



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL

MARCOS MAIA DOS SANTOS

**AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO R_u DE SOLOS COMPACTADOS EM BARRAGENS
DE TERRA**

FORTALEZA
2021

MARCOS MAIA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO R_U DE SOLOS COMPACTADOS EM
BARRAGENS DE TERRA

Projeto de Graduação apresentado á coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

FORTALEZA

2021

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S236a Santos, Marcos Maia dos.

Avaliação do parâmetro Ru de solos compactados em barragens de terra / Marcos Maia dos Santos. – 2021.

67 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2021.

Orientação: Profa. Dra. Rosiel Ferreira Leme.

1. Parâmetro Ru. 2. Parâmetro B. 3. Pressão neutra. 4. Barragens de terra. 5. Final de construção. I. Título.

CDD 620

MARCOS MAIA DOS SANTOS

AVALIAÇÃO DO PARÂMETRO R_U DE SOLOS COMPACTADOS EM
BARRAGENS DE TERRA

Projeto de Graduação apresentado á coordenação do Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia civil.

Orientador: Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme.

Aprovada em: 06 / 04 / 2021

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Rosiel Ferreira Leme (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. Anderson Borghetti Soares
Universidade Federal do Ceará (UFC)

MSc. José Alves Carneiro Neto
COGERH

Aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, a Deus, pela minha vida, e pela minha saúde em uma época tão conturbada no país e no mundo. Não só na minha, mas de todos meus familiares. Se cheguei até aqui, foi com todo seu apoio.

Ao Prof. Dr. Rosiel Ferreira, pela admirável orientação, paciência, que desde o primeiro contato, acolheu o tema e direcionou o caminho com maestria. Sem dúvida um ótimo profissional que vejo como exemplo.

Aos meus pais, Denize e Garcia, que sem eles eu não teria realizado nem 80% de tudo que conquistei na vida até o momento. Por todo apoio e incentivo que recebi desde criança. Além de todos os valores que aprendi com eles.

A Rayssa, por todo seu companheirismo, que apareceu na minha vida no início da minha graduação neste curso e permaneceu até o fim. Que me orientou e apoiou em vários momentos da minha vida nos últimos anos. Sem ela com certeza os momentos livres não seriam tão aconchegantes.

A meus amigos e colegas que a vida e universidade me trouxeram, que sem vocês, o convívio na universidade e momentos de distração não seriam tão divertidos. Vou guardar com carinho todas as lembranças compartilhadas e vividas com vocês.

Aos técnicos do laboratório, que auxiliaram nos ensaios realizados.

A banca examinadora por ter aceitado participar dessa fase final da minha graduação. Pelo tempo dedicado a leitura e sugestões de melhoria para meu trabalho e paciência.

Finalmente, não posso esquecer da pessoa que teve o papel mais direto neste trabalho, sem ela nada poderia ter sido realizado: Eu. Embora possa parecer um discurso pretencioso, não podemos deixar de nos orgulhar e agradecer a nossas conquistas. ☺

RESUMO

A construção de barragens de terra é uma prática comum na história da humanidade, entretanto, mesmo com a evolução das técnicas construtivas, essas obras ainda estão sujeitas a falhas. A fase de projeto que avalia a segurança da barragem é a análise de estabilidade de taludes, que deve ser realizada para diferentes solicitações, sendo a condição de final de construção, na qual ainda não ocorreu o enchimento do reservatório, uma das fases a ser analisada. Nessa condição, a geração e o excesso de pressões neutras pelo aumento de cargas verticais durante a execução das camadas de solo devem ser considerados, visto que essas solicitações reduzem a estabilidade da obra. Para uma melhor avaliação das condições de estabilidade dos taludes, a razão de poropressão (R_u), que representa a relação do acréscimo de pressões neutras em relação ao aumento de tensão vertical, deve ser considerado nos métodos de cálculo. Assim, esta pesquisa avaliou o desenvolvimento e fatores que influenciam no parâmetro, além de verificar a consistência dos valores de R_u utilizados em projetos no estado do Ceará para solos compactados de barragens de terra, na condição de final de construção. Para tanto, foram realizados ensaios laboratoriais para determinação de R_u para cinco diferentes amostras, como também um levantamento de dados de projetos de barragens construídas no estado do Ceará. Conclui-se, a partir das análises dos ensaios e dados de literatura, que o parâmetro tem uma alta variabilidade de comportamento e que tende a ser sensível a litologia do solo e sua classificação. Além disso, também foi possível constatar que os valores usualmente adotados em projetos no estado do Ceará podem não representar adequadamente o desenvolvimento das pressões neutras nos maciços.

Palavras-chave: Parâmetro R_u . Parâmetro \bar{B} . Pressão neutra. Barragens de terra. Final de construção.

ABSTRACT

The construction of earth dams is a common practice in the history of humanity, however, even though construction techniques have evolved, these works are still subject to failure. The analysis of slope stability is the design phase that assesses the dam safety. In this type of construction, this analysis must be performed for different requests; the end of construction condition is one of them and considers that the filling of the dam has not yet occurred. In this condition, the generation and excess of neutral pressures due to the increase of vertical loads during the execution of the soil layers must be considered, since these requests reduce the stability. For a better evaluation of the slope stability conditions, the R_u parameter, which represents the ratio of the increase in pore pressure in relation to the increase in vertical stress, must be considered in the calculation methods. Thus, this research evaluated the development and factors that influence the parameter, in addition to checking the consistency of the R_u values used in projects in the state of Ceará (Brazil) for compacted soils of earth dams, in the condition of final construction. It is concluded, from the analysis of the tests and literature data, that the parameter has a high variability of behavior and that it tends to be sensitive to soil lithology and its classification. In addition, it was also possible to verify that the values usually adopted in projects in Ceará (Brazil) may not adequately consider the development of neutral pressures in the massifs.

Keywords: Parameter R_u . Parameter \bar{B} . Pore pressure. Earth dams. Final construction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Curva de Compactação	19
Figura 2 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias	21
Figura 3 – Processo executivo do maciço de uma barragem.....	25
Figura 4 - Evolução das poropressões em uma camada de solo compactado	26
Figura 5 – Variação da pressão neutra na barragem de Limoeiro	27
Figura 6 – Seção tipo central da barragem de Açú	30
Figura 7 – Vista da ruptura da Barragem do Açú	31
Figura 8 – Ruptura da barragem Fort Peck.....	32
Figura 9 - Curvas típicas da variação do parâmetro \bar{B} com a tensão principal máxima	37
Figura 10 - Curvas típicas da variação do parâmetro \bar{B} com o desvio de umidade em relação a ótima.....	38
Figura 11-Localidades das amostras de solo	41
Figura 12 – Granulometria	43
Figura 13- Ensaio de Limite de Liquidez	43
Figura 14 - Ensaio de Limite de Plasticidade	44
Figura 15 – Compactação	44
Figura 16 – Gráficos do ensaio	47
Figura 17 - Ensaio realizado.....	48
Figura 18 - Curvas granulométricas das amostras ensaiadas.....	50
Figura 19 - Limites de Liquidez	51
Figura 20 - Curvas de Compactação.....	53
Figura 21 - PN - Amostra 1.....	54
Figura 22 - PN - Amostra 2.....	54
Figura 23 - PN - Amostra 3.....	55
Figura 24 - PN - Amostra 4.....	55
Figura 25 - PN - Amostra 5.....	56
Figura 26 - Poropressão x σ_1	57
Figura 27 - Variação de R_u com σ_1	58
Figura 28 - Comparação entre o parâmetro R_u determinado para a amostra 1 com os retirados de Cruz (1996)	60

Figura 29 - Comparação entre o parâmetro R_u determinado para a amostra 2 com os retirados de Cruz (1996)	61
Figura 30 – Comparação entre o parâmetro R_u determinado para as amostras 3, 4 e 5 com os retirados de Cruz (1996)	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Ensaio de compactação	20
Tabela 2 - Fatores de segurança mínimos e faces a analisar	24
Tabela 3 - Materiais utilizados na construção da barragem	29
Tabela 4 - Grupo de solos	36
Tabela 5 - Parâmetro R_u em função do tipo de solo	39
Tabela 6 - Localidades das amostras de solo	40
Tabela 7 - Ensaio normalizado	42
Tabela 8 - Parâmetros de resistência de solos	45
Tabela 9 - Frações de solo das amostras	51
Tabela 10 - Limites de Atterberg	52
Tabela 11 – Massa esp e umidade ótima	52
Tabela 12 - Parâmetros de resistência das amostras	53
Tabela 13 - R_u das amostras	56
Tabela 14 - Levantamento de dados de projetos	63

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Generalidades.....	14
1.2	Motivação e problema de pesquisa	15
1.3	Justificativa.....	16
1.4	Objetivos	16
1.4.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>16</i>
1.4.2	<i>Objetivos Específicos</i>	<i>16</i>
1.5	Estrutura do trabalho	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1	Solo compactado.....	18
2.1.1	<i>Compactação.....</i>	<i>18</i>
2.1.2	<i>Ensaio Proctor Normal.....</i>	<i>18</i>
2.1.3	<i>Energias de compactação</i>	<i>20</i>
2.1.4	<i>Estrutura do solo compactado.....</i>	<i>22</i>
2.2	Estabilidade de barragens de terra na condição de final de construção	23
2.2.1	<i>Final de construção.....</i>	<i>24</i>
2.2.2	<i>Evolução das pressões neutras durante a construção de um barramento.....</i>	<i>26</i>
2.2.3	<i>Casos de ruptura em final de construção</i>	<i>28</i>
2.2.3.1	<i>Barragem de açu.....</i>	<i>29</i>
2.2.3.2	<i>Barragem de Fort Peck</i>	<i>32</i>
2.3	Parâmetro B e R_u	33
2.3.1	<i>Valores usuais de e e B</i>	<i>36</i>
3	MATERIAIS E MÉTODO.....	40

3.1	 Materiais	40
3.2	 Método.....	41
3.2.1	 <i>Etapa laboratorial</i>	42
3.2.1.1	<i>Ensaio normalizados</i>	42
3.2.1.2	<i>Triaxial PN</i>	45
3.2.2	 <i>Levantamento de dados e análise dos valores</i>.....	49
4	 RESULTADOS E DISCUSSÕES	50
4.1	 Ensaio laboratorial	50
4.1.1	 <i>Granulometria</i>.....	50
4.1.2	 <i>Limites de atterberg e a classificação do solo</i>	51
4.1.3	 <i>Ensaio de compactação</i>.....	52
4.1.4	 <i>Ensaio triaxial PN</i>	53
4.2	 Comparação dos valores de Ru determinados em laboratório com os obtidos da literatura.....	59
4.3	 Levantamento de dados de projetos	62
4.4	 Avaliação dos valores de Ru adotados em projetos de barragens no estado do Ceará	63
5	 CONSIDERAÇÕES FINAIS	65
5.1	 Conclusão	65
5.2	 Limitações da pesquisa	66
5.3	 Recomendações para trabalhos futuros	66
	 REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo trata sobre os objetivos da pesquisa e o contexto no qual ela se enquadra, atualmente. Para introduzir o assunto da pesquisa, é feita uma rápida revisão sobre as barragens de terra, a análise de sua segurança e a finalidade o parâmetro R_u , a fim de ressaltar a importância que este tem para os projetos de barragens.

1.1 Generalidades

Barragens de terra são obras hídricas destinadas a acumulação da água proveniente da drenagem natural de bacias hidrográficas. Suas finalidades podem ser desde abastecimento de água e irrigação, em virtude dos períodos de estiagem que comprometem o abastecimento das cidades, até produção de energia elétrica e atividades recreativas.

Segundo Cruz (1996), a construção de barramentos em rios é uma prática constante na história da humanidade. Há registros de construções em praticamente todas as civilizações ao longo do tempo. Logo, é muito fácil a associar a evolução da construção de barragens com o desenvolvimento humano. Ainda hoje, especialmente as regiões com base econômica voltada a agricultura, esse tipo de construção é indispensável para o desenvolvimento.

Embora seja uma prática constantemente aperfeiçoada, as obras de barragens – como quaisquer outras obras de engenharia – não são a prova de falhas, portanto, acidentes podem acontecer (PERINI, 2009). Pelo fato delas acumularem grandes massas de água, qualquer falha de projeto, execução ou operação pode resultar em consequências traumáticas, como perdas de vidas e destruição da região atingida. Diante disso, a elaboração de um projeto seguro é o primeiro passo para evitar erros nas demais etapas.

A análise de estabilidade de taludes é uma das últimas, porém não menos importante, fases de Projeto. Nessa análise, a partir de geometrias pré-dimensionadas, é avaliado se a estrutura é segura ou não. Os métodos de análise por equilíbrio limite, que são largamente utilizados e aceitos, tanto no meio acadêmico quanto profissional, expressam a estabilidade por meio de um fator de segurança, do

qual valores acima de 1,0 são considerados estáveis, mas vale ressaltar que a depender da condição e tipo de obra analisada, há valores mínimos a serem levados em consideração.

Diferentemente de outras obras geotécnicas, o estudo de estabilidade de barragens requer a avaliação da obra sob diferentes solicitações, sendo a condição de final de construção um dos estudos empregados. Nele, a estabilidade é avaliada considerando a obra sem ainda ocorrer o enchimento, porém havendo a geração de pressões neutras pelo aumento de cargas que ocorrem durante a execução das camadas de aterro. Segundo Massad (2010), esse fato ocorre, pois, em geral, a barragem leva alguns meses para ser construída, e portanto, não há tempo para as pressões neutras se dissiparem, em razão a baixa permeabilidade do solo compactado.

O parâmetro que estabelece a relação do aumento da pressão neutra conforme o aumento de tensão vertical devido a construção de um aterro é definido como parâmetro \bar{B} de Skempton (1954), que na situação de final de construção é equivalente ao valor de R_u . No entanto o indicador não varia apenas em função da carga, mas também é influenciado pelo tipo dos solos, como mostra o estudo de Cruz (1967). Ele pode ser obtido em laboratório, por meio de ensaios triaxiais PN, e por intermédio da observação de obras semelhantes ou de maciços experimentais com o uso de piezômetros.

1.2 Motivação e problema de pesquisa

Realizou-se um levantamento de dados com 23 projetos de barragens que foram construídas no estado do Ceará, onde foi possível identificar que não é comum a realização de ensaios para obter o parâmetro R_u . Nos projetos consultados foi possível observar que foram adotados valores de R_u entre 0,1 e 0,3, sem o uso de qualquer metodologia. Logo, é observado a ausência de um conhecimento do solo sobre a geração de poropressões nos projetos, que pode resultar em um projeto superdimensionado ou mesmo em uma obra projetada com riscos de instabilidade.

1.3 Justificativa

Embora as barragens tenham um papel importante para a sociedade devido seus aspectos positivos, possuem risco potencial elevado. No Brasil, os casos de ruptura, como o rompimento das barragens de Algodões nos municípios de Cocal e Buriti dos Lopes (PI) e Camará em Alagoa Nova (PB), causam preocupações e a procura de mitigar a ocorrência de novos desastres.

Para realizar um estudo de estabilidade eficaz, é preciso, antes de mais nada, obter os parâmetros geotécnicos do material que será utilizado. Logo, ensaios ou estimativas que determinam os índices do solo e que preverá seu comportamento, devem ser realizados, como os ensaios de caracterização do material, permeabilidade e resistência.

No entanto, a estimativa do parâmetro R_u nos projetos de barragens, ainda é um assunto pouco abordado. Além de não ser comum sua determinação por ensaios laboratoriais, o nível de complexidade é alta e exige um tempo significativo para sua obtenção. Logo, avaliar o parâmetro para diferentes solos de barragens, se justifica tanto para verificar confiança das análises de estabilidade dos projetos já concluídos, quanto para contribuir com a comunidade científica com o estudo desse coeficiente.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo Geral

O objetivo principal da presente pesquisa é a avaliação do parâmetro R_u para solos compactados de barragens de terra, na condição de final de construção, abordando valores de laboratório e projetos.

1.4.2 Objetivos Específicos

O objetivo principal do estudo será alcançado com os seguintes objetivos específicos:

- a) Avaliar o parâmetro R_u em relação ao seu desenvolvimento e valores;

- b) Avaliar os valores de R_u adotados em projetos de barragens no estado do Ceará.

1.5 Estrutura do trabalho

O presente trabalho está dividido em cinco capítulos e uma seção de referências. O primeiro traz a contextualização do tema, a área que aborda e os problemas relacionados a ele. Traz também, os objetivos principal e específicos da pesquisa.

No capítulo 2 é apresentado a revisão bibliográfica que aborda em seus tópicos, as informações e necessárias ao entendimento da pesquisa.

O capítulo 3 discorre sobre os materiais e métodos utilizados para a execução deste trabalho. Nele é apresentado os tipos de amostras de solos, ensaios realizados e a busca por dados de projetos.

No capítulo 4 temos os resultados e discussões obtidos nos ensaios laboratoriais e do levantamento de dados. Já o capítulo 5 traz as conclusões obtidas no trabalho a partir dos resultados obtidos e recomendações para trabalhos futuros. Por fim, temos a seção de referências, que contém todas as bibliografias consultadas para a elaboração deste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solo compactado

2.1.1 Compactação

A compactação de um solo consiste no processo de reduzir o volume de vazios de forma rápida por meio de equipamentos, sejam estes mecânicos, como rolos compactadores, ou manuais, como soquetes (PINTO, 2006). Essa técnica se diferencia do adensamento pois nesta a redução dos vazios se dá pela expulsão de água, geralmente de forma lenta. Já na compactação, ocorre a expulsão do ar entre os grãos do solo pela aplicação de energia mecânica.

Segundo Massad (2003), após a expulsão do ar, ocorre uma melhoria nas propriedades do solo, como aumento da resistência ao cisalhamento e redução da permeabilidade e compressibilidade. Por isso, a técnica é vastamente utilizada em obras civis que utilizam o solo como insumo. Pode-se citar aplicações desde a melhoria do solo de fundações de empreendimentos e implantação de estradas, até em aterros compactados para a construção de barragens de terra e contenções.

2.1.2 Ensaio Proctor Normal

O ensaio que visa determinar os aspectos físicos do solo quando compactado é o ensaio de Proctor, que leva o nome do homem que o padronizou. No Brasil, ele é normatizado pela NBR 7182/2016 – Ensaio de compactação.

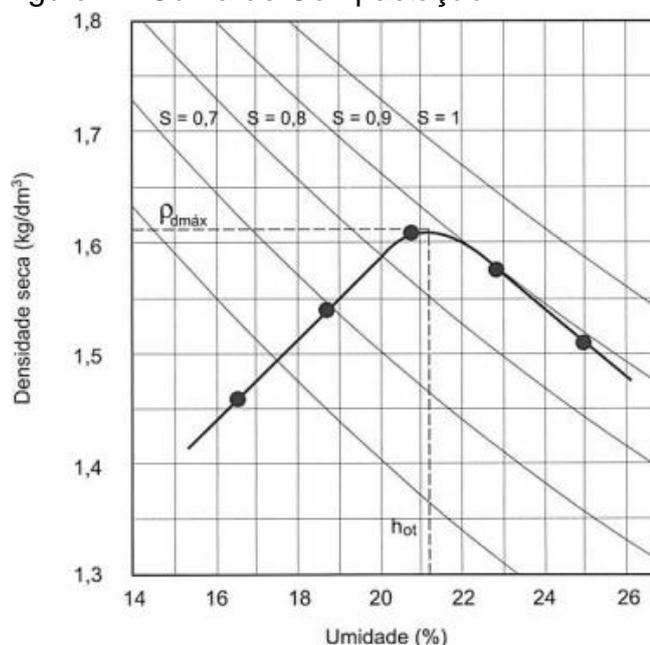
Segundo a norma, o procedimento pode ser feito com ou sem reuso de material, pois em alguns casos o reuso pode afetar as características do solo pela quebra de partículas durante o ensaio. Além disso, pode ser feito de duas formas, pela via seca e pela úmida. Embora seja possível escolher dentre essas variações de metodologia, o processo de execução não difere muito.

A técnica é realizada da seguinte maneira: a amostra deve primeiramente ser destorroada e seca ao ar, em seguida, o material deve estar com a umidade em torno de 5% abaixo da umidade ótima, seja pela via seca ou úmida. É preciso adicionar porções de água até chegar nessa umidade pois o solo é seco até a umidade

higroscópica. Já na via úmida, a amostra é seca até atingir uma umidade 5% abaixo da ótima.

Após a porção de solo estar preparada e homogeneizada para uma certa umidade, o mesmo é colocado em um cilindro de medidas padronizadas de 10 cm de diâmetro e 1.000 cm³ de volume. A compactação dentro do molde é feita em 3 camadas, e cada uma delas deve ser submetida a 26 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de queda de 30,5cm. Em seguida, determina-se o peso específico seco e a umidade do corpo de prova compactado para obter o primeiro ponto da curva de compactação. Os demais pontos são determinados repetindo-se o mesmo procedimento, mas com a adição de água no solo superior a do ponto anterior (maior teor de umidade). Caso o método for feito com reuso de material, utiliza-se a mesma amostra anterior, recompactando com uma umidade superior (acrescentar água). A forma final da curva de compactação, ou também conhecida como curva de proctor, está apresentada na Figura 1. Das curvas resultantes do ensaio retira-se o ponto referente a densidade seca máxima e o teor de umidade ótima para essa densidade.

Figura 1 - Curva de Compactação



Fonte: Pinto (2006)

2.1.3 Energias de compactação

Os valores de densidade máxima seca e umidade ótima não são influenciados apenas pelo tipo de solo que está sendo compactado, mas também pela energia de compactação utilizada, por isso não podem ser considerados como índices físicos. Além da energia do ensaio de Proctor Normal, a NBR 7182/1986 também apresenta outros ensaios com diferentes energias: O Intermediário e o Proctor Modificado. O procedimento desses ensaios é análogo ao Proctor Normal. A Tabela 1 apresenta as características de cada um.

Tabela 1 - Ensaio de compactação

Designação	Peso (N)	Altura de queda (cm)	Número de camadas	Número de golpes	Volume do cilindro (cm ³)	Energia (N.cm/cm ³)
Proctor normal	25	30,5	3	26	1.000	59
Proctor normal	45	45,0	5	12	2.000	60
Intermediário	45	45,0	5	26	2.000	130
Proctor modificado	45	45,0	5	55	2.000	270

Fonte: Massad (2016)

A energia de compactação apresentada na Tabela 1 pode ser determinada pela expressão:

$$E = \frac{M_s \cdot H \cdot N_g \cdot N_c}{V} \quad (01)$$

Onde:

M_s: massa do soquete;

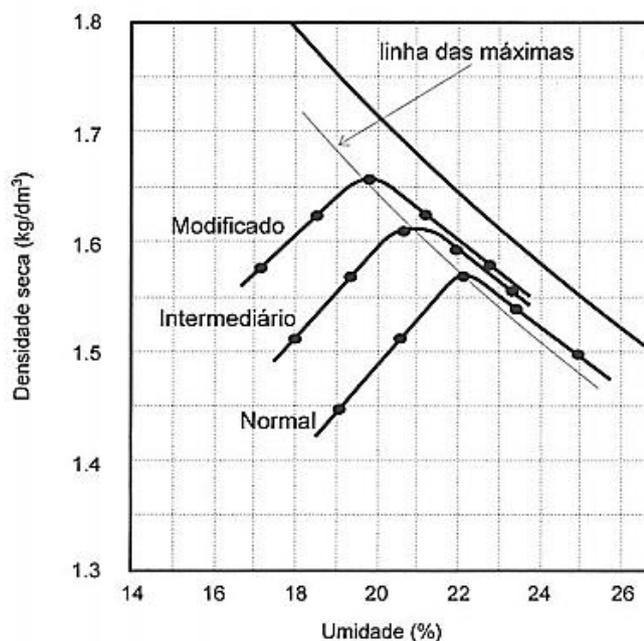
H: altura do soquete;

N_g : número de golpes por camada;

N_c : número de camadas.

O uso de maiores energias, como o Proctor Modificado, é geralmente usado para compactação de camadas mais relevantes, pois o emprego de maior energia de compactação permite melhorias nas propriedades do solo. Segundo Pinto (2006), esse fato se dá, pois, a aplicação de maior energia de compactação provoca uma maior densidade seca máxima e redução da umidade ótima. A Figura 2 apresenta curvas de compactação com diferentes energias para um mesmo solo.

Figura 2 – Curvas de compactação de um solo com diferentes energias



Fonte: Pinto (2006)

Pela Figura 02 e pelo comportamento descrito por Pinto (2006) no parágrafo anterior, é possível concluir que quando o solo é solicitado com maior energia, ele tende a ter um maior peso específico máximo e uma umidade ótima menor. O que faz com que as curvas sejam deslocadas cada vez mais para a esquerda e para cima.

2.1.4 Estrutura do solo compactado

A estrutura do solo compactado depende tanto pela energia de compactação, quanto pela umidade, como é notado pelas curvas da Figura 02, que ao variar a energia e umidade, a densidade também varia. Portanto, o controle do processo de compactação deve ser rigoroso.

O formato da curva de Proctor, mostra a estrutura do solo compactado em função da umidade e densidade. Podemos dividi-la em dois ramos: O seco (trecho crescente) e o úmido (trecho decrescente). No ramo seco, com o aumento de umidade, a densidade do solo varia de maneira ascendente, já no ramo úmido ocorre uma inversão e a densidade tende a decrescer com a adição de água. O encontro desses ramos é marcado por uma inflexão, na qual se dá pelo ponto de máxima densidade aparente. O teor umidade desse ponto é conhecida como umidade ótima (hot), pois nela que o solo apresenta sua máxima eficiência na curva.

Uma das primeiras explicações do comportamento crescente e decrescente da curva de compactação abrange o conceito de lubrificação: na medida que há acréscimo do teor de umidade no ramo seco, as partículas do solo conseguem se aproximar e se acomodar mais diante do efeito lubrificante da água, aumentando a massa específica. Entretanto, com teores de umidade superiores a ótima, a água passa a existir em excesso, fazendo com que as partículas de solo se espalhem, assim provocando uma diminuição do peso específico (MASSAD, 2003).

Essa explicação funciona muito bem nos solos granulares, pois são consideramos como inertes, logo as forças que atuam na estrutura são de origem gravitacional. Mas nos solos argilosos, no qual a estrutura é fortemente influenciada pela interação elétrica entre as partículas de solo e água, a questão se torna mais complexa.

Lambe (1958), explica o comportamento dos solos argilosos compactados pelos fenômenos físico-químicos que ocorrem em suas partículas. Segundo o autor, as argilas contêm água adsorvida em sua composição formando um sistema de cargas negativas em suas partículas, e para manter o equilíbrio elétrico, cátions do meio exterior são atraídos por essas cargas, formando o que se chama de “camada dupla”. As forças de repulsão e atração das partículas são ligadas diretamente pela espessura dessa camada.

Assim, com o aumento da umidade no ramo seco, a camada dupla expande, o que faz as forças atrativas diminuírem e as repulsivas aumentarem, fazendo com que os grãos sejam rearranjados até obter uma máxima densidade. Após a umidade ótima, as forças repulsivas aumentam superando as atrativas, formando uma estrutura mais dispersa e com menor densidade.

2.2 Estabilidade de barragens de terra na condição de final de construção

Das (2007) define a estabilidade de taludes, sejam eles naturais ou artificiais, como a verificação de sua segurança ao comparar a tensão de cisalhamento desenvolvida ao longo da superfície de ruptura com a resistência do solo a esse esforço. A razão entre essas tensões é o fator de segurança (FS), como mostra a equação 02, que avalia o quão longe da ruptura o talude está, sendo o valor unitário o divisor entre um talude estável ($FS > 1$) e o instável ($FS < 1$).

$$FS = \frac{\textit{Tensão resistente}}{\textit{Tensão atuante}} \quad (02)$$

Segundo Pereira (2013) e Pinto (2006), a maioria dos métodos de cálculo de estabilidade, é baseado na teoria do equilíbrio limite. Essa teoria é baseada na hipótese de verificar o equilíbrio da massa de solo que pode deslizar ao longo de uma superfície de ruptura. Logo, para evitar o deslizamento dessa massa, a resistência do material precisa ser superior as tensões solicitantes.

Pereira (2013) ainda apresenta em seu trabalho, os principais métodos de cálculo de estabilidade que utilizam o princípio do equilíbrio-limite, como Fellenius, Bishop, Bishop Simplificado, Janbu Simplificado, Spencer e Morgenstern e Price. Dentre esses, Pereira (2013) analisou os quatro primeiros e comparou seus resultados, concluindo que os de Bishop Simplificado e Janbu Simplificado obtiveram maiores índices de confiança em comparação aos outros.

Em barragens de terra, o estudo da estabilidade deve ser feito para diferentes solicitações. Alguns autores como Gerscovich (2009) e Cruz (1996), dizem que deve ser feito para três diferentes solicitações: Final de construção, regime de

operação e esvaziamento rápido do reservatório. No entanto, a Agência Federal do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (*U.S. Army Corps of Engineers*), acrescentam, em seu manual de estabilidade de taludes, uma nova situação que considera a ocorrência de abalos sísmicos nas regiões adjacentes a barragem. No manual da Eletrobrás (ELETROBRÁS, 2003) também é indicado as seguintes condições de carregamento a utilizar nos estudos de estabilidade global e de avaliação das tensões: Condição de Carregamento Normal (CCN), Condição de Carregamento Excepcional (CCE), Condição de Carregamento Limite (CCL) e Condição de Carregamento de Construção (CCC).

Em razão do estudo de estabilidade ser feito para diferentes situações, cada qual com sua peculiaridade e diferentes esforços solicitantes, o fator de segurança mínimo e faces na qual a análise deve ser feita, varia. Carvalho (1983) define coeficientes de segurança mínimos e faces a analisar para cada um desses casos, que estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Fatores de segurança mínimos e faces a analisar

Condição de análise	Fator de Segurança mínimo	Taludes analisados
Final de Construção	1,4	Montante e jusante
Regime de Operação	1,5	Jusante
Abalo Sísmico	1,0	Jusante
Rebaixamento Rápido	1,1	Montante

Fonte: Carvalho (1983)

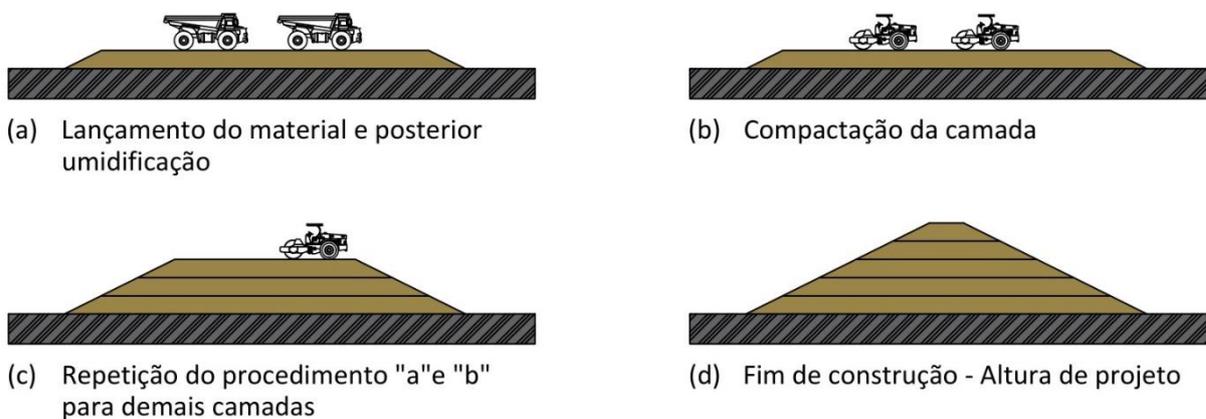
2.2.1 Final de construção

Segundo Cruz (1996), a condição de final de construção é referente ao momento no qual a barragem está concluída, mas sem carga hidráulica do reservatório. Nesta situação, as pressões neutras e as deformações do conjunto barragem-fundação serão influenciadas do estado de tensões e velocidade de construção. Também está incluso nessa situação, o estágio de construção, sendo o final dela a ocasião mais crítica.

Antes mesmo do conhecimento da influência das pressões neutras na fase construtiva de um barramento, piezômetros devem ser instalados no corpo da barragem com o objetivo de definir a linha freática. No entanto, Penman (1982) relata que na década de 30 o Bureau of Reclamation registrou poropressões nos piezômetros, que chegaram a ultrapassar o nível de aterro de uma barragem no final de sua construção, antes do seu enchimento, que os deixou seriamente preocupados (CRUZ, 1996). Essa situação pode ser considerada como um dos primeiros indicativos de observação da poropressão nesta fase construtiva, o que possivelmente culminou com a adoção desse fator para a fase de final de construção das barragens, como determinante para a análise de estabilidade para o maciço.

Hoje, é conhecido que a análise de estabilidade de taludes na situação de final de construção exige certo cuidado em relação a poropressão do maciço. Isso se deve ao fato que durante a construção, com o aumento das cargas de cada camada, pressões neutras são desenvolvidas, o que faz com que ocorra novos estados de tensões e mude sua estabilidade. A Figura 3 ilustra o processo executivo simplificado de uma barragem de terra.

Figura 3 – Processo executivo do maciço de uma barragem



Fonte: Autor

Analisando a Figura 3, é fácil visualizar como é feita a construção de um barramento, que consiste na execução de camadas com espessuras determinadas, na qual cada uma deve ser compactada. Quando a altura de projeto é atingida, chega-se na situação mais crítica, onde ocorreu a máxima variação da tensão, alterando também as pressões neutras, principalmente nos pontos mais baixos do maciço.

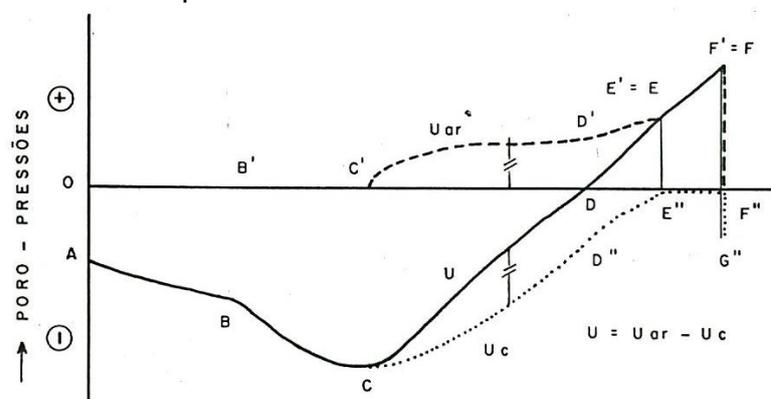
Segundo Massad (2010), a geração de poropressão devido ao aumento de carga vertical ocorre, pois, no geral, as construções de barragens leva alguns meses para ser construída, e com isso não há tempo para as pressões neutras se dissiparem, em função da baixa permeabilidade do solo compactado. Esse fato pode ser conectado com os princípios da teoria do adensamento, já que as poropressões são resultado de uma baixa permeabilidade em uma massa de solo com um baixo índice de vazios.

Com o fim de mitigar a geração dessas pressões durante a construção, algumas especificações antigas limitavam a velocidade de construção. Strange (1898, apud Penman (1982), por exemplo, recomendava que um maciço deveria elevar no máximo 9 metros durante uma estação do ano. No entanto, para os dias atuais, as condições econômicas, a grande quantidade de volume de aterro das obras atuais e a disponibilidade de equipamentos pesados para compactação, inviabilizam quaisquer tentativas de limitar a velocidade de construção (CRUZ, 1996).

2.2.2 Evolução das pressões neutras durante a construção de um barramento

Segundo Pacheco Silva (1972), a evolução das poropressões em uma camada de solo de uma barragem de terra durante sua construção, se dá de acordo com a Figura 4. Na figura, as curvas tracejada, contínua e pontilhada representam respectivamente as pressões no ar, água e as tensões capilares.

Figura 4 - Evolução das poropressões em uma camada de solo compactado

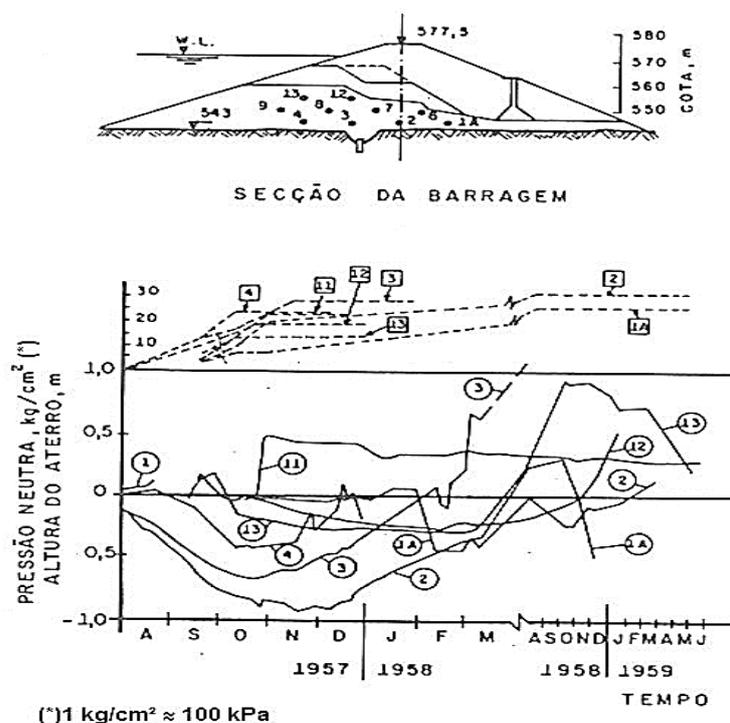


Fonte: Pacheco Silva (1972)

O traçado das curvas é explicado por Pacheco Silva (1972) da seguinte forma: A pressão no ar permanece igual a atmosférica até atingir o ponto C', no qual corresponde ao momento que os poros de ar deixam de ser contínuos. Nesse intervalo, a pressão na água aumenta negativamente de uma tensão capilar u_c no ponto A até uma tensão u_c' máxima no ponto C. A partir do ponto C', parte o ar entra em contato com a água. Com isso, o ar que permanece sob efeito de pressão aumenta gradualmente, como mostra C'D' e a tensão capilar passa a diminuir segundo CD''.

Passa a surgir pressões positivas na água após o ponto D, onde as pressões do ar e tensão capilar possuem valores iguais. Ao atingir o ponto E, o solo apresenta saturação completa, correspondente a tensão capilar nula. O ponto F representa o final do carregamento. Após atingir o final da construção, se não sobrevierem pressões de percolação, a pressão no ar e água evoluem lentamente com o tempo até a pressão do ar ser a atmosférica (F'') e a tensão da água um valor negativo em G''.

Figura 5 – Variação da pressão neutra na barragem de Limoeiro



Fonte: Pacheco Silva (1966)

O surgimento de pressões neutras negativas (pressão menor que a atmosférica) no início da construção das camadas pode ser explicado analogamente com o comportamento de tubos capilares equivalentes. Como a compactação aproxima as partículas, os capilares formados pela pequena distância entre os grãos reduzem de diâmetro, fazendo com que aumente a tensão superficial da água, e com isso elevando a força de sucção. No entanto, após atingir uma determinada tensão máxima, essa força de sucção reduz gradualmente, até atingir pressões positivas.

Na barragem de Limoeiro foram instalados piezômetros para verificar as pressões durante sua fase de construção. O comportamento da variação da pressão neutra apresentou tendências similares ao modelo mostrado anteriormente, como mostra a Figura 5.

2.2.3 Casos de ruptura em final de construção

Qualquer obra de engenharia não é a prova de falhas, logo, acidentes podem acontecer. No caso das barragens de terra, eles acabam tendo grande repercussão, seja pelas perdas de vidas humanas e materiais, ou pela degradação ambiental. Terzaghi tinha a visão de que os acidentes eram essenciais e inevitáveis para o progresso da engenharia, pois para ele, não existiam outros meios detectar os limites e validade dos conceitos e procedimentos estudados (MASSAD, 2010).

Com base nessa filosofia, é possível notar que os casos de ruptura em final de construção muitas vezes eram ligados a evolução das pressões neutras. Casos como a Ilha de Solteira, Açú, Fort Peck, confirmam esse fato. Sandroni (1986) ainda relata em seu trabalho que nenhum barramento, com inclinações comuns, sofre rupturas sem ser causado por excesso de poropressão. Embora essa afirmação ser antiga para os conhecimentos dos dias atuais, sabe-se que essa causa é responsável por muitos dos problemas no universo dessas obras hídricas.

Nas próximas seções serão apresentados casos de rupturas de barragens na condição de final de construção.

2.2.3.1 Barragem de açu

Um caso brasileiro que vale a pena abordar detalhadamente é a Barragem engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves, também conhecida como barragem do Açú. Ela é uma barragem de terra localizada no estado do Rio Grande do Norte, no município de Açú e foi construída no leito do rio Piranhas-Açú com o objetivo de suprir as demandas do projeto de irrigação do baixo Açú. Sua construção teve início no mês de maio de 1979 e término previsto para fevereiro de 1982. No entanto, na fase de final de construção, o seu talude de montante sofreu uma ruptura em dezembro de 1981.

Segundo os trabalhos de Rocha (2003), Vilhete (2017) e Souza (2017), os materiais utilizados na construção da barragem e dos aterros foram solos aluvionares retirados da mesma região da construção, em 4 diferentes jazidas. Esses materiais foram divididos em dois grupos, o grupo I com três subdivisões, e o II com duas subdivisões que estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - Materiais utilizados na construção da barragem

Grupo	Subdivisão	Tipo
Grupo I	IA	Areia siltosa, de granulação variada, avermelhada com pedregulhos finos (SC)
Grupo I	IB	Pedregulho com areia de granulação variada, argiloso, avermelhada (GC)
Grupo I	IC	Pedregulho arenoso siltoso e areia, avermelhada, de granulação variada, siltosa, com pedregulhos (GM/SM)
Grupo II	IIA	Siltes argilo arenosos e argilas silto arenosas de coloração escura (ML/CL/MH/CH)
Grupo II	IIB	Areia de granulação variada com pedregulhos finos de coloração clara

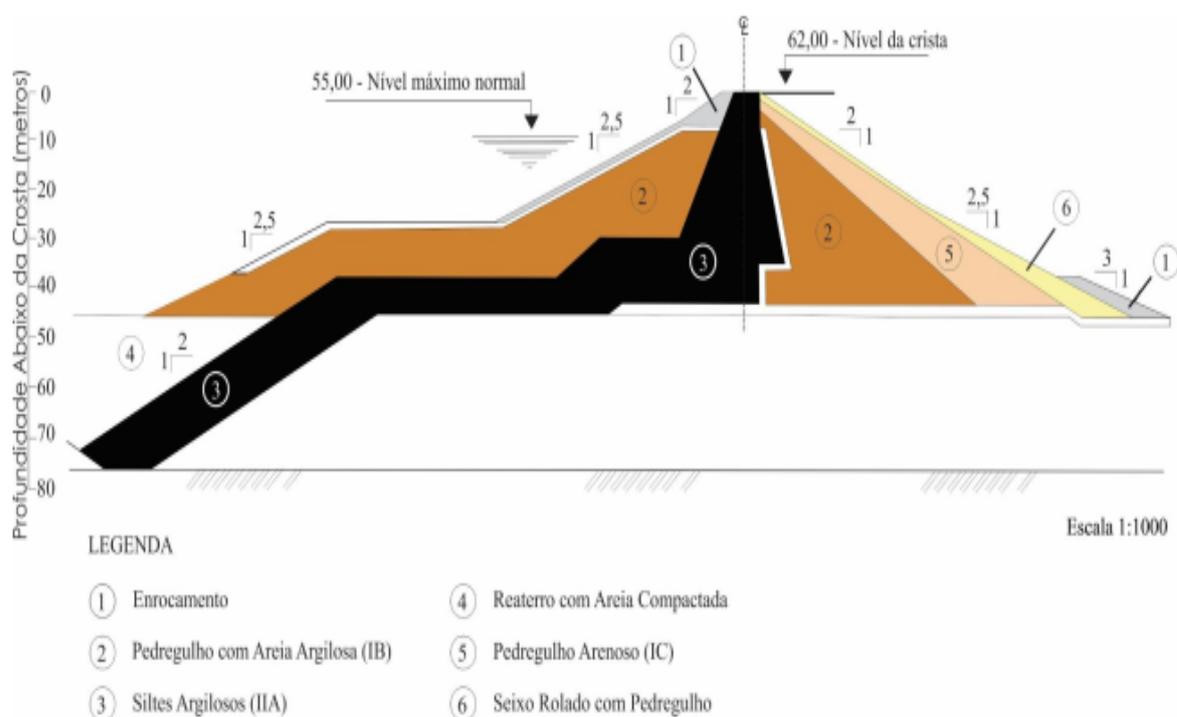
Fonte: Rocha (2003), Vilhete (2017) e Souza (2017),

Logo de início, para otimizar o uso dos materiais disponíveis nas jazidas próximas, optou-se por mais de uma seção tipo, uma para a barragem central e outra para a ombreira direita. Porém, após o início da construção da barragem, foi sugerido,

a mudança da seção tipo da barragem central, pelo consultor da obra, que foi acatada. No entanto, durante o processo construtivo, a seção central foi sofrendo alguns ajustes na sua geometria. A Figura 6, apresenta a seção tipo central construída e a composição do maciço.

Ainda segundo os trabalhos de Rocha (2003), Vilhete (2017) e Souza (2017), em dezembro de 1981, quando a altura da barragem estava a cinco metros de alcançar a dimensão de projeto, houve o deslizamento do talude de montante do barramento. A ruptura teve início com o surgimento de uma pequena fissura não contínua na crista que continuou aumentando para uma trinca contínua de cerca de 600 metros de comprimento. A ruptura do talude foi acompanhada pela movimentação de sua berma e mobilizando mais de 1,5 milhões de m³ de material. Penman (1985) relata que tudo ocorreu rapidamente, com duração aproximada de 30 minutos, tendo uma queda na altura de 15 metros, além de deslocar 25 metros horizontalmente. A Figura 7 mostra a barragem após a ruptura.

Figura 6 – Seção tipo central da barragem de Açú



Fonte: Rocha (2003)

Figura 7 – Vista da ruptura da Barragem do Açú



Fonte: Rocha (2003) modificado pelo autor

A causa da ruptura foi relacionada principalmente ao excesso de poropressão gerada no material do grupo IIA, a argila siltosa de coloração escura, que faz parte do núcleo e da zona inferior da berma do barramento. Vilhete (2017) fala que diversos fatores influenciaram para causar o excesso de pressão neutra que levou a falha da estabilidade do talude de montante. Fatores como o controle insuficiente do teor de umidade de compactação do material, e a velocidade de construção, sem considerar o tempo de dissipação do excesso de poropressão - segundo Penman (1985), a construção da berma, por exemplo, levou pouco mais de um mês a fim de antecipar a estação chuvosa - causaram esse excesso de pressão não dissipada.

Além disso, Mello (1982) e Rocha (2003) também mencionam a insuficiência de investigação geotécnica como outro fator que conduziu a um projeto que não representou fielmente a barragem. A argila siltosa preta do grupo IIA, que foi o material que desenvolveu o excesso de poropressão, teve seus parâmetros muitas vezes estimados pela experiência obtida com solos similares ensaiados no passado.

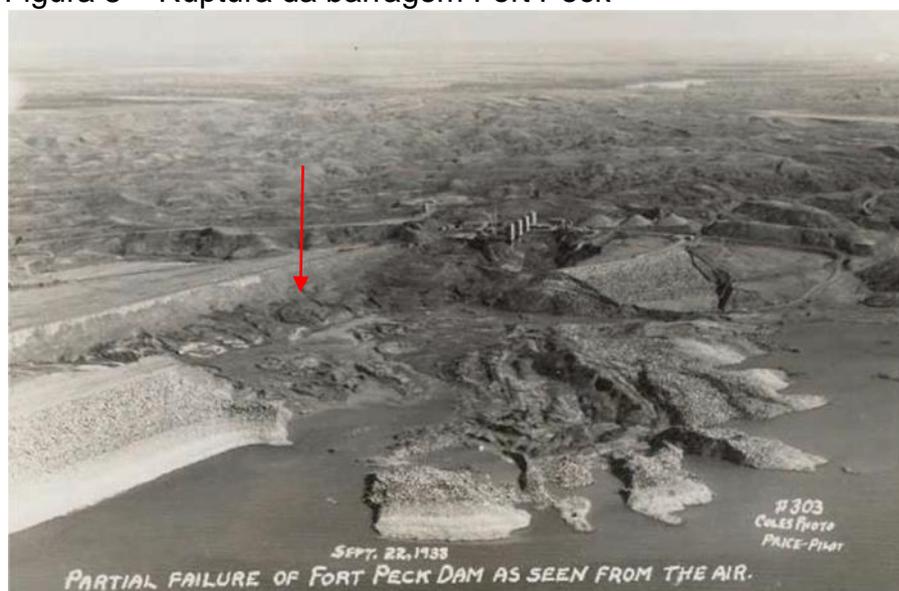
Com isso, é possível concluir que o excesso de pressão neutra foi provocado por uma série de erros que resultaram no deslizamento do talude de montante. Vilhete (2017) fala que se as equipes envolvidas no projeto e construção tivessem realizado a caracterização completa das propriedades da argila siltosa preta do grupo IIA, certamente o acidente teria sido evitado.

2.2.3.2 Barragem de Fort Peck

Outro caso de ruptura na fase de final de construção, no qual a causa foi o excesso de poropressão, é a da Barragem Fort Peck, na cidade de Montana nos Estados Unidos. A obra tinha 6,4 km de comprimento, 70 metros de altura e 100.000.000 m³ de material com inclinações de 1:5. A fundação do barramento era uma camada espessa de cerca de 40 metros de aluvião predominantemente arenoso. Segundo Souza (2017), o deslizamento ocorreu em 1938 no talude de montante e mobilizou aproximadamente 6,5 milhões de metros cúbicos de solo. De todo o comprimento da barragem, 450 metros foram deslocados e abateram as inclinações de todo talude de montante para ordem de 1:20 a 1:30.

A ruptura foi associada a liquefação das areias, pois devido as areias fofas saturadas terem sido submetidas a redução de volume, impossibilitou a dissipação de excesso de poropressão. O que refletiu na perda de tensão efetiva e consequente liquefação do material (MELLO, 1966). A Figura 8 apresenta uma imagem aérea da barragem após o rompimento.

Figura 8 – Ruptura da barragem Fort Peck



Fonte: Redlinger et al (2018) modificado pelo autor

De acordo com Redlinger et al (2018), no momento do acidente haviam cento e oitenta homens trabalhando na área, destes, oito morreram e trinta e quatro saíram feridos. Embora o deslizamento tenha acarretado perda de vidas e prejuízo

material, o fracasso trouxe lições importantes para futuros projetos da *U.S. Army Corps of Engineers*. O caso enfatizou muitas questões relacionadas ao estudo de estabilidade de taludes em barragens de terra, por exemplo, a avaliação de estabilidade de fim de construção do talude e fundação, e o projeto de futuros barramentos passou a considerar a construção em estágios, para permitir o adensamento e drenagem.

2.3 Parâmetro \bar{B} e R_u

Durante o processo executivo de uma barragem, as camadas de solos são adicionadas uma sobre a outra até completar a geometria do maciço, e a partir disso, há acréscimo de cargas e geração de pressões neutras (MASSAD, 2010). Essa poropressão presente no aterro, assim como o aumento do carregamento, faz com que ocorra novos estados de tensões na estrutura, mudando assim sua estabilidade.

O parâmetro \bar{B} difundido por Skempton (1954), estabelece a relação entre esse aumento da pressão neutra e o acréscimo de tensão vertical. Além disso, traz em seu estudo os limites de B , que variam de 0 à 1, nos quais os extremos inferior e superior apresentam graus de saturação de 0% e 100% respectivamente, indicando a forte influência desse fator. O coeficiente pode ser expresso pela equação 03.

$$\bar{B} = \frac{\Delta u}{\Delta \sigma_1} \quad (03)$$

Onde:

Δu : variação de pressão neutra,

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

Segundo Bishop (1954), esse parâmetro pode ser utilizado para problemas que envolvem a análise de estabilidade de taludes em barragens de terra durante a fase de construção e nos casos de esvaziamento rápido do reservatório. No entanto, sua influência é maior durante a construção dos barramentos.

Esse parâmetro pode ser obtido em laboratório, pois com base na sua relação, é possível estimar as condições de pressão neutra durante a fase construtiva de uma barragem de terra com o acréscimo de carga. A determinação se dá por

ensaios especiais em específicas condições que simulam o alteamento das camadas de aterro e a drenagem em campo, os ensaios triaxiais PN (POZZEBON, 2017; CRUZ, 1973).

Além disso, o parâmetro \bar{B} também pode ser obtido por meio da observação de obras semelhantes ou de maciços experimentais nos quais a variação da pressão neutra com a carga solicitada fora verificada com o uso de piezômetros (MASSAD, 2010). Vale ressaltar que a obtenção por meio da observação deve ser feita para aterros com o mesmo tipo de solo, em virtude à alta variabilidade do parâmetro.

Vilhete (2017) diz que em barragens de terra, o parâmetro \bar{B} é usado na estimativa das pressões neutras geradas com o incremento das tensões verticais com a elevação dos aterros. Já nas análises de estabilidade de taludes, é mais adequado utilizar o parâmetro R_u , introduzido por Bishop & Morgenstern (1960). Diferentemente do coeficiente de Skempton, R_u retrata a poropressão em um ponto qualquer pela equação definida por:

$$R_u = \frac{u}{\gamma h} \quad (04)$$

Onde:

u: Pressão neutra,

γ : Peso específico do solo,

h: Profundidade do ponto na camada de solo.

Segundo Cruz (1996), nas literaturas em português brasileiro sobre este tema, esses dois coeficientes têm sido confundidos entre si. No entanto, isso não produz dano algum quanto a segurança e confiabilidade dos dados das bibliografias, pois no final de construção ou logo após execução de camadas de aterro, eles são equivalentes (Bishop & Morgenstern, 1960; Massad, 2010). A explicação dessa semelhança é explicada da seguinte maneira por Bishop & Morgenstern (1960):

A pressão neutra em um ponto qualquer em uma camada de solo é calculada pela expressão abaixo, onde u_o é o valor de pressão inicial e Δu é a variação da poropressão com as mudanças de tensões devido à elevação do aterro.

$$u = u_o + \Delta u \quad (05)$$

A variação da pressão neutra pela variação das tensões pode ser determinada pela equação abaixo de acordo com Skempton (1954). Na qual A e B são parâmetros de poropressão; $\Delta\sigma_1$ e $\Delta\sigma_3$ são variações das tensões principal maior e menor, respectivamente.

$$\Delta u = B\{\Delta\sigma_3 + A(\Delta\sigma_1 - \Delta\sigma_3)\} \quad (06)$$

Com a manipulação da fórmula acima ao fazer a divisão com $\Delta\sigma_1$ e relacionar com a equação 04, temos:

$$\frac{\Delta u}{\Delta\sigma_1} = \bar{B} = B \left[\frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} + A \left(1 - \frac{\Delta\sigma_3}{\Delta\sigma_1} \right) \right] \quad (07)$$

$$(08)$$

$$R_u = \frac{u_o}{\gamma h} + \frac{\bar{B}}{\gamma h} \cdot \Delta\sigma_1$$

É razoável admitir que $\Delta\sigma_1$ é igual ao peso do solo acima do ponto de consideração, logo, a equação 08 fica:

$$R_u = \frac{u_o}{\gamma h} + \bar{B} \quad (09)$$

Nos aterros com umidade ótima, ou próximas a ela, a poropressão inicial é geralmente baixa, permitindo ter seu impacto ignorado. Portanto, nos casos de final de construção os parâmetros R_u e \bar{B} podem ser considerados equivalentes.

$$R_u = \bar{B} \quad (10)$$

2.3.1 Valores usuais de \bar{B}

Cruz (1996) apresentou um estudo que analisava a variação do parâmetro R_u para diversos tipos de solo. A obtenção desses dados se deu a partir de ensaios triaxiais para 4 grupos de solo, nos quais seguem as mesmas classificações de Maiolino (1985) e Cruz e Maiolino (1983 e 1985) em seus estudos. A definição do material que compõe cada grupo está disposta na Tabela 4. A partir disso, é visto que os solos estudados são típicos de barragens de terra, por possuírem frações de finos mais elevadas que os de materiais granulares.

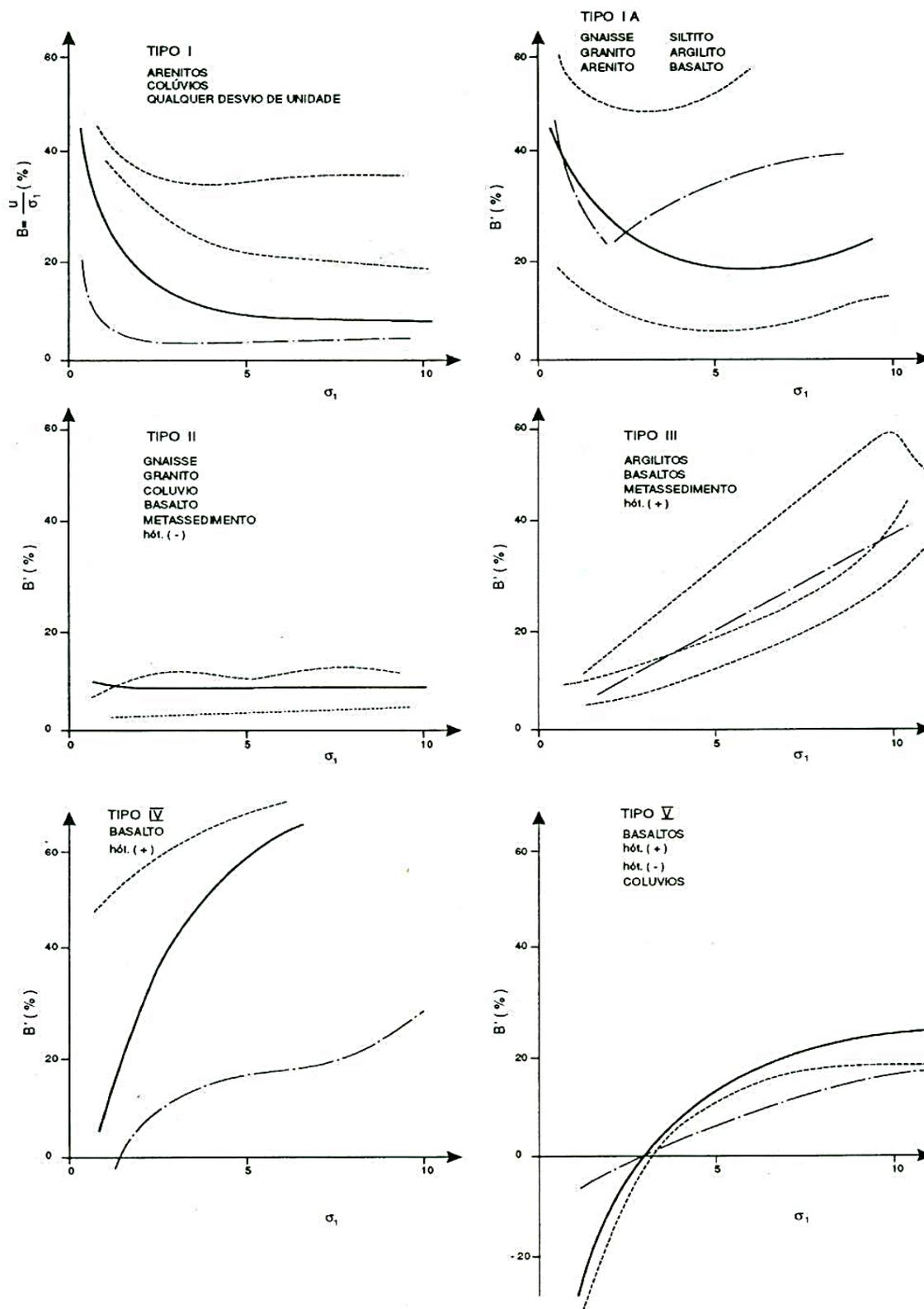
A partir dos ensaios realizados, Cruz (1996), determinou curvas típicas que continham a variação do parâmetro \bar{B} com a tensão principal máxima (σ_1) e desvio da umidade em relação a ótima, que são mostrados nas Figuras 9 e 10 respectivamente.

Tabela 4 - Grupo de solos

Grupo	Tipo de material
Grupo I	Solos lateríticos argilosos, também denominados solos residuais maduros e/ou colúvios. Correspondem à primeira camada do perfil de intemperismo, são porosos, homogêneos, possuem baixa densidade natural, baixo grau de saturação e umidade natural próxima à do ensaio ótimo de Proctor. São solos argilosos, e que podem ter sido muito ou pouco transportados.
Grupo II	Solos saprolíticos (às vezes chamados solos residuais jovens), que sofreram pouca ou nenhuma ação do processo de laterização. Correspondem à segunda camada do perfil de intemperismo. São compactos, frequentemente heterogêneos, mais siltosos em algumas formações, e possuem alta umidade natural.
Grupo III	Solos lateríticos arenosos, as vezes identificados como colúvios. São solos mais transportados que os do Grupo I, e é comum encontra-los misturados a outros solos. Na sua condição natural, são homogeneamente porosos, com baixa densidade, e possuem umidade próxima à ótima de Proctor.
Grupo IV	Solos transportados, em algumas áreas identificados como solos colúviais, originários de sedimentos. Dependendo de sua origem, podem ser mais ou menos argilosos, siltosos ou arenosos, e muito ou pouco afetados pelos processos de laterização.

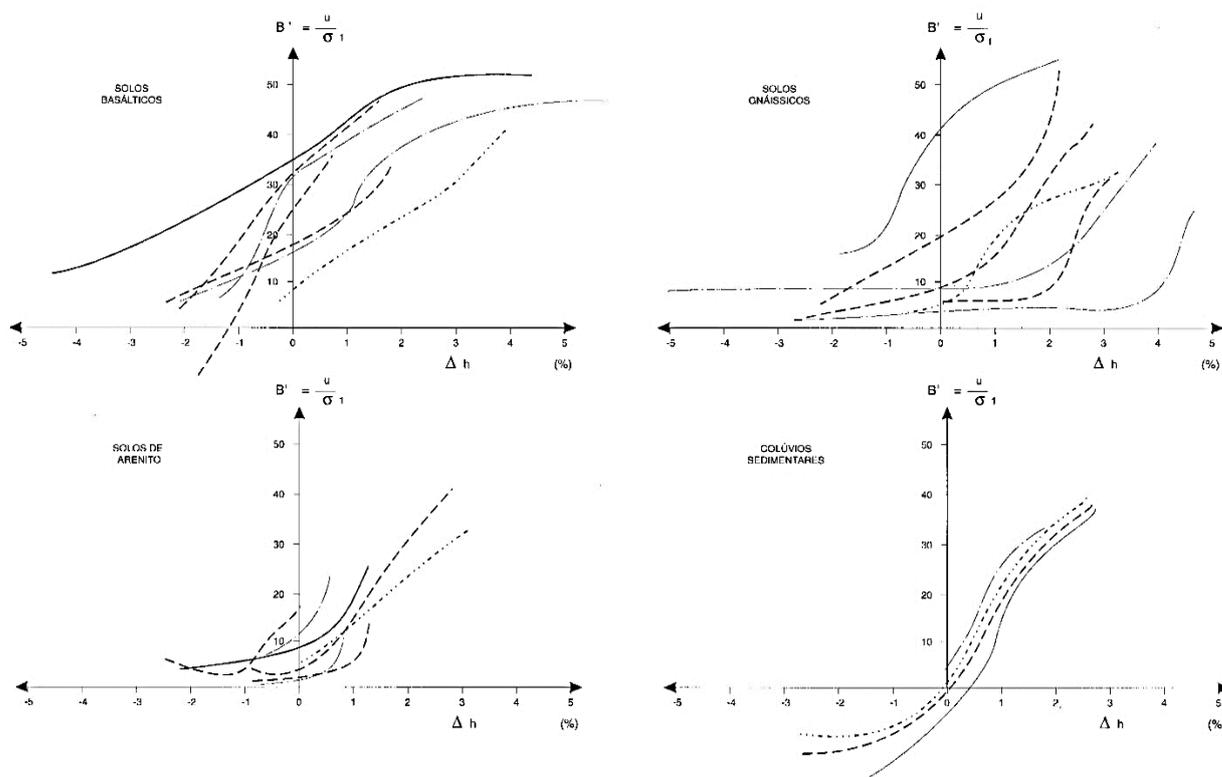
Fonte: Cruz (1996) modificado pelo autor

Figura 9 - Curvas típicas da variação do parâmetro \bar{B} com a tensão principal máxima



Fonte: Cruz (1996)

Figura 10 - Curvas típicas da variação do parâmetro \bar{B} com o desvio de umidade em relação a ótima



Fonte: Cruz (1996)

Das Figura 9 e 10, é possível notar que os valores de \bar{B} podem variar bastante de um solo para outro. No entanto, eles apresentam comportamentos e valores semelhantes para os de mesma litologia. Pozzebon (2017), em seu estudo acerca do parâmetro, também observou dos seus resultados de ensaios, que o parâmetro \bar{B} também apresentou variações de acordo com a litologia.

Solos do tipo I, III e IV podem desenvolver elevados valores de \bar{B} , na ordem de 50 a 60%. Enquanto os de II e V desenvolvem menores valores, como 10 e 20%. Observando o desenvolvimento do parâmetro partir da litologia, como mostrado na Figura 10, é possível fazer as seguintes considerações:

- a) Nos solos de gnaiss, para desvios de umidade em relação a ótima entre -5% a 0%, os valores de \bar{B} são da ordem de 0% a 10%. Já para desvios superiores a 1%, \bar{B} pode atingir até 50%;
- b) Nos solos basálticos a variação do parâmetro é alta. Abaixo da umidade ótima (entre -2% a 0%) o valor de \bar{B} eleva rapidamente da ordem de 10%

a 30%, enquanto para desvios positivos, maiores que 2%, pode elevar até 50%;

c) Nos solos de arenito os valores de \bar{B} são menores que os de gnaisse e basálticos, em torno de 10%. Apenas a partir de 1% da umidade acima da ótima que o valor tende a subir levemente para valores de até 20% em média;

d) Nos solos de colúvios sedimentares, \bar{B} é negativo quando a umidade está abaixo da ótima, no entanto, após o desvio de umidade em relação a ótima for positiva, o valor pode elevar rapidamente até aproximadamente 40% para desvios de umidade de 0% a 3%.

Além disso, dados coletados de dezoito barragens e do parâmetro R_u , por Silveira (1983), resultou na Tabela 5, com o coeficiente estudado em função do tipo de solo.

Tabela 5 - Parâmetro R_u em função do tipo de solo

Tipo de solo	LL%	LP%	GC (médio)%	Δh (médio) %	R_u % (B)
Coluvionar de arenito	27	12	99 ± 2,1	-0,6 ± 0,4	15
	23	15	100,2 ± 2,1	-0,8 ± 0,5	4
Coluvionar de arenito e basalto	31	14	100,7 ± 3,0	-1,4 ± 0,5	5-6
Coluvionar de basalto	43	13	-	-	1
	30 a 58	13 a 22	101,8 ± 1,0	-0,7 ± 1,0	2-6
Residual de arenito	20	2	102,3	-1,1	7
Residual de basalto	54	22	102	0,0	0-28
	58	27	-	-	2-3
	67	21	96 a 98	+0,4	12
Residual de gnaisse argiloso	72	38	100 ± 2	-0,13 ± 0,8	14-26
	55	26			1-16
	65-73	30-35	99	-0,9 ± 0,7	2-10
	53-87	23-42	99,2	-0,5 ± 1,1	2-8
Siltoso	44-51	NP-23	99	-1,1 ± 0,7	1-2
	34-48	NP-19	98,7	-1,0 ± 0,8	1-2
Residual de micaxisto	26-72	5 a 30	101,5 ± 2,0	-0,4 ± 0,5	3-17
Saprolito de basalto	56-64	20	96 a 102	+0,9 ± 2,6	8

Fonte: Silveira (1983) modificado pelo autor

3 MATERIAIS E MÉTODO

Esta seção apresentará os materiais que foram utilizados para realizar as análises desta pesquisa, como também os procedimentos metodológicos para a execução do estudo.

3.1 Materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram amostras de solos que o Laboratório de Mecânica dos Solos do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental (DEHA) da Universidade Federal do Ceará disponibilizou. Na escolha dos materiais buscou-se não só características de solos que são utilizados em barragens, como argilosos e siltosos, como também uma amostra mais granular para efeito de comparação. No total foram utilizadas 5 amostras e ressalta-se que algumas delas foram utilizadas para construção de barramentos reais.

As amostras disponibilizadas pelo laboratório foram coletadas nos municípios de Santa Quitéria no Estado do Ceará, e em Barcarena no Pará. De todas as amostras, apenas a amostra dois não teve sua origem informada. A Tabela 6 apresenta a localidade e coordenadas da origem do material. Já a Figura 11 mostra uma localização visual dos locais de coleta, dos quais é observado que a amostra 1 são da região noroeste do Ceará, enquanto as de 3 a 5 são do nordeste do Pará.

Tabela 6 - Localidades das amostras de solo

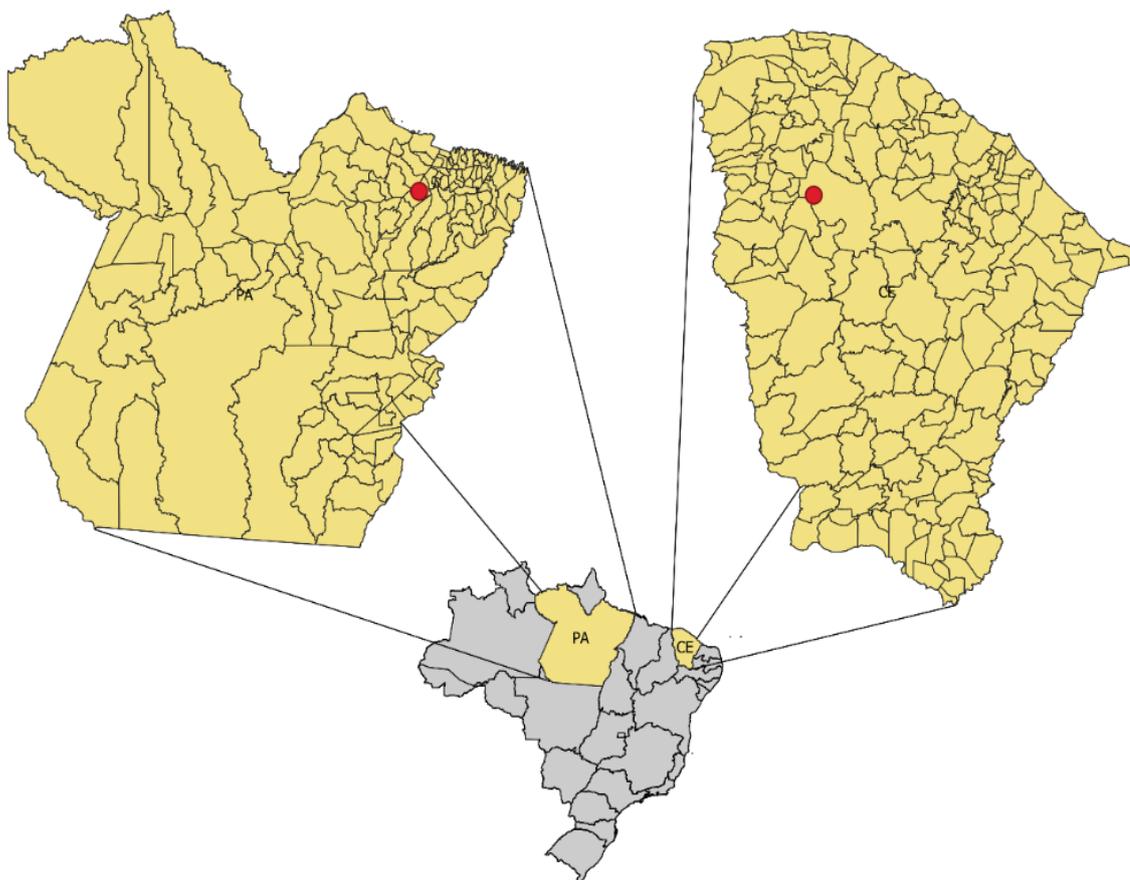
Amostra	Município	Coordenadas (UTM)
Amostra 1	Santa Quitéria - CE	355500.00 E, 9531000.00 S
Amostra 2	Não informado	Não informado
Amostra 3	Barcarena – PA	750074.82 E, 9826136.35 S
Amostra 4	Barcarena – PA	749906.63 E, 9825900.64 S
Amostra 5	Barcarena – PA	749832.02 E, 9825882.58 S

Fonte: Autor

A partir das coordenadas dos locais de coleta, foi possível estimar a litologia das amostras com base nos mapas geológicos do Estado do Ceará e Pará consultados no Serviço Geológico do Brasil (CPRM). A amostra 1 se encontra em uma

região onde há afloramento de Granito e Gnaiss, mas como o material apresenta uma configuração argilosa, foi considerado no trabalho que é oriunda de Gnaiss. Já as 3, 4 e 5 foram coletadas em locais onde há concentração de sedimentos argilosos.

Figura 11-Localidades das amostras de solo



Fonte: Autor

3.2 Método

Para a realização deste estudo, foi empregado uma metodologia qualitativa por meio de ensaios laboratoriais e levantamento de dados para avaliar os valores do parâmetro R_u utilizados em projetos de barragens. As etapas metodológicas realizadas para o desenvolvimento desta pesquisa estão descritas nas seções subsequentes.

3.2.1 *Etapa laboratorial*

A primeira etapa metodológica realizada consistiu na caracterização das amostras dos solos e determinação do parâmetro R_u em laboratório. Nos materiais foram realizados os seguintes ensaios.

- Granulometria;
- Limite de Liquidez (LL);
- Limite de Plasticidade (LP);
- Compactação;
- Triaxial PN.

3.2.1.1 *Ensaio normalizados*

Dos ensaios realizados, o de granulometria, LL, LP e compactação são procedimentos normalizados, portanto seguiram a metodologia padrão a que são regulamentados. A Tabela 7 apresenta a relação desses ensaios e suas respectivas normas.

Tabela 7 - Ensaio normalizados

Ensaio	Normas
Granulometria	NBR 7181/2016 - Análise Granulométrica
Limite de Liquidez	NBR 6459/2016 - Determinação do Limite de Liquidez
Limite de Plasticidade	NBR 7180/2016 - Determinação do Limite de Plasticidade
Compactação	NBR 7182/2016 - Ensaio de Compactação

Fonte: Autor

a) Granulometria

O ensaio de análise granulométrica teve como objetivo, determinar a distribuição das partículas constituintes do material em classes de tamanho por meio do peneiramento com o fim de avaliar a proporção das frações do solo de argila, silte, areias e pedregulho. A Figura 12 mostra as peneiras utilizadas e a distribuição granulométrica de uma das amostras.

Figura 12 – Granulometria



Fonte: Autor

b) Limites de Atterberg

Os ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade, também conhecidos como Limites de Atterberg, tiveram como objetivo determinar os valores de umidade, dos quais o solo passa do estado líquido para o estado plástico (LL) e do estado plástico para o estado semi-sólido (LP). As Figuras 13 e 14 apresentam fotografias dos ensaios LL e LP, respectivamente, realizados em uma das amostras.

Figura 13- Ensaio de Limite de Liquidez



(a) Equipamento de casagrande

(b) Massa de solo após ensaio

Fonte: Autor

Figura 14 - Ensaio de Limite de Plasticidade



Fonte: Autor

c) Compactação

O ensaio de compactação teve o objetivo de determinar o teor de umidade ótima e a massa específica seca máxima ($\rho_{d,max}$), com o fim de simular o estado do solo após a compactação dos maciços das barragens. A Figura 15 mostra fotografias do ensaio realizado.

Figura 15 – Compactação



(a) Compactação

(b) Solo compactado no cilindro

Fonte: Autor

3.2.1.2 Triaxial PN

Para determinar o parâmetro R_u foram realizados ensaios triaxiais PN. O teste seguiu os procedimentos sugeridos por Head (1998) no livro *Manual of soil Laboratory Testing* que será discutido neste subtópico.

Segundo a metodologia de Head (1998), antes de iniciar o teste em questão, é preciso determinar os parâmetros de resistência do solo por meio de um triaxial adensado e drenado, "CID", onde é permitido a drenagem, de acordo com a norma ASMT D7181. No entanto, para dar celeridade na execução dos ensaios, esta pesquisa utilizou os parâmetros de coesão e ângulo de atrito estimados a partir de uma tabela que contém parâmetros geotécnicos definidos de 1500 ensaios realizados pelo *U.S Bureau of Reclamation*, no trabalho de Carvalho (1983). A Tabela 8 apresenta os coeficientes em função da classificação do solo.

Tabela 8 - Parâmetros de resistência de solos

Classificação do solo	Compactação - Proctor		Resistência ao cisalhamento		
	γ_g	h (%)	C' (KPa)	C' sat(KPa)	ϕ (°)
GW	>19,0	<13,3	(x)	(x)	>38,3
GP	>17,6	<12,4	(x)	(x)	>36,5
GM	>18,2	<14,5	(x)	(x)	>33,8
GC	>18,4	<14,7	(x)	(x)	>31,0
SW	19,0 ± 0,8	13,3 ± 2,5	40 ± 4,0	(x)	38,6 ± 1,2
SP	17,6 ± 0,3	12,4 ± 1,0	23 ± 6,0	(x)	36,5 ± 1,2
SM	18,2 ± 0,2	14,5 ± 0,4	52 ± 6,0	20 ± 7,0	33,8 ± 1,2
SM-SC	19,0 ± 0,2	12,8 ± 0,5	51 ± 2,0	14 ± 6,0	33,4 ± 4,0
SC	18,4 ± 0,2	14,7 ± 0,4	76 ± 2,0	11 ± 6,0	31,0 ± 4,0
ML	16,5 ± 0,2	19,2 ± 0,7	68 ± 1,0	09 ± (x)	31,8 ± 2,3
ML-CL	17,4 ± 0,3	16,8 ± 0,7	64 ± 2,0	22 ± (x)	31,8 ± 3,4
CL	17,3 ± 0,2	17,3 ± 0,3	88 ± 1,0	13 ± 2,0	28,4 ± 2,3
OL	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)
MH	13,1 ± 0,6	36,3 ± 3,2	36,3 ± 3,2	20 ± 9,0	25,2 ± 2,9
CH	15,0 ± 0,3	25,5 ± 1,2	25,5 ± 1,2	11 ± 6,0	19,3 ± 5,1
OH	(x)	(x)	(x)	(x)	(x)

Fonte: Carvalho (1983)

Essa etapa inicial busca determinar a envoltória de ruptura do material estudado. Após isso, essa envoltória tem seus parâmetros de resistência minorados por meio da adoção de um fator de segurança, que neste caso, o valor de 1,5 foi adotado.

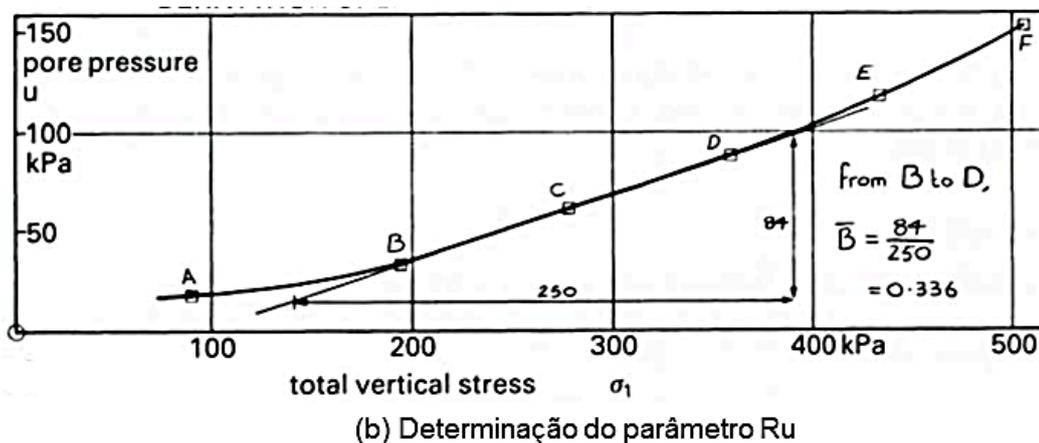
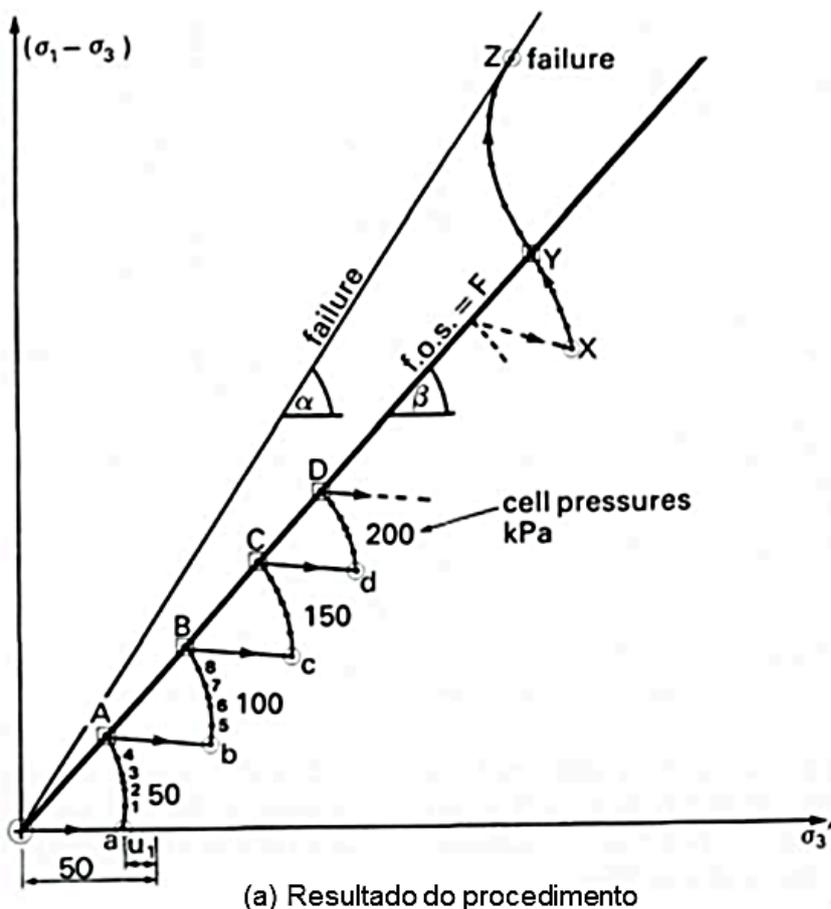
Após o procedimento preliminar de obter os parâmetros de resistência do solo, o ensaio teve prosseguimento com as seguintes etapas realizadas sem drenagem de água:

- a) Moldagem do corpo de prova (CP) na umidade desejada;
- b) Montagem CP na câmara triaxial;
- c) Preenchimento da célula triaxial com água, evitando a formação de bolhas na câmara;
- d) Encaixe do pistão no topo do corpo de prova e fechamento das saídas de ar da célula;
- e) Zerar os valores mostrados no anel dinamométrico;
- f) Aplicação de uma pressão confinante inicial na célula triaxial, no qual para este trabalho se iniciou com uma carga de 50 kPa, no primeiro estágio;
- g) Realização da leitura do anel dinamométrico, medidor de tensão desviadora, variação do volume e indicador de poropressão;
- h) Plotagem do primeiro ponto de tensão σ_3' no eixo horizontal na envoltória de ruptura com fator de segurança previamente determinado, onde $\sigma_3' = (\sigma_3 - u_1)$;
- i) Compressão do corpo de prova com a aplicação de tensão desviadora contínua, realizando as leituras do anel dinamométrico, medidor de tensão desviadora, e indicador de poropressão;
- j) Plotagem dos valores de tensão confinante e desviadora medidos, até a interceptação da envoltória de ruptura previamente definida;
- k) Repetição do processo dos passos (f) ao (j) incrementando novas tensões confinantes.

No final desse procedimento, para determinar os valores do parâmetro R_u , é preciso plotar um gráfico com a poropressão no eixo das ordenadas e a tensão σ_1

no eixo das abscissas. Os pontos utilizados são os que interceptaram a envoltória de ruptura. O coeficiente é determinado calculando a inclinação da reta que tangencia esses pontos. A Figura 16 apresenta um exemplo de gráfico resultante do procedimento descrito e como se se dá a obtenção de R_u .

Figura 16 – Gráficos do ensaio



Fonte: Head (1998) adaptado pelo autor

A Figura 17 apresenta uma fotografia da realização do ensaio realizado para esta pesquisa.

Figura 17 - Ensaio realizado



(a) Moldagem do corpo de prova



(b) Montagem da amostra na célula triaxial



(c) Equipamento montado para adição de carga e leituras

Fonte: Autor

3.2.2 Levantamento de dados e análise dos valores

Nesta pesquisa foi realizado um levantamento de dados com 23 barragens de terra construídas no Estado do Ceará. Os relatórios e projetos das obras foram solicitados a Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e pesquisados na biblioteca virtual da Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH).

As informações buscadas nos documentos foram os valores de R_u admitidos, a metodologia utilizada para determinar o coeficiente e a altura da barragem. Essa etapa teve como objetivo verificar os valores que geralmente são empregados nas análises de estabilidade dos projetos e compará-los com os encontrados em literatura e nos testes laboratoriais executados nesta pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

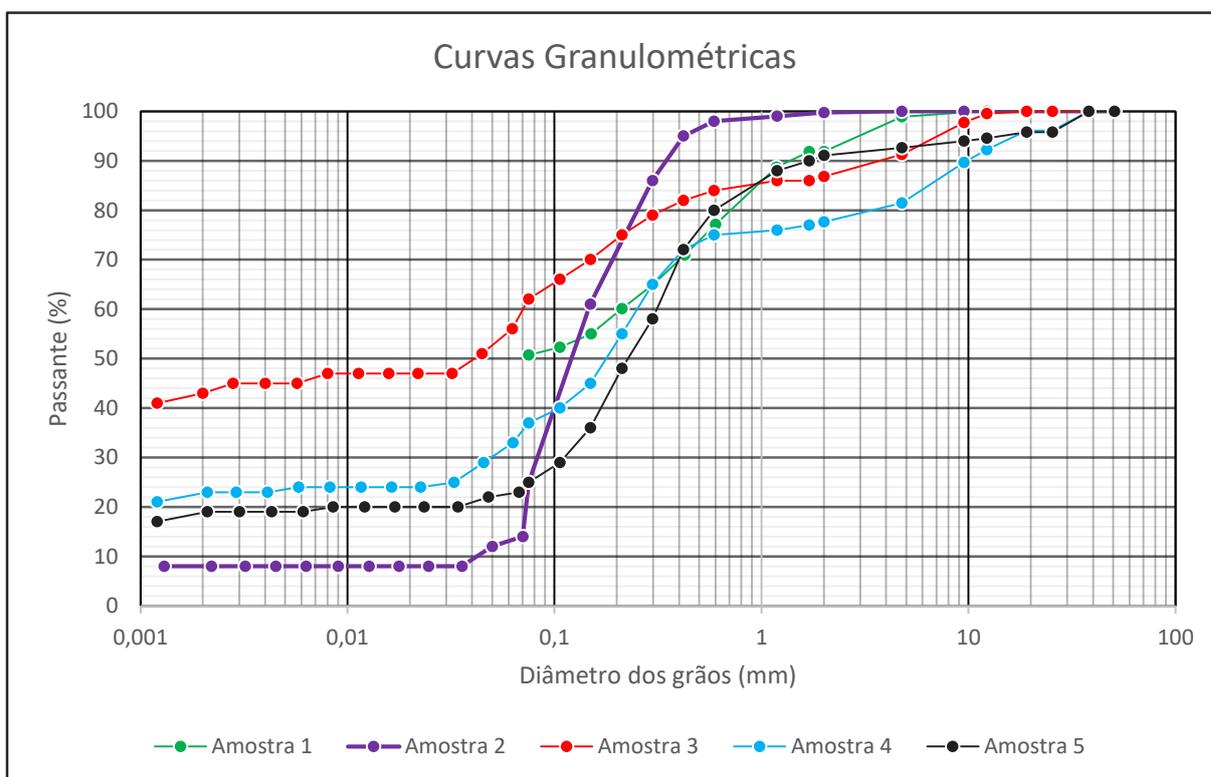
Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos pela metodologia adotada e sua discussão.

4.1 Ensaios laboratoriais

4.1.1 Granulometria

A Figura 18 mostra as curvas granulométricas dos materiais ensaiados. Os limites de frações de acordo com o tamanho dos grãos estão apresentados na Tabela 9. A partir disso, observa-se a predominância de frações finas, na maioria das amostras. Logo, os materiais tem tendência de serem argilosos ou siltosos.

Figura 18 - Curvas granulométricas das amostras ensaiadas



Fonte: Autor

Tabela 9 - Frações de solo das amostras

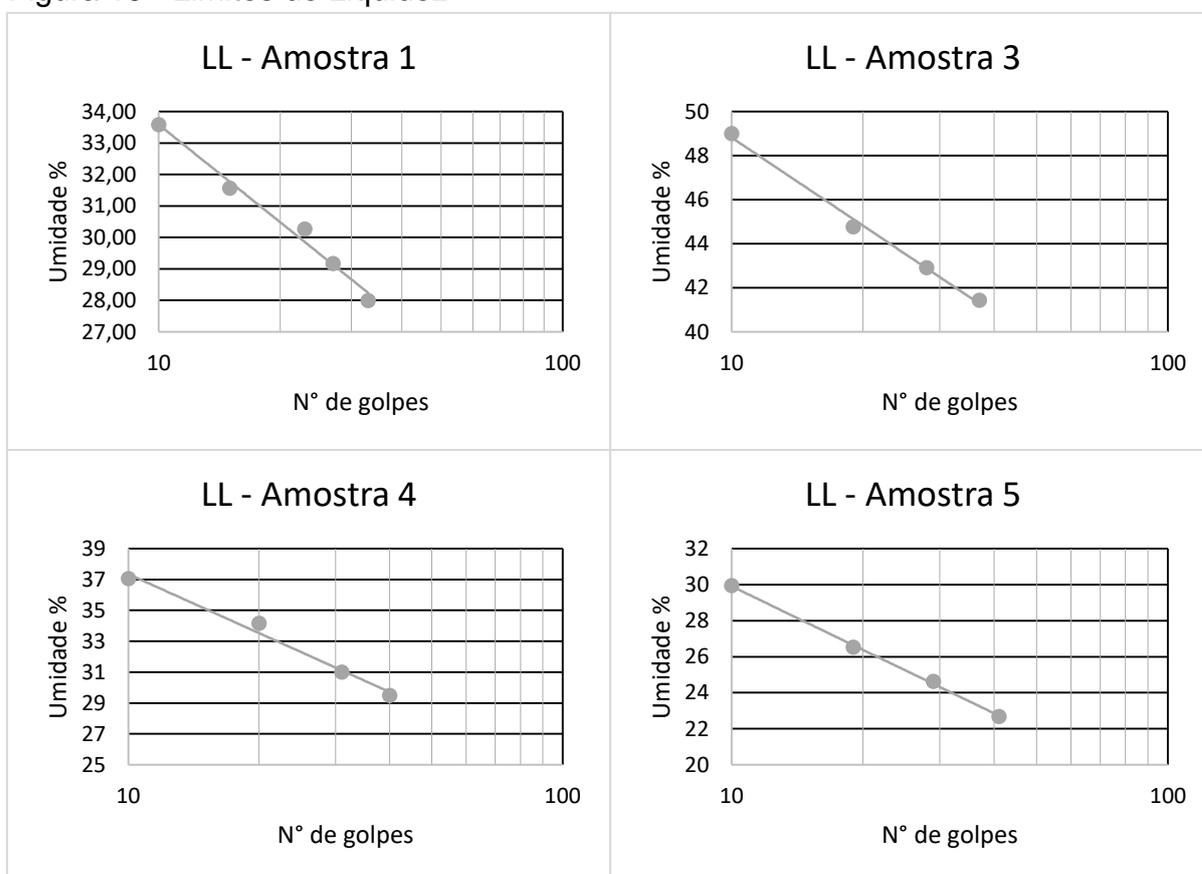
Amostra	Pedregulho %	Areia Grossa %	Areia média %	Areia Fina %	Silte %	Argila %
Amostra 1	8	15	17	9	-	-
Amostra 2	0	0	5	70	17	8
Amostra 3	13	3	9	13	19	43
Amostra 4	22	3	20	18	14	23
Amostra 5	9	11	33	22	7	18

Fonte: Autor

4.1.2 Limites de atterberg e a classificação do solo

A Figura 19 apresenta os gráficos do procedimento do ensaio de limite de liquidez das amostras. Os valores dos limites de Atterberg são mostrados na Tabela 10, exceto da amostra 2, que devido sua característica, não foi possível obter os índices de consistência, considerando o material como não plástico e não líquido.

Figura 19 - Limites de Liquidez



Fonte: Autor

Tabela 10 - 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 os limites de Atterberg, foi possível classificar as amostras de solo segundo o sistema unificado de classificação dos solos elaborado pelo professor Casagrande. As amostras 4 e 5 são consideradas areias, sendo a primeira uma areia siltosa (SM) e a outra como areia argilosa (SC). Já as amostras 1 e 3, são classificadas como argilas de baixa compressibilidade (CL).

Como a amostra 2 por não poder estabelecer os limites de liquidez e plasticidade, foi considerado como uma areia mal graduada (SP) devido a forma que a curva granulométrica se comportou.

4.1.3 Ensaios de compactação

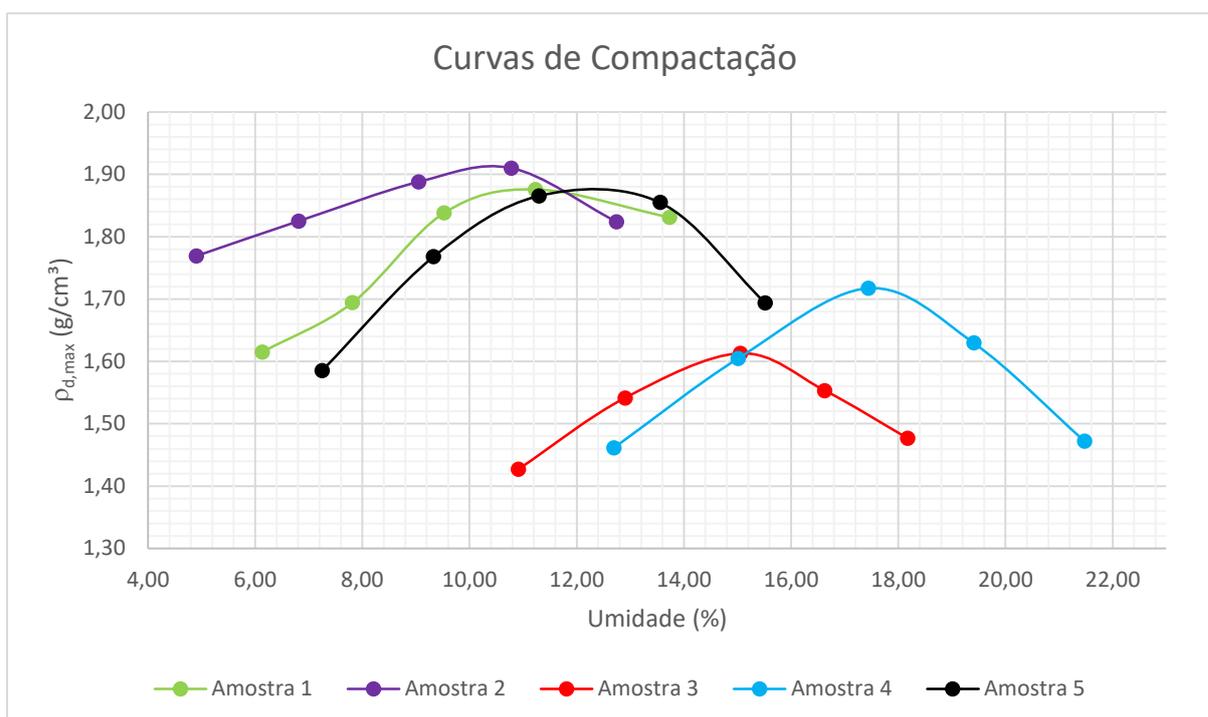
A Figura 20 mostra as curvas de compactação obtidas dos materiais ensaiados, das quais possibilitaram determinar a massa específica seca máxima ($\rho_{d,max}$) e umidade ótima do solo, que estão resumidos na Tabela 11. Observa-se que os valores são bem próximos uns aos outros e apresentam configurações mais achatadas, que é típico de solos mais finos.

Tabela 11 – Massa específica máxima e umidade ótima

Amostra	$\rho_{d,max}$	Umidade ótima
Amostra 1	1,87	11,00%
Amostra 2	1,91	10,40%
Amostra 3	1,61	15,00%
Amostra 4	1,72	17,40%
Amostra 5	1,87	13,00%

Fonte: Autor

Figura 20 - Curvas de Compactação



Fonte: Autor

4.1.4 Ensaios triaxiais PN

O parâmetro R_u das amostras foram obtidas com a realização do teste PN. A etapa preliminar deste ensaio é a determinação dos coeficientes de resistência dos solos, que para este trabalho foram estimados e estão apresentados na Tabela 12. Esses valores foram estabelecidos observando na Tabela 8, retirada de Carvalho (1983) e minorados por um FS de 1,5.

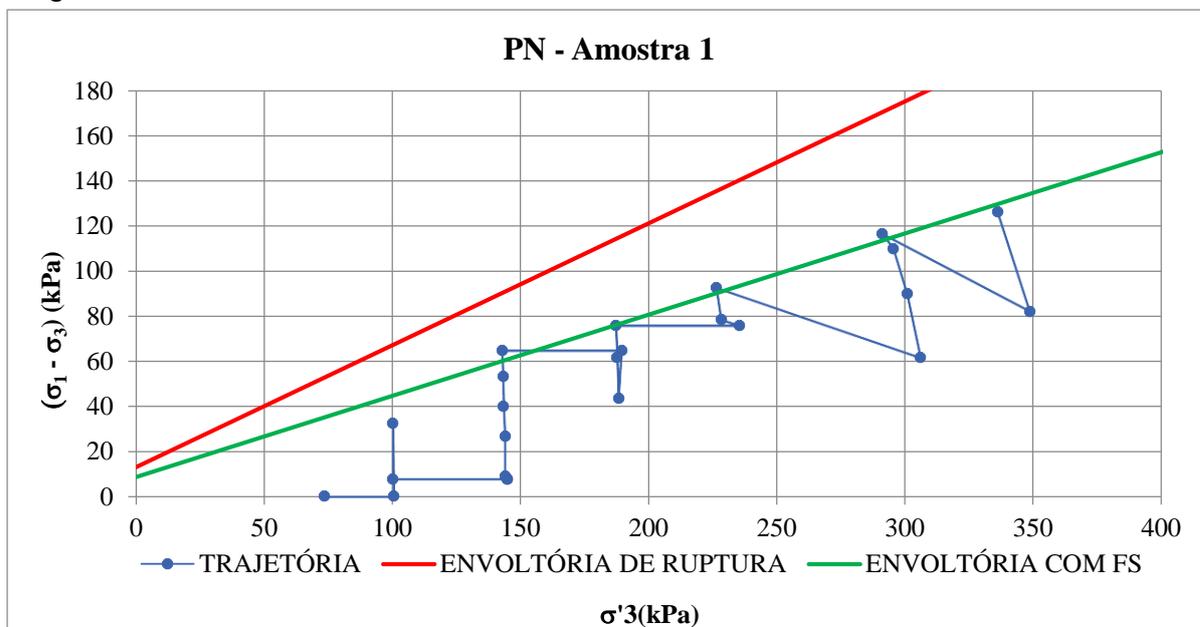
Tabela 12 - Parâmetros de resistência das amostras

Amostra	c' (KPa)	ϕ (°)	c' (KPa) - FS	ϕ (°) - FS
Amostra 1	13,0	28,4	8,7	19,8
amostra 2	0,0	36,5	0,0	26,3
Amostra 3	13,0	28,4	8,7	19,8
Amostra 4	11,0	31,0	7,3	21,8
Amostra 5	13,0	28,4	8,7	19,8

Fonte: Autor

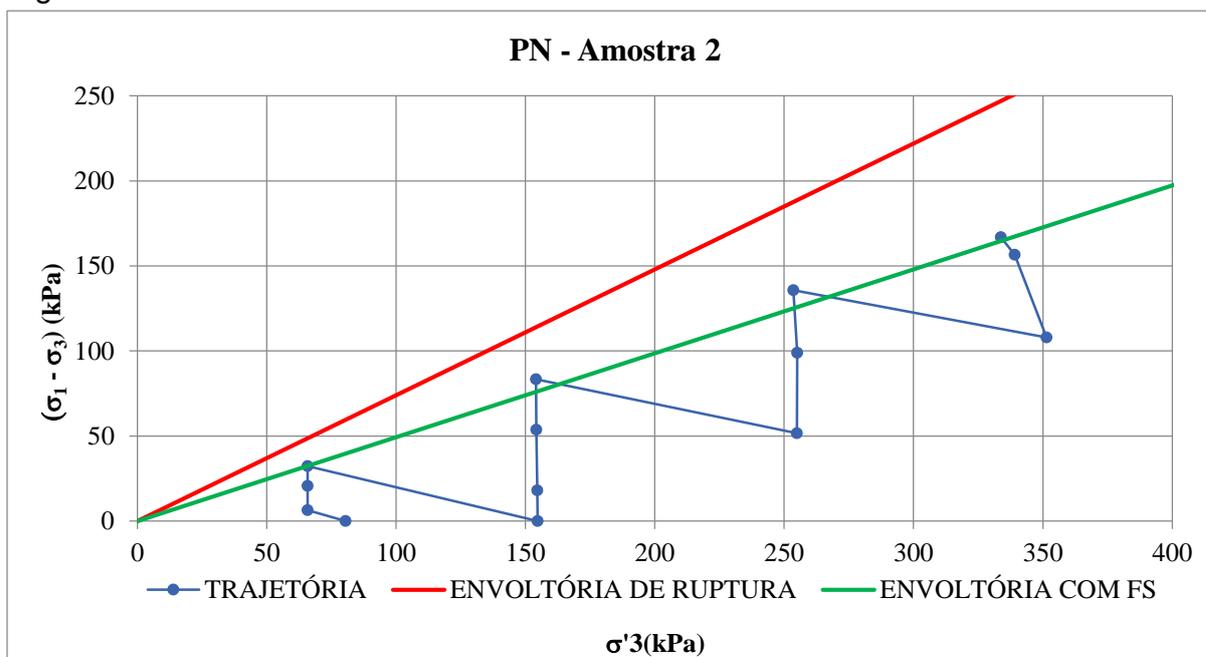
Com isso, as envoltórias de ruptura foram plotadas e o procedimento com a aplicação de cargas resultou nos seguintes gráficos que estão mostrados nas Figuras 21 a 25.

Figura 21 - PN - Amostra 1



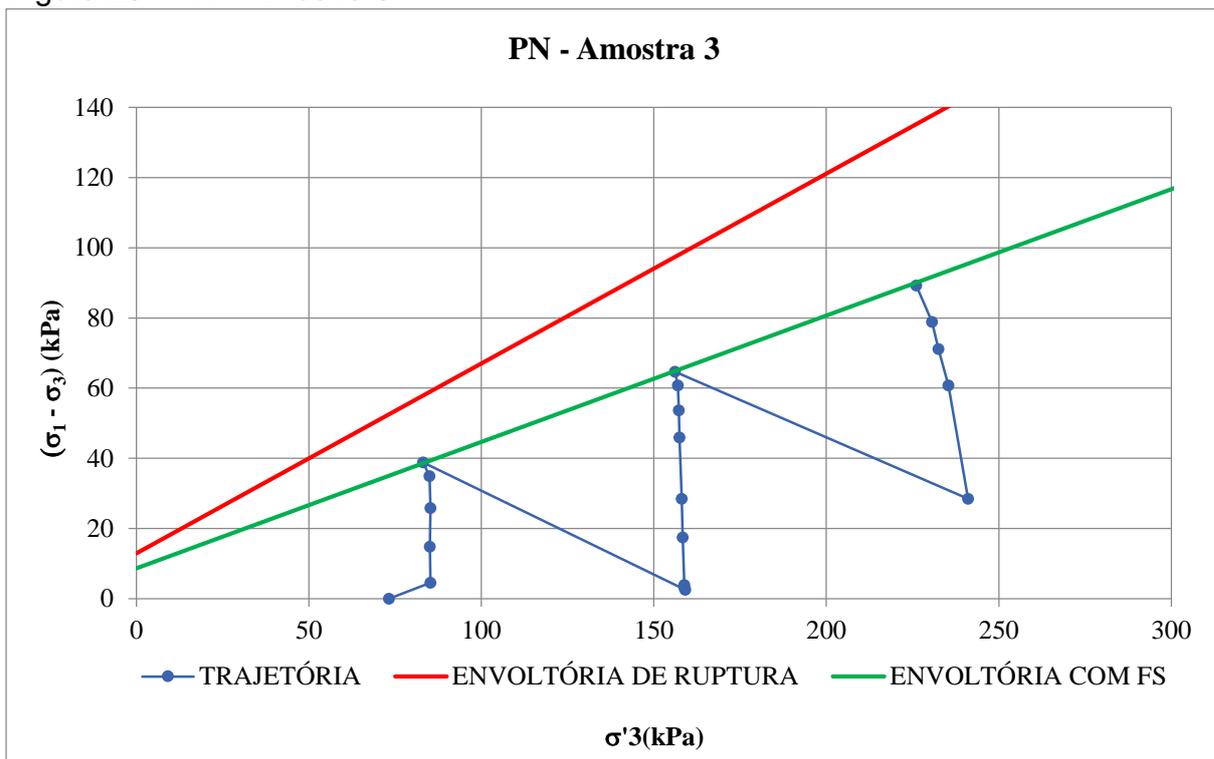
Fonte: Autor

Figura 22 - PN - Amostra 2



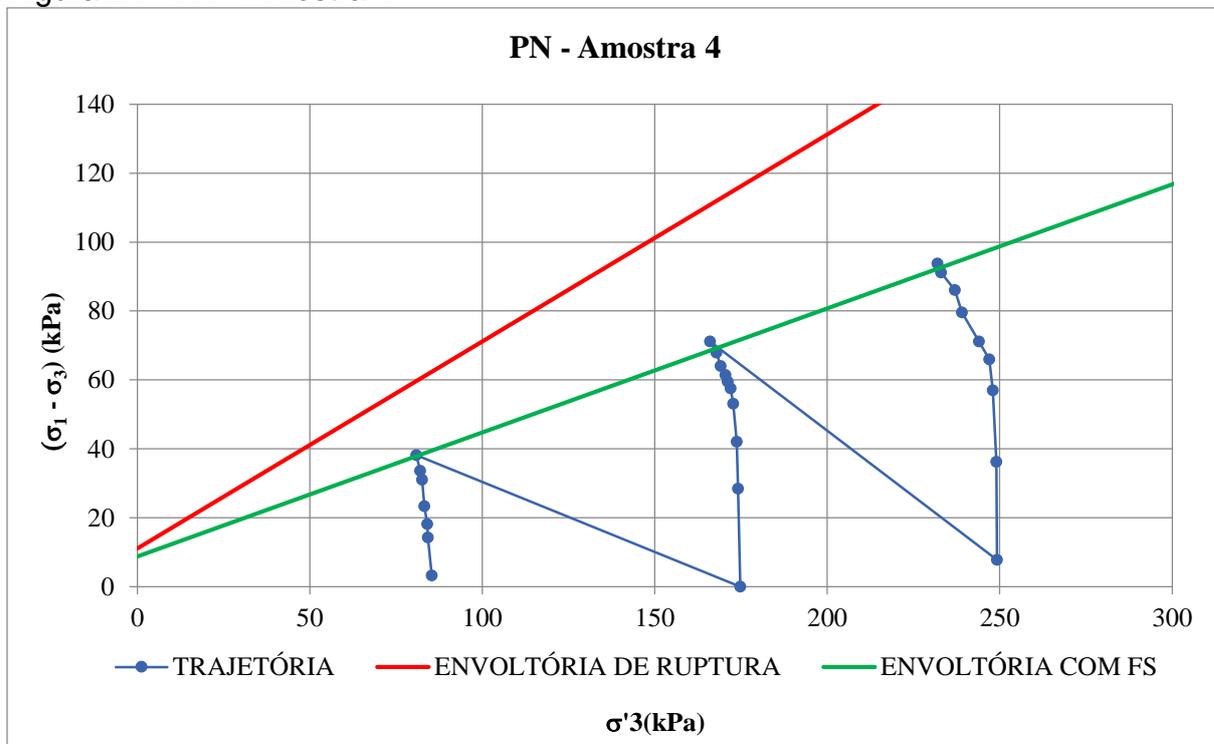
Fonte: Autor

Figura 23 - PN - Amostra 3



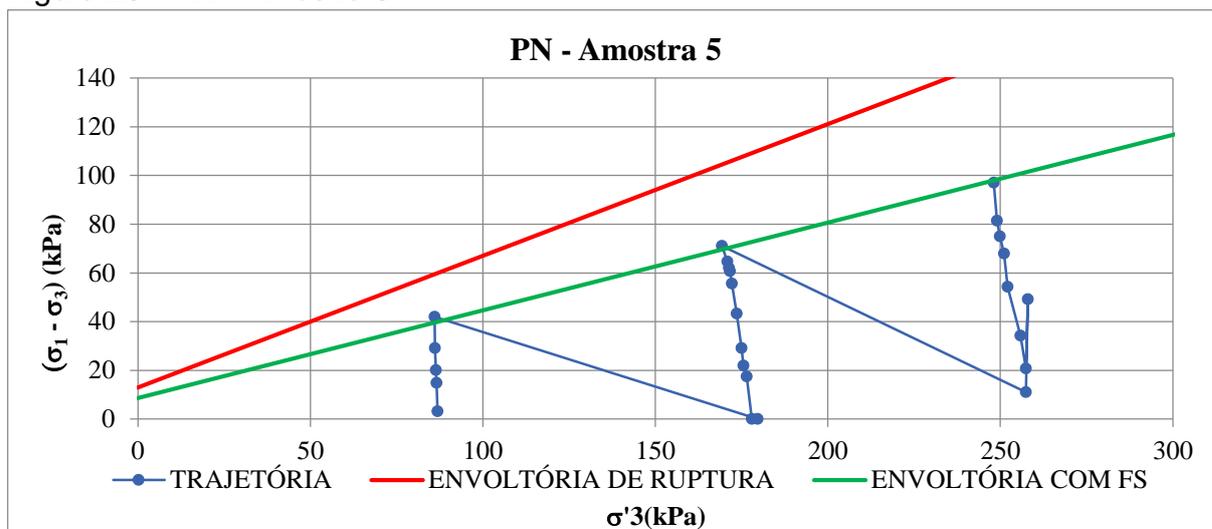
Fonte: Autor

Figura 24 - PN - Amostra 4



Fonte: Autor

Figura 25 - PN - Amostra 5



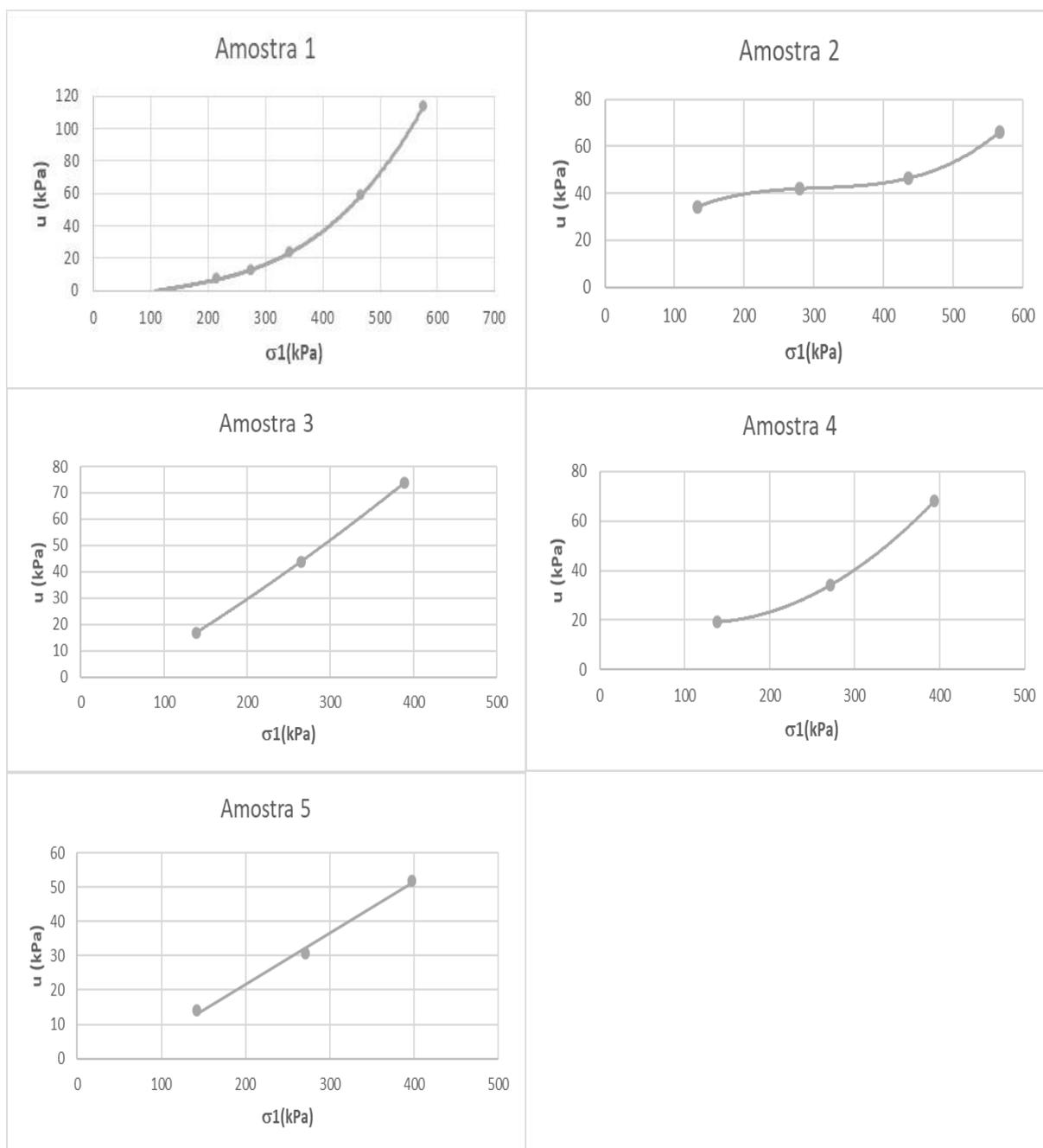
Fonte: Autor

A partir das trajetórias de tensões, é plotado a poropressão em relação a tensão principal σ_1 dos pontos que tocam as envoltórias, que estão apresentados na Figura 26. A partir disso, foi possível observar, que a tensão σ_1 variou até cerca de 400 e 600 kPa, a fim de simular as condições de alteamentos dos maciços de barragens. Com isso, R_u foi calculado pela inclinação da reta que tangencia os pontos mostrados na figura. No entanto, como a trajetórias dos pontos não variam linearmente, o coeficiente de poropressão é variável de acordo com a tensão principal maior, como mostram os resultados na Tabela 13.

Tabela 13 - R_u das amostras

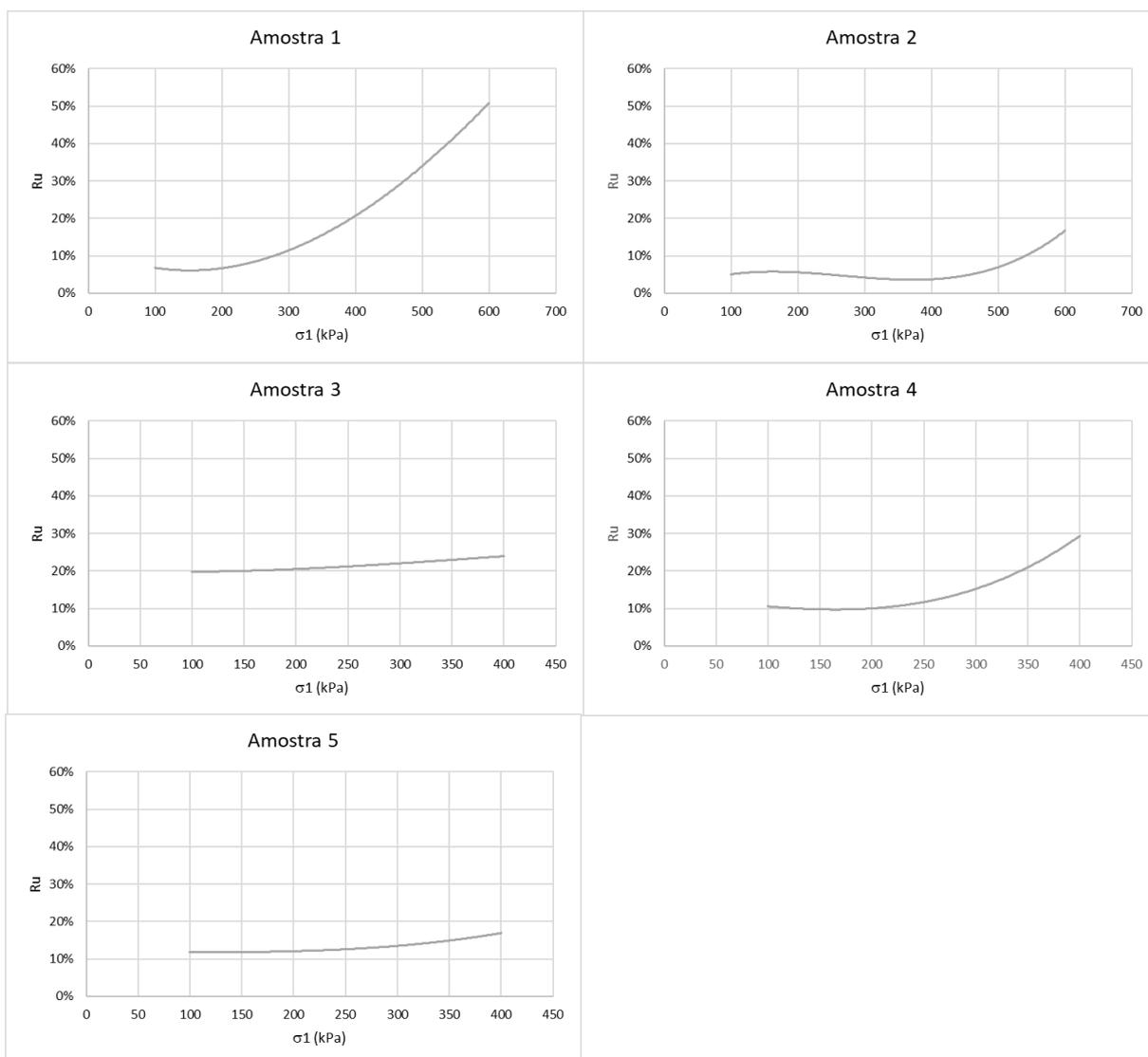
Amostra 1		Amostra 2		Amostra 3		Amostra 4		Amostra 5	
σ_1 (kPa)	R_u (%)								
100-300	8	100-300	5	100-300	21,45	150-300	11,20	150-300	12,94
300-400	16	300-400	3	300-400	24,08	300-400	27,72	300-400	16,84
400-500	28	400-600	15	-	-	-	-	-	-
500-600	50	-	-	-	-	-	-	-	-

Fonte: Autor

Figura 26 - Poropressão x σ_1 

Fonte: Autor

A partir da Figura 26 e Tabela 13, foram plotadas as linhas de tendência de comportamento do parâmetro R_u em função da tensão principal para as cinco amostras ensaiadas. A Figura 27 apresenta as linhas geradas para cada uma das amostras.

Figura 27 - Variação de Ru com σ_1 

Fonte: Autor

Nota-se, que a amostra 2, por ser um material mais granular que as outras, resultou em uma variação menor de poropressão, logo, um R_u menor, quando comparado com as demais nos mesmos níveis de tensão. Contrastando com a amostra 1, por exemplo, que é um solo com maior parte de finos, no qual obtemos R_u de 50% para tensões de até 600 kPa, enquanto para a amostra 2 chegamos apenas a 15%. Já para σ_1 até 400 kPa, o coeficiente é praticamente desprezível, entre 3 e 5%, podendo até ser considerado nulo para esse material, já que suas características

permitem uma rápida dissipação da poropressão com o tempo, o que também justifica as baixas taxas encontradas.

Além disso, é possível observar diferenças entre as amostras 1 e 3, que embora ambas sejam argilas de baixa compressibilidade, apresentaram valores e comportamento diferentes. No primeiro material, temos uma variação de R_u crescente com o aumento de σ_1 , enquanto na 3, o coeficiente apresenta uma tendência quase constante com leve aumento. No entanto, essa diferença pode ser justificada pelos estudos de Cruz (1996), que mostraram que o comportamento e valores podem variar bastante para solos de diferentes litologias mesmo que de mesma classificação.

Contudo, mesmo com a peculiaridade de cada amostra, como o comportamento, valores e litologia, é possível observar valores de R_u próximos para σ_1 de 300 a 400 kPa, em torno de 15 e 25%, exceto para o material mais granular.

4.2 Comparação dos valores de R_u determinados em laboratório com os obtidos da literatura.

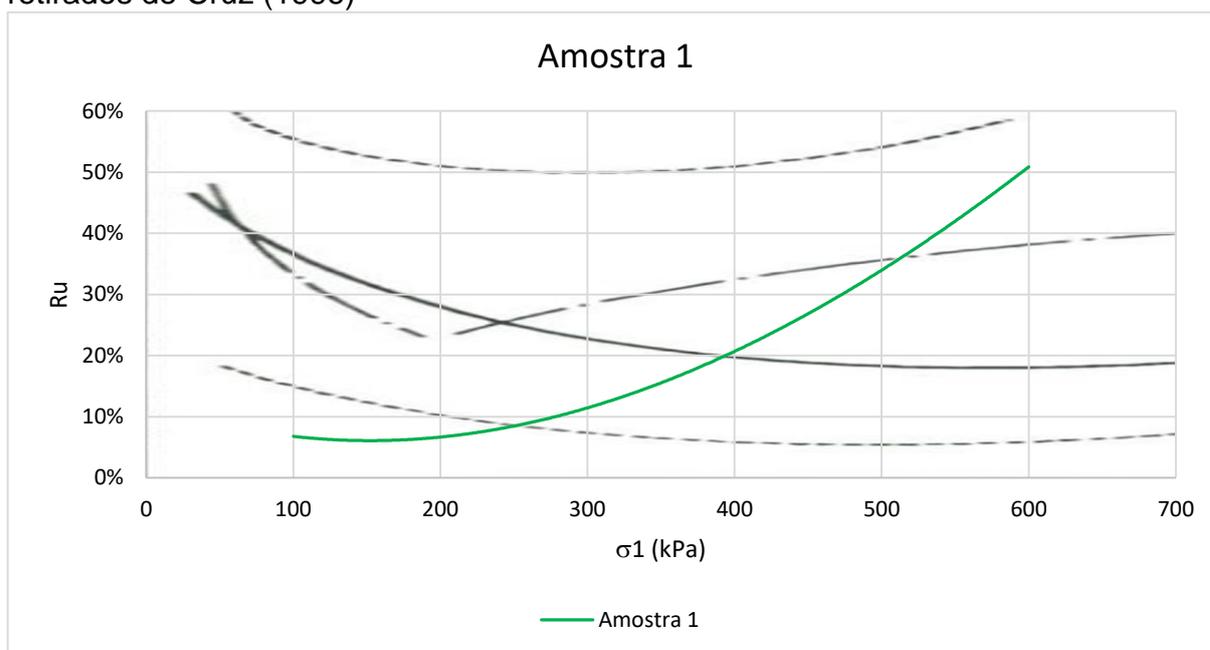
Cruz (1996) apresentou um estudo que analisava a variação do parâmetro de pressão neutra para diversos tipos de solo. Com isso, desenvolveu algumas curvas típicas do desenvolvimento do parâmetro com o aumento da tensão principal maior, de acordo com a litologia do material, como mostrado nas Figuras 9 e 10 do item 3.3.1. A partir disso, os resultados dos ensaios realizados foram comparados com essa literatura.

A amostra 1, por ter sua litologia definida como Gnaisse, foi comparada com os valores da curva do tipo IA, retirada de Cruz (1996), que contém esse tipo de material. Essa comparação está apresentada na Figura 28 para os mesmos níveis de tensão. Logo, foi possível observar que a amostra 1 se comportou de uma maneira um pouco diferente das curvas da bibliografia, no entanto, vale ressaltar que o próprio material tem alta variabilidade no desenvolvimento do parâmetro, como é visto na figura.

Além disso, os valores não foram muito diferentes, pois permaneceu dentro dos limites superiores e inferiores que as curvas típicas do tipo IA apresentam. Obtemos R_u de aproximadamente 50% para σ_1 de 600 kPa, enquanto os de Cruz

também apresentaram percentuais máximos próximos para esse tipo de material. De todas as amostras, a primeira foi a única com maiores diferenças no parâmetro ao comparar com a literatura.

Figura 28 - Comparação entre o parâmetro R_u determinado para a amostra 1 com os retirados de Cruz (1996)



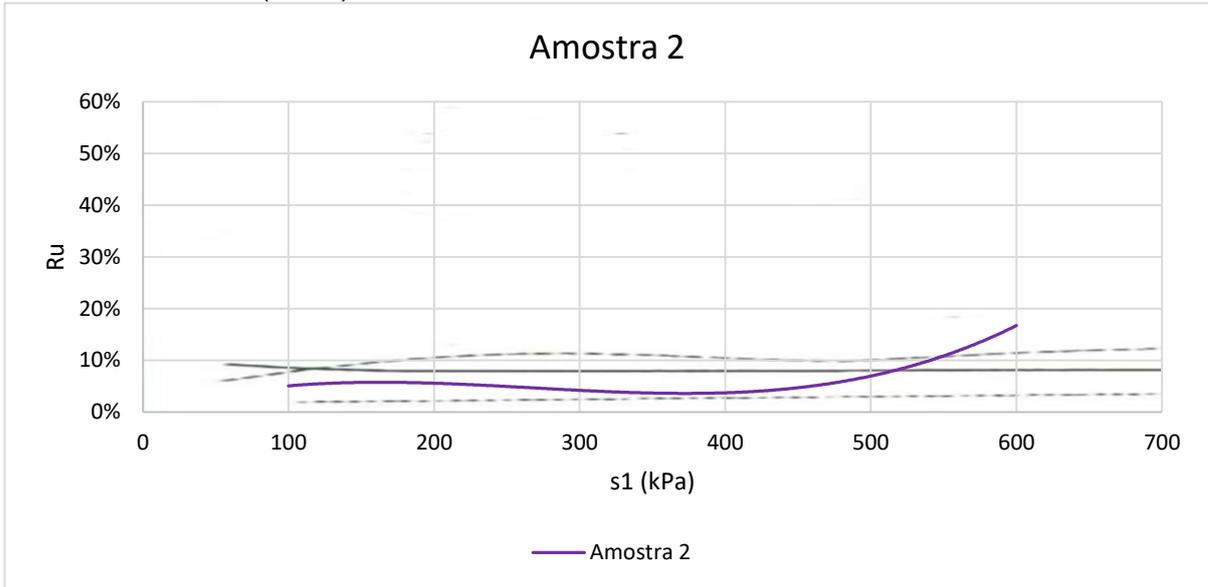
Fonte: Autor

A amostra 2, embora não tenha sua litologia estimada pela sua localização, foi comparada com a curva do tipo II, pois devido sua classificação ser de uma areia mal graduada, procurou-se valores típicos para solos originados de granito. Essa comparação está apresentada na Figura 29 para os mesmos níveis de tensão. A partir dessa figura, observa-se que os resultados do ensaio mostram valores e comportamento similares aos retirados da bibliografia. Tanto por Cruz (1996), quanto para a amostra ensaiada, o parâmetro R_u permaneceu quase constante e abaixo de 10%, exceto para cargas mais elevadas, nas quais o solo testado elevou o coeficiente até em torno de 15%.

Já as amostras 3, 4 e 5, por serem originados de sedimentos argilosos, foram comparadas com as curvas do tipo III, na qual há argilitos como um dos materiais. A Figura 30 mostra a comparação para os mesmos níveis de σ_1 . Observa-se que os parâmetros obtidos pelos ensaios são próximos aos da bibliografia, tanto em valor, quanto comportamento. Além disso, é possível notar que as amostras 4 e 5

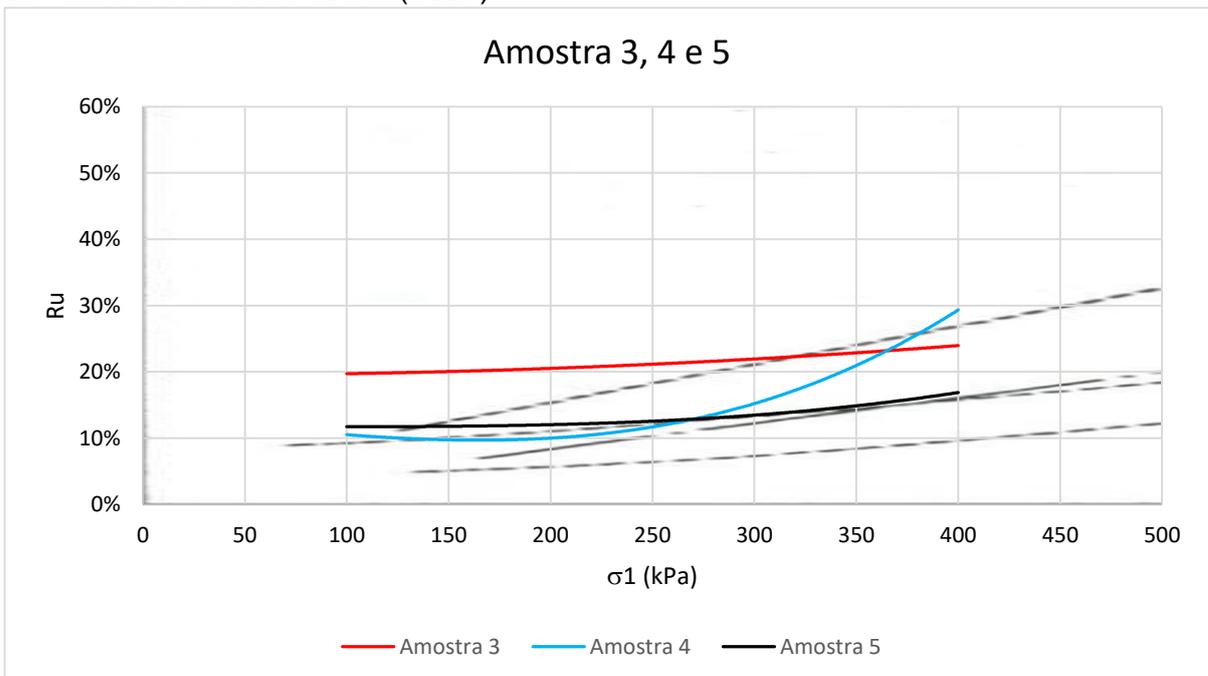
são mais similares entre si, com valores de 10 %, quando comparado com a amostra 3, que possui R_u em torno de 20% nas tensões analisadas.

Figura 29 - Comparação entre o parâmetro R_u determinado para a amostra 2 com os retirados de Cruz (1996)



Fonte: Autor

Figura 30 – Comparação entre o parâmetro R_u determinado para as amostras 3, 4 e 5 com os retirados de Cruz (1996)



Fonte: Autor

Como foi visto, o parâmetro R_u determinado em laboratório por meio dos ensaios triaxiais, são próximos aos resultados de Cruz (1996). A partir disso, com base nos dados resultantes do laboratório e dados da bibliografia, é notório a influência da litologia no comportamento do solo em relação ao parâmetro. Por exemplo, temos as amostras 1 e 3, que embora tenham o mesmo tipo de solo segundo SUCS, tem comportamentos distintos, sendo que a 3 se aproxima mais da 4 e 5 que tem mesma origem mineral.

No entanto, a classificação do material também tem influência entre os solos de mesmo litotipo, pois, partindo das comparações das amostras 3, 4 e 5, observa-se que o solo de argila de baixa compressibilidade (amostra 3) obteve valores maiores que os de areia argilosa (4 e 5), que eram similares entre si.

4.3 Levantamento de dados de projetos

Nesta pesquisa foi realizado um levantamento de dados com 23 barragens de terra construídas no Estado do Ceará. Os relatórios e projetos analisados foram cedidos pela Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e pesquisados na biblioteca virtual da Secretaria dos Recursos Hídricos (SRH).

. A partir dos relatórios disponibilizados, foi visto que geralmente os projetistas empregam valores de R_u em torno de 10 e 20% nos cálculos de estabilidade. No entanto, esses valores foram geralmente estimados sem a apresentação de uma referência metodológica. Em alguns casos foi apenas informado que em materiais de elevada permeabilidade o coeficiente é próximo de zero e, em matérias de baixa permeabilidade, assume valores entre zero e cerca de 50% sem referenciar estudos ou metodologias.

Também há casos em que o valor de R_u não foi informado, embora os métodos de cálculo adotados para os projetos exigir o coeficiente. Desse levantamento, apenas a barragem Cachoeira, no município de Aurora, referenciou a metodologia de Cruz (1970) para justificar o valor de 15% adotado. A Tabela 14 apresenta os valores de R_u adotados, a metodologia utilizada em sua determinação e a altura da construção.

Tabela 14 - Levantamento de dados de projetos

Açude	Ru (%)	Metodologia utilizada	Altura (m)
Cachoeira	0,15	Cruz (1970)	25,50
Boa vista	0,2	Não informado	6,30
Carmina	Não informado	Não informado	19,00
Catucinzenta	0,15	Não informado	16,30
FAE	0,2	Não informado	20,00
Figueiredo	0,2	Não informado	33,50
Gameleira	0,1	Não informado	19,50
Inhuçu	0,3	Não informado	45,40
Itapaje	0,1	Não informado	19,70
Itaúna	Não informado	Não informado	18,00
Jatobá	0,1	Não informado	22,05
Jenipapeiro	0,1	Não informado	15,40
João guerra	0,1	Não informado	19,60
Lontras	0,3	Não informado	57,00
Macacos	Não informado	Não informado	17,00
Malcozinhado	0,1	Não informado	19,11
Missi	Não informado	Não informado	17,30
Muquém	0,2	Não informado	27,60
Pesqueiro	0,2	Não informado	24,00
Poço do Bento	0,3	Não informado	17,30
Riacho da serra	Não informado	Não informado	18,71
Rosário	0,15	Não informado	20,80
Umari	Não informado	Não informado	21,82

Fonte: Autor

4.4 Avaliação dos valores de Ru adotados em projetos de barragens no estado do Ceará

No levantamento de dados realizado, como já citado, nos relatórios dos projetos é dito que o parâmetro R_u assume valores entre zero e cerca de 50% nos materiais de baixa permeabilidade, que são características típicas dos solos utilizados para a construção de barragens. Essa afirmação não é totalmente falha, pois nos ensaios, obtemos valores variando até 50% para tensões entre 500 e 600 kPa. No entanto, na literatura, foi possível observar percentuais levemente mais elevados até cerca de 60% para alguns materiais e até negativos.

Contudo, para averiguar a consistência dos valores adotados nos projetos, é preciso comparar os valores de R_u nos níveis de tensões que a obra está sendo

solicitada. Para isso, σ_1 foi adotado como aproximadamente a tensão vertical gerada pelo peso do material. Do levantamento, nota-se que a maioria das barragens averiguadas apresentam alturas menores que 20 metros, além do peso específico dos materiais ser aproximadamente de 19 kN/m³ na maioria dos projetos verificados. Logo, esses barramentos no fim de sua construção, para alturas de até 20 metros, são solicitados por σ_1 entre 300 e 400 kPa. Porém as litologias dos materiais dos projetos coletados não foram estabelecidas, logo a comparação foi feita sem levar em conta a litologia do material, mas somente o nível de tensão.

A partir das informações da Tabela 12, vimos que o R_u adotado para a análise de estabilidade em final de construção nas barragens, na faixa de tensão entre 300 e 400 kPa varia entre 10 e 20%. No entanto, para essa faixa, obtemos tanto em laboratório, quanto na literatura, alguns valores superiores a esse.

Além disso, ao analisar o coeficiente para alturas maiores, como por exemplo, as barragens Figueiredo (33,50 m), Inhuçu (45,50 m) e Lontras (57,00 m), os valores adotados nos projetos, 20% na primeira e 30% nos outros, contrasta tanto para valores encontrados em laboratório, com cerca de 50% no mesmo nível de tensão, quanto da literatura, que chegou a atingir 60% em alguns casos. Já para barragens menores, como Boa Vista de 6,30 metros, foi adotado 20%, enquanto nos ensaios chegamos até valores abaixo de 10% para esse nível de tensão, e nos estudos de Cruz obteve-se tanto valores menores e maiores que o utilizado no projeto.

Com isso, deixa claro que a falta de conhecimento, no que diz respeito ao desenvolvimento das pressões neutras no solo para a análise de estabilidade durante a fase de construção, pode resultar em análises superdimensionadas ou subdimensionadas. Nos casos em que o parâmetro R_u adotado é menor que o realmente desenvolvido pelo material, pode gerar instabilidades nos maciços, enquanto caso for maior, pode acarretar em um superfaturamento da obra.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste tópico serão apresentados as conclusões e limitações da pesquisa, além de recomendações para trabalhos futuros.

5.1 Conclusão

Este trabalho teve como objetivo principal o estudo do parâmetro R_u nos solos utilizados em barragens de terra, abordando valores de laboratório e projetos. Para tanto, foram utilizadas 5 amostras de solos disponibilizadas pelo laboratório de solos da UFC e realizados ensaios de laboratório para obtenção de propriedades geotécnicas necessárias para determinar o parâmetro R_u . Dos quais obtivemos resultados próximos dos apresentados por Cruz (1996).

Adicionalmente, foi realizado um levantamento de dados com projetos de barragens já construídas no estado do Ceará. Com isso, foi possível comparar os valores obtidos em laboratório com os da literatura e avaliar se os percentuais de R_u adotados em projetos condizem com a realidade.

Considerando as análises realizadas neste trabalho a partir dos resultados de laboratório e literatura, conclui-se que os valores de R_u podem variar até 60%. Além disso, observa-se que embora o parâmetro apresente alta variabilidade com o nível de tensões aplicada, é visto que a litologia do solo tem influência direta de como se dará o desenvolvimento das poropressões. No entanto, os tipos de solos baseadas nas suas classificações, também podem influenciar dentro dos materiais de mesma origem, como ocorreu nas amostras 3, 4 e 5, onde a 3 apresentou valores superiores a 4 e 5, embora fosse de mesma litologia.

A principal conclusão deste trabalho foi que os valores de R_u adotados nos projetos de barragens construídas no estado do Ceará, podem não representar precisamente a realidade acerca do desenvolvimento das pressões neutras nos maciços das barragens. Pois, tanto em laboratório, quanto em bibliografia, foram observados alguns valores superiores, de até 50% a mais do adotados em projeto. No entanto, como ocorre uma grande variação no parâmetro, devido influencia litológica, pode ser observado também, em uma menor parcela dos projetos, percentuais inferiores. Isso deixa claro que estimar esse parâmetro, como atualmente é feito, não

é algo recomendável devido à alta variabilidade do comportamento, até mesmo para solos de mesma origem e classificação. Sendo a determinação em laboratório a forma mais recomendada.

5.2 Limitações da pesquisa

O desenvolvimento desta pesquisa apresentou algumas limitações. Primeiro em relação a quantidade limitada de amostras, pois, para avaliar precisamente qualquer parâmetro geotécnico, é preciso uma grande quantidade de materiais.

A terceira limitação se refere a atual crise no sistema de saúde do país em razão da pandemia de Covid-19. Durante a realização desta pesquisa, por conta do elevado número de casos da doença registrados, houve restrições rígidas de circulação (Lockdown), o que impediu o acesso ao laboratório e suspendeu a realização dos ensaios por um tempo.

5.3 Recomendações para trabalhos futuros

Diante do que foi realizado nesta pesquisa, levando em consideração também as limitações ocorridas durante o desenvolvimento do trabalho, os seguintes assuntos são deixados como recomendações para futuros projetos:

- a) Avaliação da influência dos parâmetros geotécnicos, como os limites de Atterberg, permeabilidade e densidade máxima, no desenvolvimento das pressões neutras em maciços de terra;
- b) Tentar propor metodologias semi-empíricas que abordam a estimativa do parâmetro R_u em função da litologia e características geotécnicas do solo por meio de correlações;
- c) Avaliar a variação do parâmetro R_u em maciços de terra, adotando diferentes valores em cada camada de solo com tensões solicitantes distintas. Visto que a depender do nível de tensão, R_u pode variar.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. **ASTM D 7181: Standard Test Method for Consolidated Drained Triaxial Compression Test for Soils**. Philadelphia, 2020.
- 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.
- CRUZ, P.T. da; MAIOLINO, A.L.G. **Materiais de construção. Anais do Simpósio sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná**. São Paulo. ABMS/ABGE/CBMR. 1983.
- CRUZ, P.T. da; MAIOLINO, A.L.G. *Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils*. In: Peculiarities of geotechnical behavior of tropical lateritic and saprolitic soils. Progress Report. ABMS. Committee on Tropical Soils of the ISSMFE. Brasília. 1985.
- CRUZ, P.T. **Propriedades de engenharia de solos residuais compactados da Região Centro-Sul do Brasil**. THEMAG/ DLP/ EPUSP, 1967.
- DAS, Braja M. **Fundamentos de engenharia geotécnica**. São Paulo: Thompson, 2007.
- ELETROBRÁS (Brasil). **Critérios de Projeto Civil de Usinas Hidrelétricas**. Rio de Janeiro: Centrais Elétricas S.A. 2003.

EM 1110-2-1902. 2003. **"Slope Stability"**. U.S. Army Engineers. Washington, DC. 2003.

HEAD, K. H. **Manual of soil laboratory testing**. V.3. West Sussex: John Wiley & Sons Ltd. 1998.

LAMBE, T.W. **The Structure of Compacted Clay**. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations*. v. 84, n.SM2, 1654-1 a 1654-35, 1958a.

MAIOLINO, A.L.G. **Resistência ao cisalhamento de solos compactados: uma proposta de tipificação**. Dissertação de mestrado. COPPE/ UFRJ. 1985.

MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016.

MASSAD, F. **Obras de Terra : Curso Básico de Geotecnia**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2010.

MELLO, Victor F.B.de. **A case history of a major construction period dam failure**. Amici et Alumm Em. Prof. Dr. Ir. E.E de Beer, Bruxelas, Bélgica, p 63-78. 1982

MELLO, Victor F.B.de. **Acidentes em Barragens**. Anais. III Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos, Belo Horizonte – MG. 1966.

PACHECO SILVA, F. **Poro-pressões e recalques em Barragens de terra**. Seminário Nacional de Grandes Barragens, 8, tema 3, v. 2, p. 8, São Paulo, 1972. Publicação IPT n.982, 1972.

PENMAN, A.D.M. **The Design and Construction of Embankment Dams**. Departamento de Engenharia Civil, Puc-Rio, vol.1, Rio de Janeiro. 1982.

PENMAN, A.D.M. **Failure of Açu Dam**. Technical Note. In: Proceedings of Symposium on Failures in Earthworks, Londres, p. 414-416. 1985.

PEREIRA, Tonismar. **Avaliação do desempenho de diferentes métodos de análise de estabilidade de taludes em barragens de terra**. Dissertação de mestrado em Engenharia Agrícola – Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2013.

PERINI, D. S. **Estudo dos processos envolvidos na análise de riscos de barragens de terra**. Dissertação de Mestrado em Geotecnia - Universidade de Brasília, Distrito Federal, 2009.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006.

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.

REDLINGER, C.G.; FERGUSON, K.A.; BERRE, L.M. **80th Anniversary of the Fort Peck Dam Construction Slide**. ASDSO Annual Conference. Seattle: Associate of State Dam Safety Officials. 2018.

ROCHA, Valdecir Osvaldo da. **Barragem Engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves: Histórico e Avaliação do Comportamento Atual**. Dissertação de Mestrado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003.

SANDRONI, S.S. **Aspectos geotécnicos de uma ruptura de maciço de barragem durante a construção**. VIII Congresso Brasileiro de Mecânica dos Solos e Engenharia de Fundações. Associação Brasileira de Mecânica dos Solos. Porto Alegre/ RS, Vol. IV, p. 225-233. 1986.

SILVEIRA, J.A. **Comportamento de barragens de terra e suas fundações: tentativa de síntese da experiência brasileira na Bacia do Paraná**. Anais do Simpósio Sobre a Geotecnia da Bacia do Alto Paraná. São Paulo. ABGE/ABMS/CBMR. v. 1b. 1983 .

SKEMPTON, A. W. **The pore pressure coefficient *A* and *B***. Géotechnique, v. 4, pp. 143-147. 1954;

SOUZA, Andrielle Nascimento de. **Análise do comportamento da barragem engenheiro Armando Ribeiro Gonçalves – Açu/RN – durante sua construção, primeiro enchimento e operação do reservatório**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2017.

VILHETE, Didoney Fernandes. **Retroanálise da ruptura do talude de montante da Barragem do Açu no final do período construtivo**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Rio Grande do Norte, 2017.