

DOI: 10.47094/COBRAMSEG2024/804

Comportamento Geotécnico do Estéril de Bauxita

Virginie Queiroz Rezende Pinto

MSc Engenharia Geotécnica, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, virginiequeiroz@gmail.com

Renato Pinto da Cunha

Professor Titular, Universidade de Brasília (UnB), Brasília, Brasil, rpcunha@unb.br

Leandro Neves Duarte

Professor Associado, Universidade Federal de São João Del-Rey (UFSJ), Ouro Branco, Brasil, leandro.duarte@ufs.edu.br

RESUMO: Este trabalho buscou avaliar resultados de campanhas de investigação geológico-geotécnicas feitas em pilhas de estéril de bauxita em condição solta/esteirada e como aterro compactado, de modo a caracterizar o solo, estudar o efeito da compactação nas propriedades do material, avaliar o comportamento do mesmo durante o cisalhamento não drenado e comparar resultados de ensaios de campo e laboratório. Foram analisados ensaios de Sondagem a Percussão (SPT), Piezocone (CPTU), Triaxial CIU, Caracterização e Compactação. Os principais resultados obtidos mostraram que o estéril de bauxita pode ser classificado como um material fino, silto-argiloso de alta plasticidade. Em estado solto, como pilha esteirada, quando saturado e em condição não drenada, apresenta significativa geração de poropressões durante o cisalhamento, mostrando inicialmente tendência à contração até alcançar um estado de transformação de fase, a partir do qual se inicia uma tendência à dilatação. Quando compactado, mostrou, em geral, tendência à dilatação durante cisalhamento não drenado, justificando uma análise de estabilidade em termos de tensões efetivas.

PALAVRAS-CHAVE: estéril de bauxita, ensaios geotécnicos, resistência ao cisalhamento

ABSTRACT: This paper aimed to evaluate the results of geological and geotechnical investigation campaigns carried out in bauxite waste piles in loose/mat condition and as compacted landfill, to characterize the soil, study the effect of compaction on the properties of the material, evaluate its behavior during undrained shear and compare results of field and laboratory tests. Standard Penetration Test (SPT), Piezocone Penetration Tests (CPTU), Triaxial CIU, Characterization and Compaction tests were analyzed. The main results showed that bauxite waste can be classified as a fine, silt-clayey material of high plasticity. In a loose state, as a waste pile, when saturated and in an undrained condition, it presents significant generation of pore pressures during shear, initially showing a tendency to contraction until reaching a state of phase transformation state, from which a tendency to dilatation begins. When compacted, it showed, in general, a tendency to expansion during undrained shear, justifying a stability analysis in terms of effective stresses.

KEYWORDS: bauxite waste, geotechnical tests, shear strength.

1 INTRODUÇÃO

O alumínio é o terceiro elemento em maior abundância na crosta terrestre, depois do oxigênio e do silício. A bauxita é a principal matéria prima utilizada para produção de alumina, que na cadeia dará origem ao alumínio primário. A condição essencial à formação desse minério é a existência de um clima tropical (com temperatura média anual acima de 20° C), alternando as estações seca e úmida, que favorecem o processo natural de lixiviação (Sampaio et al., 2008).

O processo de extração da bauxita comumente se dá pelo método de strip mining, ou lavra em tiras, uma vez que esse minério encontra-se próximo a superfície, em camadas de 2 a 10 m de profundidade. A camada de material abaixo do *top soil*, conhecida como Argila Belterra ou argila amarela, é decapeada e conformada em pilhas de estéril que não tem valor econômico no processo.

Informações acerca desse solo ainda são limitadas na literatura. Sendo assim, essa pesquisa tem como objetivo a avaliação do comportamento geotécnico do estéril de bauxita, em estado solto (pilha) e compactado (aterro), por meio de ensaios de campo e laboratório, com foco nos resultados obtidos durante o cisalhamento não drenado do material.

2 METODOLOGIA

2.1 Amostragem

Para avaliação do comportamento geológico-geotécnico do estéril de bauxita foram considerados os resultados de ensaios de laboratório (Granulometria, Limites de Atterberg, Teor de umidade, Compactação, Triaxial CIU) e campo (SPT e CPTU) feitos no material em sua forma solta, como pilha sem controle, e compactada, como aterro. A Tabela 1 apresenta o quantitativo de ensaios de campo realizados.

Tabela 1. Resumo das investigações de campo e coleta de amostras

Ensaios de Campo e Amostragem	Total realizado/coletado
Coleta de Amostra Indeformada (tipo bloco)	29
Sondagem a percussão (SPT)	65
Piezocone (CPTU)	45

2.2 Ensaios de Laboratório

2.2.1 Classificação do Material

De acordo com o Sistema Universal de Classificação de Solos (USCS), os solos são classificados como finos quando possuem no mínimo 50% dos grãos passantes na peneira Nº 200 (0,075 mm), como pode ser observado para 92% das amostras do material em estudo, apresentadas no gráfico da Figura 1. As normas brasileiras que estabelecem as diretrizes para a execução da análise granulométrica do solo e dos ensaios de caracterização são a NBR 7180-2016 e a NBR 6457-2016, respectivamente (ABNT, 2016).

As curvas abaixo foram diferenciadas para que se possa analisar a influência da presença de pedregulho (%P) nas características de resistência do material. A curva tracejada em vermelho representaria, portanto, um comportamento típico da argila amarela (estéril). Segundo Das (2006) este formato de curva é característico de solos com granulometria descontínua.

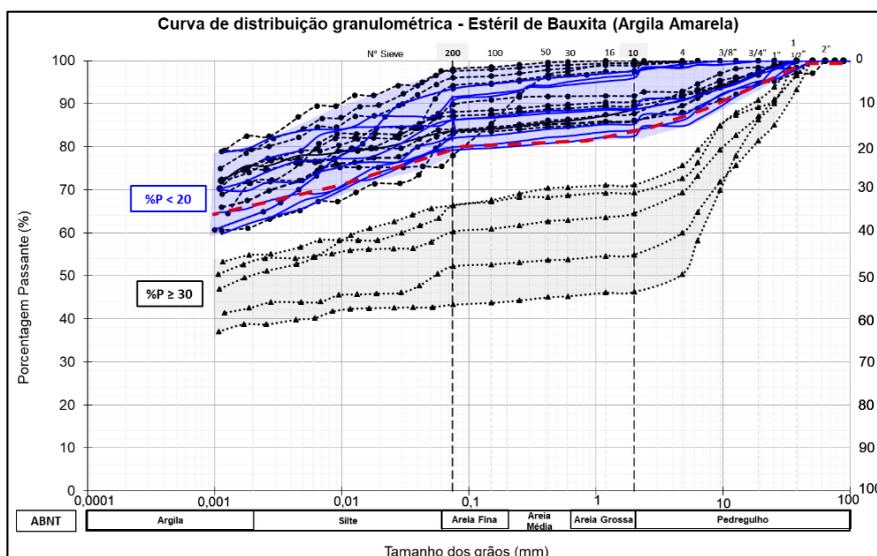


Figura 1. Curva de Distribuição Granulométrica do Material.

Burmister (1949), estabeleceu uma classificação para os solos de acordo com o índice de plasticidade, sendo considerados de alta plasticidade os solos com $20 < IP < 40$, as amostras estudadas possuem $IP_{\text{médio}}$ de 33%. Observa-se a predominância da fração fina no material, sendo este classificado como siltoso a argiloso de alta plasticidade (MH a CH), conforme mostrado da na Figura 2.

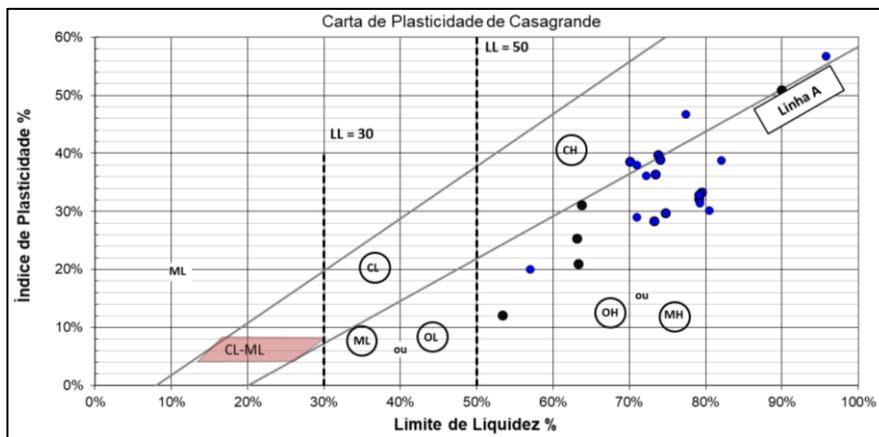


Figura 2. Limites de Atterberg – Gráfico de Plasticidade.

2.2.2 Teor de umidade e Grau de Saturação

Os gráficos apresentados na Figura 3 indicam o teor de umidade (w) determinado em laboratório e o grau de saturação das amostras (S). O resultado dos ensaios mostra o baixo teor de umidade e a considerável variabilidade no grau de saturação das amostras, que pode ser justificada pela sua forma de disposição, onde S_{med} foi igual a 85%. Além disso, as amostras de estéril compactadas (aterro), obtiveram um índice de vazios inicial médio $e_{i,\text{med}} = 0,95$, já em seu estado solto, o estéril apresentou $e_{i,\text{med}} = 1,21$.

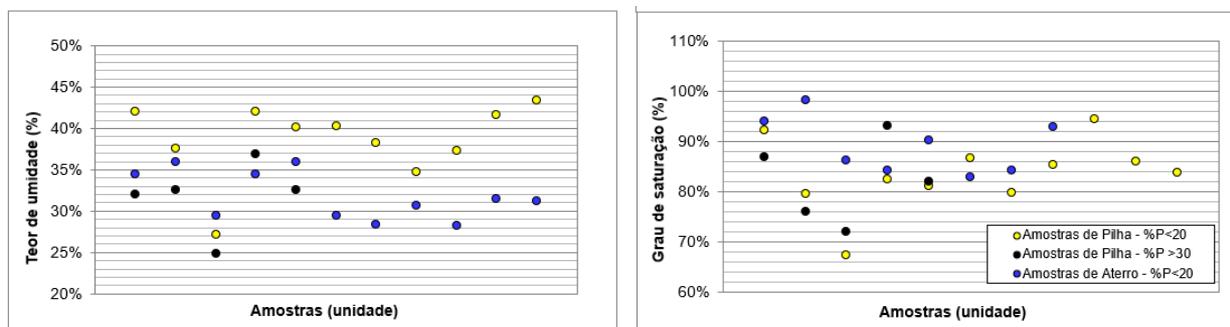


Figura 1. Teor de umidade e grau de saturação das amostras.

2.2.3 Ensaio de Compactação – Proctor Normal

A Figura 4 apresenta as curvas de compactação do estéril de bauxita. As amostras de estéril com $\%P > 30$, apresentam curva típica de siltes arenosos, com alta densidade e baixo teor de umidade. Enquanto as curvas das amostras com $\%P < 20$, são características de argilas siltosas. As amostras de estéril retiradas do aterro apresentaram grau de compactação médio igual a 104% e mínimo de 97%. O material em estado solto apresentou grau de compactação médio de 91%, sendo o mínimo de 83% e máximo de 101%.

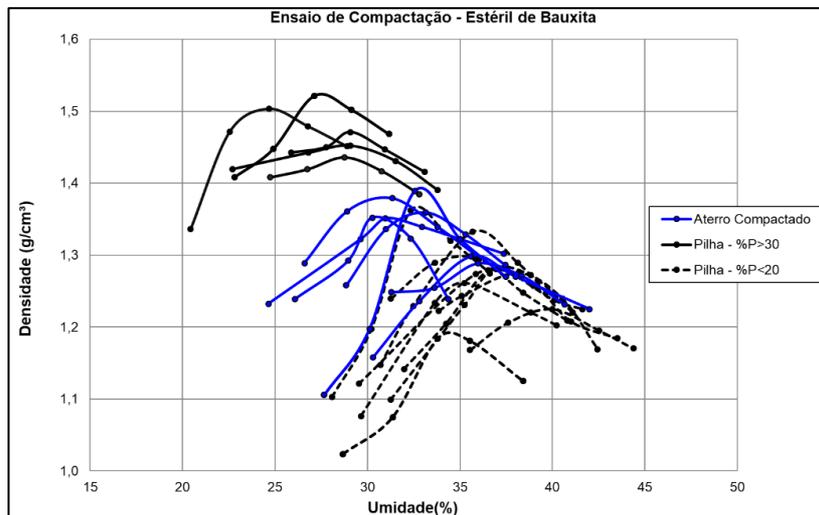


Figura 2. Curvas de Compactação do material de estéril de bauxita.

2.2.4 Ensaio Triaxial CIU

Foram analisados os resultados de 25 ensaios triaxiais adensados isotropicamente e não drenados, para as tensões confinantes de 75, 150 e 300 kPa, sendo dez amostras de estéril compactadas retiradas na região de aterro e quinze amostras de estéril solto retiradas na região das pilhas soltas. A Figura 5, Figura 6, Figura 7, apresentam um comparativo entre resultados típicos do ensaio triaxial CIU para o estéril, considerando amostras do aterro e pilha.

Observa-se que as curvas do estéril de pilha são características de argilas normalmente adensadas, em contrapartida as curvas do estéril compactado em aterro são características de materiais sobreadensados.

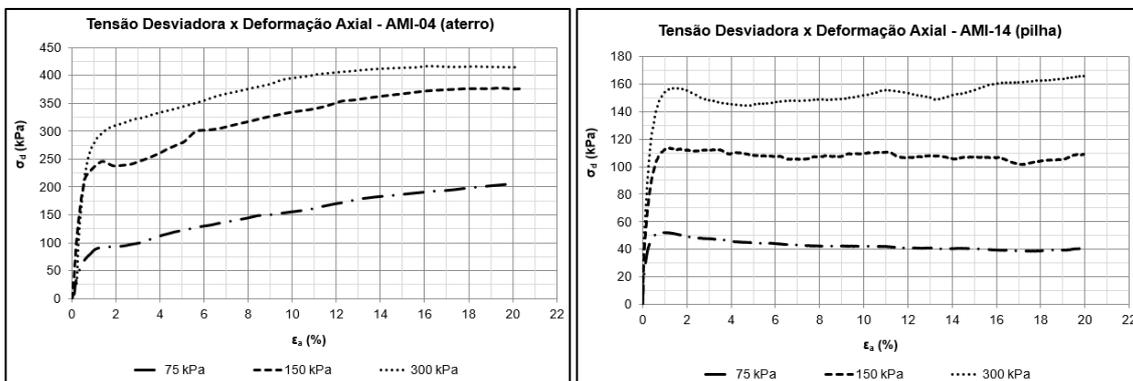


Figura 5. Gráfico σ_d x ϵ_a , (a) AMI-04 (aterro), (b) AMI-14 (pilha).

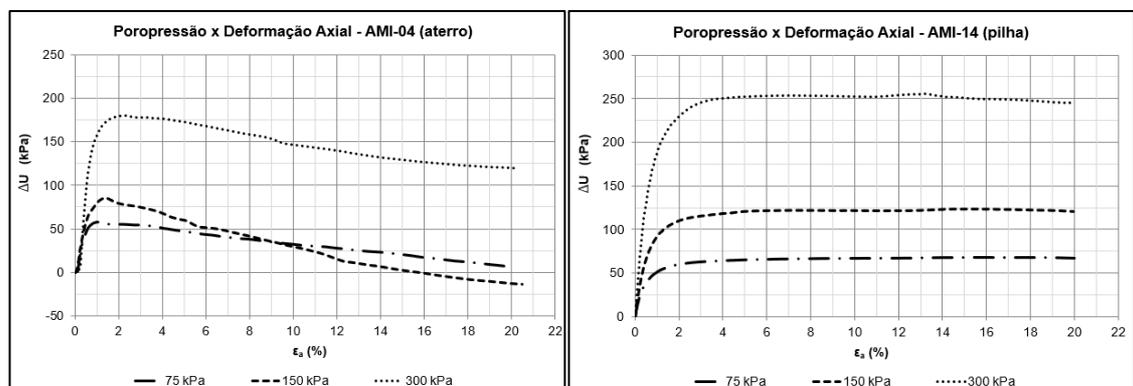


Figura 6. Gráfico ΔU x ϵ_a , (a) AMI-04 (aterro), (b) AMI-14 (pilha).

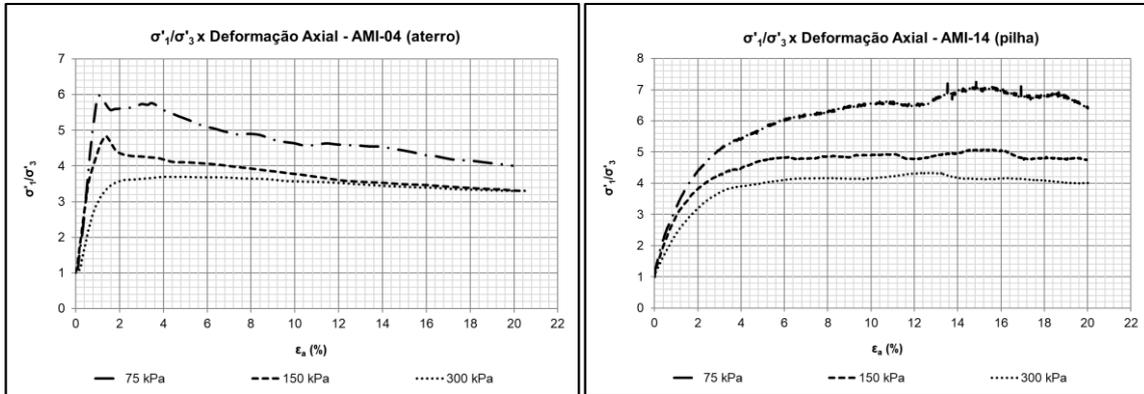


Figura 7. Gráfico σ'_1/σ'_3 x ϵ_a , (a) AMI-04 (aterro), (b) AMI-14 (pilha).

A Figura 8 apresenta as trajetórias de tensões efetivas obtidas para todos os ensaios triaxiais CIU analisados das amostras de aterro, considerando os critérios de ruptura de máxima tensão desviadora e máxima obliquidade, respectivamente. E a Figura 9 apresenta os gráficos compilando os resultados dos ensaios triaxiais CIU das amostras de estéril em estado solto (pilha), considerando ambos os critérios de ruptura.

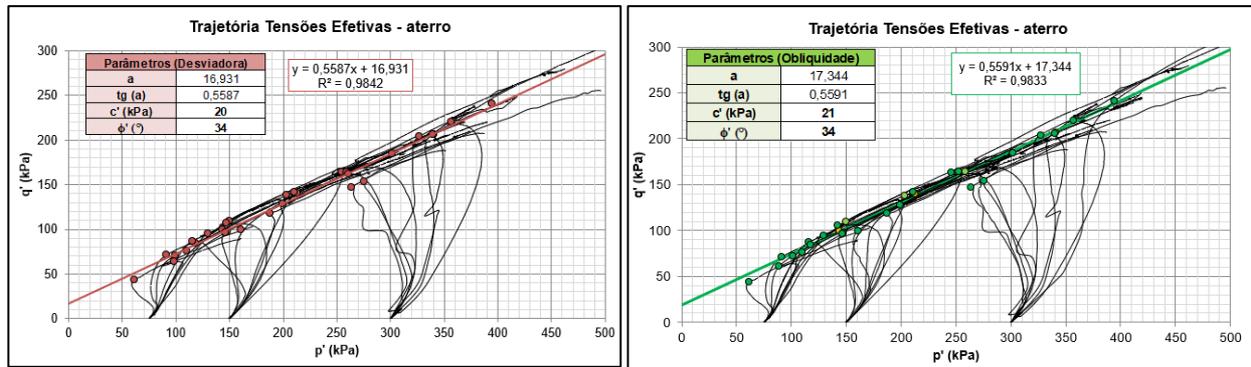


Figura 8. Trajetória de tensões efetivas (pilha compactada - aterro) – (a) critério da máxima tensão desviadora; (b) critério da máxima obliquidade

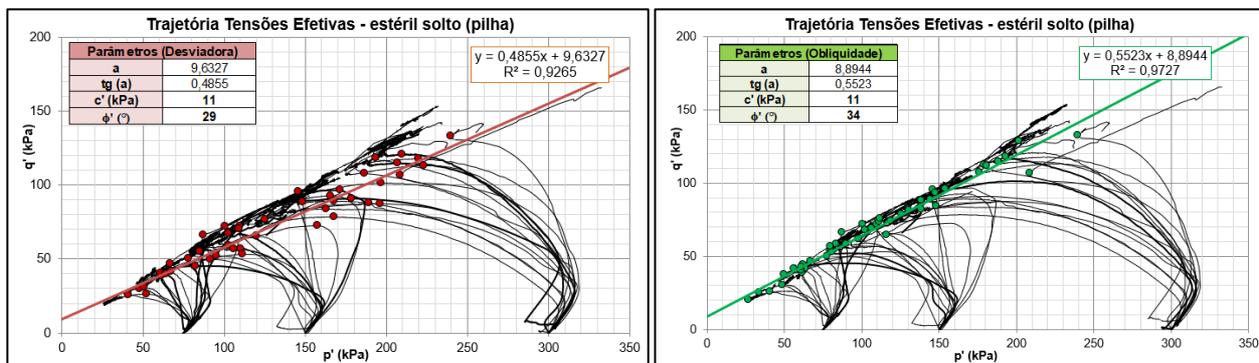


Figura 9. Trajetória de tensões efetivas (pilha solta) – (a) critério da máxima tensão desviadora; (b) critério da máxima obliquidade

2.3 Ensaios de Campo

2.3.1 Sondagem SPT

De acordo com os resultados das sondagens, a pilha de estéril (material solto) apresenta textura argilo-siltosa pouco arenosa, com pedregulhos de concreção ferruginosa (laterita/bauxita). A coloração pode variar de amarela a laranja/vermelha. Pode ser separada em dois horizontes distintos, de acordo com a resistência registrada nos ensaios de penetração (N_{SPT}), sendo classificada como mole a muito mole, quando apresenta $N_{SPT} \leq 5$ golpes, e média a rija, com $N_{SPT} 5 > n \leq 12$ golpes. Quando apresenta pedregulhos de concreção laterítica o índice N_{SPT} varia entre 19 a 40 golpes.

A resistência do material de aterro encontrada nos ensaios de penetração é de média a rija com $N_{SPT} > 12$ golpes. A cor dominante é amarela, por vezes sendo vermelha e marrom próximo aos horizontes lateríticos. Em complemento, a permeabilidade (k) encontrada nos ensaios de infiltração variou de 6×10^{-9} a 2×10^{-6} cm/s para a pilha de estéril e de 5×10^{-9} a 8×10^{-7} cm/s para o aterro.

2.3.2 Piezocone CPTU

A resistência de ponta corrigida do cone (qt) apresentou uma ampla faixa de variação para um mesmo nível de tensões indicando valores inferiores e superiores ao limite superior de 875 kPa, que divide os materiais quanto à consistência mole a média. Para valores de resistência de ponta iguais ou menores a 875 kPa, a camada da pilha de estéril foi classificada com consistência mole, e para valores acima a camada foi classificada com consistência média a rija.

A Figura 10 apresenta resultados típicos do ensaio CPTU para o estéril de aterro e pilha, respectivamente, sendo a coloração amarela referente ao estéril da pilha e laranja ao estéril do aterro. Para o aterro de estéril a resistência de ponta ao longo das camadas apresentou-se maior ou igual a 1000 kPa, o que indica um material com consistência média a rija, conforme também indicado nos ensaios de penetração (SPT).

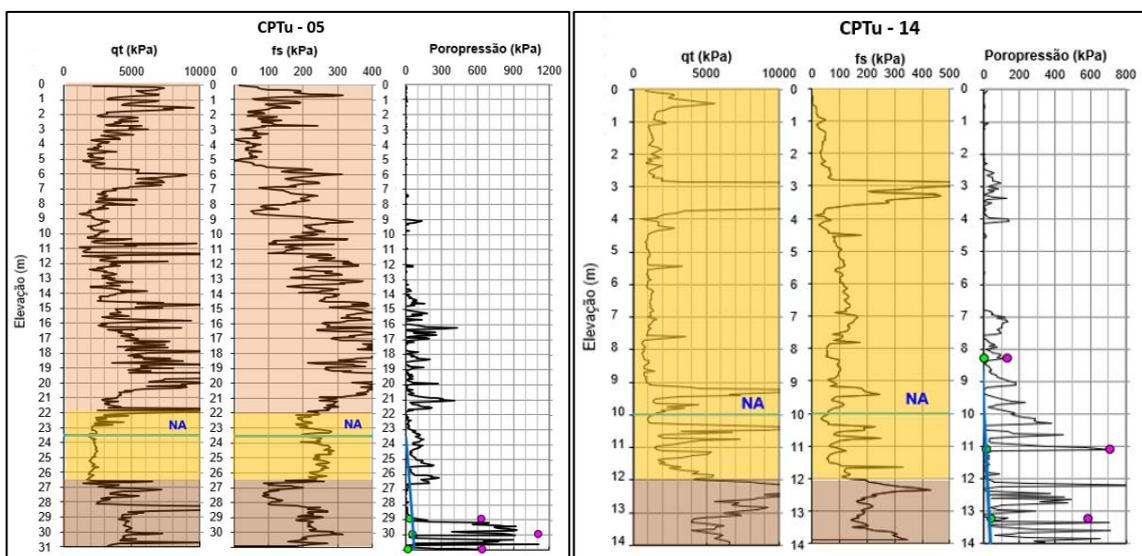


Figura 10. Resultado do ensaio CPTu para: (a) estéril compactado (aterro), (b) estéril solto (pilha).

3 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Por meio de ensaios de caracterização feitos em laboratório o solo estudado foi classificado como um material fino, siltoso a argiloso de alta plasticidade. As amostras de estéril com porcentagem de pedregulhos maior que 30% apresentaram curva típica de siltes arenosos, com alta densidade e baixo teor de umidade. Enquanto as amostras com porcentagem de pedregulho inferior a 20% apresentam curvas típicas de argilas siltosas. Visto que 83% das amostras estudadas apresentaram granulometria com $\%P < 20$, conclui-se que o estéril de bauxita possui comportamento mais argiloso.

Buscando uma análise complementar para o comportamento e classificação do material em estudo, os resultados dos ensaios de Piezocone (CPTU) foram compilados no ábaco de Robertson (2016) apresentado na Figura 12, para a pilha solta e aterro compactado, respectivamente. O ábaco de Robertson também permite identificar se o material possui comportamento drenado ou não drenado, contrátil ou dilatante. A curva $I_B = 32$ é o limiar entre solos com comportamento drenado, $I_B > 32$, e não drenado, $I_B < 32$. A curva $CD = 70$ é o limiar entre os materiais com tendência à contração, região abaixo da curva, ou dilatação, região acima da curva.

O índice de classificação dos solos (I_{CRW}) médio obtido para as amostras de pilha foi de 3,25, o que indica que o material apresenta comportamento não drenado, além da maior parte dos pontos estar na zona de $I_B < 32$. Embora exista uma quantidade significativa de pontos na região dilatante do ábaco, a análise mostrou uma predominância de comportamento contrátil desse material com 63% dos dados, sendo que a grande maioria (59% do total) é classificada como argila contrátil (CC).

Para o material de aterro compactado, o índice de classificação dos solos (I_{CRW}) médio obtido foi de 2,54, valor referente à materiais com comportamento drenado. Como pode ser observado, o resultado da avaliação mostra uma predominância de pontos com comportamento dilatante. Para esse material, 91% dos pontos apresentaram comportamento dilatante.

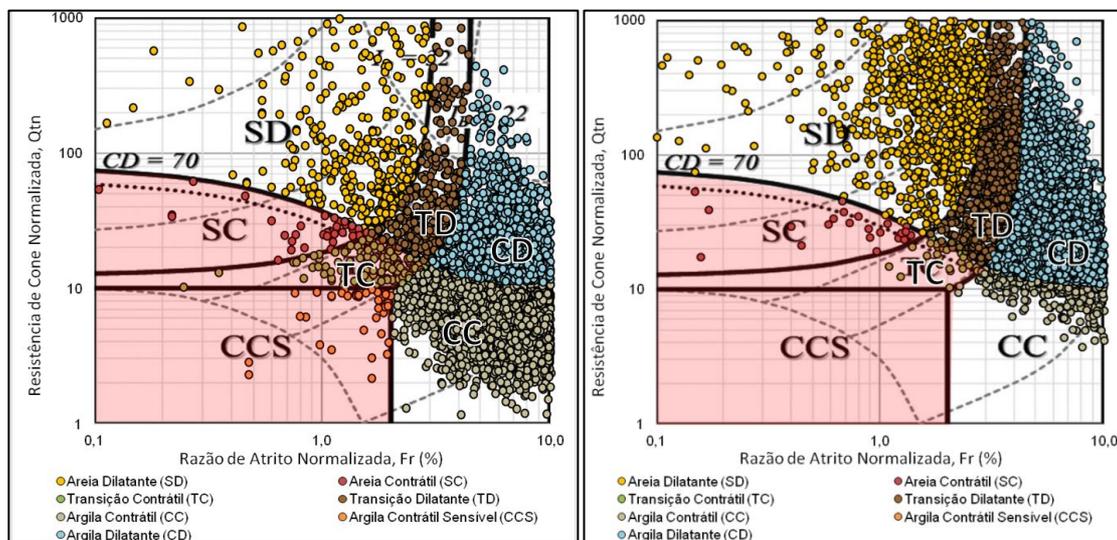


Figura 12 – Diagrama do Comportamento do estéril, para CPTU Normalizado (Robertson, 2016) – (a) pilha solta, (b) pilha compactada - aterro

Nos ensaios Triaxiais CIU o estéril compactado (aterro) apresentou comportamento dilatante durante cisalhamento não drenado, onde a envoltória de ruptura se sobrepõe para os critérios de ruptura de máxima obliquidade e máxima tensão desviadora. Este comportamento foi observado em praticamente todas as amostras de aterro analisadas e confirmado pelos ensaios de cone e piezocone plotados no ábaco de Robertson (2016). Por outro lado, quando o estéril se encontra em estado solto (pilha), o material apresenta comportamento majoritariamente contrátil durante cisalhamento não drenado, onde os parâmetros advindos do critério de ruptura de máxima tensão desviadora são menores em relação aos parâmetros advindos do critério de máxima obliquidade. Quando da comparação com o resultado de ensaios de campo plotados no ábaco de Robertson (2016), 63% dos pontos caíram em zonas de materiais contráteis e 37% em região de material com comportamento dilatante.

Da análise dos gráficos com a compilação de todos os ensaios triaxiais feitos em amostras de pilha, observou-se que algumas amostras apresentaram comportamento dilatante para baixos níveis de tensões. Quando do aumento da tensão confinante para 300 kPa essas amostras passaram a apresentar geração de poropressão positiva durante cisalhamento não drenado, indicando tendência à contração, ou seja, a depender do nível de tensões, há uma mudança de comportamento da pilha de estéril de bauxita.

Segundo Pinto (2019), em linhas gerais, os materiais que apresentam geração de poropressão positiva durante o cisalhamento não drenado, podem ser classificados em dois tipos:

- A. Materiais que apresentam tendência puramente à contração, com geração de poropressões positivas e aumento da resistência até alcançar a resistência de pico, com posterior queda de resistência pós pico até alcançar a resistência residual ou resistência de estado permanente, comportamento conhecido como *Strain Softening*. Para esses materiais, as análises de estabilidade, para carregamentos não drenados, devem considerar um cenário com a resistência não drenada de pico e outro cenário com a resistência não drenada residual (Por exemplo: materiais com tendência à liquefação).
- B. Materiais que inicialmente apresentam tendência à contração até alcançar um estado de transformação de fase a partir do qual inicia-se uma tendência à dilatação. Nesse caso, após alcançada a resistência de pico, não ocorre perda de resistência com a deformação e as análises de estabilidade, para carregamentos não drenados, devem considerar apenas o cenário com a resistência não drenada de pico, sem a necessidade de análise pós pico.

Dentre os materiais analisados, não foi observado o comportamento do tipo A (*Strain Softening*). O estéril compactado, não apresenta geração de poropressões significativas, principalmente para as condições de grau de compactação observadas. Os ensaios de campo indicaram valores elevados de resistência drenada e não drenada para este material. Com base nestas observações conclui-se que as análises de estabilidade podem ser desenvolvidas considerando-se apenas parâmetros drenados.

O estéril solto em configuração de pilhas apresenta maior geração de poropressões durante o cisalhamento não drenado, entretanto com o comportamento do tipo B. Nos ensaios de SPT e CPTU, a pilha apresentou horizontes distintos de consistência apresentando-se mole a rija. Desta forma, para esse material, além das análises considerando parâmetros drenados, devem ser também desenvolvidas análises com os parâmetros não drenados de pico.

4 CONCLUSÃO

O estéril de bauxita pode ser classificado como um material fino, silto-argiloso de alta plasticidade. Quando compactado este material apresenta curvas típicas de material sobreadensado e em estado solto apresenta comportamento de argila normalmente adensada. A partir dos resultados dos ensaios triaxiais observou-se que o estéril compactado não apresentou significativa geração de poropressão durante a fase de cisalhamento, mostrando, em geral, tendência à dilatação. Sendo assim, para este material, a abordagem mais adequada em análises de estabilidade é a adoção de parâmetros efetivos, não se aplicando análises para a condição não drenada.

Considerando o estéril solto (pilha), quando saturado e em condição não drenada, apresenta significativa geração de poropressões durante o cisalhamento, mostrando inicialmente tendência à contração até alcançar um estado de transformação de fase, a partir do qual se inicia uma tendência à dilatação. Desta forma, além das análises considerando parâmetros drenados, devem ser também desenvolvidas análises de estabilidade com os parâmetros não drenados para este material.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABNT (2016). Solo – Análise Granulométrica. Associação Brasileira de Normas Técnicas NBR 7180. Rio de Janeiro, RJ, 12 p.
- Burmister, D. M. (1949). Principles and Techniques of Soil Identification. Proceedings, Annual Highway Research Board Meeting. National Research Council, Washington, DC, vol. 29, p.204-433.
- Das, B. M. (2006). Fundamentos de Engenharia Geotécnica. Thomson Canada Limited. 6ª ed., 562 p.
- Pinto, V. R. P. (2019). Comportamento Geotécnico de Estéril de Bauxita e seu Potencial uso como Estrato de Fundação. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Publicação G.DM-327/2019, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 145 p.
- Robertson, P.K. (2016). Cone penetration test (CPT) – based soil behavior (SBT) classification system – an update. Canadian Geotechnical Journal. 53: 1910-1927
- Sampaio, J. A., Andrade, M. A.C., Dutra, A. J. B. (2008). Rochas e Minerais Industriais – CETEM/2008, 2 ed., p. 311-314.