

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA
CAMPUS CAJAZEIRAS

LUANDA DANTAS SALES

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO SOLO NA CIDADE DE CAJAZEIRAS-PB**

Cajazeiras-PB
2023

LUANDA DANTAS SALES

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO SOLO NA CIDADE DE CAJAZEIRAS-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à Coordenação do Curso de Bacharelado em Engenharia Civil do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, como parte dos requisitos para a obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Civil, sob Orientação da Prof^a. Me. Amanda Jéssica Rodrigues da Silva e Coorientação da Eng^a. Damiana Andreia Tavares Soares.

Cajazeiras-PB
2023

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catalogação na fonte: Cícero Luciano Félix CRB-15/750

S163d Sales, Luanda Dantas.
Determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo na cidade de Cajazeiras-PB / Luanda Dantas Sales. – 2023.
43f. : il.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2023.
Orientador(a): Prof^ª. Me. Amanda Jéssica Rodrigues da Silva.
Co-orientador(a): Bela: Damiana Andreia Tavares Soares.
1. Engenharia civil. 2. Análise de solo. 3. Resistência ao cisalhamento. 4. Morro do Cristo – Cajazeiras-PB. I. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba. II. Título.

IFPB/CZ

CDU: 624

LUANDA DANTAS SALES

**DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS DE RESISTÊNCIA AO
CISALHAMENTO DO SOLO NA CIDADE DE CAJAZEIRAS-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso submetido à
Coordenação do Curso de Bacharelado em
Engenharia Civil do Instituto Federal de
Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba,
Campus Cajazeiras, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2023.

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 AMANDA JESSICA RODRIGUES DA SILVA
Data: 08/03/2023 12:03:25-0300
Verifique em <https://verificador.iti.br>

Amanda Jéssica Rodrigues da Silva – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Orientador

Damiana A. Tavares Soares

Damiana Andreia Tavares Soares – IFPB-*Campus* Cajazeiras
Coorientador

Andrêza Leite de Araújo

Andrêza Leite de Araújo – Engenheira Civil
Examinador 1

“Acima de tudo, nunca pare de acreditar.”

As Aventuras de Pi (filme)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus, que sempre esteve comigo e me proporcionou coragem e perseverança para correr atrás dos meus sonhos.

Aos meus pais, Arlindo e Sandra, que sempre me apoiaram e acreditaram nos meus objetivos. Aos meus irmãos, Lucas e Luana, por serem inspiração e pela parceria de vida.

Aos meus amigos, Maria Luíza, Evilly, Leila, Letícia, Victor, Henrique, David e Ana Carolina, por terem sido família nesses 5 anos numa cidade nova e longe de todos que conhecia.

As minhas amigas de infância, Niedja, Iasmim e Kalinne, por sempre serem apoio, mesmo distantes.

A minha Orientadora Amanda e a minha Coorientadora Damiana, pela dedicação, paciência, confiança e conhecimento compartilhado no desenvolvimento deste trabalho. E ao professor Gastão, que sempre se mostrou disponível, fazendo muito mais do que seu papel, sua contribuição foi indispensável a este trabalho. Obrigada por fazerem parte da minha formação.

A cada um que fez parte desta trajetória, gratidão.

RESUMO

Grande parte das obras de engenharia se dispõem sobre o terreno e falta de conhecimento sobre as propriedades do solo são capazes de gerar diversas complicações, podendo acarretar em prejuízos financeiros ou até mesmo humanos. Quando se trata de solos, um fator imprescindível a se atentar é a sua ruptura, principalmente quando há o crescimento da malha urbana sobre regiões de morros e encostas. Assim, este trabalho possui como objetivo a determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento inerentes do solo do Morro do Cristo, na cidade de Cajazeiras-PB, como também a sua caracterização física, e comparar estes resultados a valores esperados apresentados em bibliografias de referência para o tipo de solo estudado. Tais resultados foram obtidos através de ensaios laboratoriais realizados de forma satisfatória sob três amostras indeformadas da região, retiradas do topo, meio e base do morro, de forma a se obter amostras representativas do local estudado, submetidas aos ensaios de cisalhamento direto de forma inundada, granulometria por sedimentação, limites de Atterberg e massa específica. As amostras foram caracterizadas texturalmente como areias siltsas e classificadas pelo método SUCS como SC (areias argilosas), possuindo teor de umidade variando entre 1,5% e 3,2%, massa específica a 20°C dentro de intervalo de 2,596 g/cm³ a 2,651 g/cm³, Limites de Liquidez variando de 25 a 29, Limites de plasticidade de 8 a 18, e Índices de Plasticidade de 10 a 17. Foram obtidos os valores de ângulo de atrito interno e coesão, respectivamente, de 33,4° e 17,1 kPa para a amostra 1, de 44,1° e 13,3 kPa para a amostra 2 e 27,1° e 23,9 kPa para a amostra 3, estando as amostras 1 e 3 dentro dos valores esperados de ângulo de atrito interno e a amostra 2 apresentando valor de ângulo de atrito interno superior ao intervalo estimado para o tipo de solo.

Palavras-Chave: resistência ao cisalhamento; cisalhamento direto; coesão; ângulo de atrito interno.

ABSTRACT

Most of the engineering works are available on the land and lack of knowledge about the properties of the soil are capable of generating several complications, and can lead to financial or even human losses. When it comes to soils, an essential factor to be considered is their rupture, especially when there is the growth of the urban mesh over regions of hills and slopes. Thus, this work aims to determine the values of the shear resistance parameters inherent to the soil of Morro do Cristo, in the city of Cajazeiras-PB, as well as its physical characterization, and compare these results to expected values presented in reference bibliographies for the type of soil studied. These results were obtained through laboratory tests performed satisfactorily under three undeformed samples from the region, taken from the top, middle and base of the hill, in order to obtain representative samples of the studied site, submitted to direct shear tests in a flooded form, granulometry by sedimentation, Atterberg limits and specific mass. The samples were texturally characterized as silt sands and classified by the SUCS method as SC (clay sands), having moisture content ranging from 1.5% to 3.2%, specific mass at 20°C within a range of 2.596 g/cm³ to 2.651 g/cm³, Liquidity limits ranging from 25 to 29, Plasticity limits from 8 to 18, and Plasticity Indexes from 10 to 17. The values of internal friction angle and cohesion were obtained, respectively, of 33.4° and 17.1 kPa for sample 1, of 44.1° and 13.3 kPa for sample 2 and 27.1° and 23.9 kPa for sample 3, with samples 1 and 3 within the expected values of internal friction angle and sample 2 presenting an internal friction angle value higher than the estimated range for the soil type.

Keywords: shear resistance; direct shear; cohesion; internal friction angle.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Forças referentes ao atrito entre o solo	16
Figura 2 - Envoltória representada pelo critério de Coulomb	17
Figura 3 - Envoltória representada pelo critério de Mohr	17
Figura 4 – Representação de resultado típico de ensaio de cisalhamento direto.....	18
Figura 5 – Esquema do equipamento de cisalhamento direto	19
Figura 6 - Mapa de Localização do Município de Cajazeiras-PB.....	20
Figura 7 - Mapa de localização da coleta das amostras indeformadas	21
Figura 8 - Aparelho de cisalhamento direto de acionamento manual	22
Figura 9 - Corpo de prova moldado.....	22
Figura 10 - Caixa bipartida e seus componentes	23
Figura 11 - Inserção do corpo de prova na caixa bipartida	24
Figura 12 - Corpo de prova inserido na caixa bipartida	24
Figura 13 - Corpo de prova após o ensaio de cisalhamento direto.....	25

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Limite de liquidez da amostra 1	29
Gráfico 2 - Limite de liquidez da amostra 2	29
Gráfico 3 - Limite de liquidez da amostra 3	30
Gráfico 4 - Curva Granulométrica da amostra 1	32
Gráfico 5 - Curva Granulométrica da amostra 2	32
Gráfico 6 - Curva Granulométrica da amostra 3	33
Gráfico 7 - Curvas de resistência ao cisalhamento do solo sob condição inundada da amostra 1	34
Gráfico 8 - Curvas de resistência ao cisalhamento do solo sob condição inundada da amostra 2	34
Gráfico 9 - Curvas de resistência ao cisalhamento do solo sob condição inundada da amostra 3	35
Gráfico 10 - Curva da envoltória da Amostra 1	36
Gráfico 11 - Curva da envoltória da Amostra 2	36
Gráfico 12 - Curva da envoltória da Amostra 3	36

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Síntese de parâmetros de resistência ao cisalhamento encontrados em bibliografias de referência.	19
Tabela 2 - Resultados dos limites de Atterberg para cada amostra de solo.....	30
Tabela 3 - Resultado de Teor de umidade	31
Tabela 4 - Massas específicas a 20°C em cada etapa do ensaio.....	31
Tabela 5 - Resultado Final de massa específica para cada amostra	31
Tabela 6 - Porcentagens de frações de solo presentes	33
Tabela 7 - Classificação SUCS.....	34
Tabela 8 - Valores exatos de tensões normais e de cisalhantes de ruptura aplicadas nas amostras 1, 2 e 3	35
Tabela 9 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.....	37

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS	13
1.1.1	<i>Objetivo geral.....</i>	<i>13</i>
1.1.2	<i>Objetivos específicos.....</i>	<i>13</i>
2	REFERENCIAL TEÓRICO.....	14
2.1	RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO.....	14
2.1.1	<i>Coesão.....</i>	<i>15</i>
2.1.2	<i>Atrito interno.....</i>	<i>15</i>
2.1.3	<i>Critérios de ruptura</i>	<i>17</i>
2.2	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	18
2.3	PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO	19
3	MÉTODO DA PESQUISA.....	20
3.1	ÁREA ESTUDADA	20
3.2	PROCESSO DE RETIRADA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO.....	21
3.3	APARELHO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	22
3.4	ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO.....	22
3.5	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO	25
3.5.1	<i>Distribuição Granulométrica.....</i>	<i>26</i>
3.5.2	<i>Massa Específica.....</i>	<i>26</i>
3.5.3	<i>Limite de liquidez.....</i>	<i>27</i>
3.5.4	<i>Limite de plasticidade</i>	<i>27</i>
3.5.5	<i>Teor de umidade higroscópico.....</i>	<i>28</i>
4	RESULTADOS DA PESQUISA.....	29
4.1	LIMITES DE ATTERBERG	29
4.2	TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICO	30
4.3	MASSA ESPECÍFICA	31
4.4	GRANULOMETRIA.....	31
4.5	CISALHAMENTO DIRETO.....	34
5	CONCLUSÃO	39
	REFERÊNCIAS.....	41

1 INTRODUÇÃO

De acordo com Caputo (1988), o solo é um material procedente do intemperismo ou meteorização das rochas por meio da ação de agentes físicos ou químicos. Caputo (1988) ainda cita que habitualmente os processos de desintegração mecânica e decomposição química agem simultaneamente, embora, a depender do local e das condições climáticas, possa haver a predominância de um sobre o outro.

Diemer *et al.* (2008) afirma que o solo é considerado o material mais barato, visto que está profusamente presente no substrato de grande parte das obras de engenharia. Estando presente com as mais variadas formas e funcionalidades, o solo é relevante na construção civil desde quando é incumbido como suporte a receber os esforços atribuídos pela edificação até sua utilização como componente em obras como terraplenagem, pavimentação ou barragens de terra.

Ainda segundo Diemer *et al.* (2008), complicações relacionadas a infraestrutura ou a falta de conhecimento das propriedades do solo são capazes de comprometer a utilização ou o funcionamento do empreendimento, podendo acarretar a consideráveis prejuízos financeiros.

Assim, grande parte das obras de engenharia se dispõem sobre o terreno, e possuir o conhecimento a respeito do solo é fator imprescindível ao dimensionamento seguro das construções. Segundo Zanardo (2014), quando se trabalha com obras de engenharia que envolva geotecnia, um fator primordial a se atentar inclui a ruptura dos solos, resultando em consequências desastrosas que abrangem fatores sociais, econômicos e ambientais.

Segundo Caputo (1988), questões relevantes de engenharia de solos e fundações dependem das características de resistência ao cisalhamento e, de acordo com Pinto (2006), questões de ruptura na maioria das vezes envolve o fenômeno de cisalhamento. Quando há um crescimento desordenado da malha urbana sob morros e encostas, a carga que essas edificações transmitem ao solo, ou até mesmo a falta de conhecimento sobre suas características físicas para o dimensionamento das estruturas, podem acarretar em riscos a população que ocupa este espaço.

Questões de deslizamentos de solo em morros e encostas em presença de mudanças climáticas ou aumento da carga atuante nesse solo é um assunto comum e que ocorre quando a resistência ao cisalhamento do solo se apresenta menor que as tensões cisalhantes atuantes. Dessa forma, notou-se a escassez de estudo sobre a resistência do solo da região do Morro do Cristo em Cajazeiras-PB, em contrapartida com o crescimento urbano, que avança cada vez

mais sobre esta localidade.

A partir do levantamento dos parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo dessa região, questões quanto a carga que esse solo pode suportar no seu estado menos resistente poderão ser previstas, servindo de embasamento para futuros dimensionamentos de estruturas das edificações que serão construídas no local, pavimentos e, caso necessário, contenções.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Este trabalho tem por objetivo geral determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo sob condições inundadas do morro do Cristo, na Cidade de Cajazeiras-PB, através de amostras indeformadas.

1.1.2 Objetivos específicos

Para concretização do objetivo geral, o estudo pretende alcançar de forma mais detalhada e objetiva os seguintes pontos:

- caracterizar o solo geotecnicamente quanto as suas propriedades físicas;
- realizar os ensaios de cisalhamento direto com resultados satisfatórios sob condição inundada;
- determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo;
- comparar os resultados obtidos de ângulo de atrito interno com valores esperados para o tipo de solo estudado apresentados em bibliografias de referência.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 RESISTÊNCIA AO CISALHAMENTO

A resistência ao cisalhamento pode ser definida, conforme Pinto (2006), como sendo a maior tensão de cisalhamento que o solo pode suportar sem que ocorra algum tipo de ruptura, ou também a tensão de cisalhamento do solo no plano o qual virá a suceder a ruptura. De acordo com Caputo (1988), em totalidade, uma massa de solo chega ao estágio de ruptura quando esta resistência é excedida, ou seja, as tensões cisalhantes atuantes ultrapassam o limite de resistência ao cisalhamento que solo suporta.

Caputo (1988) ainda menciona a resistência ao cisalhamento representada pela equação de Coulomb que estabelece os limites da envoltória de resistência ao cisalhamento do solo, conforme mostrada na Equação 1.

$$\tau = c + \sigma \operatorname{tg}\varphi \quad (1)$$

A equação apresenta dois parâmetros, o intercepto de coesão “c” e o ângulo de atrito interno “ φ ”. Segundo Braida *et al.* (2007), esses parâmetros são características inerentes do solo, determinados de acordo com suas propriedades, incluindo textura, densidade, estrutura, mineralogia, teor de matéria orgânica e teor de água.

Sobre a equação de Coulomb, Rocha *et al.* (2002) acrescenta que esta equação delimita os limites da linha de envoltória de resistência que caracteriza as máximas tensões cisalhantes que o solo suporta, onde qualquer força de cisalhamento que venha está acima desta linha promoverá a ruptura do solo.

Biavati (2017) refere-se ao princípio das tensões efetivas de Terzaghi, dizendo que quando o solo em condição saturada está submetido a ações de carregamento, uma parcela do carregamento incide sobre os grãos de solo, gerando as tensões efetivas, enquanto uma outra parcela incidirá sobre a água, causando a chamada poro-pressão ou pressão neutra. Logo, a deformabilidade e resistência do solo dependem da variante de tensões efetivas aplicadas sobre ele.

Biavati (2017) ainda reforça a atenção quanto a estabilidade de solos saturados devido a sua perda de resistência ao cisalhamento. É visto que em situações de solo saturado há a redução da força de contato entre as partículas, favorecendo o escorregamento.

2.1.1 Coesão

De acordo com a definição da Associação Brasileira de Normas Técnicas-ABNT, na norma NBR 6502 (ABNT, 2022), a coesão pode ser definida como sendo a fração da resistência ao cisalhamento gerada pela atração físico-química entre as partículas de solo ou pela cimentação das mesmas.

Pinto (2006) diz que a resistência ao cisalhamento se deve principalmente ao atrito entre os grãos, porém esta atração entre as partículas pode gerar uma resistência ao cisalhamento que independe da tensão normal aplicada no plano, constituindo uma coesão real, exemplificando ainda com a situação de uma cola sendo utilizada entre dois corpos.

Viecili (2003) acrescenta que, além de independer da força normal, a coesão tem uma parcela significativa de resistência em definidos tipos de solos. Ainda cita que a medida que o solo vai saturando essa resistência tende a reduzir e que a coesão real não deve ser confundida com a coesão aparente, presente principalmente em solos argilosos úmidos não saturados.

De acordo com Silva *et al.* (2007), a coesão se trata de uma força de atração entre as superfícies das partículas de solo, diferenciadas entre coesão real e aparente. Ainda há diferença da influência desses parâmetros de acordo com a textura do solo onde, em solos arenosos a resistência ao cisalhamento está submetida basicamente a influência do atrito entre as partículas, enquanto em solos argilosos a resistência ao cisalhamento sofrerá influência tanto do atrito quanto da coesão (SILVA, 2007 *apud* LEBERT; HORN, 1991).

Quanto a distinção de coesão verdadeira e coesão aparente, Caputo (1988) descreve a primeira como sendo gerada em virtude de forças eletroquímicas de atração atuando sob as partículas de argila, sendo esta dependente de vários fatores, e a segunda se comportando como uma pressão externa, sendo esta gerada a partir da pressão capilar da água presente nos vazios dos solos.

2.1.2 Atrito interno

Conforme a norma NBR 6502 (ABNT, 2022), o atrito interno se trata da fração da resistência ao cisalhamento do solo equivalente ao atrito gerado entre os grãos ou partículas de solo em situação de deslizamento.

Caputo (1988) menciona que não há uma superfície de contato clara e evidente, pelo contrário, é feito uma infinidade de contatos pontuais, logo, quando se fala sobre atrito interno

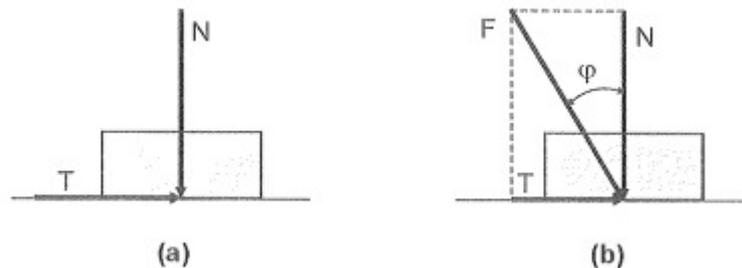
do solo não se trata apenas do “atrito físico” entre as partículas, como também deve ser levado em consideração o “atrito fictício” gerado pela interação das partículas do solo.

Pinto (2006) ainda diz que o atrito no solo se apresenta de forma diferente do atrito entre dois corpos já que no solo além do deslizamento envolver uma grande quantidade de grãos, estes ainda podem rolar entre si, acomodando-se entre os vazios.

Além disso, não deve ser confundido os conceitos de atrito interno que, na equação de Coulomb (Equação 1) é referente ao valor encontrado por meio da expressão “ $\sigma \text{ tg}\phi$ ”, com a denominação de ângulo de atrito interno.

Quanto ao ângulo de atrito interno pode ser entendido, segundo Pinto (2006), como o ângulo ϕ formado entre a força cisalhante F e a força N , conforme apresentado na Figura 1.

Figura 1 - Forças referentes ao atrito entre o solo



Fonte: Pinto (2006).

Sendo N a força vertical sob o corpo e T a força horizontal necessária para fazer para fazer com que ocorra deslizamento, sendo esta superior a $f.N$, considerando f o coeficiente de atrito entre os materiais, pode ser concluído que a força T é proporcional a força normal N . Tal proporcionalidade pode ser apresentada conforme a Equação 2.

$$T = N \cdot \text{tg}\phi \quad (2)$$

Silva *et al.*, (2007) se refere ao ângulo de atrito interno como tratando-se da representação das propriedades friccionais do solo, conceituando-o como o maior ângulo que a força aplicada pode fazer com a força normal sem que haja cisalhamento no plano de ruptura.

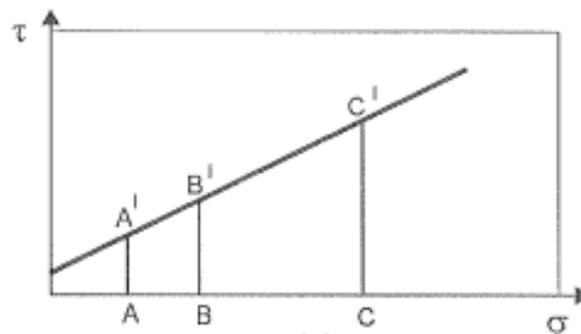
A norma NBR 6502 (ABNT, 2022) ainda cita o ângulo de atrito interno efetivo, que é parâmetro da envoltória de resistência efetiva, se tratando do ângulo formado pela envoltória de Mohr-Coulomb com o eixo das tensões normais. Sendo este o ângulo de atrito interno utilizado como parâmetro para este trabalho.

2.1.3 Critérios de ruptura

Critérios de ruptura podem ser entendidos como sendo concepções que procuram representar as condições de ruptura de um material. Com relação aos critérios de ruptura existentes para solos, Pinto (2006) menciona os critérios de Coulomb e de Mohr como os critérios de ruptura mais significativos quanto ao comportamento do solo, sendo um critério satisfatório aquele que reflete o comportamento do material em questão.

Segundo Pinto (2006), o critério de Coulomb pode ser definido de modo que “não há ruptura se a tensão de cisalhamento não ultrapassar um valor dado pela expressão $c + f \sigma$, sendo c e f constantes do material e σ a tensão normal existente no plano de cisalhamento”. Logo, o critério de Coulomb pode ser visto como delimitado pela linha tangente ao ângulo de atrito interno, conforme representado pela Figura 2.

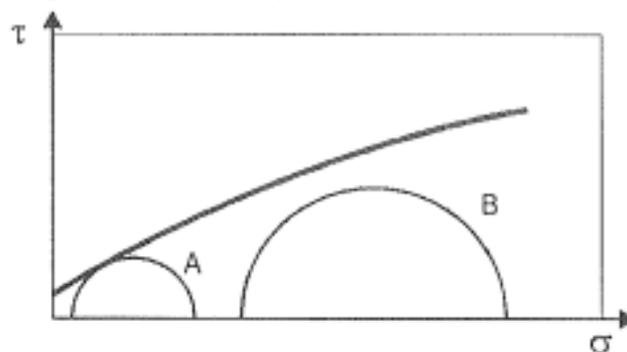
Figura 2 - Envoltória representada pelo critério de Coulomb



Fonte: Pinto (2006).

Já sobre o critério de Mohr, Pinto (2006, p. 251) se refere como “não há ruptura enquanto o círculo representativo do estado de tensões se encontrar no interior de uma curva, que é a envoltória dos círculos relativos a estados de ruptura, observados experimentalmente para o material”, podendo ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Envoltória representada pelo critério de Mohr



Fonte: Pinto (2006).

Ainda é muito vista a expressão “critério de Mohr-Coulomb”, que se deve ao fato da não usualidade da curva no critério de Mohr devido a sua difícil aplicação, substituindo-a por uma reta que melhor se adapte a envoltória, justificando a expressão pela analogia dos critérios.

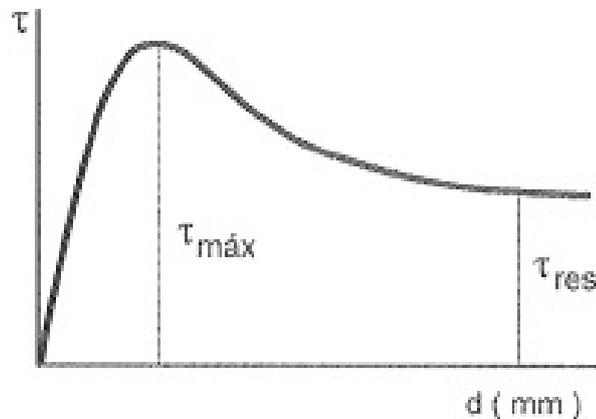
2.2 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

Quando se trata de resistência ao cisalhamento, essa pode ser auferida através de ensaios laboratoriais ou de campo, dentre estes o ensaio de cisalhamento direto. Segundo Pinto (2006), o ensaio de cisalhamento direto é um dos métodos mais antigos de obtenção da resistência ao cisalhamento e está claramente ligado ao critério de Coulomb.

Para Caputo (1988), o ensaio de cisalhamento direto constitui-se na indicação da tensão ao cisalhamento $\tau = \tau_r$ capaz de gerar a ruptura de uma amostra de solo submetida a uma tensão normal σ e inserida numa caixa formada por duas partes que se movem entre si.

Pinto (2006) ainda fala que a tensão τ pode ser representada em função do deslocamento na direção do cisalhamento, conforme indicado na Figura 4, onde pode ser identificado a tensão de ruptura $\tau_{m\acute{a}x}$ e a tensão residual τ_{res} que o corpo de prova ainda suporta após atingida a situação de ruptura.

Figura 4 – Representação de resultado típico de ensaio de cisalhamento direto



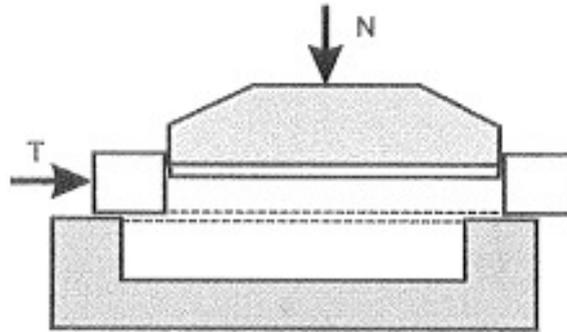
Fonte: Pinto (2006).

Além disso, as deformações verticais do corpo de prova também são contabilizadas durante o ensaio, indicando se houve variação de volume do solo durante o processo de cisalhamento (VIECILI, 2003).

Para o ensaio, o corpo de prova é inserido dentro da caixa de cisalhamento, ficando com cada metade dentro de uma das partes da caixa bipartida. Inicialmente é aplicada uma tensão normal N , também é aplicado uma força tangencial T na metade superior da caixa causando

deslocamento da parte superior do corpo de prova, conforme representado na Figura 5 (PINTO, 2006).

Figura 5 – Esquema do equipamento de cisalhamento direto



Fonte: Pinto (2006).

Conforme Matté (2017), executando o ensaio com variadas tensões normais é possível gerar a envoltória de resistência, apresentando num gráfico as tensões de ruptura para cada tensão normal aplicada, podendo assim calcular através da função obtida os parâmetros de resistência ao cisalhamento: coesão e ângulo de atrito.

2.3 PARÂMETROS DE COMPARAÇÃO

Devido à escassez de estudos sobre a resistência do solo da região e do tipo de solo, constatou-se que seria mais pertinente fazer a análise comparativa com resultados típicos de parâmetros de resistência do solo apresentadas em bibliografias de referência, como Pinto (2006) e Das (2007), visto que solos com origem, características e submetidos a climas diferentes também vão apresentar comportamentos diferentes.

Assim, a Tabela 1 sintetiza valores de parâmetros de resistência ao cisalhamento esperados para o tipo de solo estudado, mais precisamente a ângulos de atrito interno devido a não encontrar menção a resultados típicos de coesão nas obras estudadas.

Tabela 1 - Síntese de parâmetros de resistência ao cisalhamento encontrados em bibliografias de referência.

Autor	ϕ' (graus)					
	Areia: grãos arredondos			Areia: grãos angulares		
	Fofa	Média	Compacta	Fofa	Média	Compacta
DAS (2007)	27-30	30-35	35-38	30-35	35-40	40-45
PINTO (2006)	30 - 40			37 - 47		

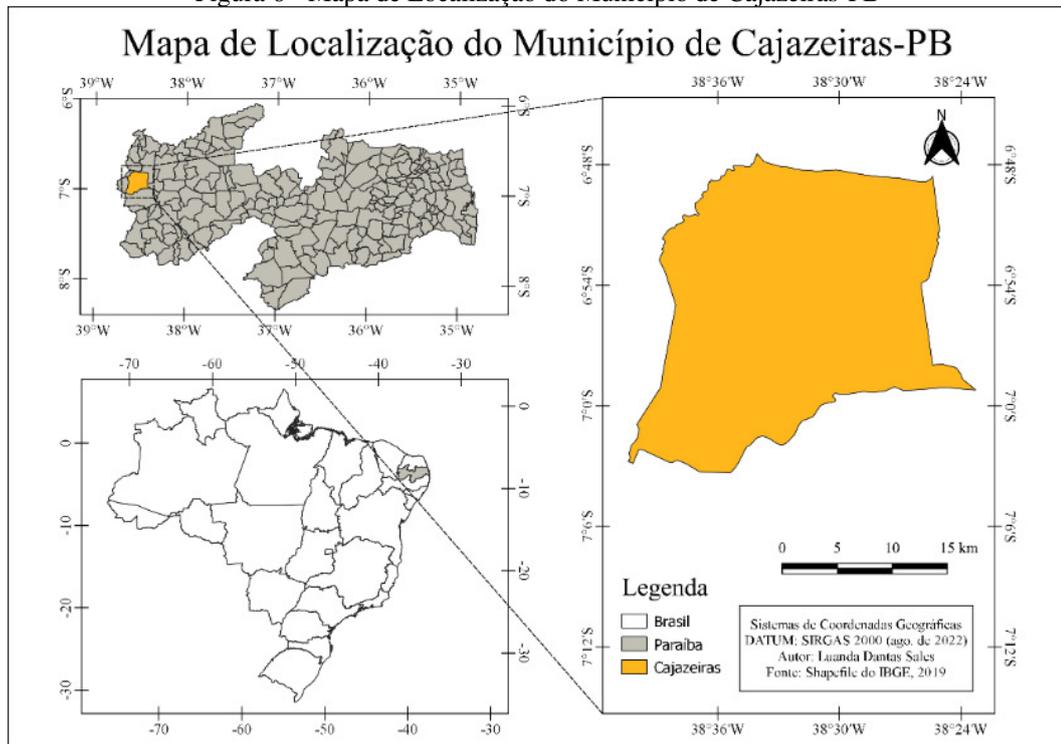
Fonte: Autoria própria (2023).

3 MÉTODO DA PESQUISA

3.1 ÁREA ESTUDADA

As amostras indeformadas de solo foram coletadas da região do Morro Cristo Rei, na Cidade de Cajazeiras-PB. O município se encontra localizado no sertão paraibano, nas proximidades da extremidade oeste do estado, conforme indicado na Figura 6, a aproximadamente 477 km da capital João Pessoa.

Figura 6 - Mapa de Localização do Município de Cajazeiras-PB



Fonte: Autoria própria (2022).

Foram feitas a coleta de 3 amostras indeformadas retiradas em localidades de altitudes diferentes do morro, afim de se obter uma maior representatividade do solo deste local. A amostra 1 foi retirada do topo do morro nas coordenadas $6^{\circ} 53' 42,922''$ S e $38^{\circ} 33' 3,197''$ W, com altitude de 363 m, a amostra 2 foi coletada em posição intermediária nas coordenadas $6^{\circ} 53' 44,422''$ S e $38^{\circ} 32' 55,583''$ W, com altitude de 311 m e a amostra 3 foi retirada nas coordenadas $6^{\circ} 53' 48,730''$ S e $38^{\circ} 33' 0,280''$ W, com altitude de 292 m acima do nível do mar. Os pontos de coleta das amostras indeformadas (AI) estão precisamente apresentados na Figura 7.



Fonte: Autoria própria (2023).

3.2 PROCESSO DE RETIRADA DAS AMOSTRAS INDEFORMADAS DE SOLO

Para a coleta das amostras indeformadas foram utilizados materiais como enxada, pá, picareta, talhadeira, marreta, serrote, papel filme, espátulas, sacos plásticos e caixa de isopor. Deu-se início ao processo retirando a camada superficial do solo onde seria coletada a amostra, afim de retirar pedregulhos e matéria orgânica presentes nos primeiros centímetros de solo.

Em seguida, passou-se a utilizar a picareta para ganhar profundidade nas laterais e logo após deu-se início ao processo de talhamento até chegar no formato e dimensões desejadas de amostra, conforme descrito na norma NBR 9604 (ABNT, 2016).

Com o cerrote e a talhadeira foi cortado a parte de baixo da amostra, deslocando assim a amostra do solo, e logo depois enrolada em papel filme e sacos plásticos e alocada na caixa de isopor.

3.3 APARELHO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio foi realizado em um aparelho de cisalhamento direto da marca SOLOTEST, com funcionamento através de acionamento manual, conforme mostrado na Figura 8.

Figura 8 - Aparelho de cisalhamento direto de acionamento manual

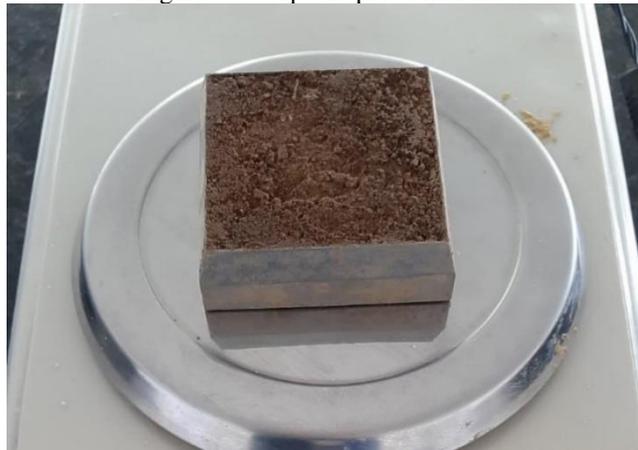


Fonte: Autoria própria (2022).

3.4 ENSAIO DE CISALHAMENTO DIRETO

O ensaio de cisalhamento direto foi executado com base na norma ASTM D3080-11 (2014). A partir das amostras indeformadas foram moldados os corpos de prova com o auxílio de um molde metálico com dimensões de (6 x 6 x 2) cm, de forma a preservar a estrutura solo, em seguida foram pesados utilizando balança de precisão, conforme mostrados na Figura 9.

Figura 9 - Corpo de prova moldado



Fonte: Autoria própria (2022).

Após realizada a moldagem, seguiu a montagem da caixa bipartida e locação do solo. A caixa bipartida possui peças as quais a montagem correta é indispensável para a execução adequada do ensaio. Na Figura 10 é apresentada a sequência de montagem da caixa bipartida.

Figura 10 - Caixa bipartida e seus componentes



Fonte: Autoria própria (2022).

Assim, pode-se observar abaixo os nomes dos componentes correspondentes aos números indicados na Figura 10.

- 1- Parte inferior da caixa bipartida;
- 2- Fundo metálico removível com canais;
- 3 e 10 – Pedras porosas;
- 4 e 9 – Papéis de filtro;
- 5 – Placa metálica perfurada com hachuras;
- 6 – Parte superior da caixa bipartida;
- 7 – Molde metálico contendo o corpo de prova;
- 8 – Placa metálica inteira com hachuras;
- 11 – Tampa metálica.

Para a montagem da caixa bipartida inicialmente foram colocados o fundo metálico (componente 2), uma pedra porosa (componente 3), um papel de filtro (componente 4) e a placa metálica perfurada com hachuras (componente 5) nesta ordem na parte inferior da caixa bipartida (componente 1).

Em seguida, foi parafusada a parte superior da caixa bipartida (componente 6) e com a ajuda de um molde de gesso o corpo de prova foi desmoldado dentro da caixa bipartida, conforme ilustrado nas Figuras 11 e 12.

Figura 11 - Inserção do corpo de prova na caixa bipartida



Fonte: Autoria própria (2022).

Figura 12 - Corpo de prova inserido na caixa bipartida



Fonte: Autoria própria (2022).

Após feito isso, foi inserida a placa metálica inteira com hachuras (componente 8), um papel de filtro (componente 9), uma pedra porosa (componente 10) e a tampa metálica (componente 11). Então a caixa bipartida foi colocada na caixa de cisalhamento, coberta por água destilada e é deixada submersa por pelo menos 24 horas.

Passado este tempo, deu-se início ao processo de consolidação do solo, os três relógios que marcam os deslocamentos foram zerados e foram aplicadas as tensões normais de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200 kPa durante no mínimo 90 minutos para cada amostra, sendo moldados 4 corpos de prova por amostra.

Em seguida, retirados os parafusos da caixa bipartida, deu-se início ao processo de cisalhamento, onde a manivela foi girada em velocidade lenta o suficiente para evitar a presença significativa da poro-pressão até o deslocamento horizontal atingir a marca de 6,00 mm, onde já é possível gerar a curva da envoltória e obter os parâmetros de cisalhamento. A Figura 13 ilustra um corpo de prova após submetido ao ensaio de cisalhamento direto.

Figura 13 - Corpo de prova após o ensaio de cisalhamento direto



Fonte: Autoria própria (2022).

3.5 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

A fim de determinar as características físicas do solo, uma parcela de cada amostra indeformada retirada foi destinada para o uso em ensaios de caracterização. Os ensaios foram executados de acordo com o procedimento indicado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Assim foram realizados:

- Preparação para ensaio de compactação e caracterização, segundo a norma NBR 6457 (ABNT, 2016);
- Distribuição granulométrica, conforme a norma NBR 7181 (ABNT, 2016);
- Massa específica, de acordo com a norma NBR 6458 (ABNT, 2016);
- Limite de liquidez, segundo a norma NBR 6459 (ABNT, 2016);
- Limite de plasticidade, segundo a norma NBR 7180 (ABNT, 2016);
- Teor de umidade higroscópica do solo, como descrito na norma NBR 6457 (ABNT, 2016);

A preparação do solo para os ensaios procedeu de acordo com o descrito na norma NBR 6457 (ABNT, 2016), onde foi feita a secagem previa das amostras, o solo deformado ficou

exposto ao ar livre para perda de umidade, também foi feito o destorroamento e homogeneização do solo para que fossem ensaiadas amostras representativas.

3.5.1 Distribuição granulométrica

O ensaio foi realizado por granulometria conjunta, ou seja, peneiramento e sedimentação, seguindo as instruções apresentadas na norma NBR 7181 (ABNT, 2016), devido ao solo possuir frações finas e grossas.

O processo começou separando aproximadamente 1 kg de material e passando na peneira 2,0 mm. A parte retida foi lavada, a fim de retirar vestígios de material fino aderido as partículas maiores, e levada para a estufa para secar. Concluído o processo de secagem do material, é feito o peneiramento grosso.

Quanto ao solo que passou na peneira 2,0 mm, foi feito o processo de sedimentação, onde uma parte do material foi pesado e colocado em um béquer submerso em solução aquosa por mais de 24 horas.

Logo após, o conteúdo do béquer é submetido a ação do dispersor por 15 minutos. Em seguida o material é transferido para uma proveta que é completada com água destilada até atingir a marca de 1 000 cm³.

Com o solo já na proveta, a proveta é agitada a fim de manter a dispersão das partículas e a partir do momento que foi colocada sobre a bancada foi cronometrado o tempo e dado início as leituras com o densímetro e o termômetro.

Após feita a última leitura com o densímetro, o conteúdo da proveta foi despejado na peneira 0,075 mm e lavado. Em seguida o material foi levado à estufa até a completa secagem e depois foi realizado o processo de peneiramento fino, concluindo o ensaio de granulometria.

3.5.2 Massa específica

O ensaio de massa específica sucedeu conforme a norma NBR 6458 (ABNT, 2016), para o qual foi separado aproximadamente 60 g de amostra já preparada conforme a norma NBR 6457 (ABNT, 2016), pesada e colocada em um béquer onde foi adicionado água destilada até a completa imersão do solo e reservado por pelo menos 12 horas.

Após o repouso, o conteúdo do béquer foi transferido para o copo do dispersor onde foi adicionado um pouco mais de água destilada e foi colocado para bater por 15 minutos. Em seguida, com auxílio do funil, a mistura de solo e água destilada foi transferida para o

picnômetro, sempre cuidado para que não houvesse perdas de solo nas transferências de recipiente e também para que o volume não ultrapasse metade do volume útil do picnômetro.

Logo depois, o picnômetro foi levado para a bomba a vácuo até que não fosse mais visto bolhas de ar na superfície de suspensão. Em seguida, o picnômetro foi preenchido com água destilada até aproximadamente 1 cm abaixo da base do gargalo e foi levado a bomba a vácuo mais uma vez até que não se visse bolhas de ar.

Posteriormente, a mistura no picnômetro foi deixado em repouso até atingir uma temperatura de equilíbrio com o ambiente, adicionado água destilada até atingir a marca da base do gargalo do picnômetro, enxugado e pesado.

Após a pesagem inicial, o conjunto foi submetido a resfriamento e anotada a variação de temperatura e a massa, sempre enxugando e mantendo o volume da mistura na marca da base do gargalo do picnômetro. Repetindo o processo 5 vezes para cada amostra de solo.

3.5.3 Limite de liquidez

O ensaio de limite de liquidez seguiu o exposto na norma NBR 6459 (ABNT, 2016). Com a amostra já preparada, foi passada uma quantidade de solo pela peneira #40, adicionada água destilada e misturada até homogeneizar. Em seguida, foi posta uma parte dessa mistura no aparelho de Casagrande de maneira uniforme ocupando $2/3$ do diâmetro do aparelho e com o cinzel foi aberto uma ranhura na linha central do aparelho, dividindo o solo em duas partes.

Logo depois, passou-se a girar o aparelho até que ranhura se fechasse na extensão de 13 mm e a quantidade necessária de golpes para isto foi anotada. Também foi retirada uma parcela de solo do local onde a ranhura se fechou e foi levado a estufa para determinação do teor de umidade.

O processo foi repetido 3 vezes para cada amostra de solo, mantendo um intervalo de 15 a 35 golpes para que a ranhura se feche.

3.5.4 Limite de plasticidade

Para o ensaio de limite de plasticidade foi utilizada a norma NBR 7180 (ABNT, 2016) como base. Começou com uma parcela da amostra de solo já preparada sendo passada na peneira #40 e colocada em um recipiente onde foi adicionado água destilada aos poucos e misturado uniformemente.

Foi separado aproximadamente 10 g desta mistura e iniciou o processo de rolagem com a palma da mão em cima de uma placa de vidro formando um cilindro. Quando atingido

aproximadamente 3 mm de diâmetro deste cilindro é observado se apareceu fissuras e levado estas partes a estufa para determinação do teor de umidade.

Em situações onde apareceram fissuras antes do diâmetro atingir 3 mm, foi acrescentado mais água e repetido o ensaio. Em casos onde atingiu o diâmetro de gabarito e ainda não havia apresentado fissuras, foi acrescentado um pouco mais de solo e repetido o ensaio.

3.5.5 Teor de umidade higroscópica

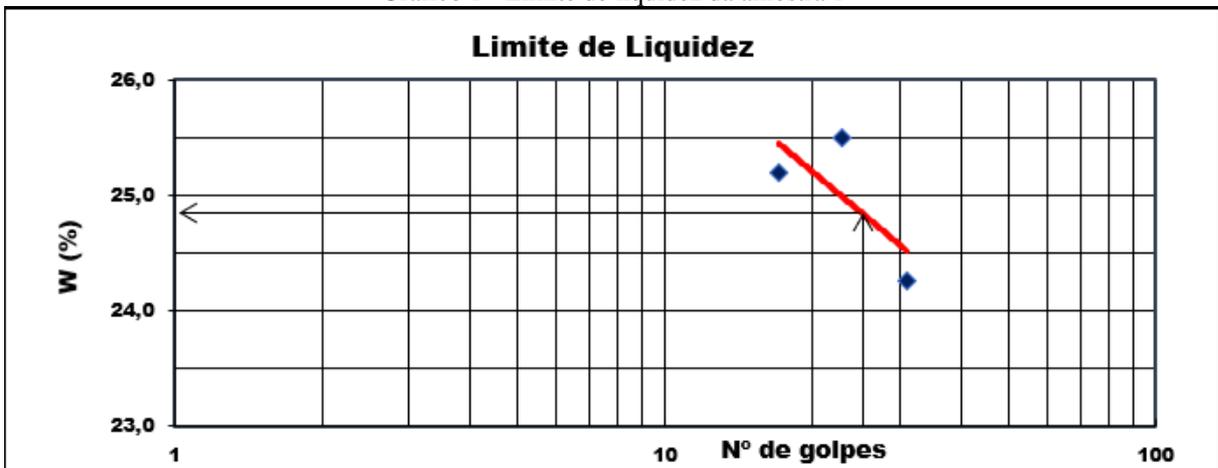
Para determinação do teor de umidade higroscópica foram seguidas as instruções da norma NBR 6457 (ABNT, 2016), onde após as amostras de solo já preparadas, foi pego uma quantidade de aproximadamente 50 g de solo, pesada e foi levada a estufa por no mínimo 24 horas, até a completa secagem. Em seguida, foi pesada novamente e constatada a diferença relacionada a massa de água que foi evaporada.

4 RESULTADOS DA PESQUISA

4.1 LIMITES DE ATTERBERG

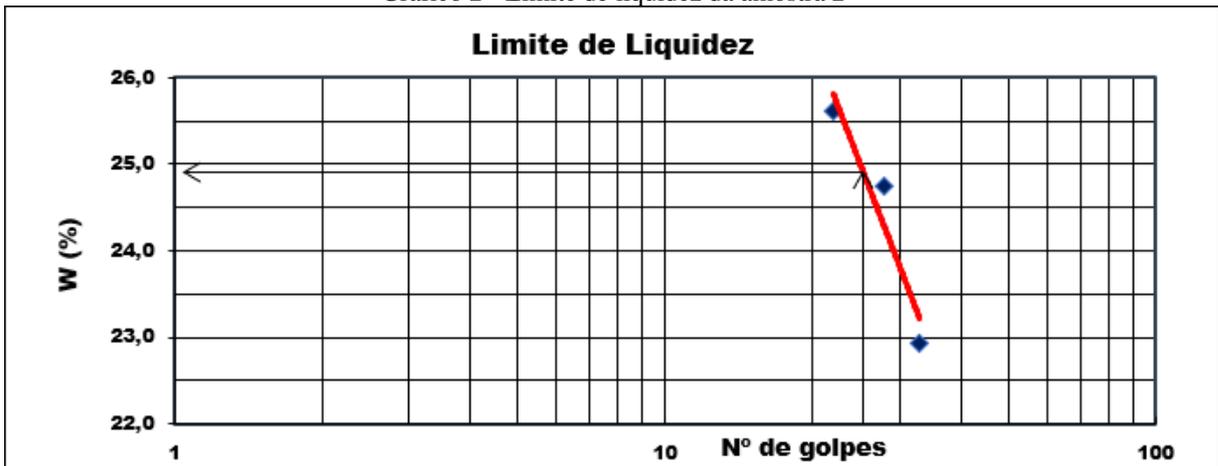
O valor do limite de liquidez (LL) é determinado pelo teor de umidade do solo correspondente ao ponto que a ranhura se fecha com 25 golpes, sendo este valor obtido através do gráfico da reta de escoamento, apresentando o número de golpes no eixo das abscissas em escala logarítmica e o teor de umidade no eixo das coordenadas. Os Gráficos 1, 2 e 3 apresentam o resultado de limites de liquidez para as amostras 1, 2 e 3, respectivamente.

Gráfico 1 - Limite de liquidez da amostra 1



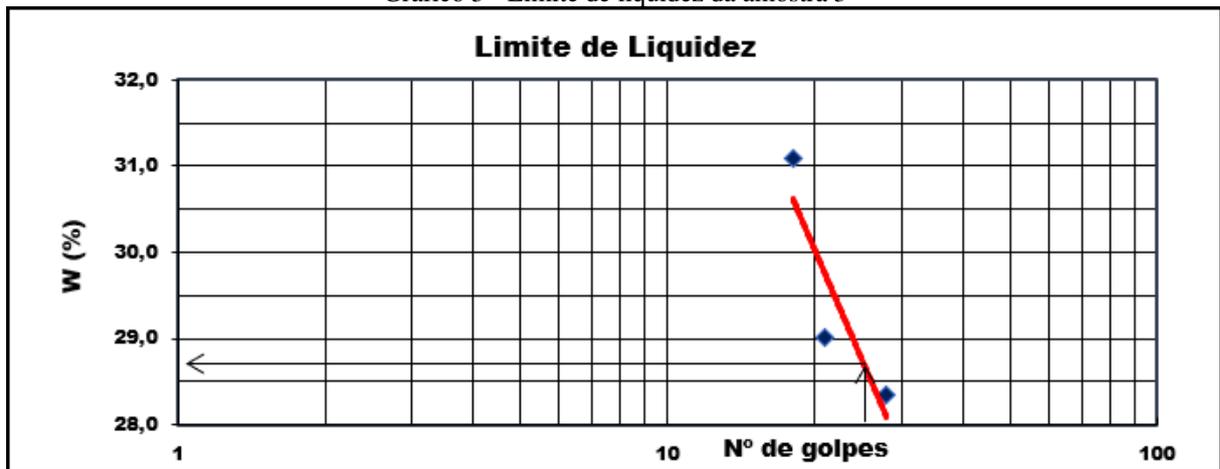
Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 2 - Limite de liquidez da amostra 2



Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 3 - Limite de liquidez da amostra 3



Fonte: Autoria própria (2023).

Assim, através da análise dos gráficos apresentados, determinou-se os valores de limites de liquidez para cada amostra de solo.

O valor do limite de plasticidade é determinado através da média do teor de umidade encontrado de ao menos 3 pontos obtidos pelo ensaio descrito na norma NBR 7180 (ABNT, 2016). Tal valor foi determinado para cada amostra de solo.

A determinação do índice de plasticidade (IP) é dada através da subtração do valor do limite de liquidez (LL) pelo valor do limite de plasticidade (LP). Este processo foi realizado para cada amostra, encontrando os valores apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Resultados dos limites de Atterberg para cada amostra de solo.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
LL (%)	25	25	29
LP (%)	15	8	18
IP (%)	10	17	11

Fonte: Autoria própria (2023).

Observou-se que nas amostras 1 e 3 os valores de IP se encontram no intervalo entre 7 e 15, se caracterizando como solos medianamente plásticos e na amostra 2 o valor de IP é superior a 15, sendo qualificado como solo altamente plástico.

4.2 TEOR DE UMIDADE HIGROSCÓPICO

Os resultados de teor de umidade higroscópico de cada amostra foram obtidos através da média das 3 umidades encontradas, apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Resultado de teor de umidade higroscópico

Solo	Teor de Umidade
Amostra 1	1,8%
Amostra 2	1,5%
Amostra 3	3,2%

Fonte: Autoria própria (2023).

4.3 MASSA ESPECÍFICA

As massas específicas do solo, com fator de correção aplicado para obter valores correspondentes a uma temperatura de 20°C, encontradas em cada etapa do ensaio de cada amostra estão apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Massas específicas a 20°C em cada etapa do ensaio

Solo	$\rho_{s 1}$ (g/cm ³)	$\rho_{s 2}$ (g/cm ³)	$\rho_{s 3}$ (g/cm ³)	$\rho_{s 4}$ (g/cm ³)	$\rho_{s 5}$ (g/cm ³)
Amostra 1	2,650	2,632	2,607	2,552	2,541
Amostra 2	2,744	2,702	2,657	2,605	2,547
Amostra 3	2,707	2,635	2,611	2,586	2,560

Fonte: Autoria própria (2023).

O resultado final de massa específica para cada amostra foi obtido através da média aritmética dos valores mostrados na Tabela 4. Chegando, assim, nos valores exibidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resultado Final de massa específica para cada amostra

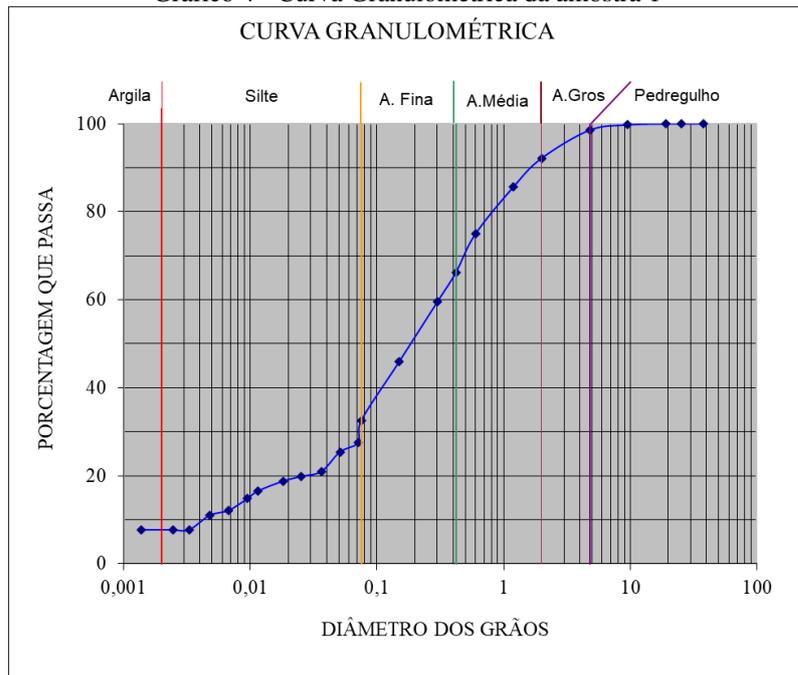
Solo	$\rho_{s 20^{\circ}\text{C}} \text{ Méd}$
Amostra 1	2,596
Amostra 2	2,651
Amostra 3	2,620

Fonte: Autoria própria (2023).

4.4 GRANULOMETRIA

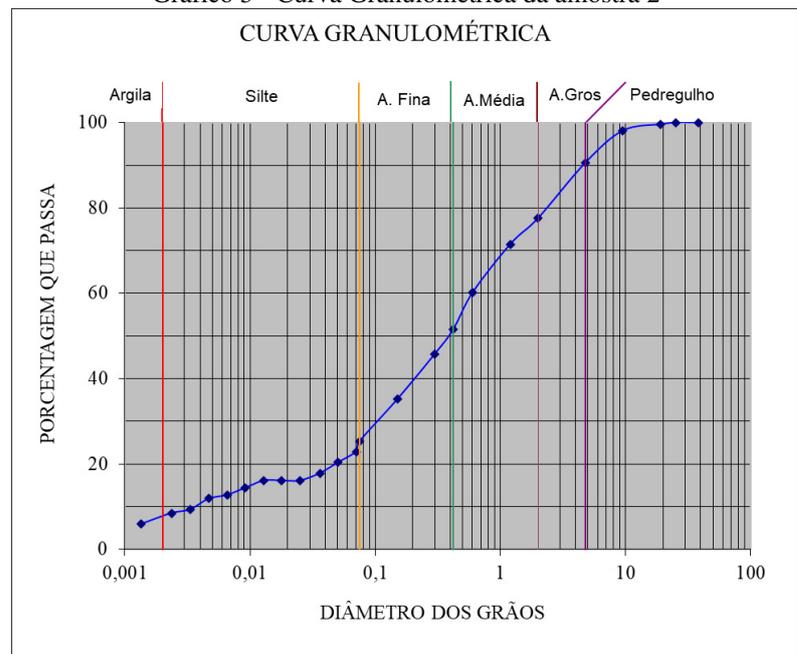
Com os resultados dos ensaios foi possível gerar a curva granulométrica de cada solo, conforme mostradas nos Gráficos 4, 5 e 6.

Gráfico 4 - Curva Granulométrica da amostra 1

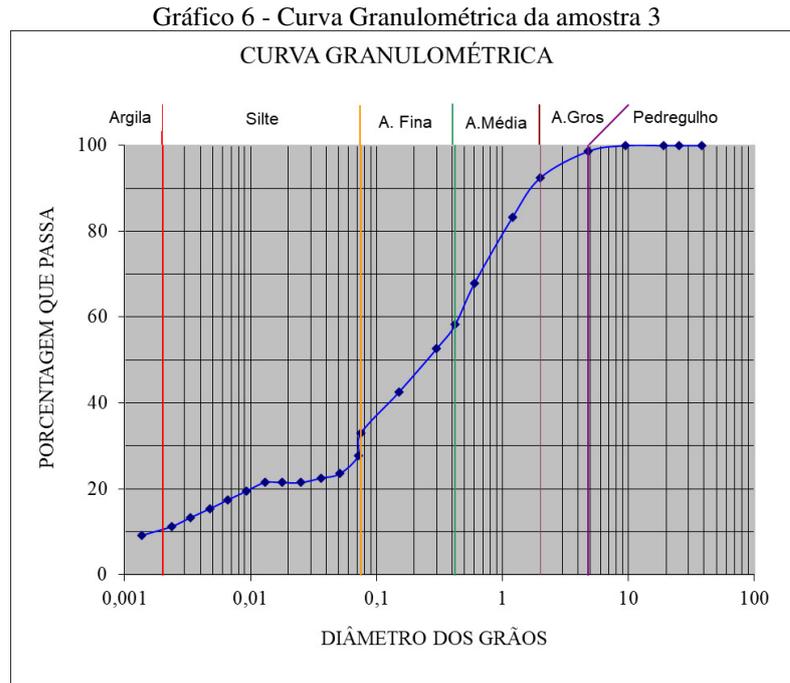


Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 5 - Curva Granulométrica da amostra 2



Fonte: Autoria própria (2023).



A partir das curvas granulométricas e com as definições obtidas na norma é possível classificar o solo estudado. A Tabela 6 apresenta as porcentagens das frações granulométricas de cada amostra de solo.

Tabela 6 - Porcentagens de frações de solo presentes

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Pedregulho	1,4%	9,3%	1,3%
Areia grossa	1,4%	13,1%	6,1%
Areia Média	26,0%	26,1%	34,2%
Areia fina	33,7%	26,2%	25,3%
Silte	24,7%	16,8%	21,7%
Argila	7,7%	8,5%	11,3%

Fonte: Autoria própria (2023).

Assim, notou-se que em todas as amostras as maiores porcentagens são de areia e em segundo lugar de silte. Sendo predominante nas amostras 1 e 2 a areia fina e na amostra 3 a areia média. Assim, a classificação textural das três amostras foi de areia siltosa.

Quanto aos resultados obtidos pelo Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), que além das dimensões dos grãos ainda levou em consideração o comportamento plástico do solo, todas as três amostras foram classificadas como areias argilosas, definida pela sigla SC, vinda do inglês, onde S é *sand* (areia) e C é *clay* (argila), conforme apresentada na Tabela 7.

Tabela 7 - Classificação SUCS

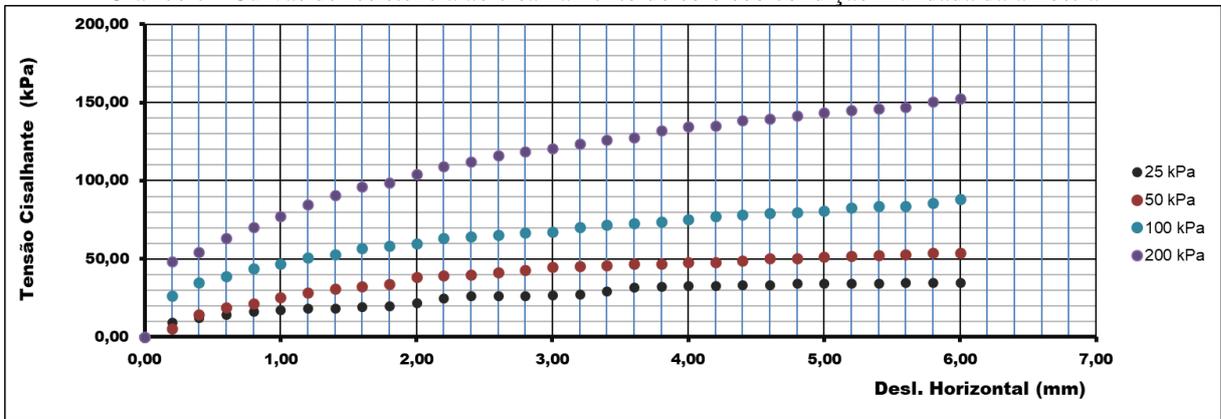
Solo	SUCS
Amostra 1	SC
Amostra 2	SC
Amostra 3	SC

Fonte: Autoria própria (2023).

4.5 CISALHAMENTO DIRETO

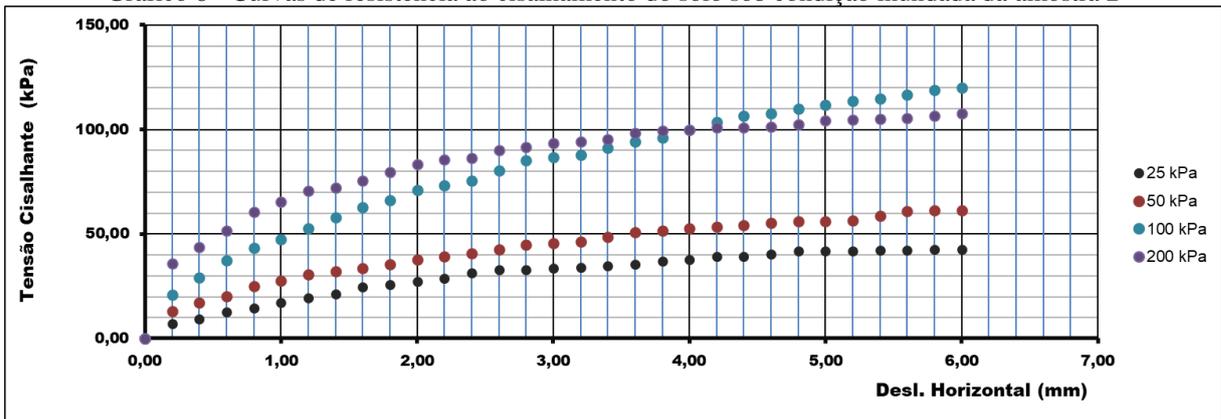
Os Gráficos 7, 8 e 9 ilustram as curvas onde são plotados o deslocamento horizontal versus a tensão cisalhante para as tensões normais aplicadas de 25 kPa, 50 kPa, 100 kPa e 200kPa, todos relacionados com o ensaio realizado sob condição inundada.

Gráfico 7 - Curvas de resistência ao cisalhamento do solo sob condição inundada da amostra 1



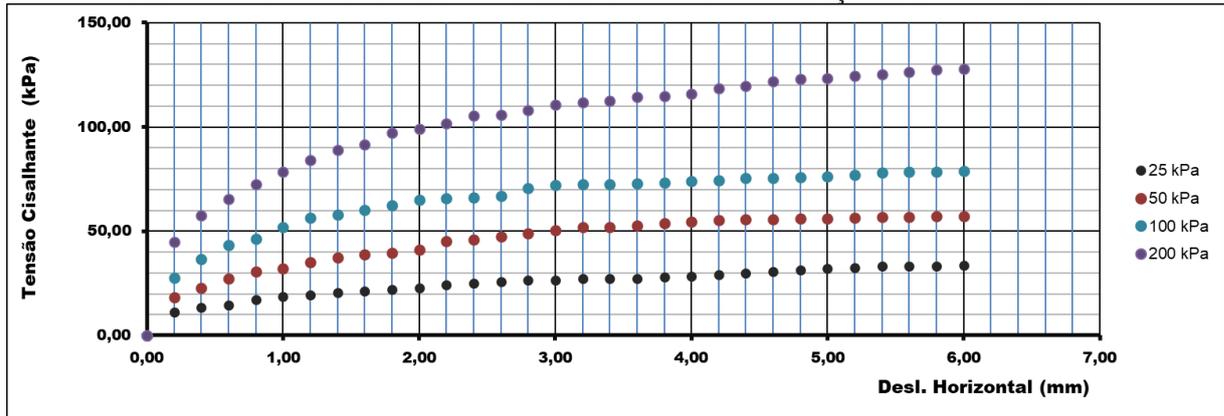
Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 8 - Curvas de resistência ao cisalhamento do solo sob condição inundada da amostra 2



Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 9 - Curvas de resistência ao cisalhamento do solo sob condição inundada da amostra 3



Fonte: Autoria própria (2023).

De acordo com tais gráficos, é possível observar um comportamento de curva semelhante entre as variações de tensões, sem formação de pico em nenhuma delas, o que implica que a ruptura ainda estaria por acontecer. Tal comportamento é exposto no gráfico deslocamento horizontal versus tensão cisalhante de cada amostra de solo.

Além disso, nota-se uma semelhança entre os gráficos das amostras, principalmente entre o Gráfico 7 e o Gráfico 9, apesar do primeiro ser referente ao solo do topo do morro e o segundo da base do morro, mostrando conformidade no comportamento desses solos.

No Gráfico 8 é possível verificar um comportamento diferente dos demais, em que a curva referente a tensão normal aplicada de 100 kPa ultrapassa a curva correspondente a tensão normal aplicada de 200 kPa, notando-se uma incoerência de resultados desta última curva citada.

Na Tabela 8 são informados os valores exatos das tensões normais aplicadas, bem como os valores das tensões cisalhantes de ruptura para cada amostra de solo.

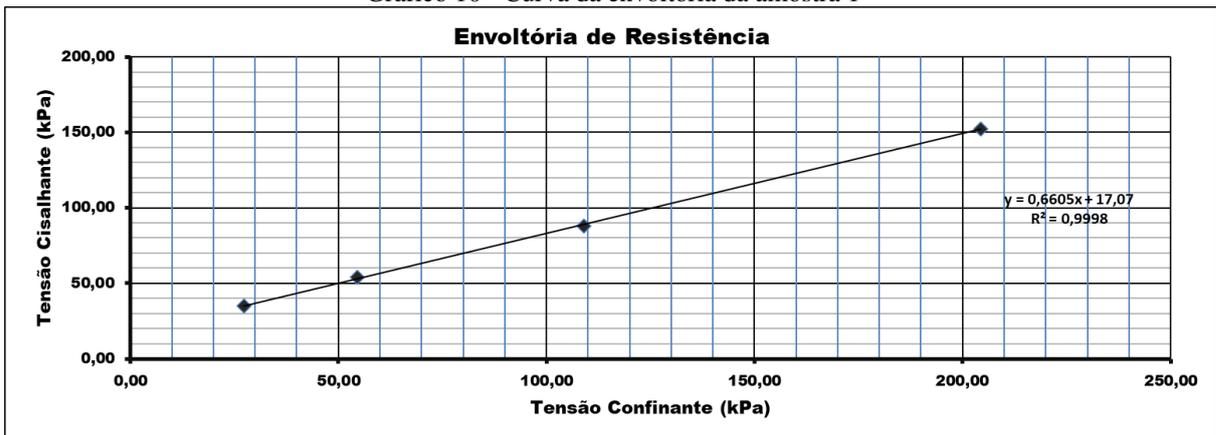
Tabela 8 - Valores exatos de tensões normais e cisalhantes de ruptura aplicadas nas amostras 1, 2 e 3

Tensão Confinante (kPa)		27,25	54,5	109	204,375
Tensão Cisalhante de Ruptura (kPa)	Amostra 1	34,95	53,83	88,08	152,40
	Amostra 2	42,64	61,52	120,24	107,66
	Amostra 3	33,56	57,32	79,00	127,93

Fonte: Autoria própria (2023).

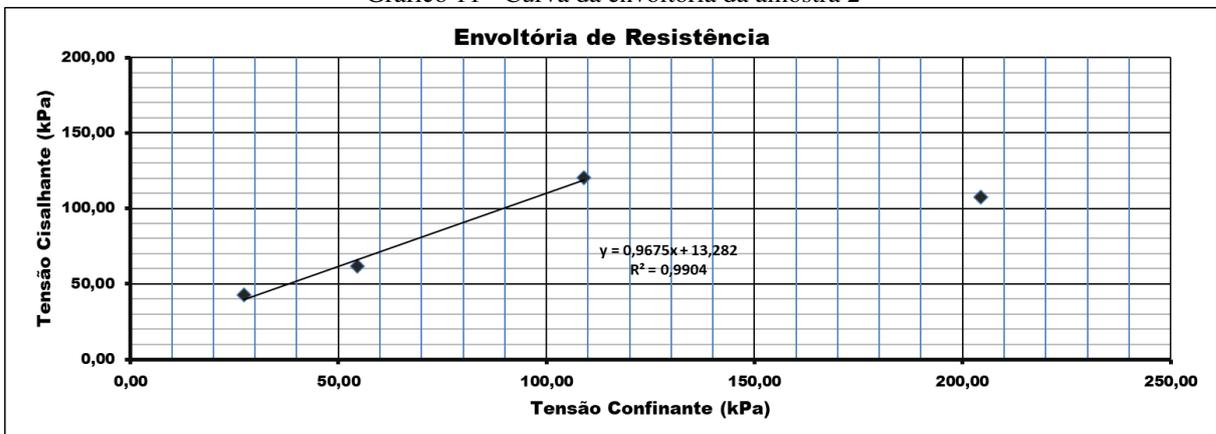
Com os valores das tensões normais aplicadas e suas tensões cisalhantes de ruptura correspondentes, foi possível gerar a envoltória de resistência ao cisalhamento do solo para cada amostra estudada considerando o critério de Coulomb, conforme apresentadas nos Gráficos 10, 11 e 12.

Gráfico 10 - Curva da envoltória da amostra 1



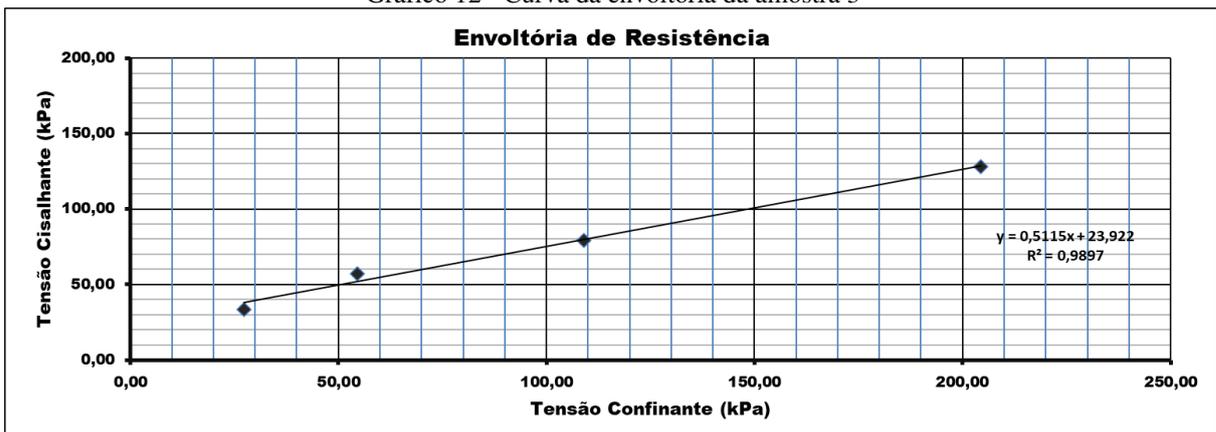
Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 11 - Curva da envoltória da amostra 2



Fonte: Autoria própria (2023).

Gráfico 12 - Curva da envoltória da amostra 3



Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores dos parâmetros de resistência ao cisalhamento são obtidos através da função gerada por cada reta, onde o ângulo de atrito interno é o ângulo que a reta faz com o eixo da tensão confinante e a coesão é o coeficiente linear da reta.

Devido a incoerência já citada dos resultados de tensões cisalhante apresentadas no Gráfico 8, o ponto gerado pela tensão confinante de 200 kPa do Gráfico 11 foi retirada da influência da reta da envoltória da amostra 2, gerando resultados mais precisos e coerentes, visto que 3 pontos coerentes são mais que suficientes para a formação da envoltória de resistência de um solo.

Pode-se notar tal coerência observando os coeficientes de correlação (R^2) gerados para as envoltórias de cada amostra, onde todos apresentam valores superiores a 0,98, que são números satisfatórios.

Por meio das equações geradas pelos gráficos de envoltória de cada amostra foi possível determinar os parâmetros de resistência ao cisalhamento, apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Parâmetros de resistência ao cisalhamento do solo.

	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
Ângulo de atrito interno	33,4°	44,1°	27,1°
Coesão (kPa)	17	13	24
Equação da reta	$y = 0,6605x + 17,07$	$y = 0,9675x + 13,282$	$y = 0,5115x + 23,922$
R²	0,9998	0,9904	0,9897

Fonte: Autoria própria (2023).

Os valores dos ângulos de atrito interno obtidos para as três amostras estudadas se encontram dentro dos intervalos de valores médios citados por Das (2007) e Pinto (2006) para solos arenosos.

Quando comparados os valores obtidos com os intervalos de valores esperados por Das (2007), a amostra 1 se encaixa no intervalo de areias médias de grãos redondos ou areias fofas de grãos angulares, a amostra 2 em areias compactas de grãos angulares e a amostra 3 em areias fofas de grãos redondos.

Já comparando aos valores esperados por Pinto (2006), as amostras 1 e 3 se encontram no intervalo esperado para areias de grãos redondos e a amostra 2 se encontra no intervalo esperado para areais de grãos angulares.

Porém, foi constatado que todas as amostras de solos estudadas possuem grãos arredondados, estando o ângulo de atrito interno da amostra 2 a aproximadamente 16% acima dos valores esperados por Das (2007) e a aproximadamente 10% acima dos valores esperados por Pinto (2006), apresentando maior inclinação da reta da envoltória.

Assim, é notório que os comportamentos dos solos dependem muito mais do que uma classificação textural, estes também sofrem influência de fatores climáticos, rocha mãe, agentes químicos, umidade, presença de matéria orgânica, entre outros. Deste modo, podemos

evidenciar a variação do comportamento do solo a medida das diversidades de situações as quais esse está submetido e a relevância do estudo do solo.

5 CONCLUSÃO

A pesquisa baseou-se na determinação dos parâmetros de resistência ao cisalhamento e na realização da caracterização do solo, através de ensaios laboratoriais desenvolvidos de forma satisfatória.

De forma resumida, foram obtidos os resultados de caracterização para a amostra 1 para granulometria de 1,4% de pedregulho, 61,1% de areia, 24,7% de silte e 7,7% de argila, caracterizada texturalmente como areia siltosa, valores de umidade, massa específica a 20°C e Limites de Atterberg de $w=1,8\%$, ρ_s 20°C=2,596 g/cm³, LL=25%, LP=15% e IP=10%, respectivamente, sendo classificada pelo método SUCS como SC (areia argilosa).

Para a amostra 2 foram obtidos os valores para granulometria de 9,3% de pedregulho, 65,4% de areia, 16,8% de silte e 8,5% de argila, caracterizada texturalmente como areia siltosa e valores de umidade, massa específica a 20°C e Limites de Atterberg de $w=1,5\%$, ρ_s 20°C=2,651 g/cm³, LL=25%, LP=8% e IP=17%, respectivamente, sendo classificada pelo método SUCS como SC (areia argilosa).

E para a amostra 3 foram obtidos os resultados para granulometria de 1,3% de pedregulho, 65,6% de areia, 21,7% de silte e 11,3% de argila, caracterizada texturalmente como areia siltosa e valores de umidade, massa específica a 20°C e Limites de Atterberg de $w=3,2\%$, ρ_s 20°C=2,620 g/cm³, LL=29%, LP=18% e IP=11%, respectivamente, sendo classificada pelo método SUCS como SC (areia argilosa).

Por meio do ensaio de cisalhamento direto em amostras indeformadas sob condição inundada foram obtidos os valores para o ângulo de atrito interno e intercepto coesivo, respectivamente, de 33,4° e 17,1 kPa da amostra 1, 44,1° e 13,3 kPa para a amostra 2 e 27,1° e 23,9 kPa para a amostra 3.

Em uma sucinta análise pode-se notar que os valores de ângulos de atrito interno obtidos se encontraram dentro dos intervalos comparativos, com exceção do solo da amostra 2 que apresentou valor de ângulo de atrito interno superior a faixa esperada para areias de grãos redondos, se encaixando no intervalo esperado para areias de grãos angulares.

Vale ressaltar a importância do estudo geotécnico do solo, onde os resultados obtidos nesta pesquisa caracterizam o solo e delimitam a sua resistência suportada, sendo informações necessárias em dimensionamentos de fundações, análises de estabilidade do solo e dimensionamentos de estruturas de contenção.

Também pode-se observar a escassez do estudo do solo do sertão da Paraíba, em específico, da região de Cajazeiras-PB. Em virtude disso, recomenda-se a realização de futuras pesquisas com base em ensaios de cisalhamento direto, como também a realização de outros ensaios como o triaxial, para fins representativos e comparativos a respeito do solo da região, como também pesquisas analisando a estabilidade do solo ou um exemplo de dimensionamento de fundações adequadas para a região.

REFERÊNCIAS

- AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS-ASTM. **ASTM D3080/D3080-11**: Standard Test Method for Direct Shear Test of Soils Under Consolidated Drained Conditions. In: Annual Book of ASTM Standarts, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Solos e rochas - Terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, mai. 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6457**: Amostras de solo — Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro: ABNT, abr. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6458**: Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm — Determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, set. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 6459**: Solo — Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro: ABNT, abr. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7180**: Solo — Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro: ABNT, mar. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 7181**: Solo — Análise granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, set. 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS-ABNT. **NBR 9604**: Abertura de poço e trincheira de inspeção em solo, com retirada de amostras deformadas e indeformadas — Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, jan. 2016.
- BIAVATI, Franciel. **Determinação e análise dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo residual de basalto do Campus Erechim-RS em condições naturais e inundadas**. 2017. 71 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, Erechim-RS, 2017.
- BRAIDA, João Alfredo; REICHERT, José Miguel; REINERT, Dalvan José; SOARES, José Mário Doleys. **Coesão e atrito interno associados aos teores de carbono orgânico e de água de um solo franco arenoso**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 37, ed. 6, p. 1646-1653, nov-dez 2007.
- CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas aplicações: fundamentos**. 6. ed. rev. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1988. v. 1.
- DAS, Braja M. **Fundamento de engenharia geotécnica**. 6. ed. São Paulo: Thomson Learning, 2007. ISBN 85-221-0548-0.
- DIEMER, Francielle; RAMBO, Dimas; SPECHT, Luciano; POZZOBON, Cristina. **Propriedades geotécnicas do solo residual de basalto da região de Ijuí/RS**. Teoria e

Prática na Engenharia Civil, n.12, p.25-36, Outubro, 2008.

MATTÉ, Felipe. **Determinação preliminar dos parâmetros de resistência ao cisalhamento de um solo residual do Campus UFFS-Erechim/RS.** 2017. 45 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Bacharelado em Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul – UFFS, Erechim-RS, 2017.

PINTO, Carlos de Sousa. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 Aulas.** 3. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. ISBN 978-85-86238-51-2.

ROCHA, Wellington Willian; DIAS JUNIOR, Moacir de Souza; LIMA, José Maria; MIRANDA, Elka Élice Vasco de; SILVA, Arystides Resende. **Resistência ao cisalhamento e grau de intemperismo de cinco solos na região de Lavras (MG).** Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]. 2002, vol.26, n.2, p.297-303. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832002000200002>. Acesso em: 03 jan. 2023.

SILVA, Apolino José Nogueira da.; CARVALHO, Fabíola Gomes de. **Coesão e resistência ao cisalhamento relacionadas a atributos físicos e químicos de um latossolo amarelo de tabuleiro costeiro.** Rev. Bras. Ciênc. Solo [online]. 2007, vol.31, p.853-862. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832007000500003>. Acesso em: 04 jan. 2023.

VIECILI, Cristiano. **Determinação dos parâmetros de resistência do solo de Ijuí a partir do ensaio de cisalhamento direto.** 76 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Departamento de Tecnologia, Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí - RS, 2003.

ZANARDO, Bruno Felipe. **Análise de Estabilidade de Taludes de Escavação em Mina de Bauxita.** 2014. 38 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação) - Bacharelado em Engenharia de Minas, Universidade Federal de Alfenas, Campus Poços de Caldas, 2014.

Documento Digitalizado Ostensivo (Público)

Trabalho de Conclusão de Curso

Assunto: Trabalho de Conclusão de Curso
Assinado por: Luanda Sales
Tipo do Documento: Tese
Situação: Finalizado
Nível de Acesso: Ostensivo (Público)
Tipo do Conferência: Cópia Simples

Documento assinado eletronicamente por:

- Luanda Dantas Sales, ALUNO (201812200008) DE BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL - CAJAZEIRAS, em 15/03/2023 17:42:07.

Este documento foi armazenado no SUAP em 15/03/2023. Para comprovar sua integridade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifpb.edu.br/verificar-documento-externo/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 779759
Código de Autenticação: d5a1be40f5

