

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/602

AValiação DO COMPORTAMENTO MECÂNICO DE DUAS AMOSTRAS DE ARGILA EXPANDIDA COM DIFERENTES TEXTURAS

Jose Anibal Alves Filho

Engenheiro Civil, Foa Construção e Projetos Ltda., Salvador, Brasil, anibaleng@hotmail.com

Sandro Lemos Machado

Professor, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, sandrolemosmachado@gmail.com

Antonio Felipe de Souza Machado Reis

Aluno de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Brasil, felipe.m.reis2@gmail.com

RESUMO: Na geotecnia, os engenheiros se deparam não raro com condições de subsuperfície desafiadoras para execução de uma obra de terra. Tal é o caso dos aterros sobre solos moles, onde a substituição do material de fundação e o uso de materiais leves, seja como parte do aterro ou como substituição das camadas superficiais do terreno, são alternativas possíveis. O uso de agregados leves de argila expandida (ALAE ou LECA, *lightweight expanded clay aggregates*), tem ganhado impulso recente por possuir como vantagens a sua alta resistência ao cisalhamento, baixa compressibilidade e alta estabilidade química. Entretanto, sob determinadas condições de carregamento, as altas tensões nos contatos entre as partículas causam microfissuras, que se propagam até que as partículas de ALAE se fragmentem, podendo causar redução significativa da sua resistência ao cisalhamento e permeabilidade. O entendimento do comportamento mecânico dos materiais de construção é indispensável para o correto desempenho das obras de engenharia. Sendo assim, entender o comportamento mecânico da ALAE é essencial para se garantir a estabilidade de um Aterro e o bom desempenho geral de uma obra de terra. O principal ensaio laboratorial para a estimativa das características mecânicas de solos em geotecnia é o ensaio triaxial, pois este oferece um maior controle das condições de contorno das amostras e dos carregamentos aplicados. Neste trabalho, resultados de ensaios triaxiais são analisados para a determinação das propriedades de compressibilidade e de resistência das argilas expandidas, considerando seu uso em aterros leves sobre solos de alta compressibilidade ou de baixa capacidade de suporte. Além disso, ensaios de CBR foram executados para auxiliar no entendimento dos mecanismos de quebra das partículas, assim como ensaios de absorção de água a 100 kPa de pressão. Foi estudado o comportamento mecânico de duas amostras de argilas expandidas com granulometrias distintas produzidas pela CINEXPAN (grãos entre 22 e 32 mm e entre 15 e 22 mm). Foram obtidos valores de absorção de água em torno de 23,5% e 26,7%, de CBR de cerca de 14% e 10%, sem expansão, e de ângulo de atrito de 39,7° e 39,5° para as amostras de maior e menor textura, respectivamente. Ambas as amostras se apresentaram como não coesivas e com envoltória de resistência levemente curva. Os resultados obtidos apontam para um grande potencial de aplicação da ALAE em aterros leves.

PALAVRAS-CHAVE: Agregado leve, ALAE, resistência ao cisalhamento.

ABSTRACT:

Geotechnical Engineers often face challenging subsurface conditions when carrying out earthworks, such as the embankments over soft soils. In such scenarios, the soil foundation replacement and the use of lightweight materials, either as part of the embankment or as a replacement for the subsurface layers, are possible alternatives. The use of lightweight expanded clay aggregates (LECA or ALAE) has gained impetus in recent years because of their attractive mechanical properties, such as high shear strength and permeability, low compressibility, and chemical stability. However, certain loading conditions can induce very high stresses in the contacts between the particles and cause micro-cracks, which propagate until the material particles break up, causing a significant reduction in its shear strength and permeability. Understanding the mechanical behavior of any construction materials is essential for correctly performing

engineering works. Therefore, studying the LECA hydromechanical behavior is essential for ensuring the stability of embankments and good overall earthwork performance. Triaxial tests are commonly used to estimate the hydromechanical characteristics of earth construction materials, as they offer adequate control over the boundary conditions and loading applied to the specimens. This work analyzes the triaxial tests performed on LECA specimens to determine their compressibility and strength properties for light embankments on soils with low bearing capacity. In addition, CBR tests were carried out to help understand the mechanisms of particle breakage, and water absorption tests were performed under 100 kPa water pressure. Two LECA specifications were studied, with grain size distributions ranging from 22 to 32 mm and 15 to 22 mm, produced by CINEXPAN. Water absorption values of 26.7% and 23.5%, CBR values of 14% and 10%, and friction angles of 39.7° and 39.50° were obtained for coarser and finer LECA specimens, respectively. Both LECA specifications presented a cohesionless nature and a slightly curved shear strength envelope.

KEYWORDS: Lightweight aggregates, shear strength, LECA.

1 INTRODUÇÃO

Nem sempre as condições de subsuperfície são adequadas para a obra que se deseja construir no local. Os aterros sobre solos moles são exemplos de obras realizadas sob difíceis condições de subsuperfície, sendo o bom desempenho da obra dependente da correta avaliação dos processos de compressão no tempo que a camada de solo venha a apresentar e sua compatibilização com a execução das obras de arte do entorno. Em situações em que as características do solo de fundação são julgadas incompatíveis com a obra que se deseja construir, pode-se optar pela sua melhoria *in loco*, ou substituição, até uma profundidade julgada como viável técnica e economicamente. O próprio projeto ou materiais da obra a ser implantada podem ser modificados de forma a apresentarem solicitações que melhor sejam absorvidas pelo solo de subsuperfície. Em ambos os casos, o uso de agregados leves tem ganhado impulso, tanto em substituição ao material de construção (diminuição do peso próprio) quanto em substituição ao solo natural de fundação (melhoria das condições de fundação). Dentre os agregados leves, aqueles formados por partículas de argila expandida (ALAE), têm ganhado destaque nos últimos anos (KULKARNI; SATYANARAYANA; SUKUMARAN, 1981; MLIH et al., 2020; MOVAHEDI; LINUL, 2018). Em comparação com o EPS (Poliestireno Expandido), a ALAE possui vantagens, como a sua alta resistência ao cisalhamento e baixa compressibilidade. Entretanto, sob determinadas combinações de carregamento, as altas tensões nos contatos entre as partículas causam microfissuras nos grãos de argila expandida, que se propagam até que estes se fragmentem, causando uma redução significativa da resistência ao cisalhamento e permeabilidade do material. Desta forma, como no caso de qualquer outro material de construção, para a sua correta utilização como agregado leve em estruturas geotécnicas, é de extrema importância a realização de ensaios que auxiliem entender como e sob quais condições estas fraturas se propagam. Pode-se assim dizer que, com relação à ALAE, ainda se busca um maior conhecimento do seu comportamento geotécnico, considerando o seu uso em aterros sobre solos de baixa capacidade de suporte, em substituição aos materiais de construção convencionais do aterro ou em substituição aos solos de fundação, diminuindo os recalques previstos e o tempo para a sua obtenção, haja vista a alta capacidade drenante apresentada pelo material.

A avaliação de desempenho hidromecânico dos materiais de construção para as obras de terra é normalmente realizada pela execução de ensaios triaxiais, em diferentes trajetórias de tensão, drenados ou não. Nestes ensaios, em comparação com outros ensaios comuns na rotina geotécnica, existe um maior controle das condições de contorno das amostras e dos carregamentos e taxas de deformação aplicados. A sua realização permite a obtenção de parâmetros de permeabilidade, compressibilidade e resistência ao cisalhamento do solo que podem ser utilizados diretamente em obras geotécnicas ou serem utilizados para alimentar modelos constitutivos mais elaborados. Como não existe norma Brasileira que regule a sua realização, estes ensaios são realizados seguindo as orientações de livros textos consagrados e normas internacionais (ASTM-D7181; HEAD, 1994). Desta forma, esse trabalho visou a estudar o comportamento resistente e mecânico de duas amostras de argilas expandida com granulometrias denominadas de 3222 e 2215, produzidas pela CINEXPAN em Jundiaí- SP.

2 MATERIAL E MÉTODOS

As amostras de ALAE utilizadas para a realização dos ensaios foram recebidas no Laboratório de Geotecnia Ambiental (GEOAMB) da EPUFBA, tendo a coleta e transporte ocorridos sob a responsabilidade da CINEXPAN. Trata-se de material caracterizado como um agregado leve e isolante, constituído de uma crosta microporosa rígida e de alta resistência, com o interior formado por uma massa cerâmica porosa. As amostras utilizadas foram do tipo 3222 e 2215 (grãos entre 22 e 32 mm e entre 15 e 22 mm, respectivamente). No GEOAMB, as amostras foram dispostas em pilha e homogeneizadas (Figura 1a). Em seguida, estas foram levadas à estufa e secadas a 110° C para determinação da umidade higroscópica.

Foram executados ensaios de absorção de água em duas condições. Na primeira condição cerca de 500 g de material foi levado a um recipiente com água (Figura 1b), ficando submerso por um período de 24 horas. Na segunda condição, o material foi pressurizado de forma hidrostática com uma pressão de 100 kPa em uma câmara triaxial (Figura 1c), notou-se com o passar do tempo que os grãos começaram a se depositar no fundo da câmara, indicando aumento da densidade, uma vez que os poros começaram a ser ocupados por água. Após este período, as amostras foram levadas a uma peneira por cerca de 5 minutos para retirar o excesso de água em sua superfície (Figura 1d). Em seguida, a amostra foi pesada para determinação do ganho de massa no período de submersão.



Figura 1: Argila expandida. 1(a) Homogeneização do material. (b) Absorção de água sem pressão. (c) Absorção de água com pressão de 100 kPa. (d) Amostras em peneiras após imersão em água.

As amostras foram caracterizadas fisicamente, realizando-se ensaios de densidade mínima e máxima (ABNT-NBR-12004, 1990; ABNT-NBR-12051, 1991), absorção de água, com o uso de uma pressão hidrostática de 100 kPa, Índice de Suporte Califórnia (ISC) (ABNT-NBR-9895, 1987) e triaxiais consolidados isotropicamente drenados (ASTM-D7181, 2011; HEAD, 1994). Os ensaios de ISC e triaxiais foram realizados com compacidade relativa de 60%.

Foram realizados ensaios de densidade máxima e mínima das amostras. Para os ensaios de densidade seca máxima a amostra foi inserida em um cilindro PVC ($\phi = 20\text{cm}$ e $h = 60\text{cm}$), o qual foi posicionado sobre um agitador de grande porte (Figura 3a), com o objetivo de vibrar a amostra, de forma que os seus índices de vazios chegassem ao seu menor valor. Foi usado um contrapeso de cerca de 20 kg auxiliar no processo de densificação (Figura 2a). Foram feitas marcações internas no tubo para identificar a constância da altura da amostra (Figura 2b), condição para que o ensaio fosse finalizado. A cada cinco minutos de vibração a amostra era verificada e uma nova marcação era feita. Quando em três intervalos de vibração a altura não apresentava variação, o ensaio era encerrado. Com as dimensões da amostra e sua massa, foi determinado a densidade máxima. O processo foi repetido para as amostras 3222 e 2215.

Para determinação da densidade mínima foi usado um cone de borracha ($d = 10\text{ cm}$, $D = 30\text{ cm}$ e $h = 60\text{ cm}$) para lançar a amostra em um cilindro PVC ($\phi = 20\text{cm}$ e $h = 60\text{cm}$) até sua altura total, com o menor impacto e sem vibração (Figura 2c). O material foi colocado manualmente pelo lado de maior diâmetro do cone, passando cuidadosamente por toda sua extensão, entrando em contato com o material presente no cilindro pelo lado de menor diâmetro do cone. O processo foi feito lentamente, sendo o cone rotacionado seguindo a circunferência do cilindro, estando sempre em contato com a amostra presente no fundo do cilindro, para que não houvesse descida brusca de material (Figura 4). O procedimento foi repetido três vezes e o menor valor de massa encontrado foi utilizado para o cálculo de densidade seca mínima.

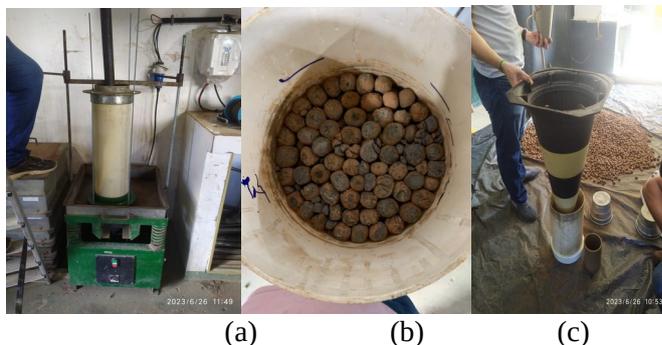


Figura 2: Ensaio de densidade seca máxima e mínima. (a) Aparato utilizado. (b) Amostra após vibração. (c) Ensaio de densidade seca mínima

Os ensaios de ISC foram realizados para as amostras 2215 e 3222, em duplicata, utilizando valor de densidade relativa de 60% correspondente de cada amostra. Os corpos de prova foram moldados em três camadas com o objetivo de facilitar a moldagem (Figura 3a). Em seguida, o cilindro foi levado para um tanque com água para imersão durante quatro dias (Figura 3b), com medidas de expansão a cada 24h. Após o período de imersão, o corpo de prova foi levado à ruptura com uma taxa de deslocamento de 1,27mm/min (Figura 3c). O sistema do Laboratório de Geotecnia Ambiental da UFBA (GEOAMB) conta com um atuador hidráulico, com motor de passo, que aplica taxas de deslocamentos constantes, possibilitando a execução do ensaio.



Figura 3: Ensaio de ISC. (a) Moldagem de uma amostra. (b) Amostra imersa no tanque. (c) Ruptura da amostra

Como a argila expandida é um material granular, não coesivo, o processo de preparação e moldagem dos corpos de prova para os ensaios triaxiais ocorreu utilizando um molde PVC (Figura 4a). A moldagem iniciou-se com a determinação da massa necessária para alcance densidade relativa de 60%, conforme acordado anteriormente com o contratante. Em seguida, o molde foi revestido internamente por uma membrana de látex e fixado na base da câmara triaxial, com dimensões de 20 x 40 cm.

A confecção dos corpos de prova foi feita em quatro camadas com a mesma altura para facilitar a moldagem, para isso, a membrana foi marcada internamente para controle de altura e densidade (Figura 4b). Foi aplicada uma sucção pela base do corpo de prova, com um auxílio de uma bomba de vácuo, com pressão de 20 kPa. Essa sucção foi mantida constante durante todo o processo de montagem dos corpos de prova. Colocou-se um filtro geotêxtil em seu topo e em sua base para evitar eventuais obstruções nas linhas de pressão. Após a compactação foi colocado o cabeçote da câmara triaxial para a drenagem superior. Ainda sob ação da aplicação de vácuo no interior da amostra, o molde foi retirado, observando-se a integridade do corpo de prova (Figura 4c). Em seguida, a câmara foi fechada e preenchida com água. Com a câmara preenchida, a bomba de vácuo foi desligada e a amostra foi posicionada no pórtico para início do ensaio (Figura 4d). Após a montagem da amostra, o corpo de prova passou pelo processo de saturação por fluxo, no sentido base-topo. Devido à sua alta permeabilidade, o processo ocorreu rapidamente, em cerca de 30 minutos a amostra já começa a drenar água.

Devido à natureza do material estudado, foi elaborada uma sistemática para o processo de saturação por contrapressão (Figura 4e). Conforme apresentado anteriormente, os grãos da argila expandida

apresentam capacidade de absorção de água. Por isso, optou-se por utilizar um reservatório d'água, com pressão de 180 kPa, para aplicar a pressão interna no corpo de prova. Um reservatório com a mesma pressão, elevado a 2 metros em relação ao reservatório de pressão neutra, totalizando 200 kPa, foi utilizado para aplicação da pressão externa (tensão efetiva de 20 kPa). Este processo ocorreu durante 12 horas ou até que a câmara de pressão interna não apresentasse borbulhamento. Em seguida, iniciou-se o processo de contrapressão convencional para leitura do parâmetro B de Skempton. Por conta da natureza da amostra, houve dificuldade de atingir altos valores de parâmetro B, variando entre do valor de 0,8 e 0,9.

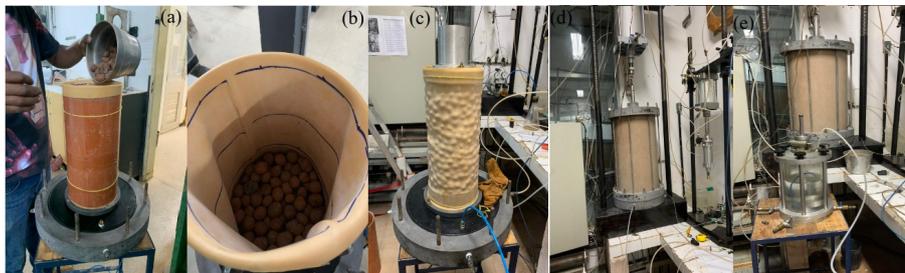


Figura 4: Procedimento para moldagem do ensaio triaxial. (a) Molde utilizado. (b) Procedimento de controle de densidade. (c) Amostra moldada com aplicação de vácuo em sua base. (d) Câmara triaxial pronta para ensaio. (e) Sistema utilizado para saturação por contrapressão.

Após a saturação por contrapressão as amostras foram levadas à fase de adensamento. As tensões confinantes utilizadas foram de 40, 60, 100 e 200 kPa. Por se tratar de um material de alta permeabilidade, com adensamento ocorrendo rapidamente, foi adotada uma taxa de deslocamento de 8 mm/min. Após a ruptura do corpo de prova todo o seu material constituinte foi colocado em uma bandeja e levado à estufa, para a remoção do excesso de umidade. Um ensaio de peneiramento foi realizado nas amostras, de forma a avaliar a evolução da quebra das partículas em função da tensão confinante aplicada.

3 RESULTADOS

3.1 Análise dos Resultados : umidade e absorção de água

Na Tabela 1, apresenta-se os resultados de umidade e absorção de água. Nota-se, que não houve grande variação de umidade entre as amostras, com o teor, em termo de massa seca, próximo de 1,0%.

Tabela 1: Resultados de umidade e absorção de água das amostras.

Condição	Amostra 2215	Amostra 3222
Umidade higroscópica	0,91	1,10
Sem pressão	9,5	8,38
Pressão 100 kPa	23,55	26,74

Em relação ao ganho de massa após 24 horas das amostras sob uma pressão de 100 kPa. O ganho de massa das amostras submetidos à pressão de 100 kPa foi mais expressivo quando comparado à primeira condição. A amostra da argila 3222, na condição sem pressão, alterou a massa de 8,38% para 26,74% e a amostra 2215 passou de 9,50% para 23,55%. Observa-se que a absorção de água, à pressão atmosférica, correspondeu a uma condição de infiltração de água no maciço seguida de leve deficiência no sistema de drenagem, enquanto a submersão pressurizada representou situações em que as amostras de argila expendida foram submetidas a uma coluna de água de cerca de 10 metros. Nesta simulação fica demonstrado que o material terá um ganho de massa em 26,74% com a presença de água a uma condição de pressão provocada por um lençol freático ou aumento de nível do mar. Esta característica já comprovada em trabalhos de caracterização microestrutural da argila expandida como agregado em concretos estruturais leves, em ensaios

de absorção, onde a alta porosidade do grão aliado a quebra de partículas, está absorção não se estabilizou durante um intervalo de 24 horas (MORAVIA et al, 2006).

3.2 Análise dos Resultados da densidade seca máxima e mínima

A Tabela 2 apresenta os valores de densidade seca máxima e mínima das amostras. Observa-se a pequena variação entre os valores de densidade máxima e mínima das amostras, característica típica de solos granulares uniformes (mal graduado). Com base no ensaio realizado, as amostras foram lançadas com menor impacto e sem vibração como forma de simular uma condição de aplicação como lançamento do material por caminhões e sua arrumação com menor impacto e sem vibração, apenas um aperto de ajuste como um espalhamento de uma máquina leve, com uma compactação acima de 60% de densidade relativa.

Tabela 2: Valores de densidade seca máxima e mínima das amostras.

Parâmetro	Amostra 2215	Amostra 3222
ρ_{dmax} (g/cm ³)	0,563	0,458
ρ_{dmin} (g/cm ³)	0,482	0,389
ρ_d (DR=60%) (g/cm ³)	0,528	0,428

Com estes resultados este material pode ser utilizado no mesmo conceito dos aterros leves em EPS tão empregados para situações de diminuir as tensões do aterro sobre uma camada de argila mole, sendo observados as condições de drenagem e confinamento dos grãos dentro da cava com uso de um geotêxtil de gramatura alta. (PATRIARCA, 2012; FIRMINO, 2013; CORREIA et al, 2018).

3.3 Análise dos Resultados dos ensaios de Expansão Livre e Suporte California (CBR)

Em relação aos ensaios de expansão livre, nenhuma das amostras apresentaram variação de expansão ao longo da imersão. Comportamento já esperado, visto que há uma grande presença de vazios entre os sólidos, além da capacidade de absorção de água dos grãos devido à sua porosidade, como apresentado nos resultados da seção 3.1

Os resultados de ISC das amostras e seus gráficos ao longo do ensaio são apresentados, respectivamente, na Tabela 3 e Figura 5a e 5b, amostra 2215 e 3222, respectivamente. O GEOAMB/UFBA possui um sistema supervisorio para aquisição de dados, com leituras de tensão e deslocamento ao longo do tempo que permite a plotagem do gráfico em todo o ensaio, com intervalo de 3 segundos entre cada ponto. Para elaboração dos ensaios de ISC e Triaxiais foi necessário a construção de um novo pórtico, com a capacidade de aplicação de cargas de até 6.000 kg.

Tabela 3: Resultados do ensaio de ISC.

Amostra	ISC (%)	
	2215	3222
01	12	14
02	7	14

Como pode ser observado na Tabela 3, o valor de ISC da amostra 2215 ficou entre 7 e 12% e da amostra 3222 foi de 14%. Esses valores são determinados baseados no valor da tensão de uma brita padrão para as penetrações de 2,54 e 5,08 mm, dividindo-se a tensão encontrada por 70 e 105 kgf/cm², respectivamente. No entanto, durante a execução do ensaio de ISC observou-se quebra dos grãos de argila (ver Figura 5a e 5b). Este comportamento do material faz com que ocorra quedas nos valores de resistência da amostra, seguido por uma ascensão nos valores de tensão, que ocorre após a acomodação dos grãos. Recomenda-se, para fins de projeto, o uso dos valores de tensão antes da ocorrência das quebras, de modo que este comportamento peculiar do material não afete a estabilidade do maciço construído. Nesse caso, sugere-se

para a amostra 2215 o uso de tensão máxima de 5,6 kgf/cm² e 7,6 kgf/cm² para a amostra 3222.

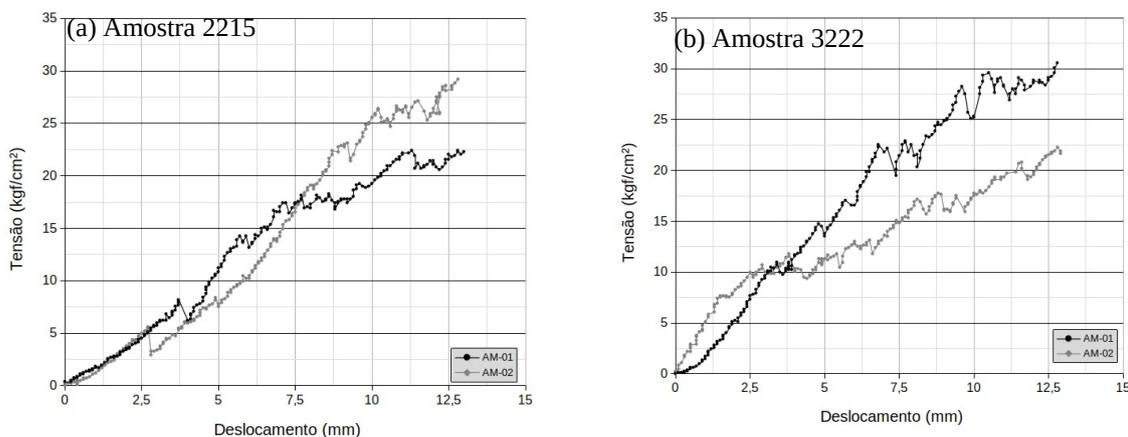


Figura 5: Resultados dos ensaios de ISC. (a) Amostra 2215. (b) Amostra 3222.

3.4 Análise dos Resultados dos ensaios Triaxiais

Os resultados dos ensaios executados na argila expandida 3222 estão apresentados na Figura 6 e da argila 2215 na Figura 7. Os gráficos de tensão-deformação (Figura 6a e Figura 7a), deformação axial x deformação volumétrica (Figura 6b e Figura 7b). Ambas apresentam elevados valores de ângulo de atrito interno, em torno de 40 graus, e um valor de coesão que pode ser ajustado como nulo, apesar de, para pequenas tensões confinantes, notar-se que a resistência dos corpos de prova foi maior que a prevista pela envoltória ajustada, indicando a ocorrência de uma envoltória de resistência curvilínea, comportamento comum em areias, visto que essas se comportam como compactas em tensões confinantes menores e como fofas em tensões confinantes mais elevadas.

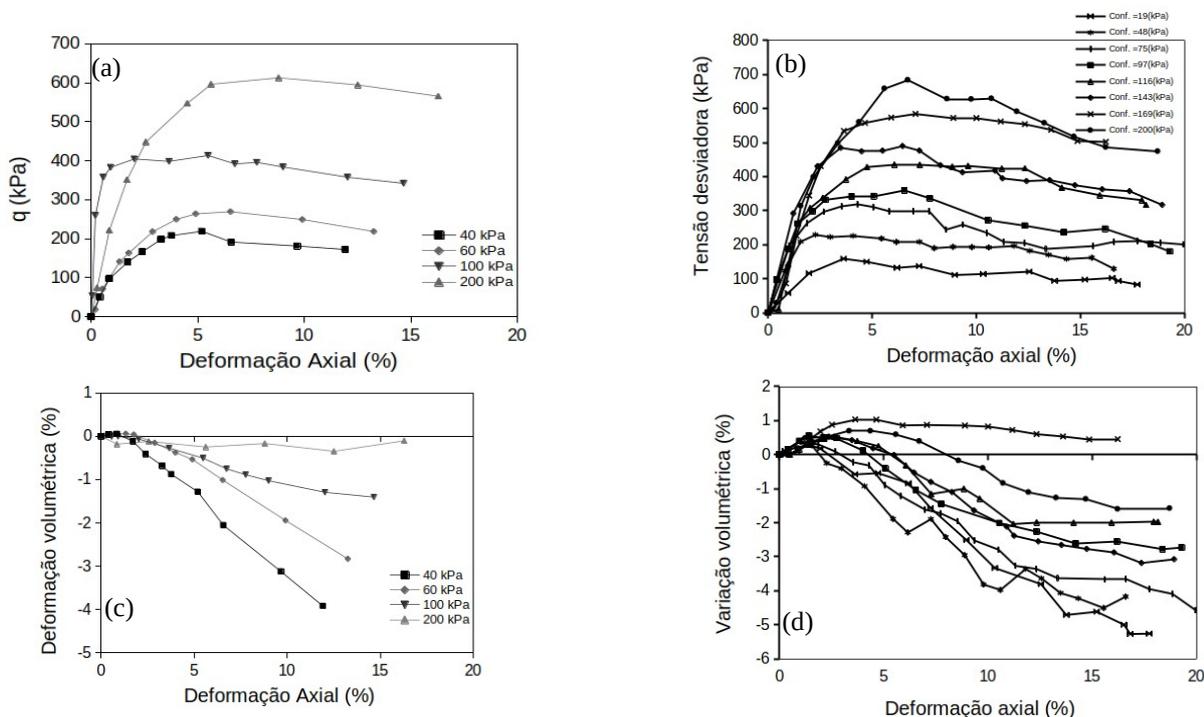


Figura 7: Resultados dos ensaios triaxiais. (a) Tensão-deformação da argila 3222. (b) Tensão-deformação da argila 2215. (c) Deformação axial x deformação volumétrica da argila 3222. (d) Deformação axial x deformação volumétrica da argila 2215.

Isto nos leva a um uso de parâmetros de resistência a favor da segurança e dispensa o uso de envoltórias bilineares. O elevado valor de ângulo de atrito deve estar relacionado ao caráter deformável das partículas sólidas do material, os quais são responsáveis por gerar áreas de contato não desprezíveis em relação à área total do plano de ruptura. Todas as amostras apresentaram comportamento equivalente a areias densas, com pico na ruptura e o comportamento volumétrico caracterizado por uma compressão inicial, experimentando expansão em seguida, com maior expansão em menores tensões confinantes.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados foi possível avaliar que o material apresentou elevado ângulo e atrito interno para valor de coesão nulos, indicando uma envoltória curvilínea sendo possível avaliar o seu comportamento similar a uma areia. Os resultados obtidos são promissores e encorajam futuras pesquisas que possam avaliar: o comportamento deste material a longo prazo; ensaios com diferentes granulometrias; implementação de aterros experimentais com uso de ALAE para análise do comportamento desse material sob diferentes tensões.

AGRADECIMENTOS

Ao GEOAMB/UFBA, a Foa Construção e Projetos Ltda e a CINEXPAN .

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT-NBR-9895. Solo - Índice de suporte califórnia - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.

ABNT-NBR-12004. Solo - Determinação do índice de vazios máximo de solos não coesivos - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1990.

ABNT-NBR-12051. Solo - Determinação do índice de vazios mínimo de solos não-coesivos - Método de ensaio. Rio de Janeiro: ABNT, 1991.

ASTM-D7181. Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils. [s.l.] ASTM, 2011.

Correia et al. Análise do custo benefício da utilização de argila expandida em pontes de concreto armado. *X Congresso Brasileiro de Pontes e Estruturas*. Rio de Janeiro, 2018.

Firmino, R.M. Análise do comportamento de aterros sobre solos moles: um estudo de caso de um aterro leve com poliestireno expandido na Rodovia BR-101, Goiana-Pe. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal de Campina Grande, 125 p, 2013.

Head, K. H. Manual of soil laboratory testing, vol 2, permeability, shear strength and compressibility tests. [s.l.] John Wiley and SonS, INC., 1994.

Kulkarni, A. G.; Satyanarayana, K. G.; Sukumaran, K. Mechanical behaviour of coir fibres under tensile load. *J Mater Sci*, v. 16, p. 905–914, 1981.

Mlih, R. et al. Light-expanded clay aggregate (LECA) as a substrate in constructed wetlands – A review. *Ecological Engineering*, v. 148, p. 105783, abr. 2020.

Moravia et al. Caracterização microestrutural de argila expandida para aplicação como agregado em concreto estrutural leve. *Cerâmica*, v.52, p. 193-199, 2006

Movahedi, N.; Linul, E. Mechanical properties of Light Expanded Clay Aggregated (LECA) filled tubes. *Materials Letters*, v. 217, p. 194–197, abr. 2018.

Patriarca, M.A.B. Utilização de materiais de aterro leves no domínio das obras geotécnicas. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa, 148 p, 2012.