

Análise do Parâmetro Ru Em Barragens de Terra

Marcos Maia dos Santos

Mestrando em geotecnia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, marcosmaiadossantos@gmail.com

Dr. Rosiel Ferreira Leme

Professor, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, rosiel.leme@ufc.br

Fabiola Costa Lima

Laboratorista, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil, cl-fabiola@hotmail.com

RESUMO: Apesar do avanço tecnológico na engenharia, as construções de barragens ainda enfrentam desafios, como na avaliação da estabilidade durante a fase final da construção. Neste estágio, o aumento das cargas durante a elevação do maciço pode gerar excesso de poropressão, ameaçando a estabilidade da estrutura. O parâmetro Ru, que relaciona o incremento das poropressões ao aumento da tensão vertical, é fundamental para uma análise precisa da estabilidade. Este estudo focou na análise do parâmetro Ru e nos fatores que o influenciam, assim como na consistência dos valores utilizados em projetos de barragens no Ceará na fase final de construção. Ensaios laboratoriais revelaram resultados consistentes com a literatura, mostrando uma variabilidade significativa no comportamento do parâmetro, influenciada pela origem do solo. Nos projetos de barragens no Ceará, os valores de Ru normalmente variam entre 10% e 30%, sem uma metodologia específica para sua determinação. Porém, uma análise mais detalhada revelou que para barragens com cerca de 50m de altura, os valores empregados nos projetos permanecem entre 20% e 30%. Em contraste, ensaios de laboratório e literatura indicam valores mais altos, chegando até 60% em alguns casos. Essa discrepância sugere que os valores de Ru nos projetos de barragens no Ceará podem não refletir adequadamente o desenvolvimento de poropressão no maciço durante a fase de construção.

PALAVRAS-CHAVE: Parameter Ru, Parameter \bar{B} , Pore pressure, Earth dams, Final construction.

ABSTRACT: Despite technological advances in engineering, dam constructions still face challenges, such as assessing stability during the final construction phase. At this stage, increased loads during mass lifting can generate excess pore pressure, threatening the structure's stability. The parameter Ru, which relates pore pressure increments to vertical stress increase, is essential for precise stability analysis. This study focused on analyzing the Ru parameter and the factors influencing it, as well as the consistency of values used in dam projects in Ceará during the final construction phase. Laboratory tests revealed results consistent with the literature, showing significant variability in parameter behavior influenced by soil origin. In Ceará dam projects, Ru values typically range from 10% to 30%, without a specific methodology for determination. However, a more detailed analysis revealed that for dams approximately 50m high, project values remain between 20% and 30%. In contrast, laboratory tests and literature indicate higher values, reaching up to 60% in some cases. This discrepancy suggests that Ru values in Ceará dam projects may not adequately reflect pore pressure development in the mass during the construction phase.

KEYWORDS: Parâmetro Ru, Parâmetro \bar{B} , Poropressão, Barragens de terra, Final de construção

1 INTRODUÇÃO

Barragens de terra são construções que acumulam água de bacias hidrográficas para diversas finalidades, como abastecimento de água, irrigação e geração de energia. Ao longo da história, a construção de barragens tem sido uma prática constante, evidenciando sua ligação com o desenvolvimento humano. No entanto, como qualquer obra de engenharia, as barragens não estão isentas de falhas, o que pode resultar em acidentes graves.

Portanto, é crucial elaborar projetos seguros para evitar problemas durante a execução e operação das barragens.

A análise de estabilidade de taludes é uma etapa essencial do projeto de barragens, onde se avalia se a estrutura é segura ou não. Métodos de equilíbrio limite são amplamente utilizados para expressar a estabilidade da estrutura por meio de um fator de segurança, no qual valores superiores a 1,0 são considerados estáveis. É importante ressaltar que, dependendo das características da obra, existem valores mínimos a serem considerados para garantir a estabilidade.

Diferentemente de outras obras geotécnicas, o estudo de estabilidade de barragens requer a avaliação da estrutura sob diferentes condições, incluindo a fase final de construção. Durante essa fase, a estabilidade é avaliada considerando a geração de pressões neutras devido ao aumento das cargas durante a execução das camadas de aterro. Massad (2010) explica que o excesso de poropressão ocorre por conta da velocidade da construção da barragem, na qual a baixa permeabilidade do solo compactado impede a dissipação adequada das pressões nos vazios. O parâmetro B de Skempton (1954) é utilizado para definir essa relação entre o aumento da pressão neutra e a carga vertical, que na situação de final de construção é equivalente ao valor de R_u .

O parâmetro R_u é determinado em laboratório por meio de ensaios triaxiais PN, mas pode ser estimado por intermédio da análise de obras semelhantes ou determinados por maciços experimentais com uso de piezômetros.

Santos (2021) realizou um levantamento com 23 projetos de barragens no estado do Ceará, onde foi identificado que não é comum a realização de ensaios laboratoriais para obter o parâmetro R_u . Os valores adotados nos projetos verificados variaram entre 0,1 e 0,3, sem o respaldo de uma metodologia adequada para sua determinação. Isso evidencia a falta de conhecimento sobre as características do solo, nessa área de pesquisa, o que pode resultar em projetos que podem não representar fielmente a situação proposta.

Esse artigo é fruto dos resultados obtidos em laboratório do projeto de graduação intitulado “Avaliação do Parâmetro R_u de solos compactados em barragens de terra” desenvolvido por Santos (2021). Seu objetivo é avaliar o parâmetro, comparando valores de laboratório com aqueles utilizados em projetos.

2 PARÂMETRO \bar{B} E R_u

O parâmetro \bar{B} , difundido por Skempton (1954), define a relação entre o aumento da poropressão e o acréscimo de tensão vertical, como a adição de camadas de solo durante o processo executivo de uma barragem. Em seu estudo, Skempton também estabelece os limites de " \bar{B} ", variando de 0 a 1, onde os extremos inferior e superior correspondem a graus de saturação de 0% e 100%, respectivamente. Bishop (1954) em seu trabalho, afirma que esse parâmetro pode ser empregado na análise de estabilidade de taludes de barragens de terra, especialmente durante a fase de construção e em situações de esvaziamento rápido do reservatório. A equação 01 apresenta \bar{B} .

$$\bar{B} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} \quad (1)$$

Onde:

Δu : variação de pressão neutra,

$\Delta \sigma_1$: variação da tensão principal maior.

Existem várias metodologias para determinar o parâmetro B. Uma delas envolve a realização de ensaios triaxiais PN, que simulam o processo de elevação de camadas de aterro e drenagem em condições específicas encontradas no campo (POZZEBON, 2017; CRUZ, 1973). Além disso, também é possível determiná-lo através da observação de obras semelhantes ou aterros experimentais, nos quais a variação da poropressão com a carga acrescida é verificada (MASSAD, 2010).

Segundo Vilhete (2017), B é utilizado para estimar a poropressão com o incremento de tensões verticais devido a elevação do aterro. No entanto, na análise de estabilidade de taludes, o parâmetro R_u , difundido por Bishop & Morgenstern (1960), é o mais adequado. Esse índice, está apresentado na equação 02.

$$R_u = \frac{u}{\gamma h} \quad (2)$$

Onde:

u: Pressão neutra,
 γ : Peso específico do solo,
 h: Profundidade do ponto na camada de solo.

Nas literaturas, esses dois coeficientes são frequentemente confundidos entre si. No entanto, isso não produz danos quanto a análise da segurança das obras, pois de acordo com Bishop & Morgenstern (1960), na fase final de construção são considerados equivalentes.

$$R_u = \bar{B} \quad (3)$$

2.1 Valores usuais de \bar{B}

Cruz (1996) apresentou um estudo no qual foi investigado o comportamento do parâmetro B em diferentes tipos de solo e condições de carregamento. Amostras de quatro grupos de solo foram submetidas a ensaios triaxiais PN. Os tipos de materiais de cada grupo estão apresentados na Tabela 1. A Figura 1 apresenta algumas curvas típicas apresentadas por Cruz (1996), com o parâmetro B no eixo das ordenadas e tensão principal máxima (σ_1) no eixo das abscissas.

Tabela 1. Grupo de solos ensaiados.

Grupo	Tipo de material
Grupo I	Solos lateríticos argilosos
Grupo II	Solos saprolíticos
Grupo II	Solos lateríticos arenosos
Grupo IV	Solos transportados

Fonte: Cruz (1996) modificado pelo autor

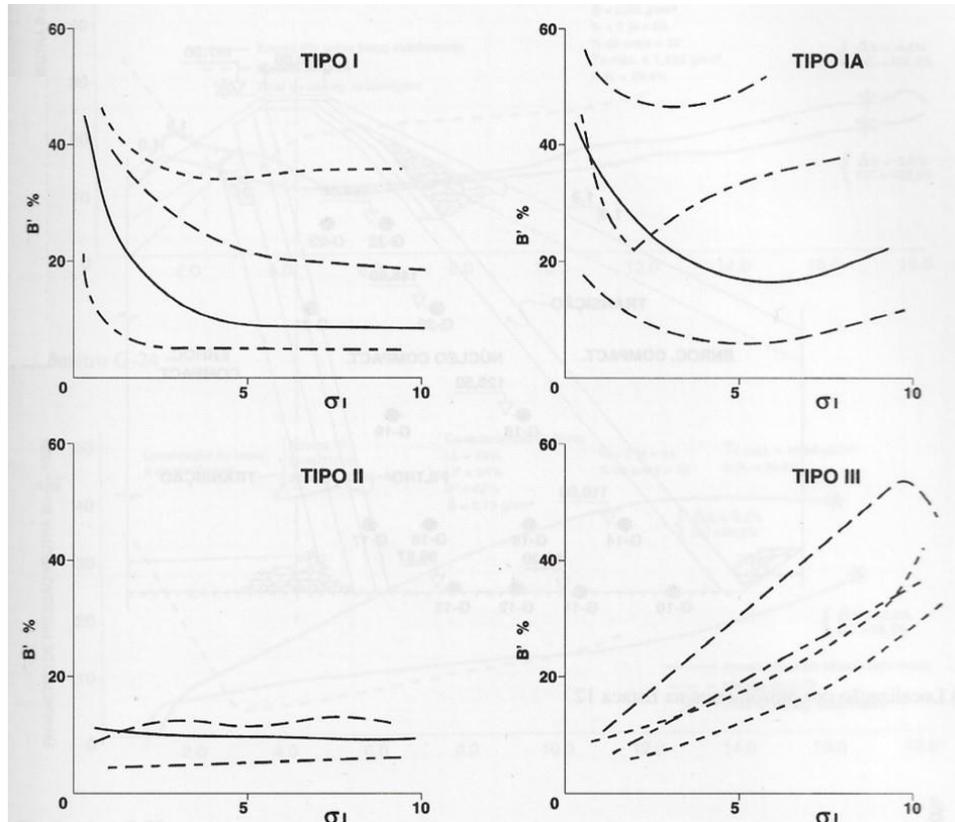


Figura 1 - Curvas típicas da variação do parâmetro \bar{B} com a tensão principal máxima
 Fonte: Cruz (1996)

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Materiais

Foram selecionadas cinco amostras de solo, buscando-se representar solos típicos de barragens. O material foi fornecido pelo Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará. A Tabela 2 detalha as localidades de onde as amostras de solo foram coletadas, bem como a litologia correspondente (a amostra 2 foi considerada originada de granito) a cada localidade.

Tabela 2. Localidade das amostras

Amostra	Município	Coordenadas (UTM)	Litologia
Amostra 1	Santa Quitéria - CE	355500.00 E, 9531000.00 S	Gnaisse
Amostra 2	Não informado	Não informado	Granito
Amostra 3	Barcarena – PA	750074.82 E, 9826136.35 S	Argilitos
Amostra 4	Barcarena – PA	749906.63 E, 9825900.64 S	Argilitos
Amostra 5	Barcarena – PA	749832.02 E, 9825882.58 S	Argilito

Fonte: Autor

3.2 Métodos

O estudo foi conduzido em duas etapas metodológicas distintas. Na primeira etapa, foram realizados ensaios laboratoriais para caracterizar o material e determinar os parâmetros de interesse. Na segunda etapa, foi avaliado o levantamento de dados realizado para complementar a análise.

3.2.1 Laboratório

Os ensaios de caracterização das amostras de solo, incluindo granulometria, limite de liquidez, limite de plasticidade e compactação, foram conduzidos em laboratório. Além disso, o parâmetro R_u foi determinado por meio do ensaio triaxial PN.

Os ensaios de caracterização seguiram as normas regulamentadoras pertinentes: NBR 7181/2016 para Análise Granulométrica, NBR 6459/2016 para Determinação do Limite de Liquidez, NBR 7180/2016 para Determinação do Limite de Plasticidade e NBR 7182/2016 para Ensaio de Compactação. Para determinar o parâmetro R_u , adotou-se a metodologia proposta por Head (1998) no Manual of Soil Laboratory Testing.

É relevante notar que, de acordo com essa metodologia, preciso determinar parâmetros de resistência do solo por meio de um triaxial adensado e drenado (CID), no entanto, estes foram estimados a partir dos valores sugeridos de resistência pela classificação do solo conforme o trabalho de Carvalho (1983).

3.2.2 Levantamento

Santos (2021) realizou uma pesquisa que envolveu o levantamento de dados de 23 barragens de terra. Os projetos foram adquiridos por meio da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e da biblioteca virtual da Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH). Os dados extraídos desses documentos consistiram nos valores de R_u utilizados nos projetos, com a finalidade de realizar comparações com os valores encontrados na literatura e determinados em laboratório.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 Laboratório

4.1.1 Ensaios de caracterização e compactação

A Figura 2 exibe as curvas granulométricas das amostras de solo analisadas. Com base nessas curvas, é evidente que os materiais estudados são predominantemente compostos por frações finas, indicando a tendência dos materiais em serem argilosos ou siltosos.

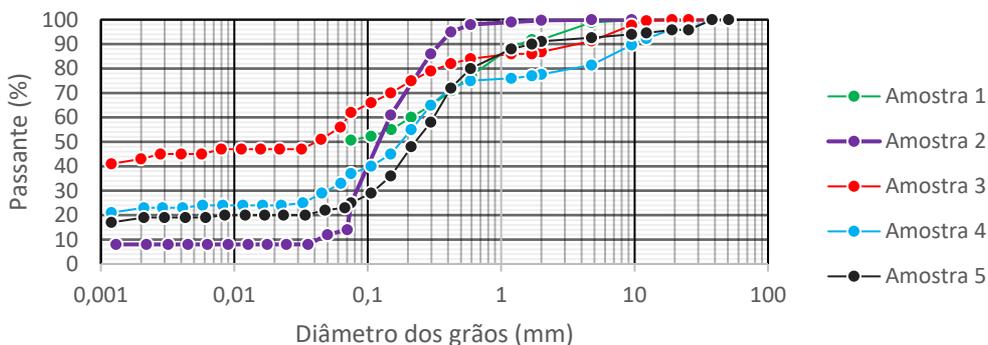


Figura 2 - Granulometria
 Fonte: Autor

A Tabela 3 apresenta os limites de Atterberg das amostras ensaiadas. É importante destacar que, devido às suas propriedades, não foi possível determinar os índices de consistência da amostra 2, sendo assim considerada como um material não plástico e não líquido.

Tabela 3. Limites de Atterberg

Amostra	Limite de Liquidez (%)	Limite de Plasticidade (%)	Índice de Plasticidade (%)
Amostra 1	30	15	15
Amostra 2	NL	NP	-
Amostra 3	48	18	30
Amostra 4	32	16	16
Amostra 5	25	14	11

Fonte: Autor

Com base na distribuição granulométrica e nos limites de Atterberg, as amostras de solo foram classificadas de acordo com o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS). As amostras 4 e 5 foram identificadas como areias argilosas (SC). As amostras 1 e 3 foram classificadas como argilas de baixa compressibilidade (CL).

Devido à impossibilidade de estabelecer os limites de liquidez e plasticidade, a amostra 2 foi considerada como uma areia siltosa, com base no comportamento da curva granulométrica.

Por conta dos solos apresentarem material fino em sua composição, há a tendência de gerar excesso de poropressões quando submetidos a aumentos de cargas verticais, tornando o material adequado para as análises desejadas.

A Figura 3 apresenta as curvas de compactação das amostras. A partir dessas curvas, foram determinadas a massa específica máxima e a umidade ótima, que podem ser obtidas nos gráficos para realizar a moldagem correta dos corpos de prova para os ensaios triaxiais.

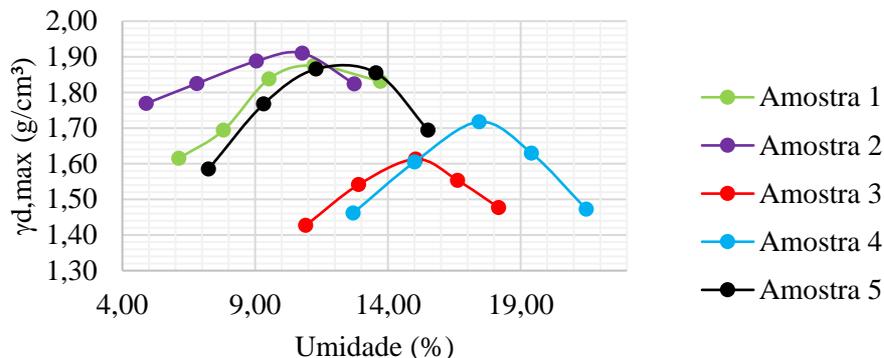


Figura 3 – Curvas de compactação
 Fonte: Autor

4.1.2 Ensaios Triaxiais

Os ensaios triaxiais PN foram executados segundo as indicações de Head (1998). A partir das trajetórias de tensões, foram determinados os valores de Ru de acordo com os intervalos de variação da tensão principal maior, conforme mostrado na Tabela 4.

Tabela 4 - Ru das amostras

Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4		Amostra 5	
σ_1 (kPa)	Ru (%)								
100-300	8	100-300	5	100-300	21,45	150-300	11,20	150-300	12,94
300-400	16	300-400	3	300-400	24,08	300-400	27,72	300-400	16,84
400-500	28	400-600	15	-	-	-	-	-	-
500-600	50	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor

Observa-se que a amostra 2, por ser mais granular em comparação com as outras, apresentou uma variação menor da poropressão, refletindo em um valor de Ru menor para os mesmos níveis de tensão. Em contraste, a amostra 1, composta principalmente por partículas finas, registrou um Ru de 50% para tensões de até 600 kPa, enquanto na amostra 2 alcançou apenas 15%. Para tensões até 400 kPa, o coeficiente é praticamente insignificante, variando entre 3 e 5%.

Além disso, as amostras 1 e 3, apesar de ambas serem argilas de baixa compressibilidade, apresentam valores e comportamentos distintos. Na amostra 1, observa-se uma variação crescente do Ru com o aumento de σ_1 , enquanto na amostra 3, o coeficiente apresenta uma tendência quase constante. Essa disparidade pode ser justificada observando os estudos de Cruz (1996), os quais mostraram que o comportamento e valores podem variar consideravelmente para solos da mesma classificação, mas com diferentes litologias. No entanto, mesmo diante das distintas características de cada amostra, incluindo comportamento, valores e composição litológica, é perceptível que os valores de Ru permanecem consistentes com σ_1 , geralmente na faixa de 300 a 400 kPa, com uma variação de 15 a 25%, exceto para o material mais granular.

4.2 Comparação

Os resultados obtidos em laboratório foram comparados com os apresentados por Cruz (1996), levando principalmente em consideração a litologia do material. As amostras 1 e 2 foram relacionadas, respectivamente, com as curvas do tipo IA e II retiradas de Cruz (1996), enquanto as amostras 3, 4 e 5 foram comparadas com o tipo III. As curvas de comparação estão apresentadas na Figura 4.

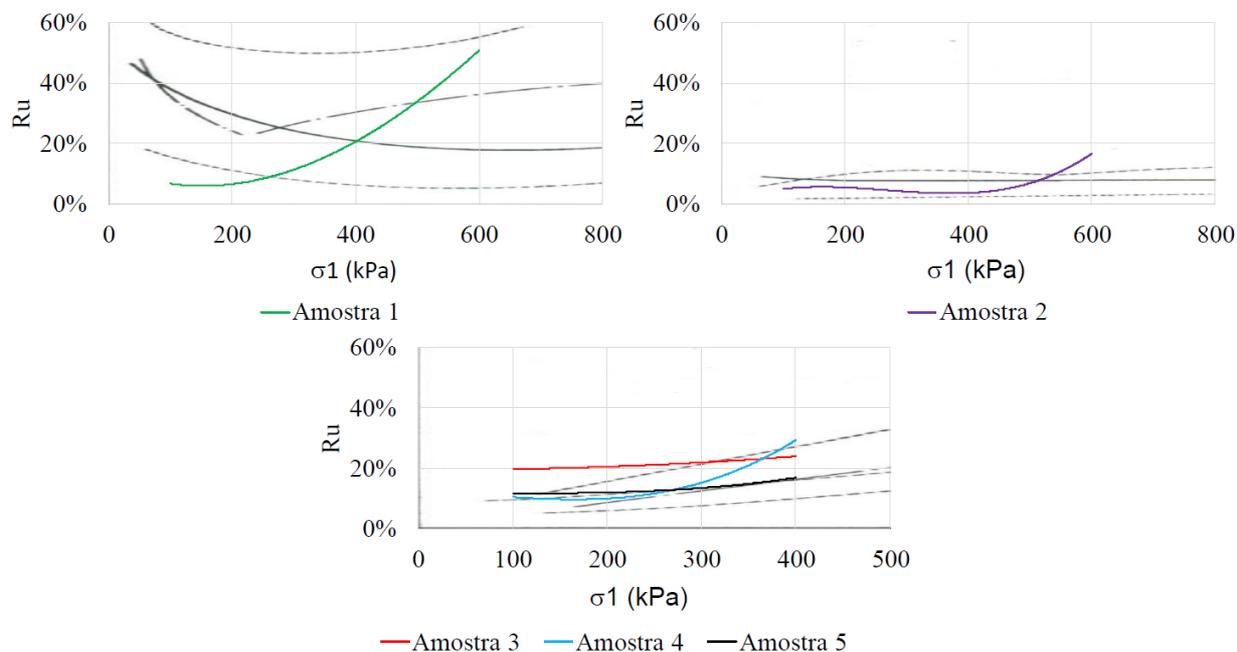


Figura 4 – Comparação entre o parâmetro R_u determinado em laboratório com os retirados de Cruz (1996)
 Fonte: Autor

Foi possível observar que os valores encontrados em laboratório são próximos, tanto em termos de valores quanto de comportamento, aos encontrados na literatura. Além disso, como também apresentado por Cruz (1996), a influência da litologia no parâmetro R_u é clara. Por exemplo, as amostras 1 e 3, embora possuam a mesma classificação de solo, apresentam comportamentos distintos, enquanto as amostras 3, 4 e 5 são muito próximas e têm a mesma origem mineral.

4.3 Avaliação dos valores de R_u adotados em projetos de barragens no estado do Ceará

Nos relatórios de projetos de construção de barragens levantados por Santos (2021), o parâmetro R_u varia de 0 a 50% em materiais de baixa permeabilidade, o que está de acordo com os valores determinados em laboratório. No entanto, na literatura, é possível encontrar valores de até 60%.

Para verificar a consistência dos valores adotados em projetos, considerou-se que S_1 é aproximadamente a tensão vertical do maciço. Geralmente, para barragens com até 20 metros de altura, as tensões variam entre 300 e 400 kPa. Os valores de R_u adotados nos projetos geralmente ficam entre 10% e 30%, mas os valores de laboratório e literatura para essa mesma faixa de tensões podem ser mais elevados. Além disso, ao analisar barragens mais altas, como Figueiredo, Inhuçu e Lontras, com alturas de 33,50 m, 45,50 m e 57,00 m, respectivamente, observamos que foram adotados 20% para a primeira e 30% para as últimas, o que contrasta com os valores de laboratório e literatura, que para esse nível de tensão podem chegar até 60%. Já em barragens mais baixas, como Boa Vista, com 6,30 m, foi adotado um valor de 20%, enquanto em ensaios chegamos a valores abaixo de 10% para esse nível de tensão. Isso mostra que a falta de conhecimento sobre as pressões neutras no solo pode levar a análises superdimensionadas ou subdimensionadas, afetando a estabilidade e o custo da obra.

5 CONCLUSÃO

É possível concluir que os valores de R_u podem variar até 60% de acordo com os resultados de laboratório e a literatura. Além disso, eles apresentam uma alta variabilidade, mas também podem exibir tendências de comportamento e valores, que são fortemente influenciados pela litologia do solo.

Além disso, foi observado que os valores desse parâmetro adotados em projetos de barragens no estado do Ceará podem não representar adequadamente o desenvolvimento de poropressão no maciço durante a fase de construção. Tanto em laboratório quanto na literatura, foi possível observar valores até 50% mais altos do que os adotados nos projetos.

A principal conclusão do trabalho foi a verificação da influência da litologia no comportamento da variação de poropressão com a variação de cargas verticais. No entanto, embora a litologia seja influente para os valores e tendências de R_u , não é recomendado estimar seu valor com base apenas nesse fator, devido à alta variabilidade do parâmetro, mesmo para solos de mesma origem e classificação. Portanto, a determinação em laboratório é a abordagem mais recomendada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 6459: *Solo – Determinação do limite de liquidez*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7180: *Solo – Determinação do limite de plasticidade*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7181: *Solo – Análise granulométrica*. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 7182: - *Ensaio de compactação*. Rio de Janeiro. 2016.
- Bishop, A.W. The Use of Pore-Pressure Coefficients in Practice. *Géotechnique*, v. 4. 1954.
- Bishop, A.W; Morgenstern, Norbert. Stability coefficients for earth slopes. *Géotechnique*, v. 10. P 129-153. 1960.
- Carvalho, L. Hermani. Curso de Barragens de Terra com vistas ao Nordeste Brasileiro. DNOCS. Fortaleza, Ceará. 1983.
- Cruz, P. T. 100 Barragens Brasileiras: Casos históricos, materiais de construção, projeto. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 1996.
- Das, Braja M. Fundamentos de engenharia geotécnica. São Paulo: Thompson, 2007.
- Head, K. H. Manual of soil laboratory testing. V.3. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 1998.
- Massad, F. Obras de Terra : Curso Básico de Geotecnia. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.
- Pozzebon, Beatriz Herter. Parâmetros de solos residuais compactados da Região Metropolitana de São Paulo: comparação com dados de outras localidades no Brasil. Dissertação de mestrado em Ciências – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.
- Santos, M. *Avaliação do parâmetro R_u de solos compactados em barragens de terra*. Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, Ceará, 2021.
- Skempton, A. W. The pore pressure coefficient A and B. *Géotechnique*, v. 4, pp. 143-147. 1954;
- Vilhete, Didoney Fernandes. Retroanálise da ruptura do talude de montante da Barragem do Açú no final do período construtivo. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2017.