de borracha moída tem nas características de resistência do solo argiloso. Na medida em que vai se acrescentando borracha no solo argiloso, o comportamento deste, durante o cisalhamento, melhora. Atinge-se uma melhora máxima quando a porcentagem da borracha moída, presente no solo argiloso, é de 10%, mostrando-se uma degradação do comportamento a partir do teor de borracha de 20%. Embora 10% seja o teor que apresenta as maiores melhoras na resistência ao cisalhamento, não se pode confirmá-lo como teor ótimo. Assim, a porcentagem ótima vai se situar entre 10% e 20% de borracha moída. Ver Figura 4.28 e Figura 4.29.

O comportamento das misturas, além de depender da porcentagem de borracha, depende em grande parte, do nível de confinamento sob a qual as amostras estão sendo submetidas. Assim, as envoltórias e parâmetros de resistência não vão depender somente do teor de borracha moída presente do solo argiloso, mas também do nível de tensão confinante.

Com o fim de se apresentar uma comparação quantitativa da influência da inserção de borracha no solo argiloso estabeleceram-se dois parâmetros adimensionais. O primeiro, chamado de “*relação de resistência de pico*”, que compara a resistência de pico da mistura com a resistência de pico do solo puro. Assim para valores maiores que um (1,0), da “*relação de resistência de pico*”, a mistura tem uma maior resistência de pico que o solo puro e o contrário acontece quando o valor da “*relação de resistência de pico*” é menor que um (1,0). O segundo parâmetro, chamado de “*relação de resistência pós-pico*”, compara a resistência pós-pico da mistura (correspondente à deformação axial de 24%) com a resistência pós-pico do solo argiloso. A “*relação de resistência pós-pico*” indica que a resistência pós-pico da mistura é maior do que do solo puro quando o resultado desta comparação é maior do que um (1,0). A seguir se apresenta as relações antes indicadas:

$$R_{pico} = \frac{\text{Resistência de Pico da Mistura}}{\text{Resistência de Pico do Solo Puro}} \quad \text{Equação 7}$$

$$R_{pós} = \frac{\text{Resistência Pós-Pico da Mistura}}{\text{Resistência Pós-Pico do Solo Puro}} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

$R_{\text{pico}}$  = Relação de Resistência de Pico

$R_{\text{pós}}$  = Relação de Resistência Pós-Pico

Se  $R_{\text{pico}} > 1,0$  então a resistência de pico da mistura é maior do que a do solo puro. Se  $R_{\text{pós}} > 1,0$  então a resistência pós-pico da mistura é maior do que a do solo puro.

Em função destes parâmetros, a Figura 4.28 e a Figura 4.29 apresentam a influência da inserção da borracha e do nível de tensão confinante na resistência de pico e na resistência pós-pico, respectivamente. Pode-se apreciar mais claramente a influência do teor de borracha na resistência ao cisalhamento, sendo que, para o teor de 10% a melhoria é máxima, mas o teor ótimo situa-se entre 10% e 20% de borracha. A influência da tensão confinante é apresentada com maior notoriedade, sendo mais efetiva a inserção de borracha para tensões de confinamento de até 200 kPa. Para tensões de confinamento maiores do que 200 kPa nota-se que a presença da borracha é prejudicial, pois  $R_{\text{pico}}$  e  $R_{\text{pós}}$  apresentam diminuição. Este comportamento encontraria uma explicação no confinamento excessivo que restringe a dilatação do corpo de prova. Esta dilatação tal vez seja necessária para mobilizar a resistência à tração da borracha.

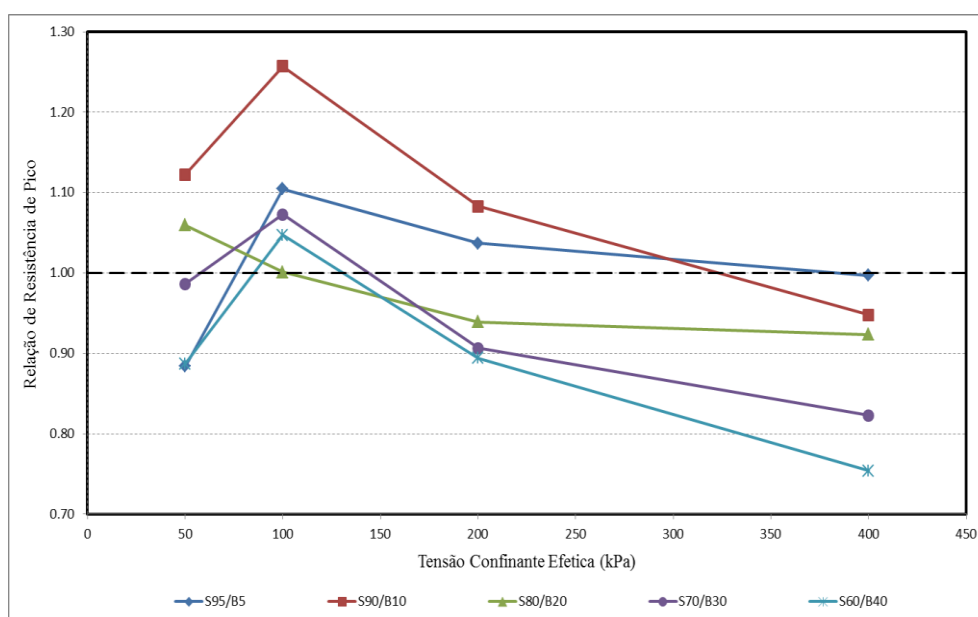


Figura 4.28 - Relação de Resistência de Pico x Tensão Confinante Efetiva.  
Misturas solo argiloso - borracha.

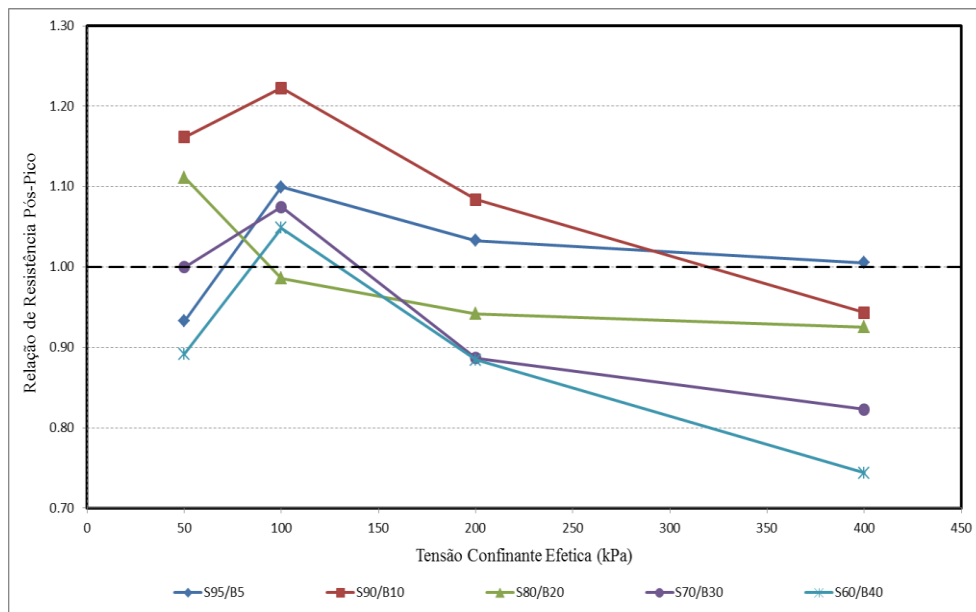


Figura 4.29 - Relação de Resistência Pós-Pico x Tensão Confinante Efetiva.  
Misturas solo argiloso - borracha.

Attom et. al. (2007), Costa et. al. (2011) e Szeliga (2011) mostraram que o comportamento mecânico dos compósitos solo argiloso-borracha depende do teor de borracha inserido na mistura. Sendo que a melhora acontece até certo teor, a partir deste valor a adição de borracha é prejudicial.

#### 4.2.1.2.4. Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Desde a Figura 4.30 até a Figura 4.35 estão ilustradas, respectivamente, as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso e das misturas S95/B5, S90/B10, S80/B20, S70/B30 e S60/B40. As envoltórias estão plotadas no espaço  $p':q$ . Desde a Figura 4.36 até a Figura 4.40, apresentam-se as comparações entre as envoltórias de resistência obtidas para o solo argiloso e cada mistura. As envoltórias obtidas para as misturas foram consideradas bi-lineares, sendo a envoltória ajustada para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa é denominada com o símbolo I e a envoltória ajustada para as tensões confinantes de 200 kPa e 400 kPa com o símbolo II.

Este comportamento de bi-linearidade da envoltória de resistência também foi registrado por Özkul e Baykal (2007). Estabeleceram um limite de tensão

confinante depois da qual o comportamento da resistência ao cisalhamento muda negativamente.

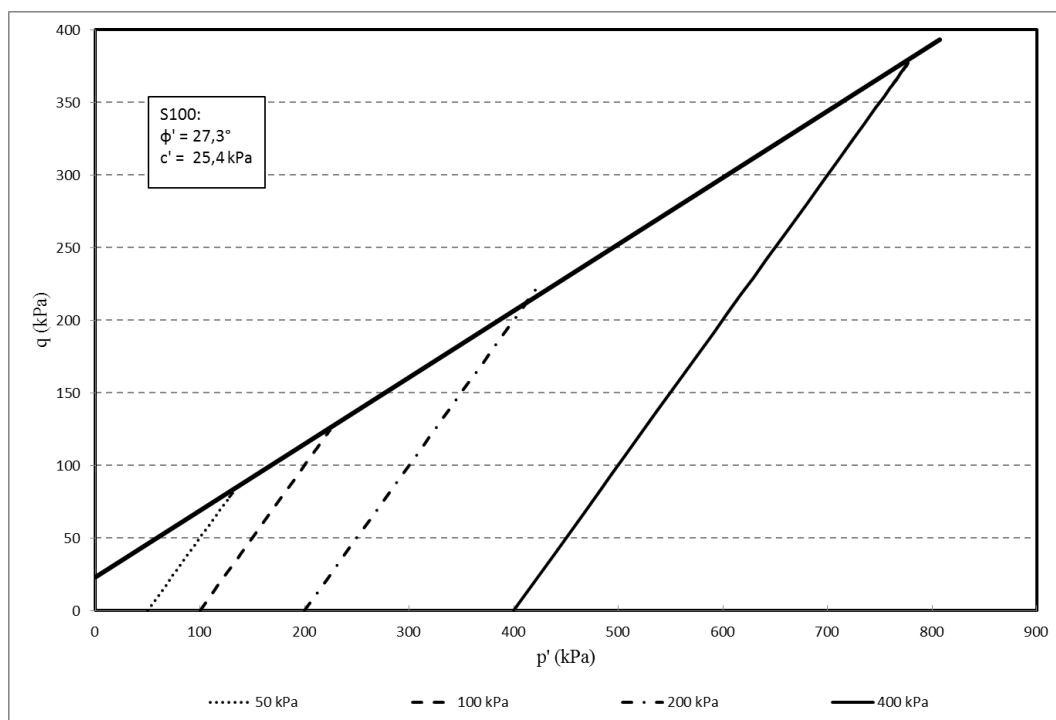


Figura 4.30 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo argiloso S100.

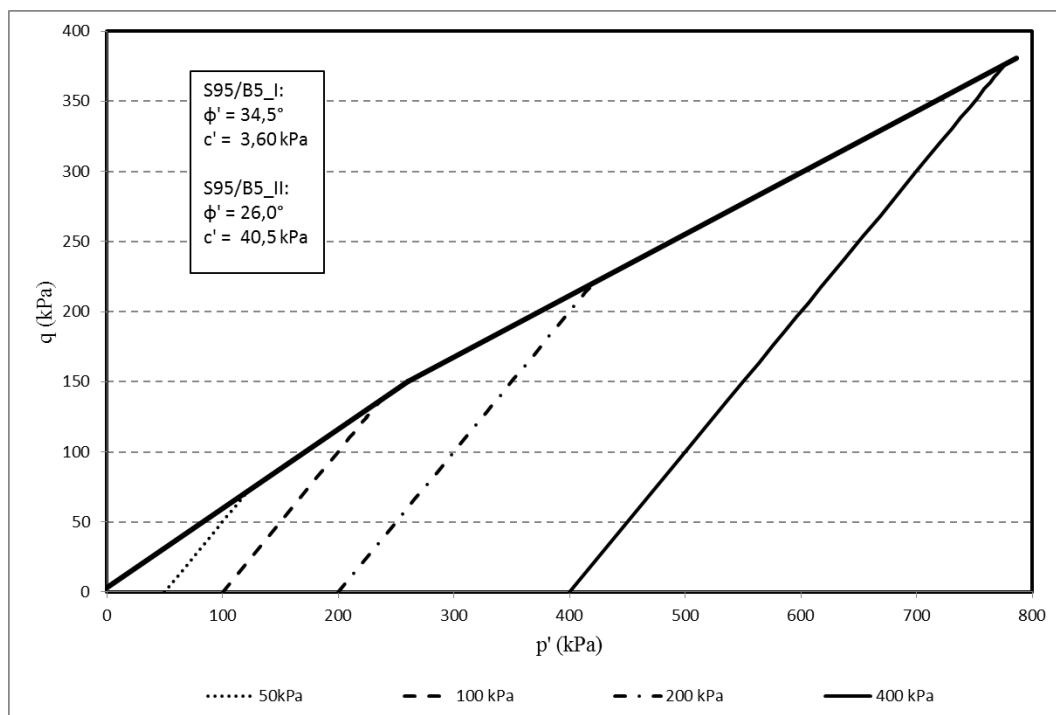


Figura 4.31 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S95/B5.

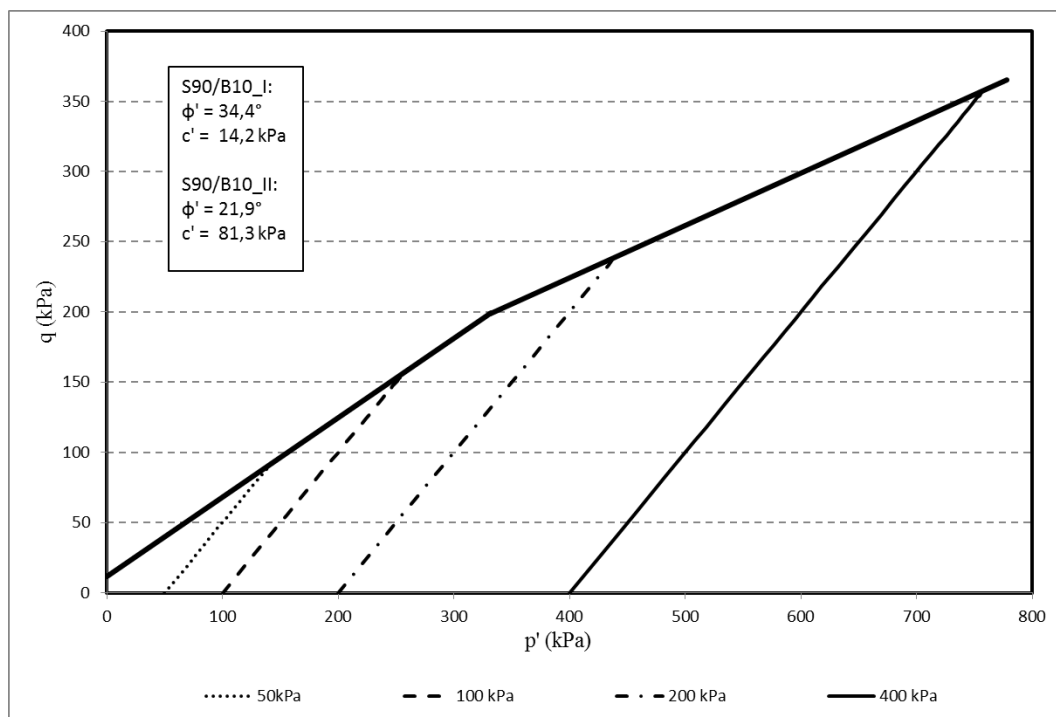


Figura 4.32 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S90/B10.

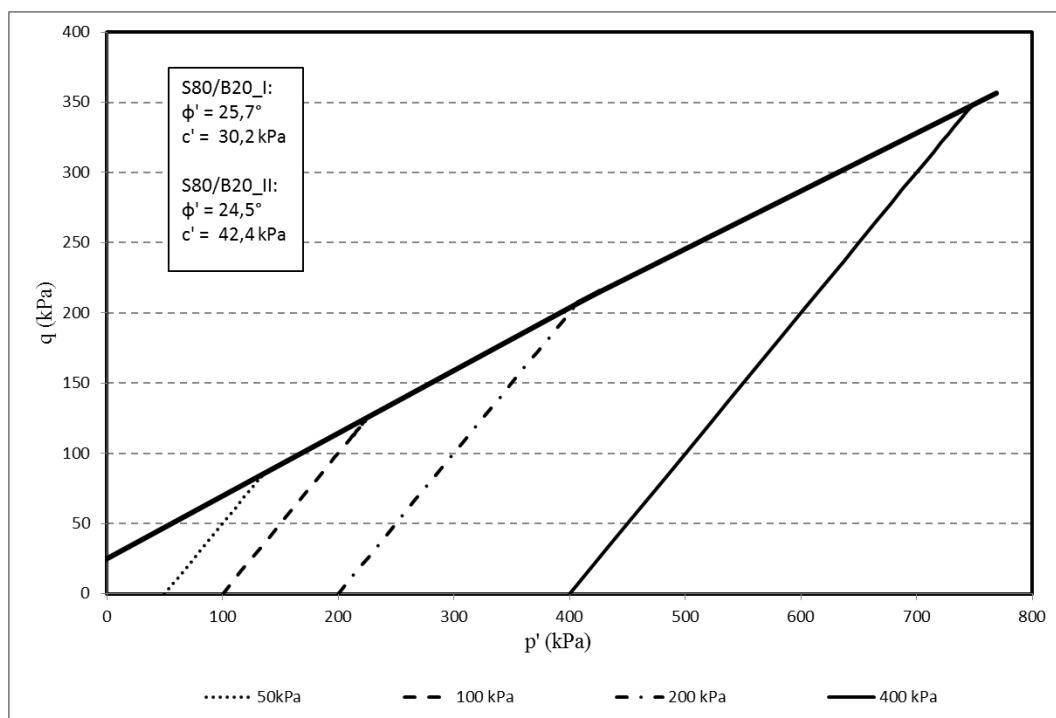


Figura 4.33 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S80/B20.

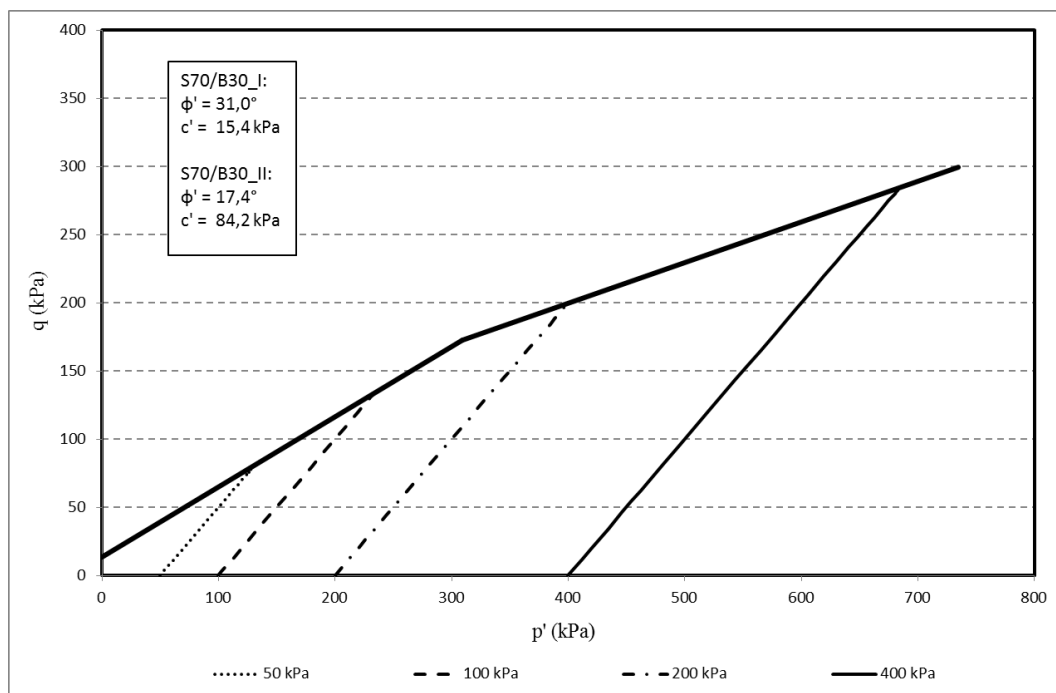


Figura 4.34 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S70/B30.

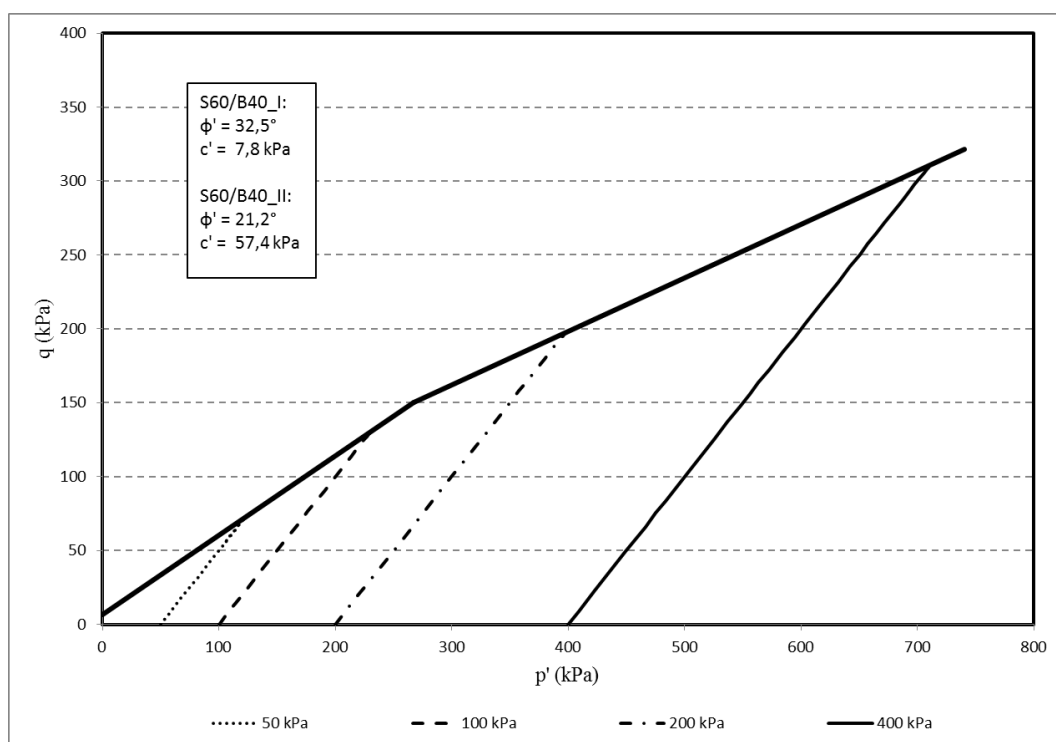


Figura 4.35 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura S60/B40.

A Figura 4.36 apresenta as envoltórias do solo argiloso puro (S100) e da mistura S95/B5. O início da primeira parcela (S95/B5\_I) da envoltória da mistura mostra resistências menores que da envoltória do S100. Este resulta do menor valor de resistência de pico da mistura quando comparada com a resistência do solo puro para a tensão de 50 kPa. Já para a tensão de 100 kPa, a resistência de pico da mistura é maior que do solo argiloso puro fazendo que a última parte desta parcela (S95/B5\_I) se situe sobre a envoltória de S100. Para esta primeira parcela observa-se uma melhora no ângulo de atrito, sendo que este aumentou de  $27,3^\circ$  para  $34,5^\circ$ . A coesão caiu de 25,4 kPa para 3,6 kPa. Então para níveis de tensões confinantes baixos a presença de borracha moída favorece na melhora do ângulo de atrito, mas prejudica a coesão provocando uma queda significativa. A segunda parte da envoltória (S95/B5\_II) apresenta melhoras nos parâmetros de resistência, sendo que o ângulo de atrito praticamente não mudou e a coesão aumentou de 25,4 kPa para 40,5 kPa.

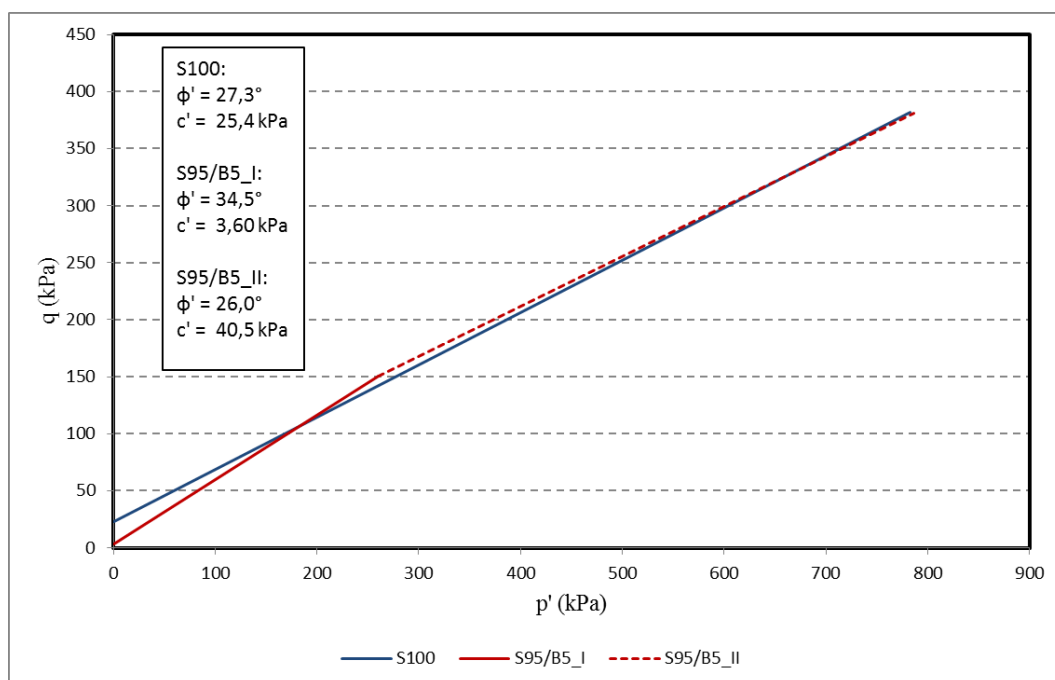


Figura 4.36 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S95/B5.

A Figura 4.37 apresenta as envoltórias de resistência do solo argiloso (S100) e da mistura S90/B10. Pode-se apreciar uma maior área no espaço  $p':q$  onde a tensão de desvio da mistura é maior que a resistência ao cisalhamento do solo

puro. Esta melhoria se reflete no aumento dos parâmetros de resistência, sendo que existe um incremento destes em relação aos parâmetros do solo argiloso (S100) e da mistura S95/B5.

Na Figura 4.38 comparam-se as envoltórias de resistência do solo puro e da mistura S80/B20. Observa-se que às envoltórias são muito parecidas, sendo que para tensões confinantes altas a mistura apresenta uma leve queda dos valores da tensão de desvio. Os parâmetros de resistência apresentam melhora na coesão e redução do ângulo de atrito.

A Figura 4.39 apresenta as envoltórias de resistência do solo argiloso (S100) e das misturas S70/B30. Pode-se apreciar que existe uma maior área no espaço  $p':q$  onde a tensão de desvio da mistura é menor que a tensão de desvio do solo puro.

A comparação das envoltórias do solo puro e da mistura S60/B40 são apresentadas na Figura 4.40. Ao igual que a comparação feita na Figura 4.39 correspondente à mistura S70/B30, pode-se ver uma área significativa no espaço  $p':q$  onde os valores de tensão de desvio da mistura são menores que do solo argiloso (S100).

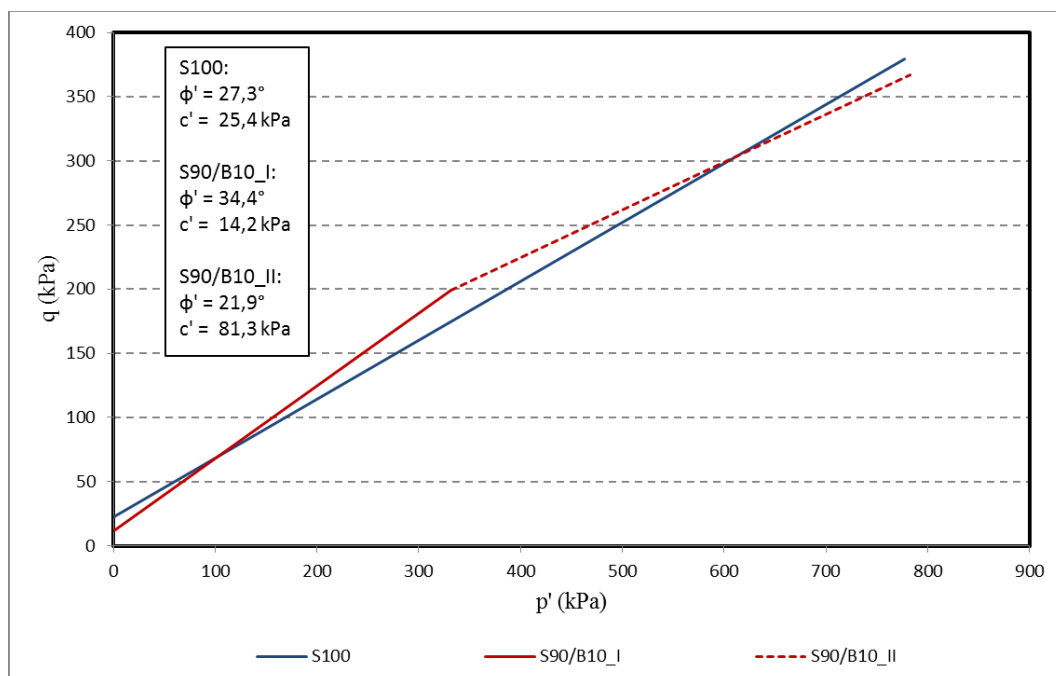


Figura 4.37 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S90/B10.



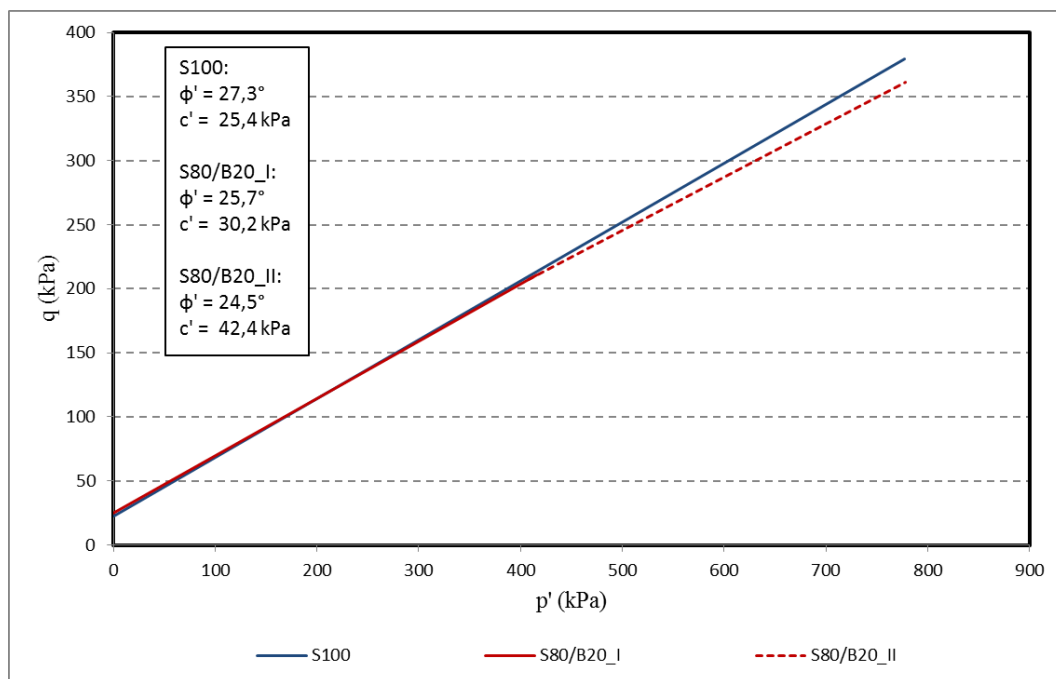


Figura 4.38 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S80/B20.

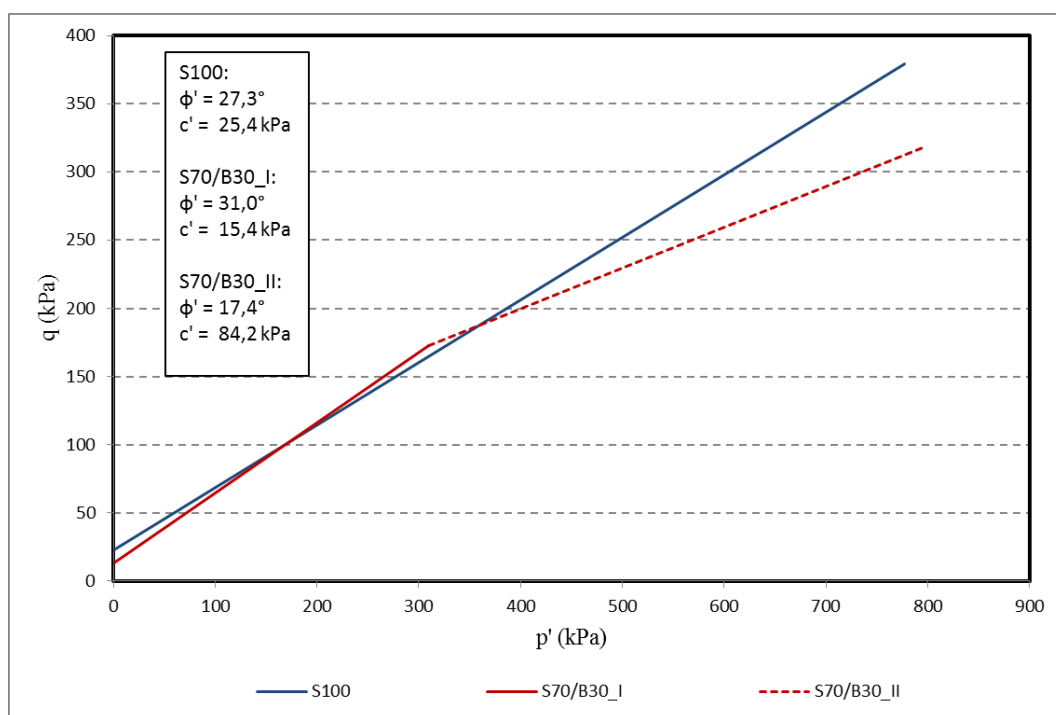


Figura 4.39 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S70/B30.

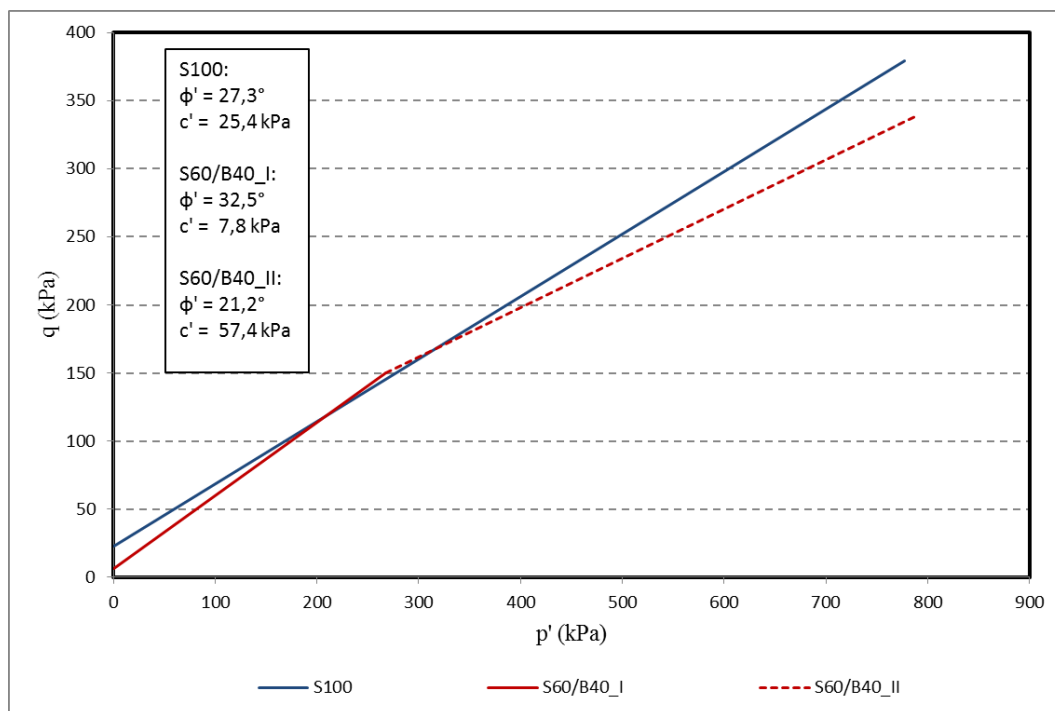


Figura 4.40 - Comparação entre as envoltórias do solo argiloso S100 e da mistura S60/B40.

A Tabela 4.4 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência do solo argiloso (S100) e de todas as misturas. Pode-se apreciar a influência do nível de confinamento nas magnitudes dos parâmetros de resistência. O ângulo de atrito do solo puro melhora para tensões de confinamento baixas, o contrário sucede para tensões de confinamento altas. A coesão apresenta um melhor comportamento em relação ao solo puro para tensões de confinamento altas.

Tabela 4.4 - Resumo ângulo de atrito e coesão (kPa) de cada mistura solo argiloso-borracha e nível de tensão confinante.

MATERIAL											
S100		S95/B5		S90/B10		S80/B20		S70/B30		S60/B40	
		Conf. Baixo	Conf. Alto	Conf. Baixo	Conf. Alto	Conf. Baixo	Conf. Alto	Conf. Baixo	Conf. Alto	Conf. Baixo	Conf. Alto
$\varphi^{\circ}$	27,3	34,5	26,0	34,4	21,9	25,7	24,5	31,0	17,4	32,5	21,2
$c'$	25,4	3,6	40,5	14,2	81,3	30,2	42,4	15,4	84,2	7,8	57,4

## **4.2.2. Solo Arenoso**

### **4.2.2.1. Ensaio Triaxiais CID**

Este item abrange os resultados dos ensaios triaxiais CID, em compressão axial, executados em amostras do solo arenoso (A100) e misturas com teores de borracha de 5% e 10% em relação ao peso do solo seco. Foram aplicadas tensões efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa em todos os casos. As trajetórias, envoltórias de resistência e os parâmetros de resistência ao cisalhamento são apresentados neste item.

Apresenta-se também uma análise da influência da tensão de confinamento e do teor de borracha no comportamento das amostras durante o cisalhamento.

São apresentadas também as fotografias dos corpos de prova ao final do cisalhamento de solo arenoso e das misturas para os diferentes níveis de tensões. O corpo de prova da areia pura ensaiada em 50 kPa de tensão confinante não foi colocado já que o registro fotográfico se perdeu devido a uma falha informática.

Todos os corpos de prova foram fotografados dentro da câmara triaxial. Os corpos de prova não foram retirados da membrana já que este procedimento provocaria a alteração do estado final das amostras. Somente o corpo de prova da mistura A90/B10 ensaiada em 400 kPa de tensão confinante foi fotografada sem a membrana e fora da câmara triaxial. Isto serviu para observar a ruptura acontecida na amostra.

#### **4.2.2.1.1. Comportamento Tensão Desviadora e Variação Volumétrica x Distorção**

Na Figura 4.41 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a matriz de solo arenoso, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

A Figura 4.42 apresenta as fotografias das amostras rompidas do solo arenoso para cada nível de tensão.

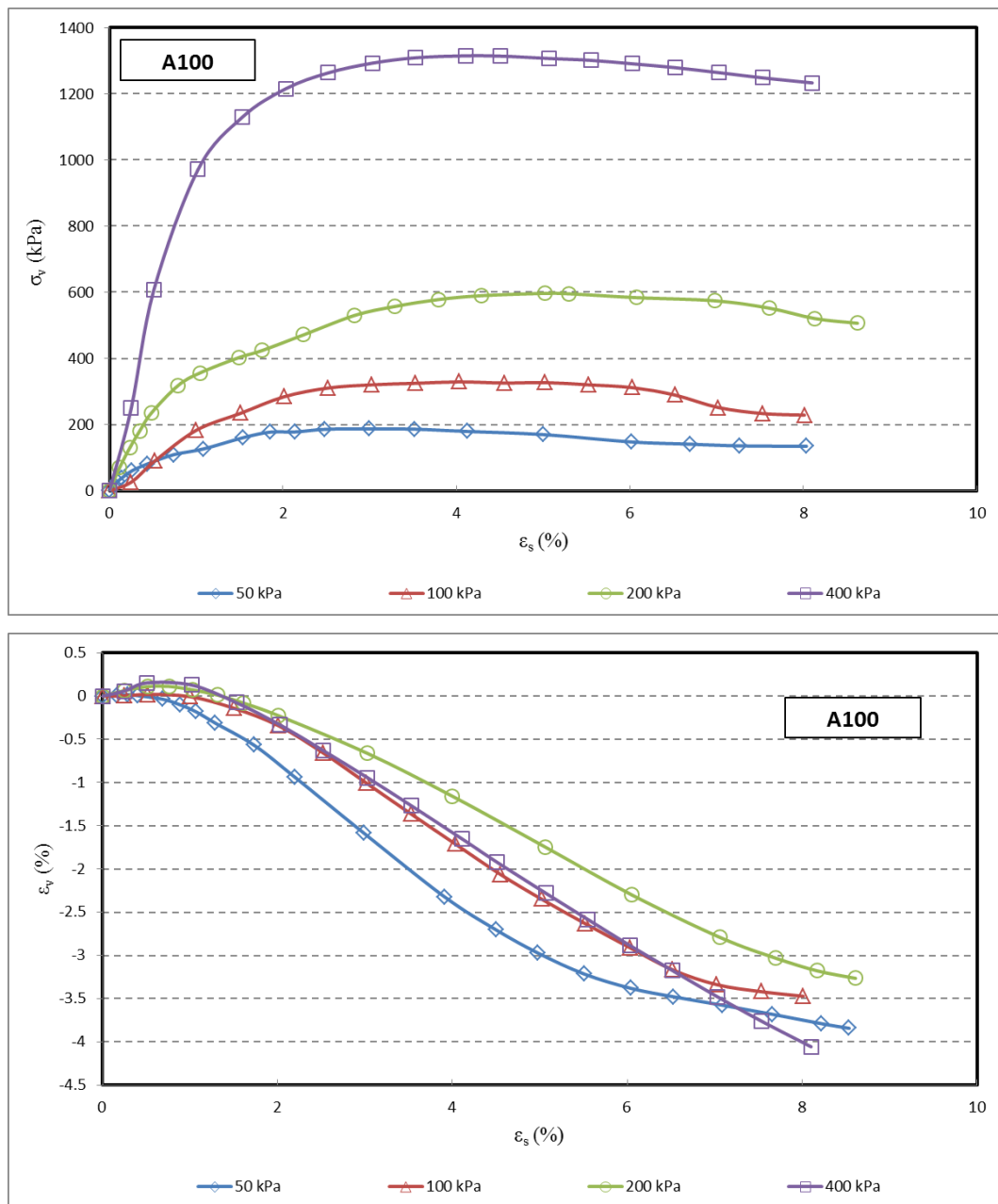


Figura 4.41 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para o solo arenoso (A100) em triaxiais em compressão axial.

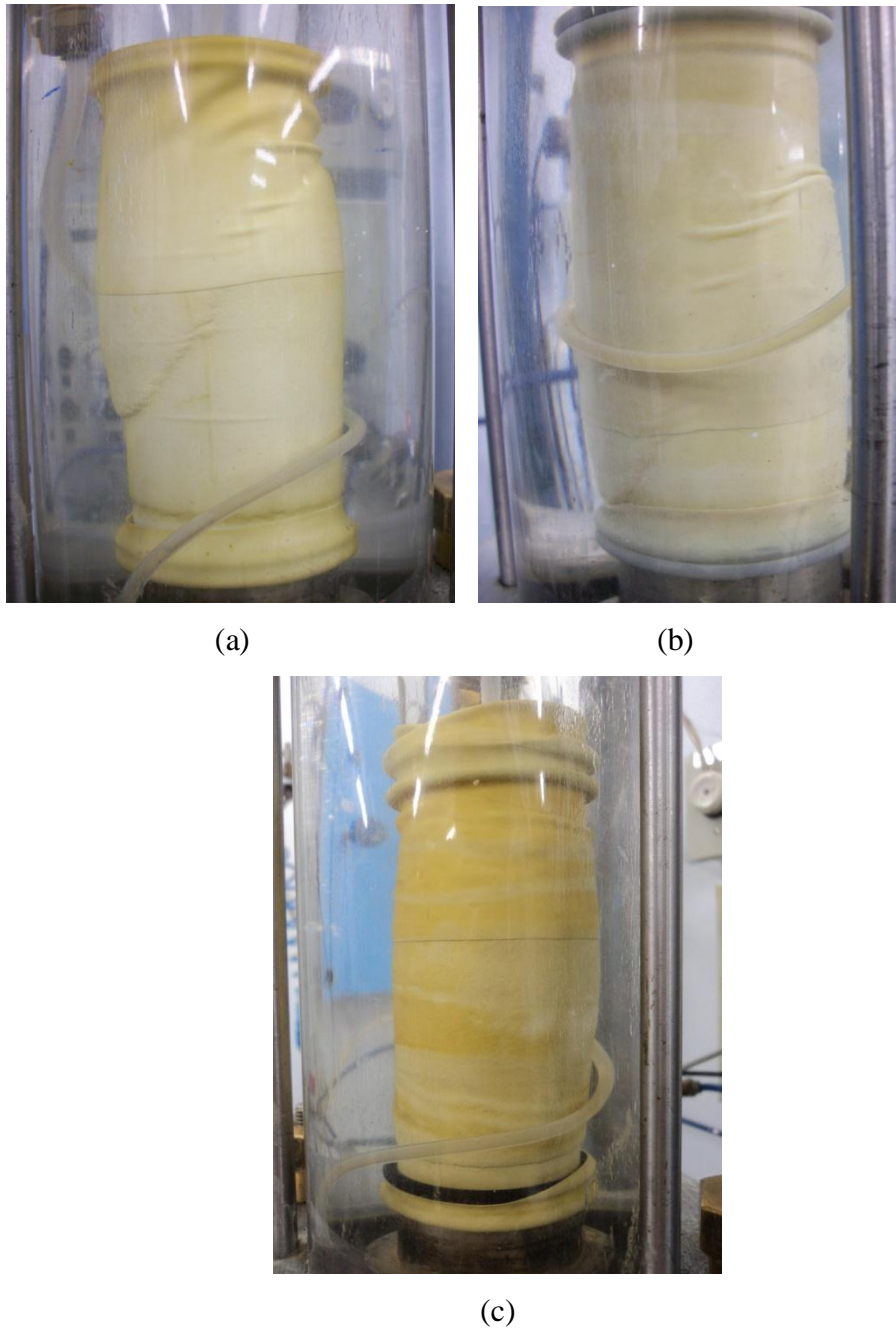


Figura 4.42 - Amostras rompidas de areia (A100). Tensão confinante de: (a) 100 kPa, (b) 200 kPa, (c) 400 kPa.

Na Figura 4.43 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura A95/B5, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa. A Figura 4.44 apresenta as fotografias das amostras rompidas da mistura S95/B5 para cada nível de tensão.

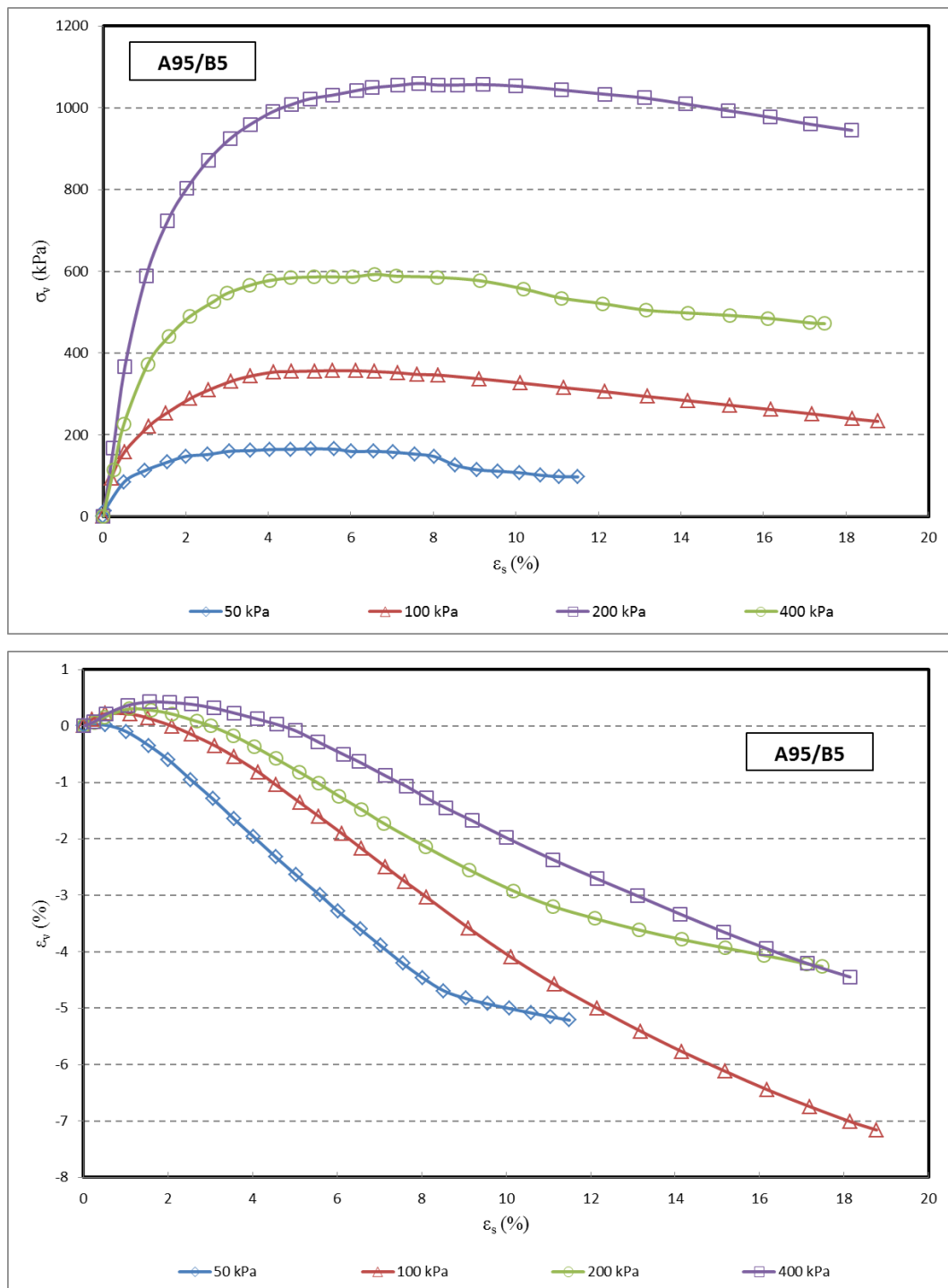


Figura 4.43 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura A95/B5 em triaxiais em compressão axial.

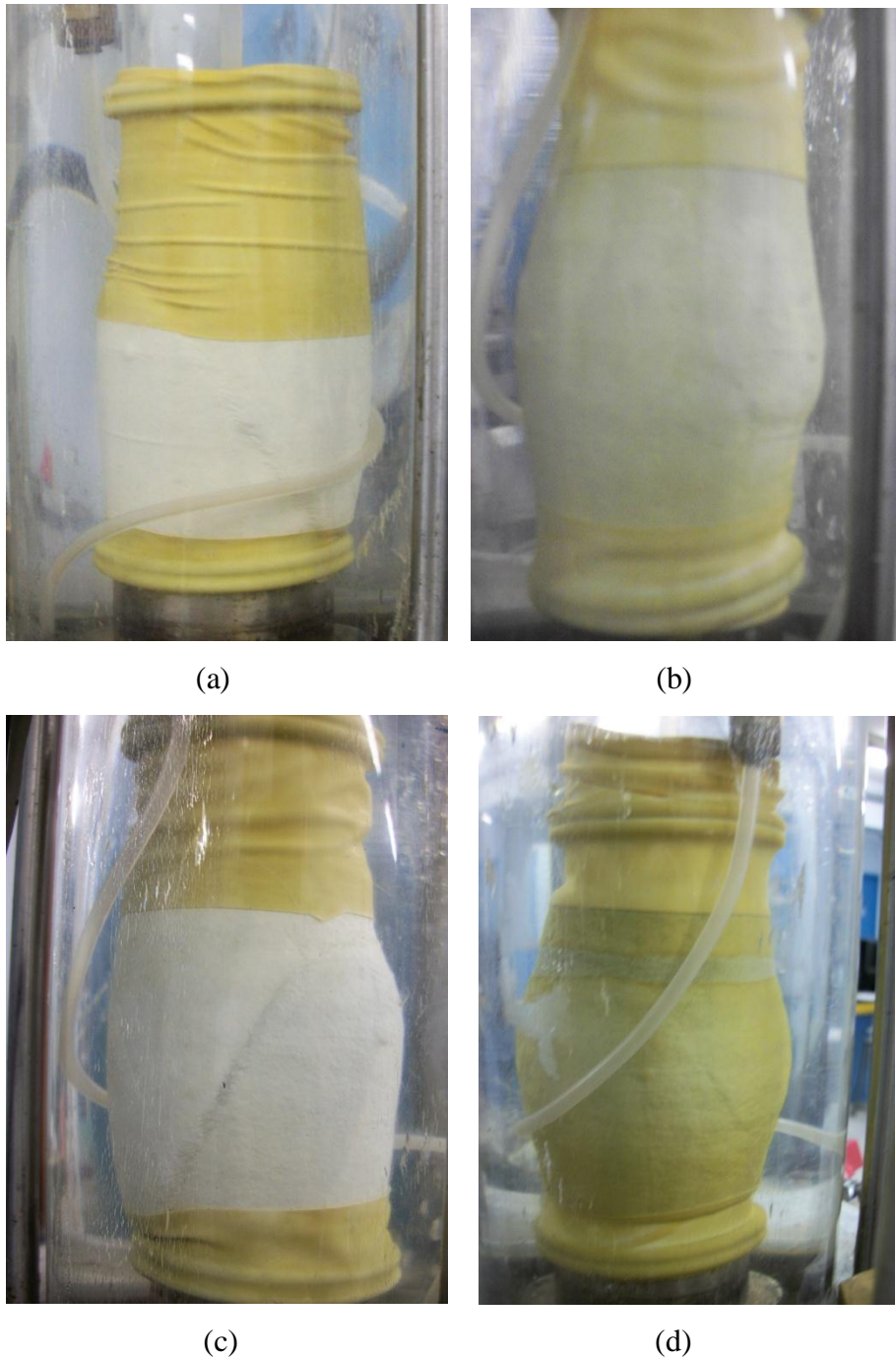


Figura 4.44 - Amostras rompidas da mistura A95/B5. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa.

Na Figura 4.45 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID, para a mistura A90/B10, em compressão axial nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa. A Figura 4.46 apresenta as fotografias das amostras rompidas da mistura S90/B10 para cada nível de tensão.

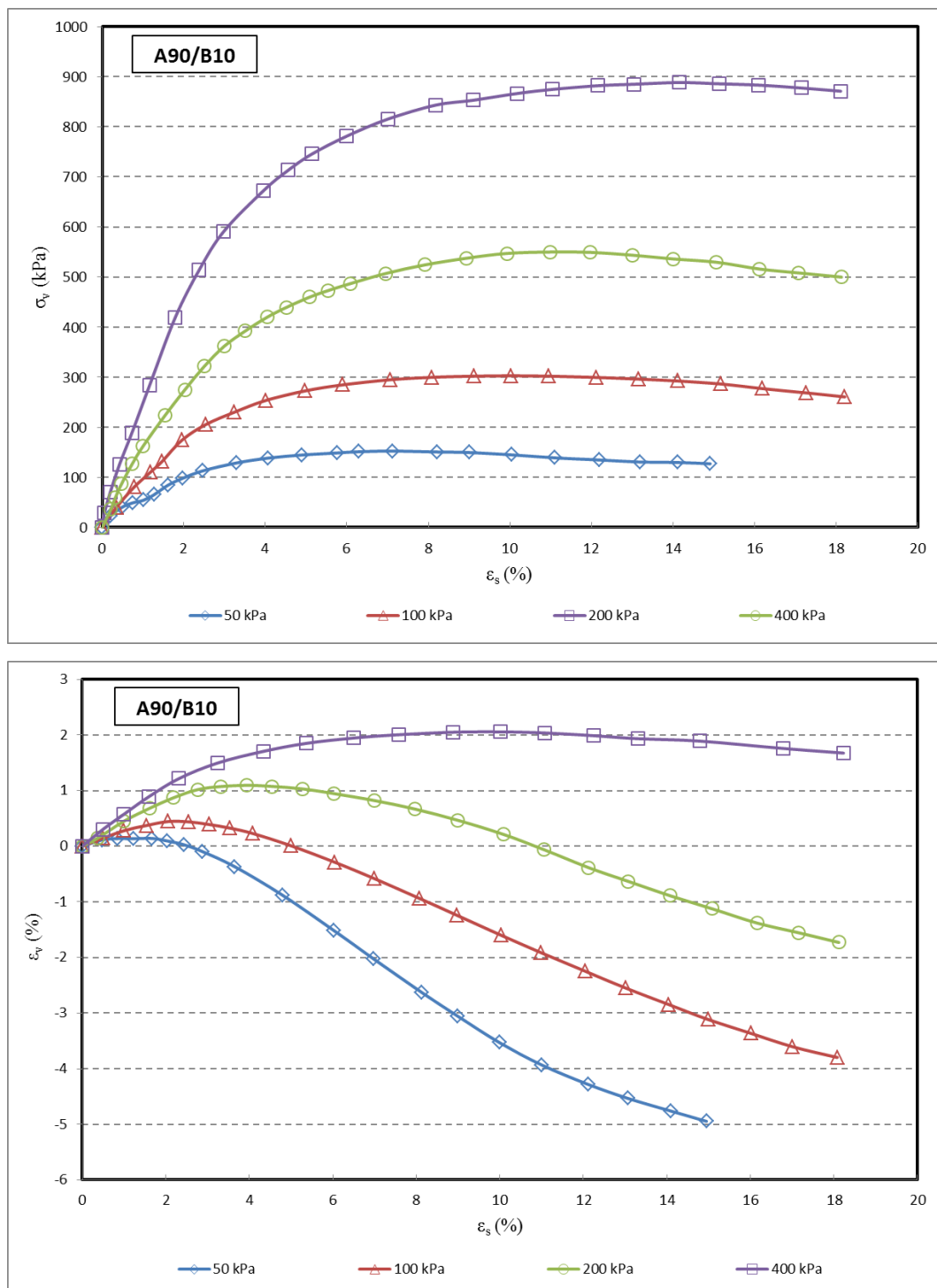


Figura 4.45 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para a mistura A90/B10 em triaxiais em compressão axial.



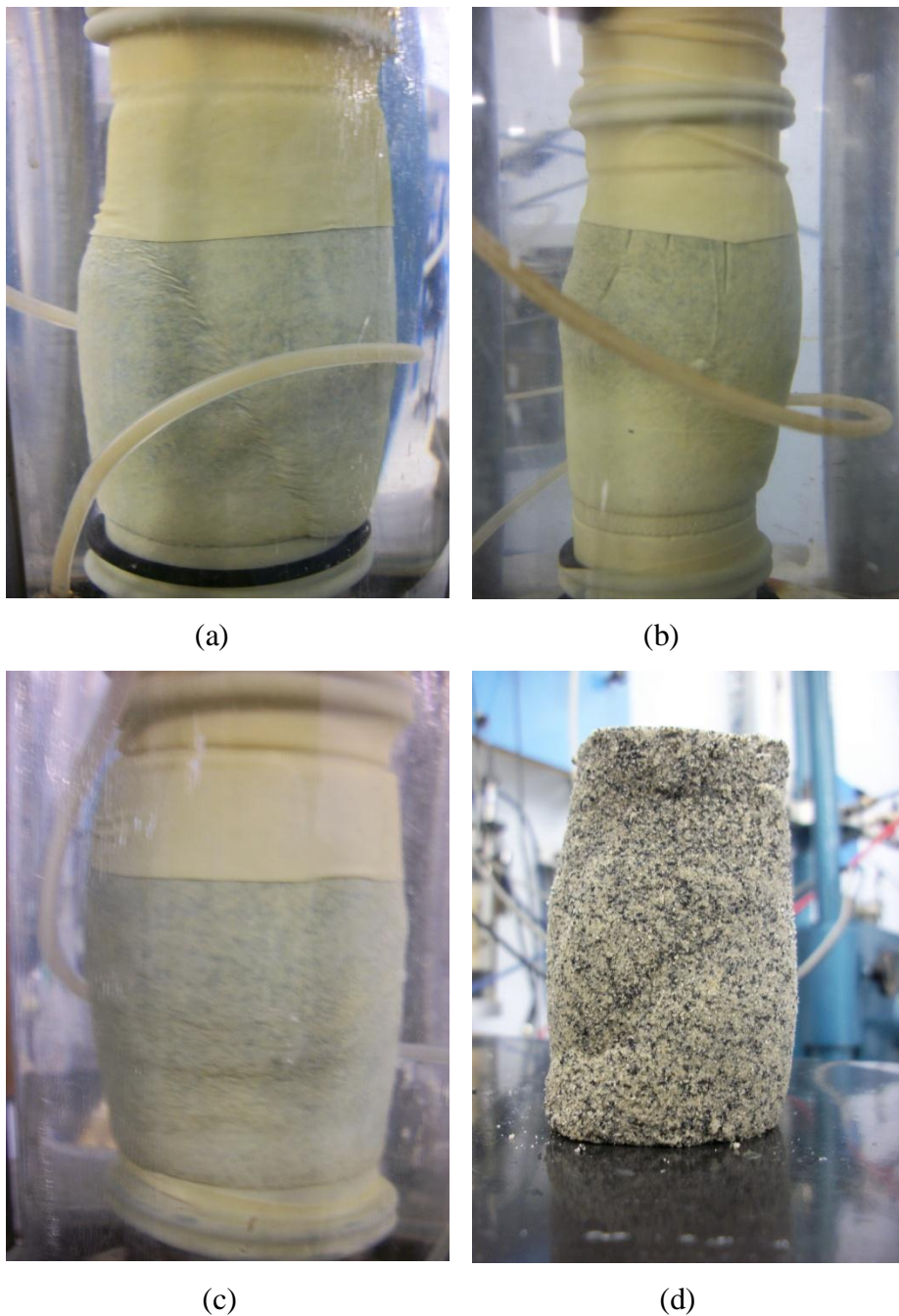


Figura 4.46 - Amostras rompidas da mistura A90/B10. Tensão confinante de: (a) 50 kPa, (b) 100 kPa, (c) 200 kPa, (d) 400 kPa.

#### 4.2.2.1.2. Influência do nível de Tensão Confinante

Para o nível de tensão confinante efetiva de 50 kPa (Figura 4.47), os corpos de prova das duas misturas, A95/B5 e A90/B10, apresentam resistências de pico menores que do corpo de prova do solo arenoso (A100), sendo que para o corpo

de prova com teor de borracha de 10% a resistência de pico é menor que do corpo de prova com teor de borracha de 5%. A resistência de pico do solo arenoso acontece para uma deformação axial de 3,0%. Enquanto que para a resistência de pico da mistura A95/B5 e A90/B10 acontecem para uma deformação axial de 5,6% e 7,1% respectivamente. O corpo de prova de solo arenoso (A100) atinge um pico e logo a resistência ao cisalhamento decresce. Devido às dimensões do corpo de prova se considerou desnecessário atingir deformações axiais maiores a 8%, já que o corpo de prova apresentou um plano de ruptura bem definido para este nível de deformação. Os corpos de prova das misturas atingiram deformações axiais maiores do que 8%. As misturas apresentaram também planos de ruptura bem definidos, assim o cisalhamento foi parado, pois a cunha superior que escorregava sobre a cunha inferior começou a se apoiar na base do pedestal provocando incremento na resistência ao cisalhamento. De esta forma a amostra A95/B5 atingiu a deformação axial de 11,5% ao final do cisalhamento e a amostra A90/B10 a deformação axial de 14,9%.

Pode-se apreciar que a mistura A90/B10 tem a tendência de possuir maiores valores de resistência pós-pico que da areia pura. Em contrapartida, a mistura A95/B5 tem a tendência de ter menores valores de resistência pós-pico que da areia pura.

As duas misturas têm menor crescimento da resistência com a deformação do que do solo puro, sendo que ao início do cisalhamento a mistura A95/B5 tem um crescimento igual ao da areia pura, mas a partir da deformação axial de 0,5% esta tendência começa a diminuir significativamente.

O corpo de prova do solo arenoso (A100), ensaiado com 50 kPa de tensão confinante efetiva apresenta uma diminuição insignificante de volume durante o início do cisalhamento, sendo que para 0,5% de deformação axial esta amostra começa a expandir-se. Os corpos de prova das misturas tiveram maiores níveis de contração em comparação ao solo puro. A inclinação da curva de deformação volumétrica na fase de expansão da amostra de solo puro é elevada em relação à inclinação das curvas de deformação volumétrica das misturas também na fase de expansão. Todos os corpos de prova apresentaram maiores volumes do que no início do cisalhamento quando alcançaram as resistências de pico respectivas. Em relação ao corpo de prova de solo puro e para uma deformação axial de 8% o

corpo de prova da mistura S95/B5 apresentou menor volume e a amostra S90/B10 alcançou um volume maior.

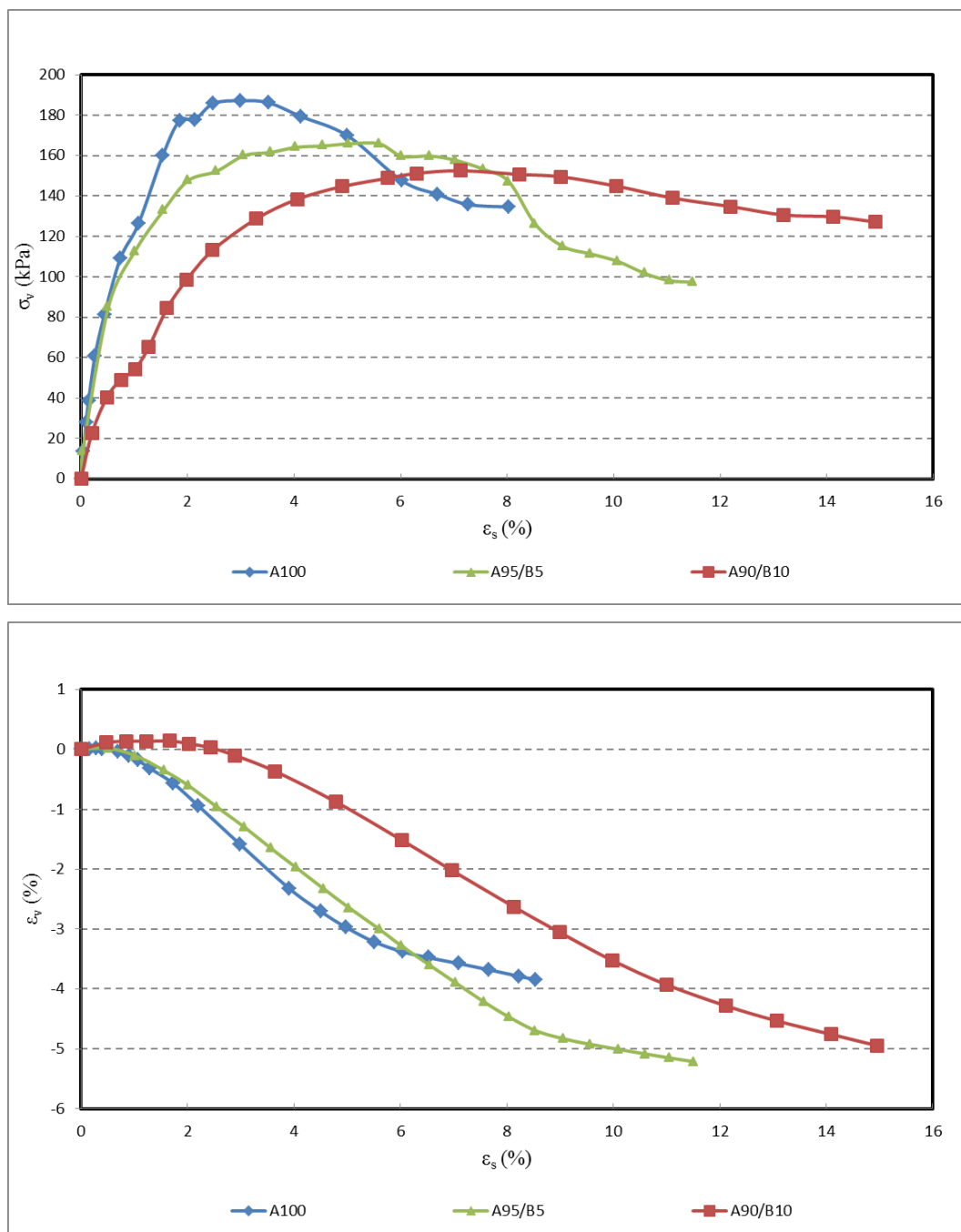


Figura 4.47 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 50 kPa de tensão confinante efetiva.

Para o nível de tensão confinante efetiva de 100 kPa (Figura 4.48), os corpos de prova das duas misturas, A95/B5 e A90/B10, apresentam resistências

de pico menores que do corpo de prova do solo arenoso (A100), sendo que para o corpo de prova com teor de borracha de 10% a resistência de pico é menor do que do corpo de prova com teor de borracha de 5%. A resistência de pico da mistura A95/B5 ligeiramente menor do que do solo puro, onde a diminuição é apenas de 6%. A resistência de pico do solo arenoso acontece para uma deformação axial de 4,0%. Enquanto que para a resistência de pico da mistura A95/B5 e A90/B10 acontecem para uma deformação axial de 5,6% e 10,0%, respectivamente. O corpo de prova de solo arenoso (A100) atinge um pico e logo a resistência ao cisalhamento decresce significativamente. As duas amostras de mistura atingiram a deformação axial de 18,0% ao final do cisalhamento, sendo que para este nível de formação apresentaram um plano de ruptura bem definido.

Pode-se apreciar que as misturas A90/B10 e A95/B5 têm a tendência de possuir maiores valores de resistência pós-pico do que da areia pura.

No início do cisalhamento a mistura A95/B5 possui maior crescimento da resistência com a deformação que do solo puro, mas a partir da deformação axial de 0,5% esta se torna menor do que do solo puro. A mistura A90/B10 apresenta um menor crescimento da resistência com a deformação do que do solo arenoso (A100).

O corpo de prova do solo arenoso (A100), ensaiado com 100 kPa de tensão confinante efetiva, apresenta uma diminuição insignificante de volume durante o início do cisalhamento, sendo que para 0,5% de deformação axial esta amostra começa a expandir-se, este comportamento apresenta-se também para a tensão confinante de 50 kPa. Os corpos de prova das misturas tiveram maiores níveis de contração em comparação ao solo puro. A inclinação da curva de deformação volumétrica na fase de expansão da amostra de solo puro é maior em relação à inclinação das curvas de deformação volumétrica das misturas também na fase de expansão. Todos os corpos de prova apresentaram maiores volumes do que no início do cisalhamento, quando alcançaram as resistências de pico respectivas. Em relação ao corpo de prova de solo puro e para uma deformação axial de 8% o corpo de prova das misturas apresentaram menores volumes.

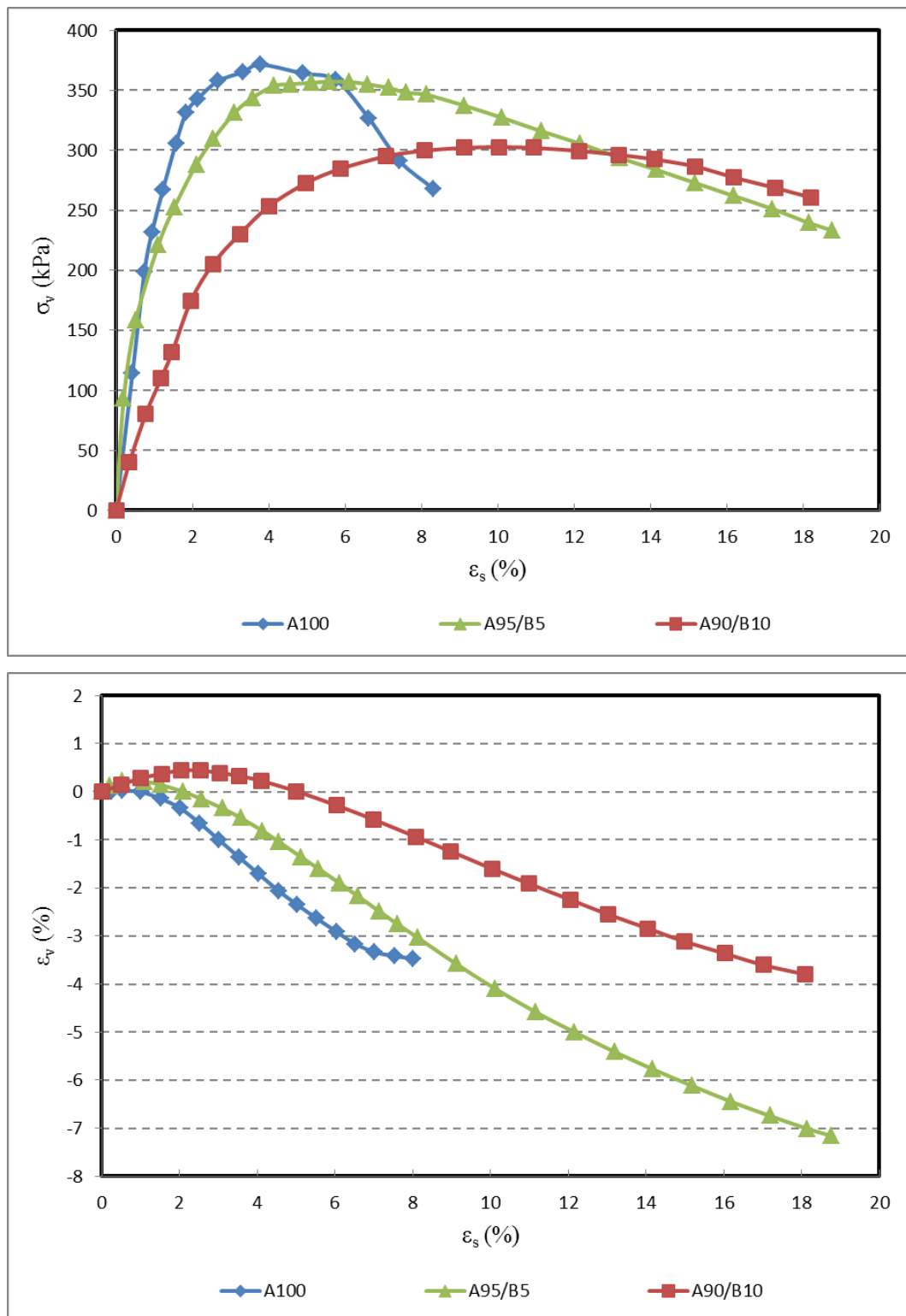


Figura 4.48 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 100 kPa de tensão confinante efetiva.

Para o nível de tensão confinante efetiva de 200 kPa (Figura 4.49), o corpo de prova da mistura A95/B5 apresentou uma resistência de pico praticamente igual que do corpo de prova do solo arenoso (A100), sendo que a diminuição de resistência foi apenas de 0,6%. A resistência de pico da mistura A90/B10 é menor que do solo puro, sendo que a diminuição foi de 7,8%. A resistência de pico do solo arenoso acontece para uma deformação axial de 5,0%. Enquanto que as resistências de pico das misturas A95/B5 e A90/B10 acontecem para uma deformação axial de 6,6% e 11,0% respectivamente. O corpo de prova de solo arenoso (A100) atinge um pico e logo a resistência ao cisalhamento decresce significativamente. As duas amostras de mistura atingiram a deformação axial de 18,0% no final do cisalhamento, sendo que para este nível de deformação apresentaram um plano de ruptura bem definido. Pode-se apreciar que as misturas A90/B10 e A95/B5 têm a tendência de possuir maiores valores de resistência pós-pico que da areia pura, apresentando-se a mistura A90/B10 como melhor comportada para grandes deformações. No início do cisalhamento a mistura A95/B5 possui igual crescimento da resistência com a deformação do que do solo puro, mas a partir da deformação axial de 1,0% esta se torna maior que do solo puro até retornar novamente a ser menor a partir da uma deformação axial de 3,0%. A mistura A90/B10 apresenta um menor crescimento da resistência com a deformação do que do solo arenoso (A100).

O corpo de prova do solo arenoso (A100), ensaiado com 200 kPa de tensão confinante efetiva apresenta uma diminuição de volume pequena durante o início do cisalhamento, sendo que para 0,5% de deformação axial esta amostra começa a expandir-se, este comportamento apresenta-se também para a tensão confinante de 50 e 100 kPa. Os corpos de prova das misturas tiveram maiores níveis de contração em comparação ao solo puro. A inclinação da curva de deformação volumétrica na fase de expansão da amostra de solo puro é maior em relação à inclinação das curvas de deformação volumétrica das misturas também na fase de expansão. Os corpos de prova de solo puro e da mistura A95/B5 apresentaram maiores volumes do que no início do cisalhamento quando alcançaram as resistências de pico respectivas. A mistura A90/B10 apresentou o mesmo volume do que no início do cisalhamento quanto atingiu sua resistência de pico. Em relação ao corpo de prova de solo puro e para uma deformação axial de 8%, os corpos de prova das misturas A95/B5 e A90/B10 apresentaram menor volume,

sendo que o volume da mistura A90/B10 foi menor do que no início do cisalhamento.

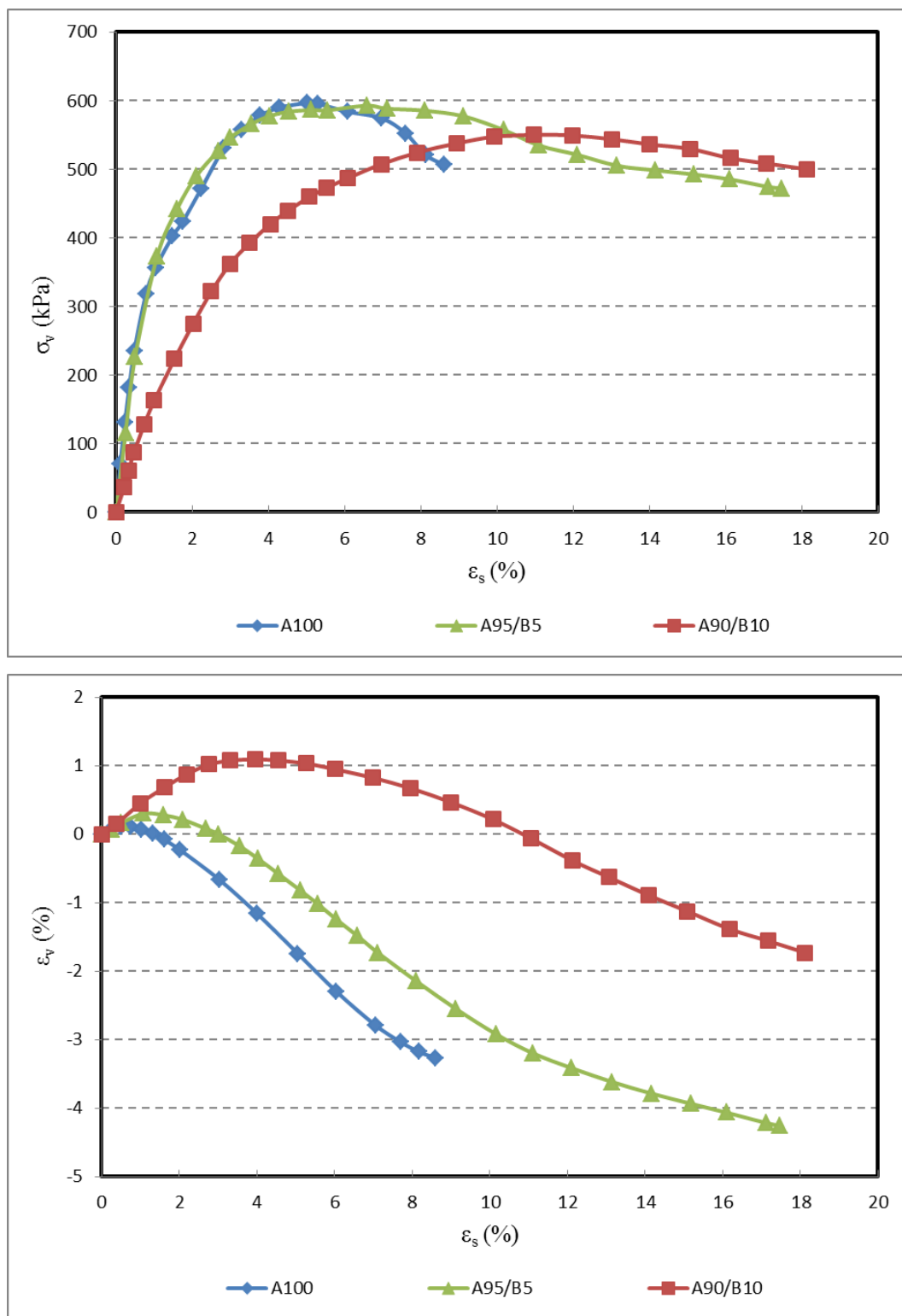


Figura 4.49 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 200 kPa de tensão confinante efetiva.

Pode-se observar que o nível de contração sofrido pelos três corpos de prova é maior que o sofrido para as tensões de confinamento menores, este fato se verifica com o valor máximo de contração que tem a mistura A90/B10, atingindo uma variação volumétrica positiva maior que 1%, sendo que nos níveis de tensão 50 e 100 kPa este valor somente chegou a ser 0,2% e 0,5% respectivamente. Também a curva de deformação volumétrica da mistura A90/B10 começa a afastar-se das outras duas curvas e apresentando menor nível de expansão em relação aos corpos de prova, desta mesma mistura, ensaiados com menores tensões confinantes. As curvas de deformação volumétrica do solo puro (A100) e da mistura A95/B5 ainda apresentam-se próximas, mas já vão mostrando um pequeno afastamento entre si em relação ao observado nos níveis de tensão confinante menores.

Para o nível de tensão confinante efetiva de 400 kPa (Figura 4.50), os corpos de prova das misturas A95/B5 e A90/B10 apresentaram resistências de pico menores que do corpo de prova do solo arenoso (A100), sendo da mistura A90/B10 menor que da mistura A95/B5. A resistência de pico do solo arenoso acontece para uma deformação axial de 4,1%. Enquanto que as resistências de pico das misturas A95/B5 e A90/B10 acontecem para uma deformação axial de 7,6% e 14,0% respectivamente. O corpo de prova de solo arenoso (A100) atinge um pico e logo a resistência ao cisalhamento decresce significativamente. As duas amostras de mistura atingiram a deformação axial de 18,0% no final do cisalhamento, sendo que para este nível de deformação apresentaram um plano de ruptura bem definido.

Neste caso não é claro a tendência da resistência pós-pico que tem o solo puro, assim não é possível afirmar que as misturas teriam melhor comportamento pós-pico. Entre as misturas, aquela que tem melhor comportamento pós-pico é A95/B5.

No início do cisalhamento as misturas A95/B5 e A90/B10 possuem menor crescimento da resistência com a deformação que do solo puro.

O corpo de prova do solo arenoso (A100), ensaiado com 400 kPa de tensão confinante efetiva apresenta uma diminuição de volume pequena durante o início do cisalhamento, sendo que para 0,7% de deformação axial esta amostra começa a expandir-se, este comportamento apresenta-se também para a tensão confinante de 50, 100 e 200 kPa. Os corpos de prova das misturas tiveram maiores níveis de



contração em comparação ao solo puro. A inclinação da curva de deformação volumétrica na fase de expansão da amostra de solo puro é maior em relação à inclinação das curvas de deformação volumétrica das misturas também na fase de expansão. Os corpos de prova de solo puro e da mistura A95/B5 apresentaram maiores volumes do que no início do cisalhamento quando alcançaram as resistências de pico respectivas. A mistura A90/B10 apresentou um volume menor do que no início do cisalhamento quando atingiu sua resistência de pico. Em relação ao corpo de prova de solo puro e para uma deformação axial de 8%, os corpos de prova das misturas A95/B5 e A90/B10 apresentaram menor volume, sendo que o volume da mistura A90/B10 foi menor do que no início do cisalhamento. Aprecia-se que o nível de contração sofrido pelos três corpos de prova é maior que o sofrido para as tensões de confinamento menores a 400 kPa, este fato se verifica com o valor máximo de contração que tem a mistura A90/B10, atingindo uma variação volumétrica positiva maior a 2%, sendo que nos níveis de tensão 50, 100 e 200 kPa este valor chegou a ser 0,2%, 0,5% e 1,2% respectivamente. A curva de deformação volumétrica da mistura A90/B10 apresenta um comportamento totalmente diferente que das curvas de deformação volumétrica do solo puro e da mistura A95/B5. As amostras de solo puro e da mistura A95/B5 conseguiram contrair-se rapidamente e continuaram logo com um comportamento expansivo durante a maior parte do cisalhamento. Em contrapartida, a mistura A90/B10 apresentou um comportamento contrativo desde o início do cisalhamento, sendo que a expansão começou somente a partir da última quarta parte do cisalhamento antes de chegar ao fim do ensaio. As curvas de deformação volumétrica do solo puro (A100) e da mistura A95/B5 apresentam um afastamento maior entre si em relação ao observado para a tensão confinante de 200 kPa.

Esta dependência do comportamento mecânico dos compósitos areia-borracha também foi registrada por Fosse *et. al.* (2006), realizando ensaios de cisalhamento direto, sendo que para níveis de tensões normais baixas o parâmetro que melhorou foi o ângulo de atrito e para tensões normais altas foi a coesão quem apresentou melhora. Zornberg e Bergado (2004) através de ensaios triaxiais drenados observaram que para tensões de confinamento baixas a melhora da resistência era significativamente melhor do que para tensões de confinamento altas.

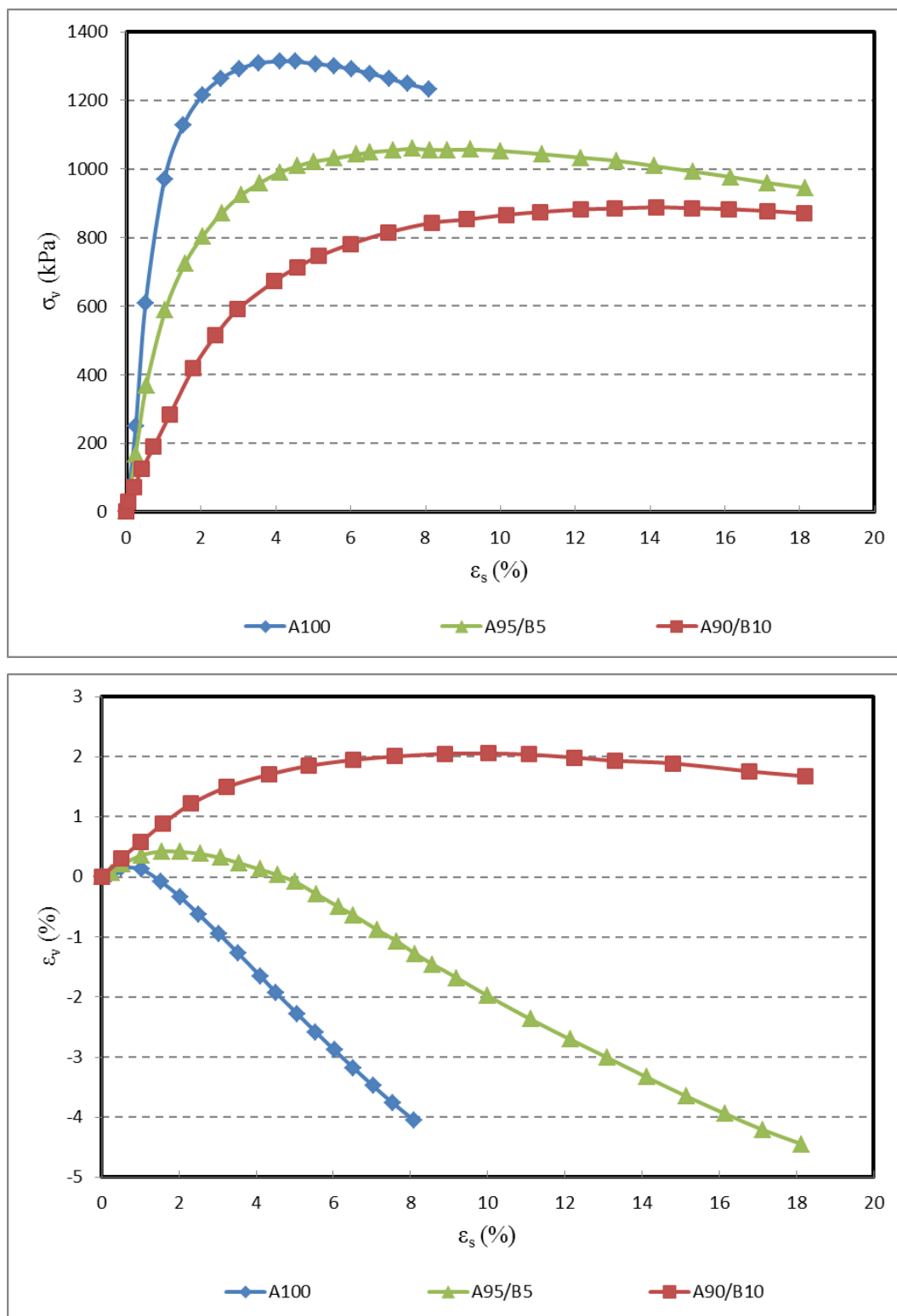


Figura 4.50 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial para A100, A95B5 e A90B10 em ensaios triaxiais de compressão axial para 400 kPa de tensão confinante efetiva.

#### 4.2.2.1.3. Influência do Teor de Borracha

Na Figura 4.51 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo arenoso A100 e mistura A95/B5, nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

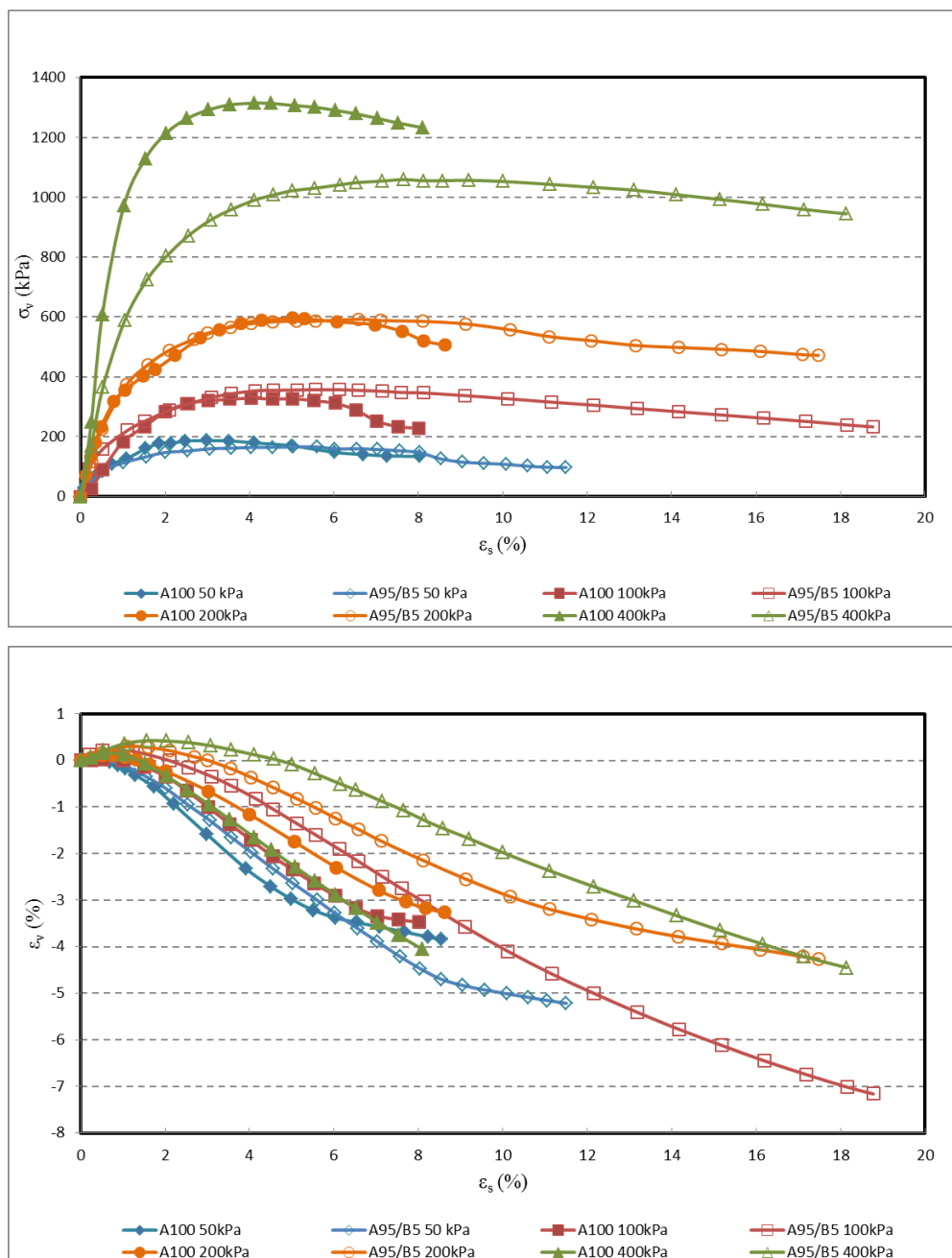


Figura 4.51 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras A100 e A95/B5 em ensaios triaxiais de compressão axial.

Na Figura 4.52 estão apresentadas as curvas tensão desviadora e variação volumétrica x distorção, correspondentes aos ensaios do tipo CID em compressão axial, para as amostras de solo argiloso A100 e mistura S90/B10, nas tensões confinantes efetivas de 50, 100, 200 e 400 kPa.

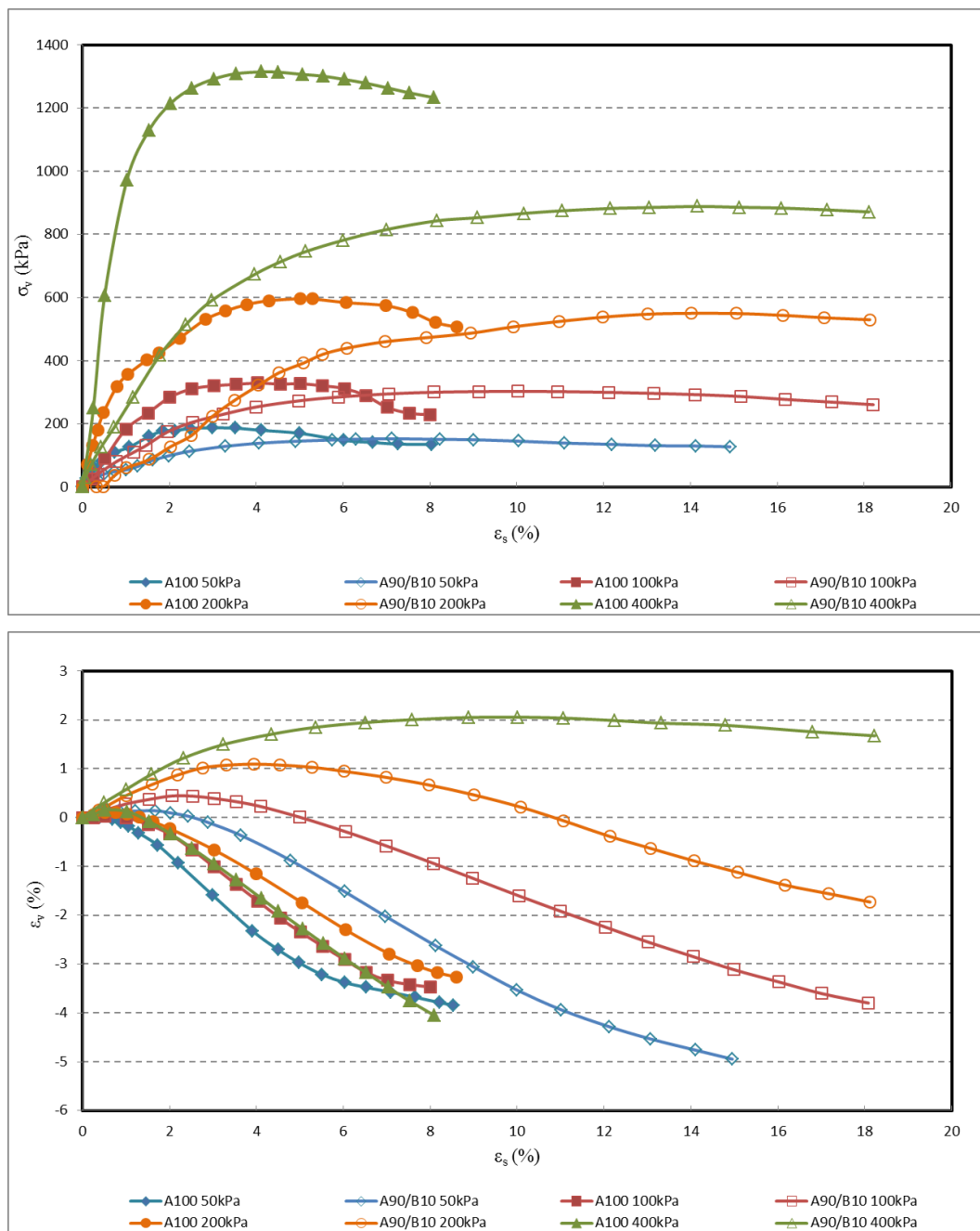


Figura 4.52 - Curvas tensão-desvio e deformação volumétrica x deformação axial das amostras A100 e A90/B10 em ensaios triaxiais de compressão axial.

Dos gráficos anteriores pode-se observar a influência que tem o teor de borracha moída nas características de resistência do solo argiloso. Na medida em que vai se acrescentando borracha no solo argiloso, o comportamento deste, durante o cisalhamento, melhora. Atinge-se uma melhora máxima quando a porcentagem da borracha moída presente no solo arenoso é de 5%, mostrando-se uma degradação do comportamento para o teor de borracha de 10%. Embora o 5% seja o teor que apresenta as maiores melhoras na resistência ao cisalhamento, não se confirma como o teor ótimo. Assim, a porcentagem ótima vai se situar entre 0% e 5% de borracha moída.

A influência do comportamento mecânico dos compósitos areia-borracha também foi registrada por Fosse et. al. (1996), Tatlisoz et. al. (1997), Zornberg et. al. (2004), Ghazavi (2004), Attom (2006), Venketappa e Dutta (2006) e Szeliga (2011).

Tal como se observou nas misturas de solo argiloso e borracha moída o comportamento durante o cisalhamento vai depender da porcentagem de borracha e do nível de confinamento sob a qual as amostras estão sendo submetidas. A Figura 4.53 apresenta uma comparação do comportamento da “*relação de resistência de pico*” das misturas A95/B5 e A90/B10. No item 4.2.1.2.3 se descreve o significado da “*relação de resistência de pico*” e a Equação 7 representa a formulação.

Na Figura 4.53 pode-se apreciar mais claramente a influência do teor de borracha na resistência ao cisalhamento, sendo que para o teor de 5% a melhoria é máxima, mas o teor ótimo situa-se entre 0% e 5% de borracha. A influência da tensão confinante é apresentada com maior notoriedade, sendo mais efetivo a inserção de borracha para tensões de confinamento entre 100 e 200 kPa. Para tensões de confinamento maiores a 200 kPa nota-se que a presença da borracha é prejudicial, pois  $R_{pico}$  apresenta diminuição. Este comportamento encontraria uma explicação no confinamento excessivo que restringe a dilatação do corpo de prova. Esta dilatação talvez seja necessária para mobilizar a resistência à tração da borracha.

Para as misturas de areia e borracha moída não foi possível calcular a “*relação de resistência pós-pico*” devido a que os corpos de prova de areia somente conseguiram atingir uma deformação axial de 8%, porque a partir deste ponto os corpos de prova apresentaram planos de ruptura bem definidos e a cunha

superior que escorregava sobre a cunha inferior apoiava-se na base do pedestal. Este fato provocava que a resistência, que tinha um comportamento decrescente, começasse a aumentar. Não era recomendável tentar uma extrapolação, pois não se possuíam os suficientes dados que representassem a tendência da resistência pós-pico das areias. Para atingir esta resistência pós-pico seria necessário realizar ensaios que permitam grandes deformações como o ensaio de “*ring shear*”.

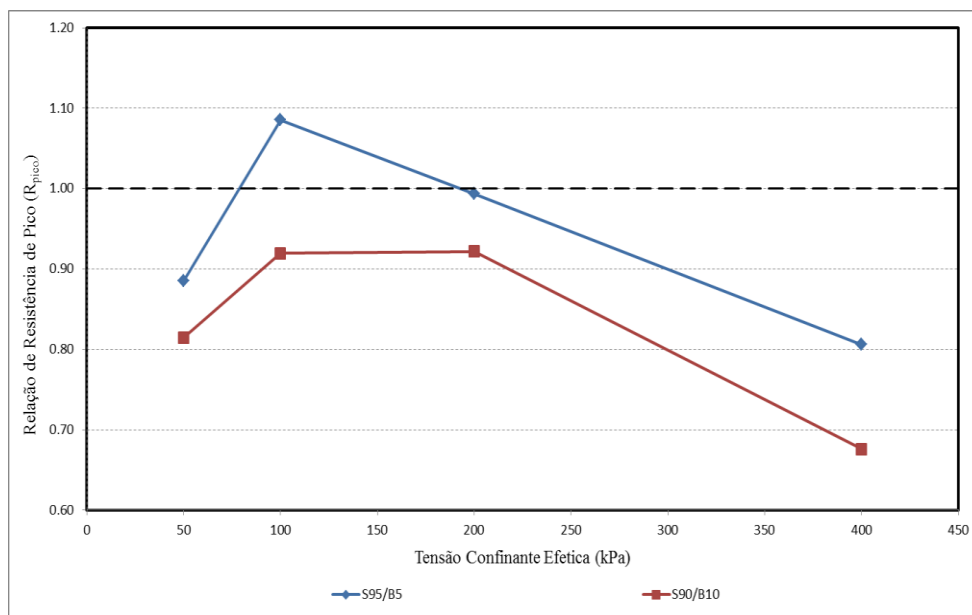


Figura 4.53 - Relação de Resistência de Pico x Tensão Confinante Efetiva.  
Mistura solo arenoso - borracha.

#### 4.2.2.1.4.

#### Envoltórias e Parâmetros de Resistência ao Cisalhamento

Desde a Figura 4.54 até a Figura 4.56 estão ilustradas as envoltórias e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo arenoso e das misturas A95/B5 e A90/B10. As envoltórias estão plotadas no espaço  $p':q$ . Desde a Figura 4.57 até a Figura 4.58, apresentam-se as comparações entre as envoltórias de resistência obtidas para o solo arenoso e cada mistura. As envoltórias obtidas para as misturas foram consideradas bi-lineares, sendo a envoltória ajustada para as tensões confinantes de 50 kPa e 100 kPa é denominada com o símbolo I e a envoltória ajustada para as tensões confinantes de 200 kPa e 400 kPa com o símbolo II.

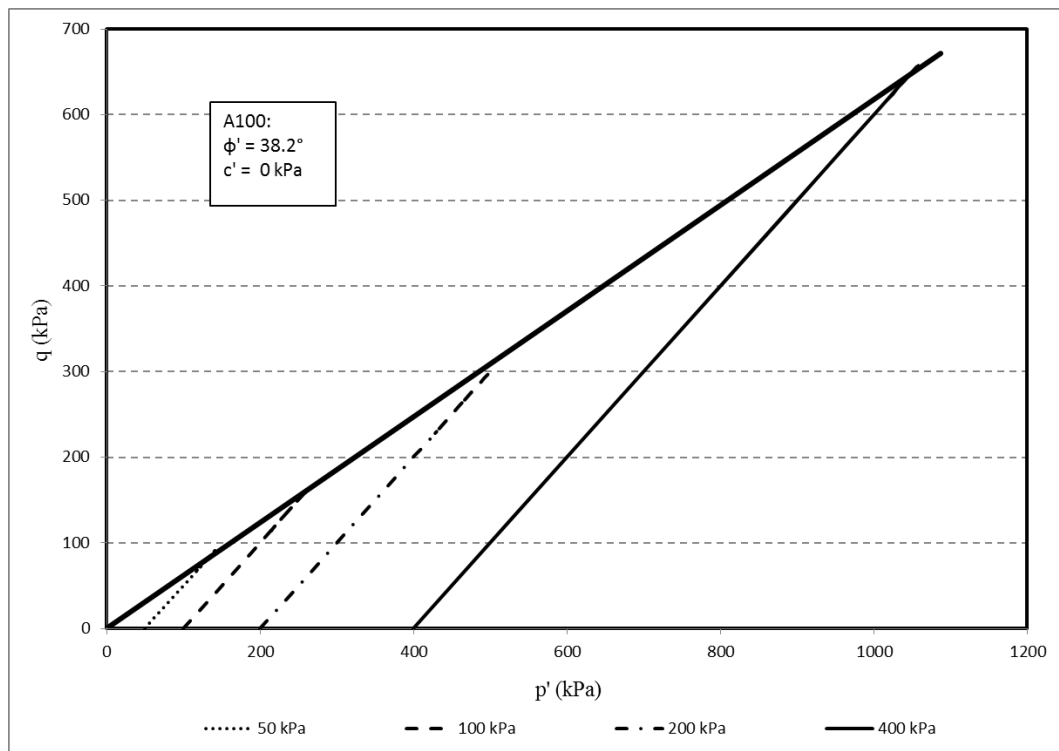


Figura 4.54 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo arenoso A100.

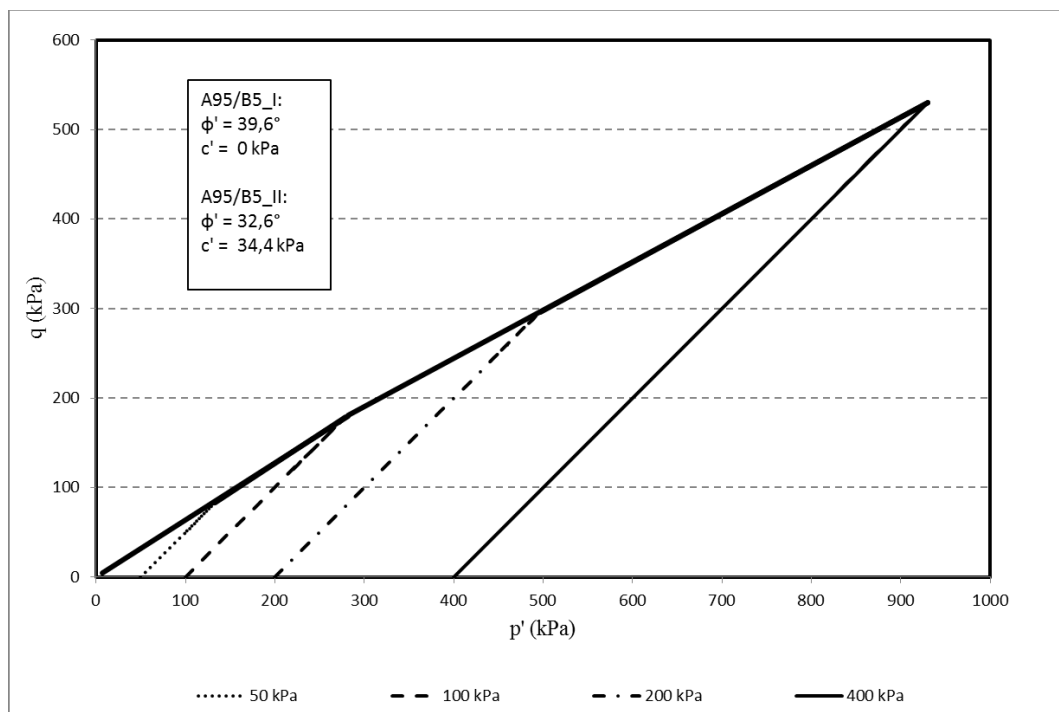


Figura 4.55 - Envoltória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura A95/B5.

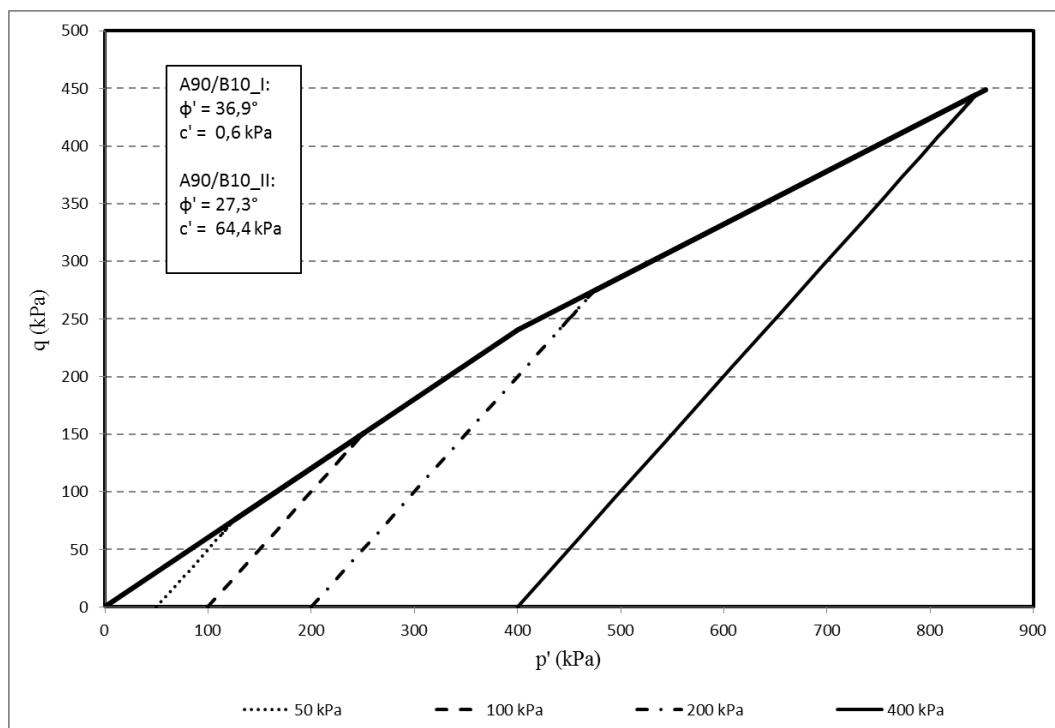


Figura 4.56 - Envolvória e parâmetros de resistência ao cisalhamento da mistura A90/B10.

Na Figura 4.57 comparam-se as envoltórias de resistência do solo arenoso (A100) e da mistura A95/B5. Observa-se que a primeira parcela da envoltória da mistura (A95/B5\_I) se situa sobre a envoltória de resistência do solo arenoso devido a que o ângulo de atrito é  $39,6^\circ$ , maior ao ângulo de atrito da areia. A coesão desta primeira parcela é nula, assim para níveis de tensão confinante baixa a borracha moída inserida na areia não aporta melhora na coesão e somente contribui no aumento do ângulo de atrito. A segunda parcela (A95/B5\_II) da envoltória da mistura apresenta menor ângulo de atrito comparado com o solo puro, mas a coesão deixa de ser nula e aumenta significativamente para ser 34 kPa. Embora esta segunda parcela tenha esta melhora na coesão, a resistência da mistura, para níveis altos de tensão confinante, possui menores valores que do solo puro.

A Figura 4.58 apresenta as envoltórias de resistência do solo arenoso (A100) e da mistura A90/B10. A primeira parcela da envoltória de resistência da mistura (A90/B10\_I) localiza-se embaixo da envoltória do solo puro devido a que o ângulo de atrito desta primeira parcela é menor que o ângulo de atrito da envoltória da areia. Apresenta-se uma pequena presença de coesão nesta parte inicial da envoltória, mudando de 0 kPa para 0,6 kPa de coesão.



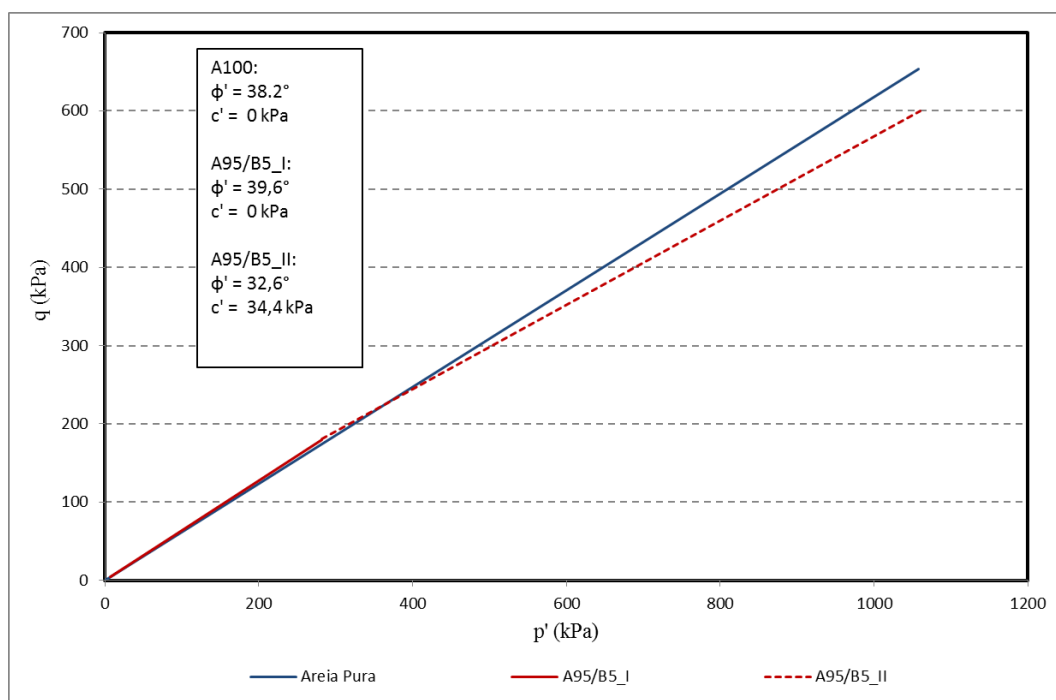


Figura 4.57 - Comparação entre as envoltórias do solo arenoso A100 e da mistura A95/B5.

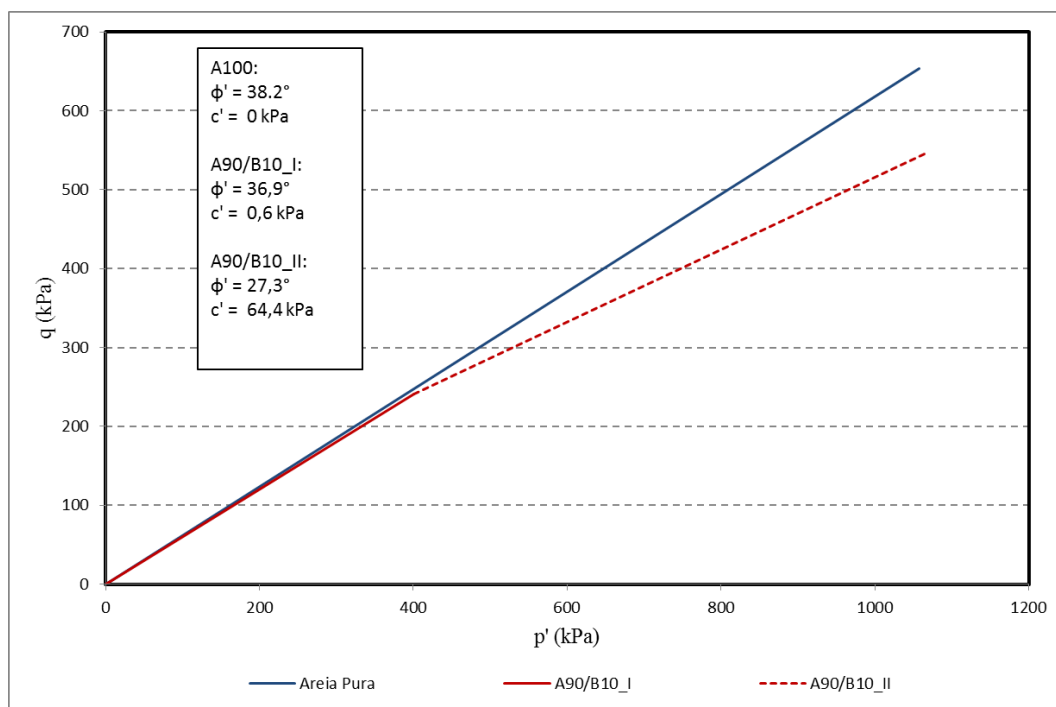


Figura 4.58 - Comparação entre as envoltórias do solo arenoso A100 e da mistura A90/B10.

A segunda parcela da envoltória da mistura (A90/B10\_II) apresenta uma queda significativa do ângulo de atrito em comparado com a areia, caindo de 38,2° até 27,3°. Embora possua 64 kPa de coesão, esta parcela da envoltória da mistura apresenta menores valores de resistência em relação ao solo arenoso (A100).

A Tabela 4.5 apresenta um resumo dos parâmetros de resistência do solo arenoso (A100) e de todas as misturas. Pode-se apreciar a influência do nível de confinamento nas magnitudes dos parâmetros de resistência. O ângulo de atrito do solo puro melhora para tensões de confinamento baixas o contrario sucede para tensões de confinamento altas. A coesão apresenta um melhor comportamento em relação ao solo puro para tensões de confinamento altas.

Tabela 4.5 - Resumo ângulo de atrito e coesão (kPa) de cada mistura solo arenoso-borracha e nível de tensão confinante.

MATERIAL					
	A100	A95/B5		A90/B10	
		Conf. Baixo	Conf. Alto	Conf. Baixo	Conf. Alto
$\varphi^\circ$	38.2	39.6	32.6	36.9	27.3
$c' (kPa)$	0	0	34.4	0.6	64.4

## 5

### Considerações Finais

#### 5.1. Conclusões

A partir dos resultados apresentados e das análises realizadas foi possível chegar às conclusões abordadas neste item.

Os compósitos apresentaram um comportamento próprio devido à influência da borracha moída. Assim, o desenvolvimento de um novo material geotécnico com a utilização deste resíduo tem seu início nesta pesquisa, já que foi observada uma melhoria das propriedades mecânicas deste novo material.

Foram utilizados dois tipos de solo para este estudo uma areia e um solo maduro, argilo-arenoso de origem coluvionar.

A borracha moída de pneus inservíveis, utilizada como material de reforços dos solos tem diâmetro médio de grãos = 1,0mm.

A seguir estão sumarizadas as principais conclusões relacionadas à adição de borracha moída aos solos utilizados neste trabalho:

- Os parâmetros de compactação das misturas solo argiloso-borracha, são influenciados pelo teor de borracha moída. Sendo que o peso específico seco e a umidade ótima decrescem para maiores teores de borracha;
- Dos ensaios triaxiais CID, se conclui que os compósitos (argila-borracha e areia-borracha) atingem sua resistência de pico em maiores deformações axiais em relação ao solo puro. Este nível de deformação axial aumenta para as misturas com maiores teores de borracha. A resistência pós-pico dos compósitos diminui lentamente

com a deformação, fornecendo um comportamento dúctil durante o cisalhamento;

- O comportamento mecânico dos compósitos depende do teor de borracha inserido no solo. Existe uma tendência de melhorar a resistência ao cisalhamento com o aumento do teor, sendo que a partir de certo teor (teores distintos para diferentes tipos de solo) a inserção de borracha é prejudicial em relação às propriedades do solo puro;
- A tensão de confinamento sob a qual é cisalhado o compósito influi grandemente no comportamento mecânico deste. Para tensões de confinamento excessivamente altas ( $> 200$  kPa) a resistência ao cisalhamento diminui significativamente. Este fenômeno pode ser explicado talvez pelo fato de que tensões de confinamento muito altas podem restringir a dilatação do compósito a qual é necessária para mobilizar a resistência à tração da borracha;
- O teor de borracha e a tensão de confinamento influenciam o comportamento mecânico dos compósitos, sendo que não se tem uma tendência de comportamento bem definida ao analisar cada fator independentemente;
- Para os compósitos de solo argiloso a inserção de borracha é mais efetiva para tensões de confinamento até 200 kPa, sendo que para tensões maiores a presença de borracha é prejudicial. O teor ótimo de borracha para este tipo de solo situa-se entre 10% e 20%;
- Para os compósitos de solo arenoso a inserção de borracha é mais efetiva para tensões de confinamento entre 100 e 200 kPa e o teor ótimo de borracha encontra-se entre 0% e 5%;
- A resistência pós-pico dos compósitos argila-borracha apresenta-se geralmente maior do que do solo argiloso puro. Quando a resistência pós-pico é menor, esta diminuição varia entre 5% e 10%;
- A resistência pós-pico dos compósitos areia-borracha não puderam ser comparados qualitativamente, devido aos corpos de prova de areia pura tiver sido somente até 8% de deformação axial. Contudo, pode-se observar que a tendência da areia pura em atingir a

resistência de pico é de apresentar resistência pós-pico menor do que dos compósitos estudados. Assim, para grandes deformações pode-se sugerir que os compósitos possuam uma maior resistência que a da areia pura;

- Apesar de se ter resultados satisfatórios sobre o assunto na literatura, esta ainda se apresenta escassa, devido ao número de variáveis a serem analisadas para tal aplicação. A maioria das pesquisas já realizadas foram conduzidas utilizando-se lascas de pneus, de tamanhos na faixa de 5 a 30 mm, existindo diferentes granulometrias geradas no processo de trituração que podem ser utilizadas para reforçar os solos. A presente pesquisa apresenta dados em relação a tamanhos menores de borracha, na faixa de 0,5 a 2,0 mm. Assim, busca-se aportar maior conhecimento para o entendimento do comportamento da inserção desta borracha nos solos, possibilitando possíveis aplicações no campo da geotecnia;
- Embora para as misturas com maiores teores de borracha o comportamento mecânico seja negativo em relação ao solo puro, estes compósitos possuem características de resistência que poderiam cumprir as exigências de determinadas obras geotécnicas como, por exemplo, camadas de aterros sanitários, aterros sobre solos moles e aterros temporários. Possibilitando desta forma o menor consumo de material natural e reduzindo consequentemente os custos de transporte e o volume de material mobilizado.

## **5.2.**

### **Sugestões para pesquisas futuras**

A seguir citam-se algumas sugestões para ampliar o conhecimento e prosseguir com os estudos sobre o reforço de solos com a inserção de borracha moída de pneus inservíveis:

- Realizar ensaios de permeabilidade nos compósitos solo-borracha e nos solos puros, para poder apreciar a influência da presença de borracha moída na condutividade hidráulica;

- Realizar tanto ensaios triaxiais convencionais de compressão, bem como triaxiais de extensão em misturas solo-borracha, para verificação de diversos tipos de comportamento;
- Realizar ensaios com borracha em maiores dimensões, preferentemente utilizar tiras de borracha, para aproveitar com maior eficácia a resistência à tração destas;
- Aplicar a técnica de congelamento dos corpos de prova com misturas solo-borracha antes e depois dos ensaios, para que se possa avaliar e entender melhor os mecanismos de comportamento deste novo material através de microscopia eletrônica;
- Utilizar um solo argiloso com maior porcentagem de finos e com menor presença de material arenoso, para elaborar os compósitos e observar a influência da granulometria nos parâmetros de resistência;
- Realizar ensaios “*ring shear*” para apreciar o comportamento (resistência residual) dos compósitos e dos solos submetidos a grandes deformações;
- Desenvolver modelos de previsão de comportamento resistência-deformação, sendo este de muita importância para a simulação numérica de obras geotécnicas.

AL-TABBAA, A.; BLACKWELL, O.; PORTER, S. A. **An investigation into the geotechnical properties of soil-tyre mixtures**. Environmental Technology, v.18, p.855-860, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 7181**: SOLO – Análise granulométrica. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 6459**: SOLO – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 7180**: SOLO – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) **ABNT NBR 6457**: AMOSTRAS DE SOLOS – Preparação para ensaios de compactação e caracterização. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1984) **ABNT NBR 6508**: SOLO – Determinação da densidade real dos grãos. Rio de Janeiro/RJ.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1986) **ABNT NBR 7182**: SOLO – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro/RJ.

ATTOM, M. F. **The use of shredded waste tires to improve the geotechnical engineering properties of sands**. Environmental Geology, v.49, n.4, p.497-503, 2006.

ATTOM, M.; KHEDAYWI, T.; MOUSA, S. A. **The effect of shredded waste tire on the shear strength, swelling and compressibility properties of the clayey soil.** Journal of Solid Waste and Management, v.33, n.4, 2007.

BENEVELI, R. M., **Estudo dos efeitos de umedecimento e secagem na resistência ao cisalhamento de um solo compactado em laboratório,** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2002.

BRAZIL TIRES MAXXIS, empresa importadora e exportadora de pneus, apresenta informação sobre a estrutura dos pneus. Disponível em: <<http://www.braziltires.com.br/tudosobrepneus/pneus.html>>. Acesso em: 13 abril 2012.

CASAGRANDE, M. D. T., **Comportamento de solos reforçados com fibras submetidos a grandes deformações,** Tese de Doutorado, PPGEC/UFRGS, Porto Alegre/RS, 2005.

CETIN, H.; FENER, M.; GUNAYDIN, O. **Geotechnical properties of tire-cohesive clayey soil mixtures as a fill material.** Engineering Geology, n.88, p. 110-120, 2006.

COSTA, Y. D.; FRANCO, K. B.; SANTOS JR, O. F. **Shear strength behaviour of tire derived aggregate – lateritic soil mixture.** 2011 Pan-Am CGS Geotechnical Conference, 2011.

DAYLAC, R., **Desenvolvimento e utilização de uma célula para medição de  $K_o$  com controle de sucção,** Dissertação de Mestrado, PUC/RJ, Rio de Janeiro, 1994.

FOOSE, G. J.; BENSON, C. H.; BOSSCHER, P. J. **Sand reinforced with shredded waste tires.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.122, n.9, p.760-767, 1996.



GHAZAVI, M. **Shear strength characteristics of sand – mixed with granular rubber.** Geotechnical and Geological Engineering, n.22, p.401-416, 2004.

HEAD, K. H. **Manual of Soil Laboratory Testing: Effective Stress Test.** Wiley, 2da ed., vol. 3, West Sussex, Inglaterra, p. 227, 1986.

LAGARINHOS, C. A. F., **Reciclagem de pneus: análise do impacto da legislação ambiental através da logística reversa,** Tese de doutorado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2011.

LINS, A. H. P., **Resistência e poro-pressões desenvolvidas em um solo compactado não saturado em laboratório.** Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE), Rio de Janeiro, 1991.

MARINHO, F. A. M., **Características de deformabilidade do solo residual do Campo Experimental II da PUC/RJ obtidas a partir de ensaios triaxiais axissimétricos,** Dissertação de Mestrado, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1986.

ÖZKUL, Z. H.; BAYKAL, G. **Shear behavior of compacted rubber fiber-clay composite in drained and undrained loading.** Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, New York: ASCE, v. 133, n.7, p.767-781, 2007.

SHULMAN, V. L., **Tyre Recycling,** Rapra Review Reporter, Rapra Technology, v.15, n.7, 2004.

SERTÃ, H. B. C., **Aspectos geológicos e geotécnicos do solo residual do Campo Experimental II da PUC/RJ,** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 1986.

SOARES, R. M., **Resistência ao cisalhamento de um solo coluvionar não saturado do Rio de Janeiro, RJ,** Dissertação de Mestrado, DEC, PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2005.

SZELIGA, L., **Avaliação do comportamento de solos reforçados com borracha moída de pneus inservíveis para aplicação em obras**, Projeto Final do Curso (ENG1130), Título de Engenheiro Ambiental, Departamento de Engenharia da PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2011.

TATLISOZ, N.; BENSON, C. H.; EDIL, T. B. **Effect of fines on mechanical properties of soil – tire chip mixtures**. American Society for Testing Materials, 1997.

VENKATAPPA, G. R.; DUTTA, R. K. **Compressibility and strength behaviour of sand – tyre chip mixtures**. Geotechnical and Geology Engineering, v.24, n.3, p.711-724, 2006.

WU, W. Y.; BENDA, C. C.; CAULEY, R. F. **Triaxial determination of shear strength of tire chips**. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, v.123, n.5, p.479-482, 1997.

YANG, S.; LOHNES, R. A.; KJARTANSON, B. H. **Mechanical properties of shredded tires**. Geotechnical Testing Journal, GTJODJ, v.25, n.1, p.44-52, 2002.

YOUWAI, S.; BERGADO, D. **Strength and deformation characteristics of shredded rubber tire – sand mixture**. School of Civil Engineering, Asian Institute of Technology, Thailand, 2003.

ZORNBERG, J. G.; CABRAL, A. R.; VIRATJANDR, C. **Behavior of tire shre – sand mixtures**. Canadian Geotechnical Journal, v.41, n.2, p.227-241, 2004.