



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE - UFAC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA –
CITA**



**ESTUDO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO PARA
MÍNIMA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM UMA
BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA NO
COMPLEXO PEIXE DA AMAZÔNIA-ACRE**

ERISSON ANTONIO PEREIRA DE ARAÚJO



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE - UFAC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA –

CITA



ERISSON ANTONIO PEREIRA DE ARAÚJO

**ESTUDO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO PARA A
MÍNIMA PERCOLAÇÃO DE ÁGUA EM UMA
BARRAGEM DE TERRA HOMOGÊNEA NO
COMPLEXO PEIXE DA AMAZÔNIA-ACRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, da Universidade Federal do Acre, como requisito para a obtenção do grau de **Mestre em Ciência e Inovação Tecnológica**.

Área de Concentração: Ciência e Inovação Tecnológica

Linha de Pesquisa: Tecnologia dos Recursos Naturais

Orientador: PROF. DR. JOSIMAR BATISTA FERREIRA

Co-orientador: PROF. DR. CAMILO LELIS DE GOUVÊIA

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da UFAC

A663e Araújo, Erisson Antonio Pereira de, 1974 -

Estudo da compactação do solo para a mínima percolação de água em uma barragem de terra homogênea no complexo Peixe da Amazônia-Acre / Erisson Antonio Pereira de Araújo; Orientador: Dr. Josimar Batista Ferreira e Coorientador: Dr. Camilo Lelis de Gouvêia. -2022.

71 f.: il.; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Acre, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia para a Amazônia, Rio Branco, 2022.
Inclui referências bibliográficas.

1. Compactação. 2. Umidade ótima. 3. Segurança de barragens. I. Ferreira, Josimar Batista (Orientador). II. Gouvêia, Camilo Lelis de (Coorientador). III. Título.

CDD: 509

Bibliotecária: Nádia Batista Vieira CRB-11º/882



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE - UFAC
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
INOVAÇÃO E TECNOLOGIA PARA A AMAZÔNIA –
CITA



PPG-CITA

ERISSON ANTONIO PEREIRA DE ARAÚJO

**Estudo da Compactação do solo para mínima percolação de água em uma
barragem de terra homogênea no complexo peixe da Amazônia-Acre**

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 23 / 09 / 2022

Dr. Camilo Lelis de Gouvêia
Universidade Federal do Acre

Dr. Adailton de Souza Galvão
Universidade Federal do Acre

Dr. Lucas Martins Lopes
Universidade Federal do Acre

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar pelo dom da vida, aos meus pais Francisco Marcelino de Araújo e Maria Evangelina Pereira de Araújo, que fizeram de tudo para me tornar a pessoa que sou, pois sem a educação recebida por eles e o sacrifício que fizeram para me manter nos trilhos do bem, com certeza não teria chegado até aqui.

À minha esposa amada que sempre deu incentivo e base para que eu pudesse estudar e trabalhar ao mesmo tempo, cuidando de nossas três filhas e de nossa casa.

Faço aqui também os meus agradecimentos ao meu Orientador, Prof Dr. Josimar Batista Ferreira, e ao meu Co-orientador, Prof. Dr. Camilo Lelis de Gouvêia, além de excelentes educadores, seres humanos fantásticos que me orientaram nessa pesquisa ajudando a traçar os melhores caminhos das idéias, com paciência e dedicação.

Agradeço ao Governo Federal através da Universidade Federal do Acre pela iniciativa de lançar o Programa de Pós-Graduação em Ciência, Inovação e Tecnologia que dá a oportunidade a pessoas de todas as classes para ajudar no desenvolvimento do estado do Acre e do país com tecnologia e desenvolvimento sustentável em projetos para a melhoria da sociedade.

Agradeço ao Prof. Dr. José Genivaldo do Vale Moreira, professor do Programa de Pós-Graduação CITA, um excelente educador, paciente e comprometido com o ensino, que compartilhou conhecimentos, principalmente do uso de ferramentas tecnológicas para obtenção de resultados práticos.

A todo corpo docente do curso, em Especial à Prof.^a Dr.^a Berenice Kussumoto de Alcântara, excelente educadora que sempre nos atendeu muito bem, compromissada em resolver os problemas que ocorreram no decorrer do curso, meus agradecimentos!

Aos colegas de Curso que sempre unidos e determinados ajudando uns aos outros em relação às dúvidas e compartilhando conhecimentos, o que nos fez melhores alunos e conseqüentemente melhores para ajudar no desenvolvimento do nosso estado do Acre e de nosso País.

Glória a Deus!

RESUMO

O crescimento populacional e o desenvolvimento das cidades, principalmente com a revolução industrial, a partir do século XVIII, fizeram surgir grandes indústrias e provocaram a expansão do agronegócio, além de aumentar a necessidade de reservar água em grandes e pequenos reservatórios denominados barragens. Assim, essa pesquisa teve o objetivo de estudar a compactação do núcleo maciço compactado de uma barragem de terra para a mínima percolação de água, pois a infiltração é indesejável porque poderia levar o núcleo ao colapso. Esse estudo poderá ainda auxiliar pesquisadores, produtores e técnicos a determinar o melhor grau de compactação para o controle de vazão no solo do núcleo, considerando-se o solo característico do Estado do Acre. Analisaram-se os aspectos de caracterização do solo, de formação sedimentar, oriundo das eras geológicas de descendência Andina e a invasão do oceano no Continente tornando a maioria do solo amazônico sedimentar, com predominância da argila de material fino, de baixa resistência. Analisou-se o núcleo de terra para a verificação da resistência e estabilidade em função da umidade e densidade do solo compactado. A parte prática desse trabalho foi coletar o solo em uma barragem de terra já construída, fazer a análise das propriedades granulométricas, classificar o solo juntamente com os ensaios de compactação e verificar a sua permeabilidade para indicar a melhor energia de compactação para este tipo de obra, seja ela com energia normal, intermediária ou modificada, em função da quantidade de água adicionada para obter e diminuir o número maior de vazios, observando-se a melhor densidade até chegar na umidade ótima de projeto, de forma a reduzir a permeabilidade do solo e aumentando a segurança do núcleo maciço compactado. Concluiu-se que o grau de compactação existente é inferior àquele de umidade ótima feita em laboratório, o que pode elevar a insegurança da estabilidade da barragem e exigir a vigilância frequente com a implantação de medidas de contingência e acompanhamento técnico da obra.

Palavras-chave: Compactação. Umidade ótima. Segurança de Barragens.

ABSTRACT

Population growth and the development of cities, especially with the industrial revolution, from the 18th century onwards, gave rise to large industries and provoked the expansion of agribusiness, in addition to increasing the need to reserve water in large and small reservoirs called dams. Thus, this research aimed to study the compaction of the massive compacted core of an earth dam to the minimum percolation of water, since infiltration is undesirable because it could lead to the collapse of the core. This study can also help researchers, producers and technicians to determine the best degree of compaction for the control of flow in the soil of the nucleus, considering the soil characteristic of the State of Acre. Aspects of soil characterization, sedimentary formation, from the geological eras of Andean descent and the invasion of the ocean on the continent were analyzed, making most of the Amazonian soil sedimentary, with a predominance of clay of fine material, of low resistance. The earth core was analyzed to verify the strength and stability as a function of the moisture and density of the compacted soil. The practical part of this work was to collect the soil in an earth dam already built, analyze the granulometric properties, classify the soil together with the compaction tests and verify its permeability to indicate the best compaction energy for this type of work, whether with normal, intermediate or modified energy, depending on the amount of water added to obtain and reduce the largest number of voids, observing the best density until reaching the optimal design moisture, in order to reduce soil permeability increasing the security of the compacted massive core. It was concluded that the existing degree of compaction is lower than that of optimal humidity, the compaction carried out in the laboratory, which can increase the insecurity of the dam's stability and require frequent surveillance with the implementation of contingency measures and technical monitoring of the work.

Keywords: Compaction. Great humidity. Dam Safety.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Local de coleta de material “Peixes da Amazônia S/A”,.....	20
Figura 2 - Deslocamento para campo local de coleta.....	21
Figura 3 – Ponto de coleta do material da pesquisa	21
Figura 4 - Local preciso onde foi feita a coleta do material para pesquisa.	22
Figura 5 – Modelo de broca utilizado para escavação	22
Figura 6 – Procedimentos para coleta do material	23
Figura 7 – Peneiramento das amostras $\varnothing = 4,8$ mm.....	24
Figura 8 - Pesagem e ensacamento da amostra para ensaio de granulometria.....	25
Figura 9 - Procedimento para peneiramento do solo - granulometria.....	25
Figura 10 - Resultado granulometria por peneiramento.....	27
Figura 11- Halph Proctor criador do Método de Proctor	28
Figura 12 - Ilustração da composição do solo	29
Figura 13 - Cilindros e soquetes para compactação do solo	30
Figura 14 - Modelo de cilindro e soquete Proctor da AASHTO.....	30
Figura 15 – Curva de compactação do solo.....	32
Figura 16- Preparação das amostras para o ensaio de compactação	34
Figura 17 – Armazenagem do solo para realização do ensaio de compactação.....	35
Figura 18 – Processo de umidificação do solo	36
Figura 19 – Processo de umidificação do solo.....	36
Figura 20 – Preparação do conjunto cilindro mais corpo de prova para pesagem	37
Figura 21- Processo de retirada da umidade do solo através da estufa	37
Figura 22 – Extração do corpo de prova	38
Figura 23 - Amostras do solo retiradas da estufa	39
Figura 24 – Modelo de curva de compactação na energia modificada	42
Figura 25- Cilindro de cravação e haste para coleta da amostra	43
Figura 26 - Raspagem do terreno para encravação do cilindro.....	44
Figura 27 - Escavação do cilindro de cravação, remoção e embalagem.....	44
Figura 28 - Preparação e pesagem do conjunto cilindro de cravação	45
Figura 29- Extração do corpo de prova do cilindro de cravação e pesagem.....	45
Figura 30 - Amostras para obtenção da umidade do solo em laboratório.....	47
Figura 31 - Modelo de Permeâmetro com carga variável	49

Figura 32 - Ensaio de permeabilidade do solo	49
Figura 33 - Modelo do gráfico volume em (ml) em função do tempo em dias (d)	50
Figura 34 – Preparação do Corpo de prova no permeâmetro	51
Figura 35 - Argila betonita utilizado para impermeabilizar o corpo de prova	52
Figura 36 – Impermeabilização do corpo de prova com betonita	52
Figura 37- Esquema do ensaio de permeabilidade do solo por gravidade	53
Figura 38 - Ensaio de permeabilidade do corpo de prova na energia modificada	54
Figura 39 – Vazão no corpo de prova com compactação de energia modificada	54
Figura 40 – Preparação do corpo de prova coletado na barragem (<i>in situ</i>)	55
Figura 41 - Corpo de prova é envolvido com material de agregado graúdo	55
Figura 42 - Esquema do ensaio de permeabilidade da amostra indeformada	56
Figura 43 - Ensaio de permeabilidade do solo amostra indeformada	56
Figura 44 - Ensaio de permeabilidade do solo <i>in situ</i> (amostra indeformada)	57
Figura 45 - Resultado granulometria por peneiramento	59
Figura 46 - Curva de compactação na energia modificada	62
Figura 47- Esquema do ensaio de permeabilidade do solo por gravidade	64
Figura 48 - Ensaio de permeabilidade do corpo de prova na energia modificada	65
Figura 49 – Vazão no corpo de prova com compactação de energia modificada	65
Figura 50 - Esquema do ensaio de permeabilidade da amostra indeformada	66
Figura 51 - Ensaio de permeabilidade do solo amostra indeformada	67
Figura 52 - Ensaio de permeabilidade do solo <i>in situ</i> (amostra indeformada)	67
Figura 53 – Comparação das vazões percoladas	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Modelo de tabela para análise granulométrica por peneiramento.....	26
Tabela 2 - Energia de compactação de acordo com cilindros e soquetes.....	31
Tabela 3 - Energia de compactação em função do soquete e número de golpes.....	40
Tabela 4 – Modelo de tabela de cálculo do peso específico do solo (γ_n).....	40
Tabela 5 - Modelo de tabela para cálculo da umidade do solo (w).....	41
Tabela 6 - Modelo de tabela para o cálculo do peso específico seco (γ_d).....	41
Tabela 7 – Modelo de tabela para plotagem da curva de compactação	41
Tabela 8 – Cálculo da umidade do solo da amostra indeformada.....	47
Tabela 9 – Modelo de tabela para determinação da massa específica seca do solo	48
Tabela 10- Análise granulométrica por peneiramento	58
Tabela 11 - Resumo do ensaio de granulometria	58
Tabela 12 - Cálculo do peso específico do solo (γ_n).....	60
Tabela 13 - Cálculo da umidade do solo (w).....	61
Tabela 14 - Cálculo do peso específico seco (γ_d)	61
Tabela 15 – Valores para plotagem da curva de compactação.....	61
Tabela 16- Cálculo da umidade do solo da amostra indeformada.....	63
Tabela 17 - Determinação da massa específica seca do solo	63
Tabela 18 – Resultados das densidades de compactação das amostras.....	64

LISTA DE ABREVEATURAS

A - água
C - Cápsula
cm³ - Centímetro cúbico
cm - Centímetro
d - Dias
Ec - Energia de compactação
Fc - Fator de correção
g - Gramas
g/cm³ - Gramas por centímetro cúbico
H - Umidade
Hm - Umidade média
Km - Quilômetro
Kg - Quilogramas
S° - Latitude sul
S - Solo
Vol - Volume
m - Metro
mm - Milímetros
ml - Mililitro
n.º - Número
Nc - Número de camadas
W - Oeste
Wot - Umidade ótima

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

A.A.S.H.O. - American Association of State Highway Officials

BR – Brasil Rodovia

CBR - California Bearing Ratio

NBR - Norma Brasileira

LET - Laboratório de Ensaio Tecnológico

OCDE - Organização para a Cooperação e o Desenvolvimento Econômico

UFAC – Universidade Federal do Acre

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 REVISÃO DA LITERATURA	16
3 JUSTIFICATIVA	18
4 OBJETIVOS	19
4.1 OBJETIVO GERAL	19
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	19
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
5.1 COLETA DO MATERIAL	20
5.2 ENSAIO DE GRANULOMETRIA.....	23
5.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO	27
5.4 CRIADOR DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO, MÉTODO DE PROCTOR	28
5.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO – EQUAÇÕES.....	31
5.6 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE COMPACTAÇÃO..	34
5.7 MAZENAMENTO E EMBALAGEM DAS AMOSTRAS.....	34
5.8 EXECUÇÃO DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO.....	35
5.9 CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE COMPACTAÇÃO	39
5.10 ENSAIO CILINDRO DE CRAVAÇÃO.....	42
5.11 EXECUÇÃO DO ENSAIO DO CILINDRO DE CRAVAÇÃO EM CAMPO.....	43
5.12 EXECUÇÃO DO ENSAIO EM CILINDRO DE CRAVAÇÃO EM LABORATÓRIO.....	45
5.13 DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO SECO NA BARRAGEM.....	46
5.14 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DO SOLO	48
5.15 APRESENTAÇÃO DO ENSAIO.....	48

5.16 ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM ENERGIA MODIFICADA.....	51
5.17 VAZÃO NO CORPO DE PROVA NA ENERGIA MODIFICADA.....	53
5.18 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DA AMOSTRA INDEFORMADA	55
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
7 CONCLUSÕES	69
8 REFERÊNCIAS.....	70

1 INTRODUÇÃO

A água é um elemento químico indispensável à manutenção da vida e o que se vê hoje no planeta é que a cada dia tem-se menos dessa substância preciosa no estado potável para consumo humano. Há a necessidade premente de manter esse bem comum aos seres vivos, principalmente, nos dias atuais onde a demanda é a cada vez maior.

O crescimento populacional e o desenvolvimento das cidades principalmente com o advento da revolução industrial a partir do século XVIII, fizeram surgir grandes indústrias e provocaram a expansão do agronegócio, além de aumentar a necessidade de se reservar água em grandes e pequenas barragens, entre elas: de terra (açudes), de concreto, mista, enrocamento, etc. O principal constituinte de uma barragem de terra, referência nessa pesquisa, é o seu núcleo impermeável, chamado comumente maciço, para a contenção da água. Tendo-se também os drenos, vertedor, etc.

Assim essa pesquisa teve o objetivo de estudar uma barragem de terra, seu tipo de solo e o grau de compactação para a mínima infiltração de água no maciço, de forma a auxiliar pesquisadores, produtores e técnicos a fazer o controle de vazão no solo do maciço através do controle da umidade do solo característico do estado do Acre.

Para a realização da pesquisa foi feita a coleta do solo de uma barragem já construída, a preparação para ensaios e sua caracterização obedecendo-se a Norma Brasileira NBR 6457:2016. Em seguida fez-se a compactação do solo através de energias de compactação do corpo de prova na umidade ótima e posterior ensaio de permeabilidade deste solo para verificação da vazão por gravidade da água em um determinado tempo, utilizando-se um permeâmetro. Por fim, foram feitas as anotações da menor vazão de acordo com a energia de compactação do solo estudado.

O solo acreano é de formação sedimentar, de diversas camadas mineralógicas, oriundo do carreamento dos diversos minerais das rochas andinas, através do vento e pela movimentação dos rios; isso traz o desafio na construção civil de rodovias e grandes obras de engenharia como as barragens (ARAÚJO, *et al.*, 2011)

As barragens do Acre, em sua grande maioria, estão situadas na zona rural, em fazendas, e voltadas mais para piscicultura e pecuária. As catalogadas são 1658 barragens (RODRIGUES, 2019). Com as crises de escassez hídrica porque o país passa, frequentemente, e a expansão do agronegócio no estado do Acre, essa pesquisa visa

garantir a construção correta das novas barragens reduzir os riscos ambientais em caso de rompimento das antigas, com a verificação de sua segurança.

2 REVISÃO DA LITERATURA

A engenharia e a sociedade, como um todo, buscam soluções para auxiliar a vida do cidadão em busca de alternativas para o melhor uso dos recursos naturais, com ideias para ativar a economia, visando principalmente o bem estar das pessoas e reduzir os custos das atividades (GAGLIARDO, 2017). Assim esta pesquisa busca uma melhor solução para uma das atividades essenciais na vida do homem que é a obtenção de água e que influencia diretamente o bem estar da sociedade.

Essa atividade traz à tona o estudo do solo e propõe a melhor solução para análise dos processos de compactação e instabilidade de barragens de terra, considerando a umidade ideal em relação à densidade do solo com vistas à estabilidade do maciço, auxiliando na execução do processo de construção das barragens de solo e reduzindo dos riscos acidentais na sua possível ruptura tema este que está ligado a esta pesquisa (GARCIA, 2021).

Uma barragem de terra é constituída, basicamente, por um núcleo maciço impermeável que forma uma barreira de contenção transversal ao fluxo da água, provocando o seu acúmulo a montante. Ela deverá ainda conter drenos verticais e horizontais que auxiliam na retirada da água de percolação sem causar danos à estrutura.

A indicação correta do local de construção dessas obras de arte correntes é indispensável para a produção agrícola seja ela, de irrigação, de armazenamento de água para o consumo dos animais, sempre visando a economicidade dos materiais empregados na sua construção, bem como a análise do solo compactado na barragem, tem como a finalidade o fato de que a compactação do solo em uma barragem é importante para segurança das barragens (OCDE, 2015).

Na análise da compressibilidade dos solos, principalmente, a argila tem o menor índice de permeabilidade e é ideal para retenção da água fazendo-se uma barreira capaz de direcionar o fluxo de acordo com a compressibilidade dos solos (CAPUTO, 2015). Como a tabatinga é um solo de alta plasticidade e muito expansiva, e encontrada em abundância no estado do Acre, faz-se necessário o estudo da construção e análise de pequenas barragens de terra com essa argila, capaz de identificar o melhor local da jazida,

bem como o apontamento das barragens existentes quanto à instabilidade do maciço (BARBOSA *et al*, 2018).

O solo acriano é predominantemente argiloso, de forma que o seu uso na Engenharia de transformação com análise geotécnica depende de ensaios laboratoriais para a tomada de decisão de acordo com objetivo do projeto (VIANA, 2019).

Verifica-se que para determinar a resistência do solo compactado em barragens de terra aplica-se um teor de umidade inicial que gera um fator de segurança com maior atenção para os resultados obtidos e também para a inclinação do talude. Se o talude tem maior inclinação gera aumento do custo de execução da barragem. Com uma boa análise das características do material, através de ensaios de laboratório como: densidade, permeabilidade do solo, compactação, saturação do corpo de prova, mostram-se resultados satisfatórios quando se tem disponível o melhor material para construção dessas barragens nas proximidades da obra (GARCIA e PACHECO, 2016).

Outro aspecto importante na instabilidade das barragens de terra é quanto ao seu peso próprio, pois é necessária a sondagem do local de construção para verificar as camadas do solo ali presente e se irão suportar o peso do maciço, podendo haver o recalque do solo (GUIDICINI e NIEBLE, 1983). Portanto a coleta do material onde será implantada a barragem é necessária, e também a investigação do solo, fazendo assim a sua classificação, granulometria, ensaios de permeabilidade, infiltração, plasticidade e liquidez além dos ensaios de resistência de compactação e verificação do teor umidade em comparação à tensão de resistência desse solo a ser estudado (CAPUTO, 2015).

O solo possui propriedades de acordo com a sua composição, suas camadas e seus índices de vazios. Assim, entende-se por compactação dos solos a redução dos índices de vazios por meio de processos mecânicos, isto é, pela forma que é empregada essa compactação através de equipamentos e um controle rigoroso no campo e no laboratório afim de se chegar à resistência de projeto (MASSAD, 2016).

Segundo Queiroz (2016), para a análise e a construção de pequenas barragens de terra é necessário conhecimento prévio do solo. Para isso, através da coleta do material em campo da jazida, e dos estudos feitos em laboratório: ensaios de granulometria, sedimentação do solo, limites de liquidez e plasticidade, compactação do solo através do ensaio de Proctor e por fim o ensaio de permeabilidade do solo, fica claro que para a construção de barragens é um serviço técnico especializado.

Assim pode-se afirmar que estes procedimentos são de fundamental importância para os estudos e pesquisas geotécnicas de construção de barragens, pois proporciona o efetivo conhecimento dos materiais permitindo chegar-se ao melhor grau de compactação para menor permeabilidade do maciço.

3 JUSTIFICATIVA

A engenharia vem cada vez mais buscando aprimorar as técnicas de construção voltadas para diminuição dos custos das obras como também o tempo de execução, com garantia da segurança dos serviços para a sociedade. Essas atitudes de pesquisas e busca de novos conhecimentos que vem alavancando o desenvolvimento do país.

O Acre apresenta solos com características diferenciais marcantes em relação aos demais da região amazônica. Isso se deve em parte à formação do solo que teve contribuição direta de sedimentos provenientes dos Andes. Esse fenômeno resultou na formação de solos mais jovens e de fertilidade natural mais expressiva. Essas características do solo, na estação de seca, muda sua plasticidade drasticamente, tornando importante o estudo do comportamento físico de coesão entre as partículas para a construção das barragens de terra (ARAÚJO, 2011).

A predominância maior de barragens de contenção no estado do Acre maioria de terra, em torno de 1658 tornam um alerta quanto o risco de rompimento e desastres ambientais (NUNES, 2019). Há abundância de argila e escassez de materiais rochosos que estão a mais de 300 km de distância, no estado de Rondônia, fonte mais próxima.

Consequentemente a formação geológica predominante no Estado do Acre, com um maior período de estação chuvosa durante o ano, faz com que se construam as pequenas barragens de terra na maioria em propriedades rurais, seja ela para criação de peixes, aquicultura ou mesmo irrigação ou até abastecimento para consumo campo e cidade.

O fulcro desta pesquisa é analisar o núcleo maciço compactado da barragem homogênea de terra quanto a sua segurança ao rompimento, já que no Estado do Acre a maioria das barragens é feita sem nenhum controle tecnológico do solo, e ainda verificar a compactação do solo existente em relação a coesão das partículas, para se chegar à umidade ideal e à densidade do solo que possa definir a menor percolação de água no solo em relação à compactação.

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral desta pesquisa é a análise da compactação de uma barragem de terra para a mínima percolação de água no maciço, para melhorar a estabilidade da barragem e prevenir os impactos de um possível caso de rompimento.

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudar os métodos de coleta de material para análise de solo incluindo o local de pesquisa;
- Estudar a caracterização de solos ao levar as amostras para ensaios de laboratório;
- Avaliar a resistência a percolação da água no solo através de ensaios de compactação na máxima energia modificada e comparar com a compactação executada no local da coleta através do ensaio tipo Hilf (brucutu);
- Realizar o ensaio de permeabilidade do solo coletado para compactação na energia modificada, quanto com o corpo de prova coletado *in situ* através do ensaio tipo Hilf (brucutu);
- Analisar os resultados e indicar a melhor compactação para mínima percolação de água na barragem desse estudo.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 COLETA DO MATERIAL

A coleta do material de solo foi feita com o deslocamento terrestre pela BR 364 até o km 30, sentido Rio Branco/Porto Velho, no Empreendimento denominado “PEIXES DA AMAZÔNIA S/A”, situado às margens da BR 364, sob as coordenadas geográficas 10° 5' 11.464" S, 67° 32' 17.799" W. A escolha desse local se deu pela grande concentração de barragens (tanques) reunidos em um só lugar, além de ter sido construído na várzea do Rio Iquiry, com a presença de mata ciliar e um importante ecossistema e propício ao rompimento e dano ambiental, Figura 1.

Figura 1- Local de coleta de material “Peixes da Amazônia S/A”



Fonte: Google, 2021

O Empreendimento é o mais moderno complexo industrial de piscicultura do país, em uma área de 63 hectares foi instalada a unidade de produção de rações mais moderna do Brasil. É a primeira fábrica de ração brasileira especializada na produção de alimentos para peixes carnívoros.

O Centro Tecnológico de Alevinagem foi instalado com o que há de mais avançado em termos de reprodução de peixes nobres e nativos da Amazônia como: pintado, pirarucu e tambaqui. São 40 hectares de lâmina d'água com capacidade para produzir 15 milhões de alevinos por ano e 127 tanques para manter matrizes e reprodutores, dentre os quais, casais de pirarucu, espécie protegida, e cujo processo de reprodução em cativeiro é totalmente dominado pela empresa “Peixes da Amazônia”.

O deslocamento para o levantamento do local foi feito em veículo oficial, legalmente cedido pela Ufac, devido às ferramentas necessárias para escavação no campo, bem como para transporte do material coletado, Figura 2.

Figura 2 - Deslocamento para campo local de coleta



Fonte: O autor, 2021

O local escolhido para a coleta de material possui diversos tanques com contenção por barragens de terra e servem para piscicultura. Eles estão agrupados em tanques pequenos e grandes, de acordo com a finalidade. A decisão de fazer a coleta no maior tanque foi devido a possui maior probabilidade de rompimento da barragem por causa da maior lâmina de água. O local de coleta está identificado pelo círculo em vermelho, conforme mostra a Figura 3.

Figura 3 – Ponto de coleta do material da pesquisa



Fonte: Google, 2021

Como os tanques escolhidos são os de maior proporção, a coleta foi feita entre os dois tanques, conforme mostrado na Figura 4 o local de extração da amostra de solo.

Figura 4 - Local preciso onde foi feita a coleta do material para pesquisa.



Fonte: Autor, 2021

Para a coleta do material foram utilizadas as brocas (trados) de diâmetro $\varnothing = 0,075\text{mm}$ e brocas de $\varnothing = 150\text{ mm}$, com hastes em aço galvanizado, conforme mostra a Figura 5:

Figura 5 – Modelo de broca utilizado para escavação



Fonte: Autor, 2021

Depois de feita a raspagem da vegetação no maciço da barragem, inicia-se a perfuração do solo com a broca menor de $\varnothing = 0,075$ mm. Essas brocas são encaixadas nas hastes roscáveis de tubos de aço galvanizado de $\frac{3}{4}$ " (± 25 mm de diâmetro). Quando a profundidade do furo chega a um metro, faz-se a abertura do furo com a broca de maior diâmetro de 150 mm. Esse procedimento visa facilitar a perfuração que é feita manualmente pelo operador das brocas, conforme Figura 6.

Figura 6 – Procedimentos para coleta do material



Fonte: Autor, 2021.

Após a coleta do material, todas as amostras de solo foram embaladas em sacos de fibras, pesando aproximadamente 50 kg, num total de 3 sacos. E então foram levados para Laboratórios de Ensaio Tecnológico (LET) do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Acre para preparação das amostras e início dos ensaios.

5.2 ENSAIO DE GRANULOMETRIA

O objetivo é determinar as dimensões das partículas e suas proporções relativas de ocorrência de forma a se obter o traçado da curva granulométrica do solo coletado no

ponto da barragem para então saber os percentuais de fração da composição desse solo e assim fazer sua caracterização através da curvatura de traçado no gráfico.

O método que será utilizado nessa pesquisa é o peneiramento grosso e fino das partículas, o qual separa as partículas até 0,074 mm e assim determinar os percentuais de fração da composição do solo, conforme a norma ABNT 7181 NBR:2016.

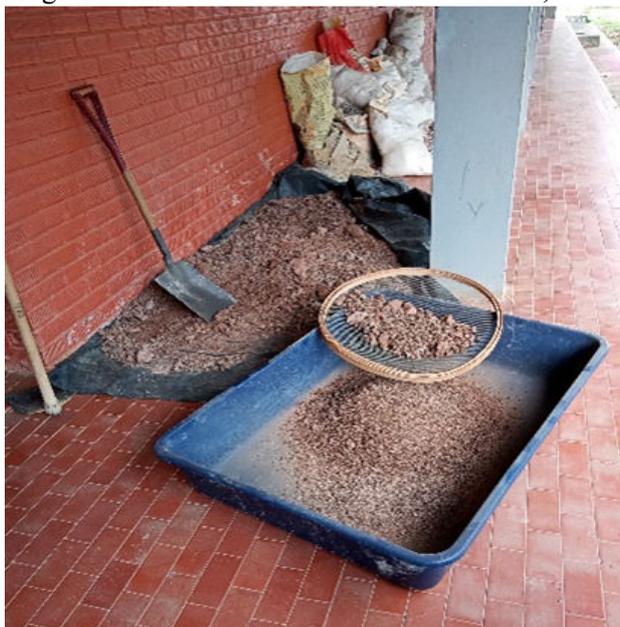
O ensaio de granulometria é utilizado para determinar a distribuição granulométrica do solo e a percentagem em peso que cada faixa especificada de tamanho de grãos para determinar o tipo de solo que será caracterizado, por exemplo, uma argila, silte, areia etc.

Assim, para determinar o tipo de solo encontrado nessa pesquisa utilizou-se os procedimentos descritos na ABNT NBR 7181:2016

O ensaio de granulometria é dividido em duas partes distintas, utilizáveis de acordo com o tipo de solo e as finalidades do ensaio para cada caso particular. No caso em questão, quer-se apenas demonstrar a granulometria do solo, de acordo com o tamanho dos grãos. Visualmente o solo predominante no médio Acre, município de Senador Guiomard, local onde foram coletadas as amostras é a argila.

Após a coleta do solo, ele foi levado para o laboratório onde se fez a preparação das amostras para o ensaio, pela ABNT NBR 6457:2016. Depois de seca ao ar a amostra foi destorroada e passada na peneira de $\varnothing = 4,8$ mm, conforme Figura 7.

Figura 7 – Peneiramento das amostras $\varnothing = 4,8$ mm



Fonte: Autor, 2021.

Assim o solo teve desagregado totalmente os torrões, com almofariz, evitando reduzir o tamanho natural das partículas para não haver descaracterização. Em seguida, o solo foi ensacado e tomado cerca de 2 kg para o início do ensaio, conforme Figura 8.

Figura 8 - Pesagem e ensacamento da amostra para ensaio de granulometria



Fonte: (Autor, 2021)

Solos caracterizados como peneiramento grosso passa nas peneiras de malhas com diâmetro de 50 a 4,8mm e solos de caracterização de peneiramento fino são todos os solos passantes na peneira de 2 mm, ou seja, no intervalo de 2 a 0,075 mm, de acordo com a NBR 7181 (ABNT, 2016)

Do material que passou na peneira 10# (2mm) é utilizado cerca de 120 g, fazendo o procedimento: assim colocou-se o material na peneira #200, lavando-o e em seguida colocando-o na estufa para retirar a umidade do solo. Sobrepõe as peneiras #40, #80 e #200, de acordo com a NBR 5734, que dispõe sobre a disposição das peneiras para ensaios de granulometria, conforme Figura 9.

Figura 9 - Procedimento para peneiramento do solo - granulometria



Fonte: (Autor, 2021)

Após o material seco, conforme descreve a ABNT NBR: 7182, na estufa e será colocado no conjunto de peneiras e agitado manualmente e pesado cada quantidade que ficou retido em cada peneira, peso da água, umidade do solo e fator de correção, fazendo-se na sequência o percentual individual e acumulado teremos o resumo da faixa granulométrica do que passou e acumulou em cada peneira, conforme a Tabela 1 (modelo), em que serão apresentados os resultados adiante:

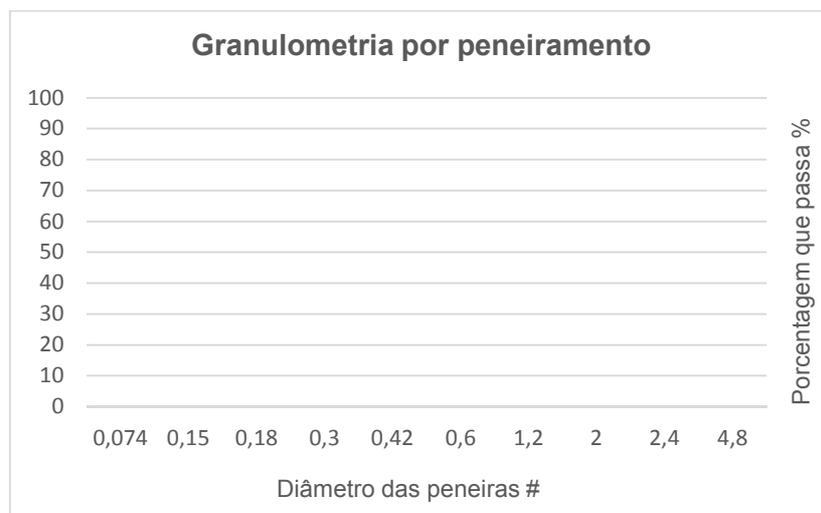
Tabela 1- Modelo de tabela para análise granulométrica por peneiramento

		AMOSTRA DE SOLO SECA AO AR		UMIDADE HIGROSCÓPICA			RESUMO	
		Amostra total úmida (g)	2000,00	Cápsula N.º			Pedregulho acima de 4,8	
	Retido # n.º 10 seca (g)						A. grossa 4,8 - 2,0 mm	
	Passa # n.º 10 úmida (g)						A. média 2,0 - 0,42 mm	
Menor n.º 10 Recip. N.º	Peso da água (g)						A. fina 0,42 - 200	
	Passa # n.º 10 seca (g)						Passando na # 200	
	Amostra < n.º 10 úmida						Total	
Retido n.º 10 Recip. N.º	Amostra < n.º 10 seca (g)			H = umidade			Retido na # 200	
	Amostra total seca (g)			Hm =	Fc =			
MATERIAL RETIDO								
PENEIRA		Peso (g)	% da amostra menor N.º 10	% da amostra total	% acumulada		% que passa da amostra total	Peneira (ABNT) mm
N.º	4						100	4,8
N.º	8							2,4
N.º	10							
N.º	16							
N.º	30							
N.º	40							
N.º	50							
N.º	80							
N.º	100							
N.º	200							

Fonte: (NBR 7182:2016)

E assim como o resumo da faixa granulométrica será marcado no eixo das abscissas o diâmetro das peneiras, nas ordenadas o percentual acumulado que passou em cada peneira e faz-se a marcação dos pontos sobre a curva granulométrica conforme modelo da Figura 11, no qual serão apresentados os resultados.

Figura 10 - Resultado granulometria por peneiramento



Fonte: (Autor, 2021)

Com os resultados dos diâmetros que serão encontrados, segundo a NBR 6092:95, chega-se à seguinte constatação para a classificação do solo:

- **Pedregulhos:** solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 e 60,0 mm. Podem ainda ser subdivididos em pedregulhos finos, médios ou grossos;
- **Areia:** solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. Pode também ser subdividido em areias finas, médias e grossas;
- **Silte:** Solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco o ar. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração silte. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm;
- **Argila:** Solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm.

5.3 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Em uma forma reduzida, o ensaio de Proctor, sendo normatizado pela A.A.S.H.O. (*American Association of State Highway Officials*), foi introduzido no Brasil e regulamentado através Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), descrito na norma ABNT-NBR 7182/86, atualizada no ano de 2016 (PINTO, 2012). O Ensaio de compactação tem como objetivo oferecer um efetivo controle da qualidade de todos os

solos que foram compactados. Também conhecido como Ensaio Normal de Proctor, permite a conclusão de um trabalho no solo de alta qualidade e segurança. Através do ensaio de compactação é possível obter a correlação entre o teor de umidade e o peso específico seco de um solo quando compactado com determinada energia. O ensaio consiste em compactar uma porção de solo em um cilindro com volume conhecido, fazendo-se variar a umidade de forma a obter o ponto de compactação máxima no qual obtém-se a umidade ótima de compactação.

5.4 CRIADOR DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO, MÉTODO DE PROCTOR

O inventor deste ensaio foi o Engenheiro Halph Proctor, Figura 11, em 1933, no estado da Califórnia, nos Estados Unidos, assim com a necessidade de expansão da malha viária americana desenvolveu este método (FERNANDES, 2011).

Figura 11- Halph Proctor criador do Método de Proctor



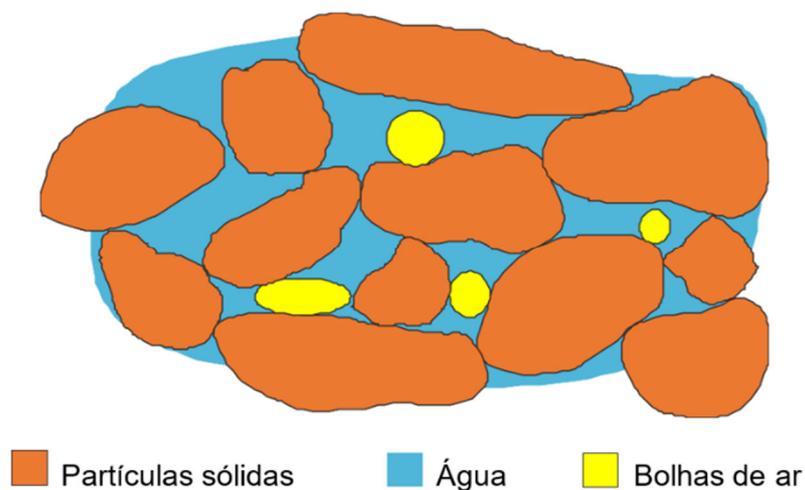
Fonte: (VOLS, 2010)

Proctor compactou solo seco e poroso e observou que não havia coesão entre as suas moléculas. Então, ele adicionou água ao solo e viu que surgia uma maior resistência do solo úmido à medida que o compactava, pois o acréscimo de água diminuía os vazios do solo e aumentava a sua resistência, ao mesmo tempo em que diminuía a permeabilidade (FERNANDES, 2011).

O princípio que Proctor utilizou foi o sistema de forças conservativas ao qual transformou energia potencial gravitacional através de um soquete de queda peso e força, definindo a conservação da energia aplicada dentro de um cilindro unindo as moléculas do solo, tornando-o em um sistema conservativo (ABREU e NETO, 2012)

A Figura 12 ilustra como Proctor analisou o solo de forma a perceber que com a compactação o solo diminuía a sua permeabilidade pela aproximação das partículas e preenchimento dos vazios.

Figura 12 - Ilustração da composição do solo



Fonte: (Suporte, 2011)

De acordo com a norma da Associação Brasileira de Normas Técnicas, ABNT NBR-7182/2016, o ensaio de compactação é utilizado para aterros compactados principalmente em barragens, pois visa obter a densidade máxima do solo.

No ensaio, o solo é compactado em um recipiente cilíndrico com o volume de $V_{ol} = 1000 \text{ cm}^3$ (cilindro pequeno) e $V_{ol} = 2000 \text{ cm}^3$ (cilindro grande). A compactação é feita com o soquete caindo de uma altura de aproximadamente 30 cm sobre a camada de solo. O número de golpes é de acordo com a energia de compactação a ser aplicada. Assim o impacto do soquete no solo gera a sua estabilidade, com um aumento do peso específico e da resistência ao cisalhamento. A Figura 13 mostra o cilindro pequeno (1) e o cilindro grande (2) utilizados no ensaio de compactação. Mostra-se também o soquete grande (3) e o soquete pequeno (4).

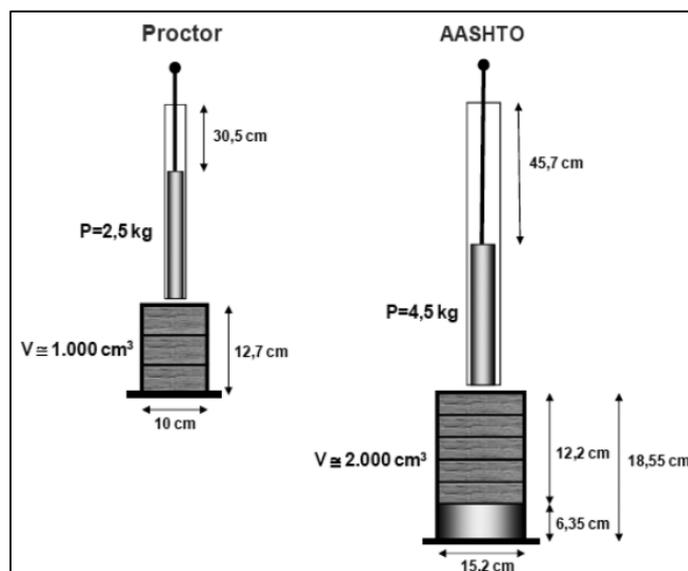
Figura 13 - Cilindros e soquetes para compactação do solo



Fonte: (Autor, 2021)

Com este ensaio, através da relação umidade do solo e o seu peso específico seco, quando compactado nas energias: normal, intermediária e modificada, de acordo com a necessidade do projeto conforme, Figura 14

Figura 14 - Modelo de cilindro e soquete Proctor da AASHTO



Fonte: (Suporte, 2011)

Assim, no ensaio de Proctor o soquete de aproximadamente 2,5 kg cai de uma altura de 30,5 cm para um volume aproximado de 1000 cm³; e o número de camadas é de acordo com a energia aplicada. Conforme a norma ABNT-NBR 7182/ 2016, os cilindros

de compactação, de pequeno e grande porte, são utilizados sob três graus de energias de compactação; normal, intermediária e modificada; e para cada cilindro, de acordo com a energia escolhida, usam-se os soquetes de grande ou pequeno porte e varia o número de golpes e espessura de camadas, Tabela 2:

Tabela 2 - Energia de compactação de acordo com cilindros e soquetes.

Cilindro	Característica de cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	N.º de golpes p/ camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	N.º de golpes p/ camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: (ABNT, 2016, p. 5)

5.5 ENSAIO DE COMPACTAÇÃO - EQUAÇÕES

Para a realização dos cálculos, no ensaio de compactação realizado em laboratório, são utilizadas as fórmulas de acordo com a norma ABNT-NBR-7182/2016. Assim para se determinar a energia de compactação aplicada durante o processo da compactação com o volume conhecido, considerando um soquete de massa (M) caindo (n) vezes de uma altura (h) sobre a amostra, usa-se a equação (1):

$$E_c = \frac{M \times H \times N \times N_c}{V} \quad (1)$$

Onde:

E_c = Energia de compactação

H = Altura de queda do soquete

M = Massa do soquete

N = Número de golpes por camada

N_c = Número de camadas

V = Volume da amostra

Para o ensaio de compactação do solo, segundo a ABNT NBR 7182:2016 segue-se o princípio geral:

1- Cálculo do peso Específico (γ_n), equação (2):

$$(\gamma_n) = \frac{M}{V} \quad (2)$$

Onde:

γ_n = massa do solo natural,

M = massa em gramas,

V = volume em cm^3 , este é o princípio geral do ensaio.

2 - Cálculo da umidade do solo (W), equação (3):

$$W = \frac{M_{seco}}{M_{úmido}} \times 100 \quad (3)$$

Onde:

M_{seco} = Massa do solo seco em gramas,

$M_{úmido}$ = Massa do solo úmido em gramas.

3 - Cálculo do peso específico seco (γ_d), equação (4):

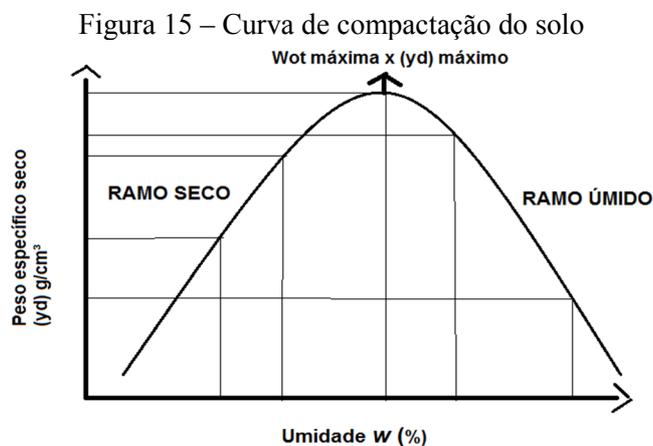
$$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1+W} (\text{g/cm}^3) \quad (4)$$

Onde:

γ_n = massa do solo natural,

W = umidade do solo em gramas por centímetros cúbicos.

Assim com os dados do peso específico seco e com os da umidade do solo traça-se a curva de compactação do solo, onde se encontram a Umidade ótima do solo (W_{ot}) e o peso específico máximo do solo (γ_d), conforme a Figura 15.



Fonte: (Autor, 2022)

Segundo a NBR 7182:2016, o ramo da curva ascendente é denominado ramo seco; e o descendente, ramo úmido, logo é necessário no mínimo cinco pontos para a determinação dos valores máximos, conforme acrescenta água no solo bem próximo a umidade ótima os valores vão subindo até encontrar o seu ponto máximo e conseqüentemente aumentando a resistência do solo e diminuindo a percolação da água no maciço da amostra, à medida que passa do ponto máximo o solo vai diminuindo a resistência e aumentando a permeabilidade.

Assim em resumo o resultado final para análise da curva de compactação é o gráfico ao qual temos a determinação da umidade ótima máxima do solo e a densidade máxima seca do solo tudo isto em conformidade com a NBR 7182:2016 e com esses valores que são analisados é essencial para achar a mínima infiltração de água da amostra para prosseguir com ensaio de permeabilidade do solo que dará a infração da água nessa amostra nos padrões apresentados.

As ferramentas utilizadas para a coleta do material é um trado manual de 100 mm ou 150 mm, juntamente com as barras de aço galvanizado unidas entre si por roscas de 3/4", assim na primeira haste de 1 metro fixa o tubo de tração para rotação o conjunto. No meio do talude com uma enxada se limpa o local onde será perfurado o solo e inicia-se o processo de perfuração manual. Será perfurado até a camada de 2 m, quando a haste inicial chegar ao seu limite, será acoplado mais uma haste de ferro galvanizado de mais 1 metro.

O solo que será retirado da broca formará um acúmulo de solo ao qual será colocado em um saco de fibra nas camadas coletados nas profundidades de um e dois metros, será levado uma balança analógica para a pesagem dos sacos em campo. Cada saco com aproximadamente 30 kg de solo totalizando 60 kg, posteriormente levados para o Laboratório de solos da Universidade Federal do Acre.

5.6 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA O ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Após as amostras terem chegado ao laboratório o solo foi destorroado com um destorroador de madeira (mão de pilão) até a granulometria ficar próxima de 5 mm, posteriormente o solo foi colocado em cima de lonas para a secagem ao ar livre por 24 horas, assim esse procedimento está descrito na NBR-7182:2016 conforme ilustra a Figura 16, a seguir:

Figura 16 - Preparação das amostras para o ensaio de compactação



Fonte: (Autor, 2021)

5.7 ARMAZENAMENTO E EMBALAGEM DAS AMOSTRAS

Depois de passado esse período o solo é passado na peneira n.º 4 de 4,8 mm, e o material passante é ensacado e pesado em 6 amostras de 6 kg em sacos de plásticos conforme Figura.17.

Figura 17 – Armazenagem do solo para realização do ensaio de compactação.



Fonte: (Autor, 2021)

5.8 EXECUÇÃO DO ENSAIO DE COMPACTAÇÃO

Como o foco principal desta pesquisa é verificar a percolação de água do solo trazido do local da coleta compactado em laboratório e aplicar a energia modificada, aquela que tem maior compactação e maior número de golpes; posteriormente fazer a compactação do solo na energia normal, que tem menor número de golpes, e assim comparar a vazão da água no solo compactado ideal e também aquela com a compactação que está aplicada *in loco*, na barragem do local da pesquisa.

Com as amostras preparadas com para o ensaio de compactação de acordo com a NBR-7182:2016, foi iniciado o ensaio utilizando uma bandeja para deposito do solo já ensacado, foi usado 6 kg de umas das amostras, onde também foi usada uma proveta graduada e acrescentado água destilada na proveta, cerca de 800 ml para umidificação do solo próximo a umidade ótima para o início do ensaio, conforme Figura 18.

Figura 18 – Processo de umidificação do solo



Fonte: (Autor, 2021)

Dado o início com a umidade próxima da ótima, isto pode ser verificada de acordo com a experiência do operador do ensaio a partir de então acrescentado água no solo para o primeiro corpo de prova do ensaio em torno de 2% do peso total da amostra de 6 kg do solo, logo a amostra foi homogeneizada e colocada no cilindro pequeno em cinco camadas na energia modificada, logo cada camada recebe 27 golpes com soquete grande conforme Figura 19.

Figura 19 – Processo de umidificação do solo.



Fonte: (autor, 2021)

Ainda, segundo a NBR 7182:2016, após esse processo de compactação do solo no cilindro, com cinco camadas, retira-se o colar superior, logo é usada a régua biselada

para regularizar a face do cilindro para extração do corpo de prova; em seguida o conjunto formado pelo cilindro mais corpo de prova é pesado e o valor anotado em planilha para os cálculos da densidade, conforme Figura 20.

Figura 20 – Preparação do conjunto cilindro mais corpo de prova para pesagem



Fonte: (Autor, 2021)

Durante a compactação foi retirada uma amostra úmida do solo para cada corpo de prova a qual foi colocada em uma cápsula em estufa entre 105 a 110°C, conforme Figura 21.

Figura 21- Processo de retirada da umidade do solo através da estufa



Fonte: (Autor, 2021)

Em seguida o corpo de prova é extraído por uma prensa hidráulica e pesado para o cálculo da densidade conforme Figura 22;

Figura 22 – Extração do corpo de prova



Fonte: (Autor, 2021)

Esse procedimento foi feito para cada corpo de prova extraído e pesado para o cálculo da densidade absoluta e da umidade para obtenção da curva de compactação. Dessa curva se saberá a densidade máxima e a umidade máxima do solo. Cada amostra foi retirada úmida durante a compactação e ficou por 24 horas na estufa; posteriormente pesadas, foi feito o cálculo da umidade do solo das amostras secas, Figura 23.

Figura 23 - Amostras do solo retiradas da estufa



Fonte: (Autor, 2021)

Após esses passos descritos na NBR 7182:2016, e depois que todos os corpos de prova, em um total de 5, dois no ramo seco e um na densidade máxima e dois no ramo úmido, e com as 5 cápsulas de solo retirada a umidade do solo, serão feitos os cálculos.

5.9 CÁLCULOS PARA DETERMINAÇÃO DA CURVA DE COMPACTAÇÃO

O fundamento desta pesquisa será obter o corpo de prova na densidade máxima e umidade ótima do solo coletado na barragem escolhida no Empreendimento Peixes da Amazônia, local característico em relação às demais propriedades do estado do Acre. Assim em relação à compactação do solo foram tomados os dois extremos do solo com energia normal e modificada e recortada. Assim, o cilindro grande é utilizado para cálculo do CBR do solo em relação à compressão, por isso, primeiramente foi feito o cálculo na energia modificada e posteriormente será feito o cálculo na energia normal e nos resultados desta pesquisa será verificada a compactação ideal para determinar a mínima percolação de água no solo pesquisado, conforme Tabela 3.

Tabela 3 - Energia de compactação em função do soquete e número de golpes

Cilindro	Característica de cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	N.º de golpes p/ camada	26	21	27

Fonte: (Adaptado, NBR-7182:2016)

Será aplicada a energia Modificada com cilindro pequeno na energia Modificada para um total de cinco camadas e 27 golpes por camada, para essa primeira fase do ensaio de compactação.

Para realização do ensaio são necessários cinco moldes de solo compactado, sendo no mínimo, de acordo com NBR7182:2016, dois pontos no ramo seco da curva e um ponto que representará o máximo da curva com as coordenadas de densidade máxima e umidade máxima do solo. Assim para o cálculo do peso específico do solo na energia modificada será utilizado o modelo da tabela 4.

Tabela 4 – Modelo de tabela de cálculo do peso específico do solo (γ_n)

Ensaio 1 Moldes	Mcil+solo(g)=A	Mcil(g)=B	Msol= C C=A-B (g)	Vcil(cm³)=D	γ_n (g/cm³) E= C/D

Fonte: (Autor, 2021)

Em seguida para realizar o cálculo da umidade do solo (w), será utilizado o modelo da Tabela 5.

Tabela 5 - Modelo de tabela para cálculo da umidade do solo (w)

Ensaio 1 Moldes	Mcap(g)=A	Mcap+Solo úmido(g)=B	Mcap+solo seco(g)=C	Cálculo da umidade(w)= D (%) D= (B-C)/(C- A)X100	$W = \frac{M_{seco}}{M_{úmido}} \times 100$
1					
2					
3					
4					
5					

Fonte: (Autor, 2021)

O próximo foi o cálculo a ser feito é achar o peso específico seco do solo (γ_d), conforme modelo da Tabela 6.

Tabela 6 - Modelo de tabela para o cálculo do peso específico seco (γ_d)

Ensaio 1 Moldes	Peso específico natural $\gamma_n(g/cm^3)=A$	Umidade do solo(w)=B	Peso específico seco(γ_d)=C	$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1+W} (g/cm^3)$ $C = \frac{A}{(1+(\frac{B}{100}))} \times 100$
1				
2				
3				
4				
5				

Fonte: (Autor, 2021)

Em seguida, com os valores que serão obtidos na Tabela 7, é feita a plotagem com os valores da umidade do solo(w) e peso específico seco (γ_d);

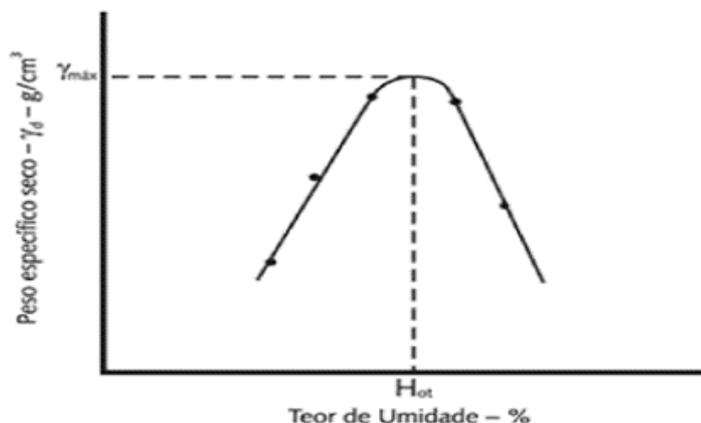
Tabela 7 – Modelo de tabela para plotagem da curva de compactação

Ensaio 1 Moldes	Umidade do solo(w)=B	Peso específico seco $\gamma_d(g/cm^3)$
1		
2		
3		
4		
5		

Fonte: (Autor, 2021)

E assim com os valores obtidos da compactação na energia modificada para o cilindro pequeno e soquete grande para um número de 27 golpes por camada num total de 5 camadas conforme NBR 7182:2016 é obtido o modelo de gráfico da curva de compactação a Figura 24, a seguir;

Figura 24 – Modelo de curva de compactação na energia modificada



Fonte:
(Autor,

2021)

5.10 ENSAIO CILINDRO DE CRAVAÇÃO

Nesta pesquisa será empregado o Método do Cilindro de Cravação, ABNT NBR 9813:1987, para determinação da massa específica seca do solo *in situ* na barragem para comparar com a compactação do laboratório, com a energia modificada.

Este Método do Cilindro de Cravação é o mais recomendado para solos argilosos isentos de pedregulho e mole, exatamente o solo característico da região do Acre.

5.10.1 EQUIPAMENTOS DE CRAVAÇÃO

Os elementos essenciais do equipamento consistem de cilindro de cravação calibrado, colarinho destacável, haste guia e soquete de cravação, que o peso que desliza na haste e cai sobre o cilindro de cravação, conforme Figura 25.

Figura 25- Cilindro de cravação e haste para coleta da amostra



Fonte: (Autor, 2022)

Além do cilindro de cravação haste é necessário: Balanças que permitam pesar nominalmente 1,5 kg e 10 kg; recipiente que permita acondicionar o cilindro de cravação contendo a amostra, sem perda de umidade; estufa capaz de manter a temperatura entre 105°C e 110°C; pá e picareta; régua de aço biselada de 30 centímetros e extrator de corpo-de-prova.

5.11 EXECUÇÃO DO ENSAIO DO CILINDRO DE CRAVAÇÃO EM CAMPO

Assim para determinação da densidade da massa seca do solo *in situ* foi feito o deslocamento com os equipamentos para a coleta do solo no empreendimento peixes da Amazônia no mesmo ponto da barragem que foi coletado o solo para o ensaio de compactação na energia modificada com o seguintes procedimentos descritos na ABNT NBR-9813:1987.

Raspagem do terreno *in situ*, assentamento do cilindro de cravação onde o interior foi levemente lubrificado com óleo, na superfície do terreno foi nivelada e isenta de partículas soltas, iniciada a cravação do cilindro por meio de queda livre do soquete de cravação, a cravação vai até passar a superfície do cilindro abaixo do nível do solo, conforme Figura 26.

Figura 26 - Raspagem do terreno para encravação do cilindro



Fonte: (Autor, 2022)

Após iniciada a cravação do cilindro foi feita a escavação ao redor, com auxílio da pá e uma picareta e logo em seguida foi cortado o solo abaixo do cilindro a uma profundidade de 5 cm e extraído a tampa superior do cilindro. Logo após, o cilindro foi embalado em saco plástico, juntamente com pequena amostra de solo para o cálculo da umidade, e levado para o laboratório, conforme Figura 27.

Figura 27 - Escavação do cilindro de cravação, remoção e embalagem



Fonte: (Autor, 2022)

5.12 EXECUÇÃO DO ENSAIO EM CILINDRO DE CRAVAÇÃO EM LABORATÓRIO

Já no laboratório de solos, o cilindro com o corpo de prova foi colocado em uma bandeja, rasado com uma régua biselar pelos dois lados e pesado para os cálculos, conforme Figura 28.

Figura 28 - Preparação e pesagem do conjunto cilindro de cravação



Fonte: (Autor, 2022)

Em seguida o corpo de prova foi extraído do cilindro de cravação através de um macaco hidráulico e pesado separadamente, cilindro de cravação e corpo de prova, para comporem os cálculos conforme Figura 29.

Figura 29 - Extração do corpo de prova do cilindro de cravação e pesagem



Fonte: (Autor, 2022)

5.13 DETERMINAÇÃO DO PESO ESPECÍFICO SECO NA BARRAGEM

Já em laboratório o corpo de prova é extraído e em seguida pesado; como também o cilindro. A execução do cálculo de peso específico natural do solo está descrito na ABNT NBR 9813:1987.

- a) Cálculo da massa específica natural do solo;

$$\gamma_{\text{nat}} = \frac{M_t - M_c}{V_c} \quad (5)$$

Onde:

γ_{nat} = massa específica natural do solo

“in situ”, em g/cm³;

M_t = massa do cilindro com amostra úmida,

em g;

M_c = massa do cilindro, em g;

V_c = volume interno do cilindro, em cm³.

- b) Cálculo da massa específica do solo seco *in situ*

$$\gamma_d = \gamma_{\text{nat}} \times \frac{100}{100 + w} \quad (6)$$

Onde:

γ_d = massa específica seca do solo “in

situ”, em g/cm³;

γ_{nat} = massa específica natural do solo “in

situ”, em g/cm³;

w = teor de umidade natural do solo, em %.

c) Cálculo da umidade do solo;

O método do cálculo da umidade do solo foi o de secagem em estufa no a 105°C. Como a coleta do solo fica próximo da cidade de Rio Branco, não houve perda de umidade, pois o solo foi acondicionado em saco plástico e levado para o laboratório. Três amostras úmidas do solo foram coletadas em cápsulas, postas para secar e pesadas novamente após 24 horas na estufa para a retirada da umidade do solo, conforme Figura 30.

Figura 30 - Amostras para obtenção da umidade do solo em laboratório



Fonte: (Autor, 2022)

Com as amostras devidamente pesadas e as cápsulas que serão enumeradas a exemplo, conforme exemplo da Tabela 8:

Tabela 8 – Cálculo da umidade do solo da amostra indeformada

Umidade do solo em estufa a 105°C por 24 horas			
N.º cápsula	26	24	22
C + S + A (g)			
C + S (g)			
C (g)			
S (g)			
A (g)			
h (%)			
Média da umidade = 13,04%			
Onde: C = cápsula, S= solo, A= água, h= umidade do solo			

Fonte: (Autor, 2022)

E por fim, com todos os dados de campo coletados, será montada a Tabela 9 de dados de cravação com as fórmulas, a seguir.

Tabela 9 – Modelo de tabela para determinação da massa específica seca do solo

ENSAIO DO CILINDRO DE CRAVAÇÃO			
Descrição	Unidade	Total	Fórmula
Massa Cilindro com amostra úmida (Mt)			$\gamma_{nat} = \frac{Mt - Mc}{Vc}$
Massa do Cilindro (Mc)			
Volume interno do cilindro (Vc)			
Massa Específica Natural (γ_{nat})			
Teor de umidade natural do solo (w)			
Massa Específica Seca (γ_d)			$\gamma_d = \gamma_{nat} \times \frac{100}{100 + w}$

Fonte: (Autor, 2022)

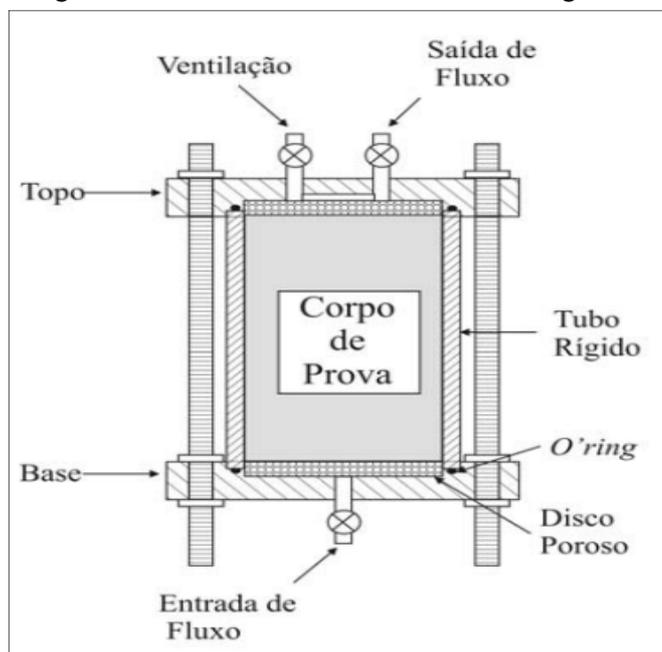
Por fim, se chegará ao valor da massa específica seca do solo na barragem (**γ_d**).

5.14 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DO SOLO

5.15 APRESENTAÇÃO DO ENSAIO

Pode-se afirmar que para realizar o Ensaio de permeabilidade do solo existem dois métodos: carga constante e carga variável. O método utilizado nesta pesquisa foi o de carga variável, descrito na ABNT NBR 14545:2000, que consiste em moldar o corpo de prova indeformado ou compactado na umidade ótima de energia modificada, instalar na câmara de parede rígida do equipamento denominado de permeômetro, projetado para atender aos ensaios de carga variável e usado para a determinação da permeabilidade de solos granulares, conforme Figura 31.

Figura 31 - Modelo de Permeâmetro com carga variável



Fonte: (DOURADO, 2003)

O Permeâmetro de Carga Variável, conforme o esquema utilizado na norma ABTN NBR 14545:2000 é feito por pressurização do corpo de prova, na umidade ótima, com água por gravidade passando pelo seu eixo e indo direto para um piezômetro com régua milimétrica, na qual se verifica o nível da água, conforme a Figura 32.

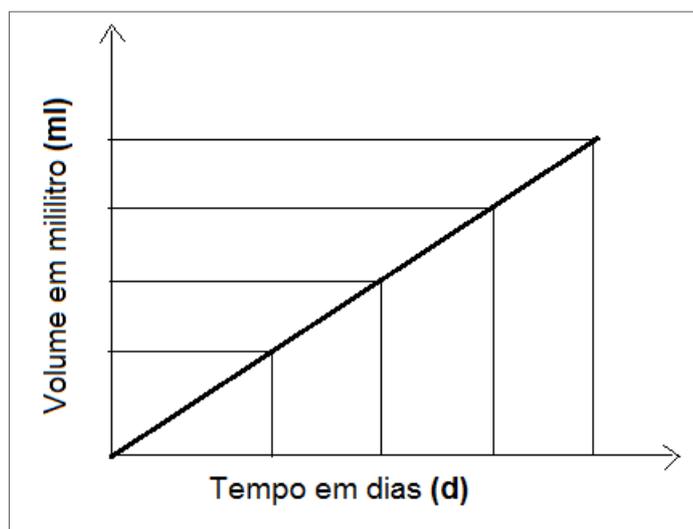
Figura 32 - Ensaio de permeabilidade do solo



Fonte: (CONTENCO, 2022)

Na pesquisa em questão, o princípio é o mesmo só que ao invés de anotar o deslocamento da água na régua milimétrica será medido o volume de água acumulado em uma proveta graduada, em função do tempo, e assim gerar o gráfico do volume em função do tempo, conforme a Figura 33.

Figura 33 - Modelo do gráfico volume em (ml) em função do tempo em dias (d)



Fonte: (Autor, 2021)

Assim, será verificada a vazão da água que passou pelo eixo do corpo de prova, ou seja, o volume de água no intervalo de tempo.

Neste primeiro momento, será feito o ensaio de permeabilidade do solo coletado na barragem, o qual foi compactado com a aplicação da energia modificada; o segundo momento é fazer o ensaio de permeabilidade desse mesmo solo, coletado no mesmo local da barragem, mas, com a amostra indeformada, obtida através do cilindro de cravação. A discussão dos resultados consistirá em qual seria melhor situação para a compactação da barragem no sentido de menor permeabilidade do solo e conseqüentemente menor percolação, no quesito segurança.

5.16 ENSAIO DE PERMEABILIDADE COM ENERGIA MODIFICADA

Após o ensaio de compactação do solo da barragem na energia modificada para cilindro pequeno, num total de 5 camadas e 27 golpes por camada, o corpo de prova foi inserido no permeâmetro, conforme Figura 34.

Figura 34 – Preparação do Corpo de prova no permeâmetro



Fonte: (Autor, 2022)

O processo de montagem, descrito na ABNT NBR-14545 e utilizado nessa pesquisa, consiste na utilização de elementos de vedação de baixa permeabilidade, comumente a parafina, para envolver o corpo de prova, porém, foi utilizada nesta pesquisa a betonita, uma argila derivada de silicato hidratado de alumínio, material altamente impermeável para confinar o corpo de prova nas paredes do permeâmetro, conforme Figura 35.

Figura 35 - Argila betonita utilizado para impermeabilizar o corpo de prova



Fonte: (Autor, 2022)

Em seguida o corpo de prova é envolvido completamente nas paredes laterais do cilindro do permeômetro com a bentonita e colocado na parte superior na tampa material granular, no caso foi colocado agregado graúdo para facilitar a percolação da água pelo eixo do corpo de prova descrito na Figura 36.

Figura 36 – Impermeabilização do corpo de prova com bentonita



Fonte: (Autor, 2021)

Assim, o permeâmetro já está pronto, com o corpo de prova instalado no interior do cilindro, de forma a que a água por gravidade passe pelo seu eixo axial e seja acumulada na proveta graduada para que seja elaborado o gráfico do volume em (ml) em função do tempo (t) em dias.

5.17 VAZÃO NO CORPO DE PROVA NA ENERGIA MODIFICADA

Conforme esquema que, por gravidade, fez a água passar pelo eixo do corpo de prova, verificou-se o volume acumulado na proveta graduada em função do tempo, conforme a Figura 37.

Figura 37- Esquema do ensaio de permeabilidade do solo por gravidade



Fonte: (Autor, 2022)

Após montado o ensaio para que a água escoasse, por gravidade, do reservatório do permeâmetro, passando exatamente pelo no eixo axial do corpo de prova, observou-se que durante uma semana não houve acúmulo de água na proveta graduada. Acredita-se que esse foi o tempo até a saturação do corpo de prova. Mas, após uma semana, houve um acúmulo na proveta graduada de 25 ml, significando 3,57 ml por dia de vazão de água percolando pelo corpo prova. Após esse período, a vazão estabilizou-se não havendo mais modificação no volume diário, conforme Figura 38.

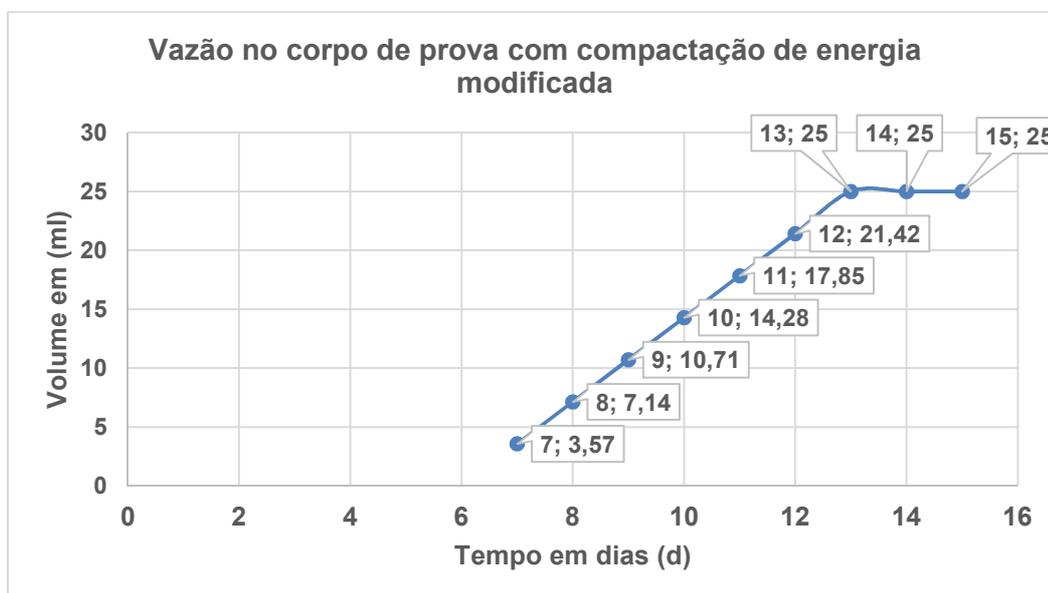
Figura 38 - Ensaio de permeabilidade do corpo de prova na energia modificada



Fonte: (Autor, 2022)

Assim com esse resultado para melhor visualização dos dados obtidos foi elaborado o gráfico de vazão, conforme a Figura 39.

Figura 39 – Vazão no corpo de prova com compactação de energia modificada



Fonte: (Autor, 2022)

5.18 ENSAIO DE PERMEABILIDADE DA AMOSTRA INDEFORMADA

Este ensaio tem o mesmo procedimento feito com a amostra do solo compactado em laboratório na energia modificada, só que agora o corpo de prova é o coletado na barragem *in situ* (item 6) desse pesquisa. A amostra foi coletada através do cilindro de cravação e verificou-se a massa específica seca. Assim o corpo de prova foi inserido no cilindro do permeômetro para início do ensaio, conforme Figura 40.

Figura 40 – Preparação do corpo de prova coletado na barragem (*in situ*)



Fonte: (Autor, 2022)

Em seguida o corpo de prova é envolvido com impermeabilizante bentonita de forma a água passe exclusivamente pelo seu eixo no interior do cilindro do permeômetro. Posteriormente, é colocado material granular, brita, para que facilite a permeabilidade da água e assim o permeômetro é fechado e está pronto para o ensaio permeabilidade do solo conforme Figura 41.

Figura 41 - Corpo de prova é envolvido com material de agregado graúdo



Fonte: (Autor, 2022)

Assim, com o corpo de prova coletado *in situ* (amostra indeformada) devidamente preparado no interior do permeômetro, novamente foi feita a passagem da água, por gravidade, pelo do corpo de prova para comparar com o mesmo ensaio de permeabilidade do solo do corpo de prova na energia modificada, conforme Figura 42.

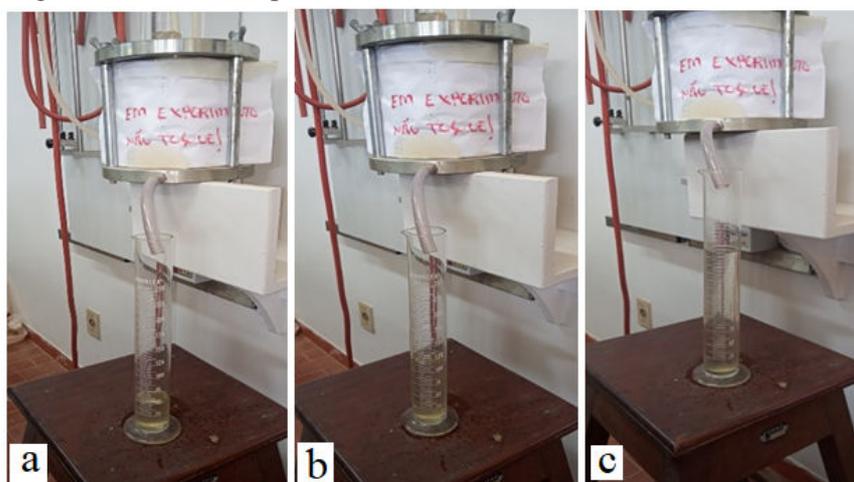
Figura 42 - Esquema do ensaio de permeabilidade da amostra indeformada



Fonte: (Autor, 2022)

No decorrer do ensaio, em 24 horas de observação, o acúmulo do volume na proveta graduada foi de 51 ml, Figura 43a; depois de mais 24 horas acumularam-se 107 ml na proveta graduada, Figura 43b; depois de mais de 24 horas acumularam-se mais 219 ml na proveta graduada Figura 43c.

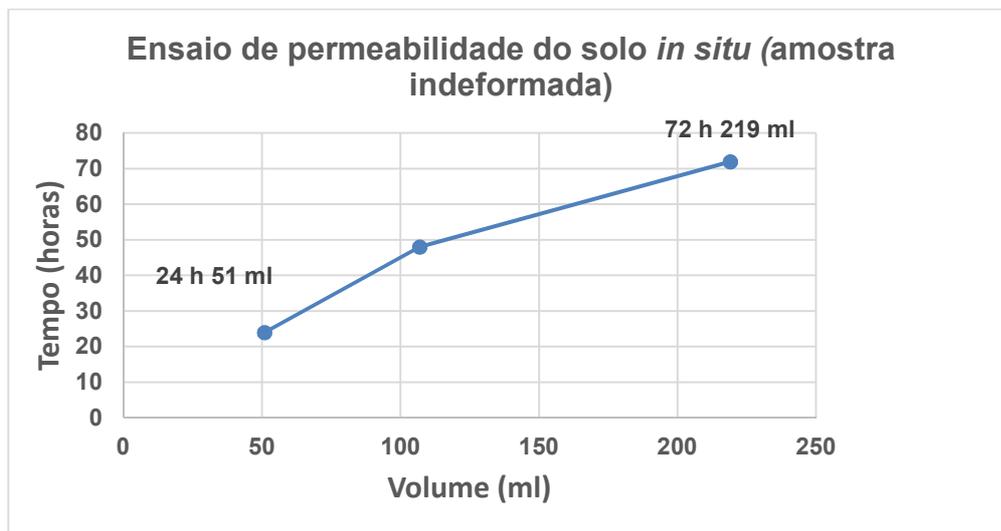
Figura 43 - Ensaio de permeabilidade do solo amostra indeformada



Fonte: (Autor, 2022)

Em resumo, para melhor exemplificar os dados observados no ensaio de permeabilidade do corpo de prova coletado *in situ*, elaborou-se o gráfico de volume x tempo, Figura 44.

Figura 44 - Ensaio de permeabilidade do solo *in situ*(amostra indeformada)



Fonte: (Autor, 2022)

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O grande desafio de construir na Amazônia é a composição do solo, especificamente em solo acriano, conforme estudos, o território do Acre era formado, há milhões de anos atrás, por oceano, isso mesmo, tudo coberto pelo mar, devido a movimentações de placas tectônicas ou sedimentos marinhos e do continente, seja pelo avanço do mar no interior do continente ou pela degradação da composição rochosa dos Andes (CAVALCANTE, 2006).

Assim o solo sedimentar é ruim para as edificações e obras de engenharia. Uma dessas obras é a construção de barragens. Aqui no estado do Acre, elas são importantes para a produção agrícola, o abastecimento de água potável no campo e na cidade, e no desenvolvimento da indústria. Com esse fulcro foi escolhido um dos grandes empreendimentos em barragens no estado do Acre: a empresa Peixes da Amazônia, um complexo de barragens de piscicultura às margens do Rio Iquiri, distante de Rio Branco cerca de 30 km, no sentido Porto Velho, pela BR 364.

A princípio, o solo foi coletado *in situ* e feita a sua análise e caracterização quanto a sua composição granulométrica por peneiramento, de acordo com a ABNT NBR:7181, com os resultados obtidos através da Tabela 10

Tabela 10 - Análise granulométrica por peneiramento

		AMOSTRA DE SOLO SECA AO AR		UMIDADE HIGROSCÓPICA			RESUMO	
		Amostra total úmida (g)	2000,00	Cápsula N.º	7	11	Pedregulho acima de 4,8	0,00%
		Retido # n.º 10 seca (g)	17,94	C + S + A	74,06	78,24	A. grossa 4,8 - 2,0 mm	1,00%
		Passa # n.º 10 úmida (g)	1982,06	C + S	68,35	71,82	A. média 2,0 - 0,42 mm	1,27%
Menor n.º 10 Recip. N.º		Peso da água (g)	202,18	A = água	5,71	6,62	A. fina 0,42 - 200	6,62%
		Passa # n.º 10 seca (g)	1779,88	C = cápsula	18,00	14,18	Passando na # 200	91,11%
		Amostra < n.º 10 úmida	200,00	S = solo	50,35	57,44	Total	100%
Retido n.º 10 Recip. N.º		Amostra < n.º 10 seca (g)	179,60	H = umidade	11,03		Retido na # 200	
		Amostra total seca (g)	1997,82	Hm =	Fc = 0,898			
PENEIRA		MATERIAL RETIDO					% que passa da amostra total	Peneira (ABNT) mm
		Peso (g)	% da amostra menor N.º 10	% da amostra total	% acumulada			
N.º	4						100	4,8
N.º	8							2,4
N.º	10	17,94		1,00	1,00		99,00	2,0
N.º	16							1,2
N.º	30							0,6
N.º	40	2,32	1,29		1,29	98,72	97,73	0,42
N.º	50							0,30
N.º	80							0,18
N.º	100							0,15
N.º	200	11,99	6,67		7,96	92,04	91,11	0,074

Fonte: NBR 7181:2016

E assim chegamos ao resumo do peneiramento conforme mostra a tabela 11;

Tabela 11 - Resumo do ensaio de granulometria

RESUMO	
Pedregulho acima de 4,8	0,00%
A. grossa 4,8 - 2,0 mm	1,00%
A. média 2,0 - 0,42 mm	1,27%
A. fina 0,42 - 200	6,62%
Argila Passando na # 200	91,11%
Total	100%

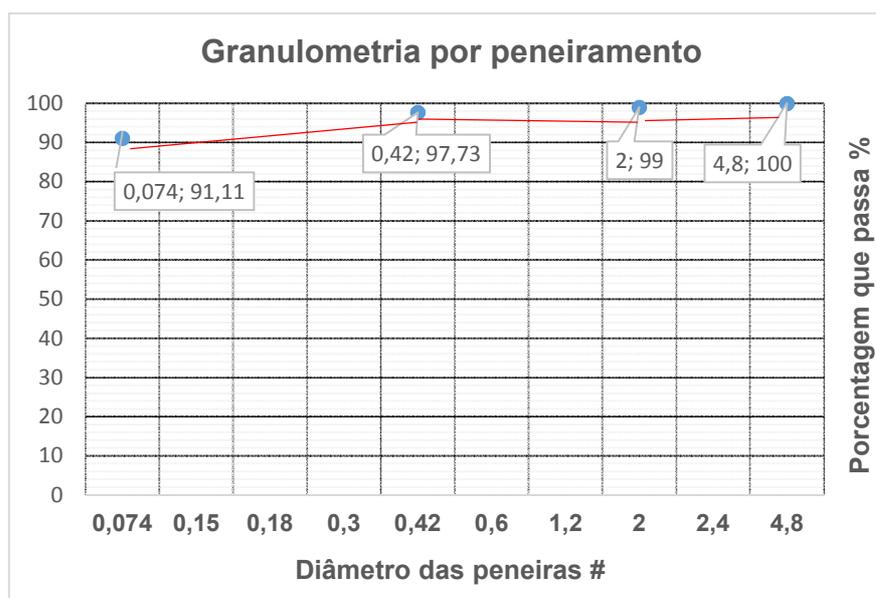
Fonte: (Auto,2022)

Com os resultados dos diâmetros encontrados, segundo a NBR 6092:95, a classificação do solo dentro dos parâmetros para cada peneira a seguir;

- **Pedregulhos:** solos formados por minerais ou partículas de rocha, com diâmetro compreendido entre 2,0 e 60,0 mm. Podem ainda ser subdivididos em pedregulhos finos, médios ou grossos;
- **Areia:** solo não coesivo e não plástico formado por minerais ou partículas de rochas com diâmetros compreendidos entre 0,06 mm e 2,0 mm. Pode também ser subdividido em areias finas, médias e grossas;
- **Silte:** Solo que apresenta baixa ou nenhuma plasticidade, e que exibe baixa resistência quando seco o ar. Suas propriedades dominantes são devidas à parte constituída pela fração silte. É formado por partículas com diâmetros compreendidos entre 0,002 mm e 0,06 mm;
- **Argila:** Solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm.

De posse dos valores encontrados é montado o gráfico da figura 45 com os valores do diâmetro das peneiras nas abscissas e o percentual do que passa no eixo das ordenadas;

Figura 45 - Resultado granulometria por peneiramento



Fonte: (Autor, 2021)

Assim o resultado final da composição granulométrica do solo dessa pesquisa foi que, como 91,11% da amostra passou na peneira #200 de diâmetro $\varnothing=0,074$ mm o resultado é um solo argiloso complexo para as obras de engenharia em destaque, as barragens de terra foco desta pesquisa.

De posse da caracterização do solo partiu-se para a comprovação do tema principal dessa pesquisa que é o ensaio de compactação. A finalidade do ensaio é compactar o solo de forma que diminua os espaços vazios entre suas moléculas com adição de água e assim, chegar à umidade ótima do solo e à densidade ideal de forma a garantir a mínima percolação de água no maciço.

De acordo com a ABNT NBR-7182:2016 existem três modalidades de energia de compactação: normal, intermediária e modificada, conforme tab.3 e de acordo com o tipo de cilindro e soquete pequeno ou grande.

Assim, observou-se que a energia modificada é a melhor em termos de densidade do solo, com maior número de golpes por camada no cilindro. Como a pesquisa em questão é verificar a percolação da água no solo e não a sua resistência a compressão do solo utilizou-se o cilindro pequeno e soquete grande, para 27 golpes, com cinco camadas,

Assim chegamos ao cálculo do peso específico do solo na energia modificada, conforme Tabela 12.

Tabela 12 - Cálculo do peso específico do solo (γ_n)

Ensaio 1 Moldes	Mcil+solo(g)=A	Mcil(g)=B	Msol= C C=A-B (g)	Vcil(cm³)=D	γ_n (g/cm³) E= C/D
1	4642,23	2900	1742,23	998	1,75
2	5012,65	2900	2112,65	998	2,12
3	5034,32	2900	2134,32	998	2,14
4	4962,62	2900	2062,62	998	2,07
5	4729,33	2900	1829,33	998	1,83

Fonte: (Autor, 2021)

Em seguida encontramos o resultado da umidade do solo (w), conforme a Tabela 13.

Tabela 13 - Cálculo da umidade do solo (w)

Ensaio 1 Moldes	Mcap(g)=A	Mcap+Solo úmido(g)=B	Mcap+solo seco(g)=C	Cálculo da umidade(w)= D (%) D= (B-C)/(C-A)X100	$W = \frac{M_{seco}}{M_{úmido}} \times 100$
1	11,54	44,43	41,49	9,82	
2	12,64	46,12	42,37	12,61	
3	11,71	47,93	43,04	15,61	
4	11,79	52,34	46,67	16,26	
5	11,62	53,74	47,47	17,49	

Fonte: (Autor, 2021)

Em seguida encontramos o resultado do peso específico seco do solo (γ_d), conforme a Tabela 14.

Tabela 14 - Cálculo do peso específico seco (γ_d)

Ensaio 1 Moldes	Peso específico natural $\gamma_n(\text{g/cm}^3)=A$	Umidade do solo(w)=B	Peso específico seco(γ_d)=C	$\gamma_d = \frac{\gamma_n}{1+W} (\text{g/cm}^3)$ $C = \frac{A}{(1+\frac{B}{100})} \times 100$
1	1,75	9,82	1,59	
2	2,12	12,61	1,88	
3	2,14	15,61	1,85	
4	2,07	16,26	1,78	
5	1,83	17,49	1,56	

Fonte: (Autor, 2021)

Em seguida com os valores obtidos conforme Tabela 15 foi feita a plotagem;

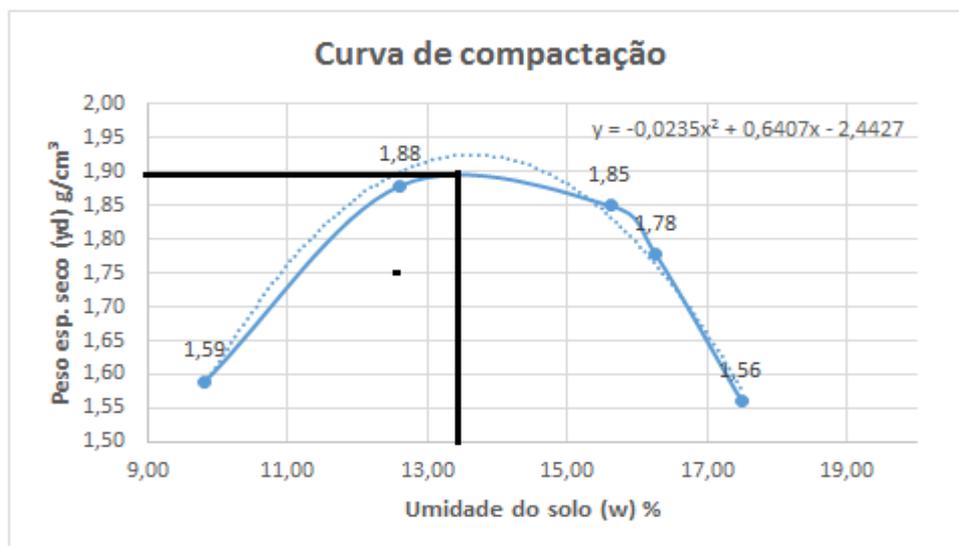
Tabela 15 – Valores para plotagem da curva de compactação

Ensaio 1 Moldes	Umidade do solo(w)=B	Peso específico seco $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$
1	9,82	1,59
2	12,61	1,88
3	15,61	1,85
4	16,26	1,78
5	17,49	1,56

Fonte: (Autor, 2021)

E assim com os valores obtidos da compactação na energia modificada para o cilindro pequeno e soquete grande para um número de 27 golpes por camada num total de 5 camadas conforme NBR 7182:2016 foi obtido o gráfico conforme a Figura 46 a seguir;

Figura 46 - Curva de compactação na energia modificada



Fonte: (Autor, 2021)

Em fim, com os resultados obtidos, conforme curva de compactação na energia modificada para cilindro pequeno, soquete grande e 27 golpes por camada, chegou-se a um peso específico seco (yd) $1,90 \text{ g/cm}^3$ e uma umidade do solo (w) de 13,45%.

Assim como na energia modificada é melhor pelo maior número de golpes e camadas, para podermos comparar com a densidade do solo aplicada *in situ* na barragem, então optamos pelo ensaio do cilindro de cravação ou ensaio de *Hilf* (Brucutu) de acordo com a NBR 9813-1987, e achamos o resultado a umidade média do solo conforme Tabela 16.

Tabela 16- Cálculo da umidade do solo da amostra indeformada

Umidade do solo em estufa a 105°C por 24 horas			
N.º cápsula	26	24	22
C + S + A (g)	88,93	83,66	88,09
C + S	80,94	76,23	81,09
C (g)	19,88	19,32	19,64
S (g)	61,06	56,91	61,45
A (g)	7,99	7,43	8,00
h (%)	13,08	13,05	13,02
Média da umidade = 13,04%			
Onde: C = cápsula, S= solo, A= água, h= umidade			

Fonte: (Autor, 2022)

E por fim, com os resultados da umidade do solo através das fórmulas da Tabela 16, para os cálculos método do cilindro de cravação, a seguir:

Tabela 17 - Determinação da massa específica seca do solo

ENSAIO DO CILINDRO DE CRAVAÇÃO			
Descrição	Unidade	Total	Fórmula
Massa Cilindro com amostra úmida (Mt)	g	3.480	$\gamma_{nat} = \frac{Mt - Mc}{Vc}$
Massa do Cilindro (Mc)	g	1.845	
Volume interno do cilindro (Vc)	cm ³	942,23	
Massa Específica Natural (γ_{nat})	g/cm ³	1,73	
Teor de umidade natural do solo (w)	%	13,04	
Massa Específica Seca (γ_d)	g/cm ³	1,53	$\gamma_d = \gamma_{nat} \times \frac{100}{100+w}$

Fonte: (Autor, 2022)

Por fim, pode-se chegar ao valor da massa específica seca do solo na barragem (**γ_d**) que foi de **1,53 g/cm³**. Com essa resultado é possível fazer as discussões em relação à massa específica seca que foi encontrada no mesmo ponto da barragem com o solo coletado e compactado na energia modificada de Proctor, conforme Tabela 18, comparação de resultados a seguir:

Tabela 18 – Resultados das densidades de compactação das amostras

Ensaio de Proctor Densidade com energia modificada (compactação em laboratório)	Ensaio de Hilf Densidade no local da barragem (<i>in situ</i>) (compactação da amostra indeformada)
1,90 g/cm ³	1,53 g/cm ³

Fonte: (Autor, 2022)

Em seguida foi feito o ensaio de permeabilidade do solo das amostras: com o corpo de prova na energia modificada descrito na ABNT NBR 14545:2000 para obter a vazão dessa amostra.

Conforme esquema que, por gravidade, fez a água passar pelo eixo do corpo de prova, verificou-se o volume acumulado na proveta graduada em função do tempo, conforme a Figura 47.

Figura 47- Esquema do ensaio de permeabilidade do solo por gravidade



Fonte: (Autor, 2022)

Após montado o ensaio para que a água escoasse, por gravidade, do reservatório do permeâmetro, passando exatamente pelo no eixo axial do corpo de prova, observou-se que durante uma semana não houve acúmulo de água na proveta graduada. Acredita-se que esse foi o tempo até a saturação do corpo de prova. Mas, após uma semana, houve um acúmulo na proveta graduada de 25 ml, significando 3,57 ml por dia de vazão de água

percolando pelo corpo prova. Após esse período, a vazão estabilizou-se não havendo mais modificação no volume diário, conforme Figura 48.

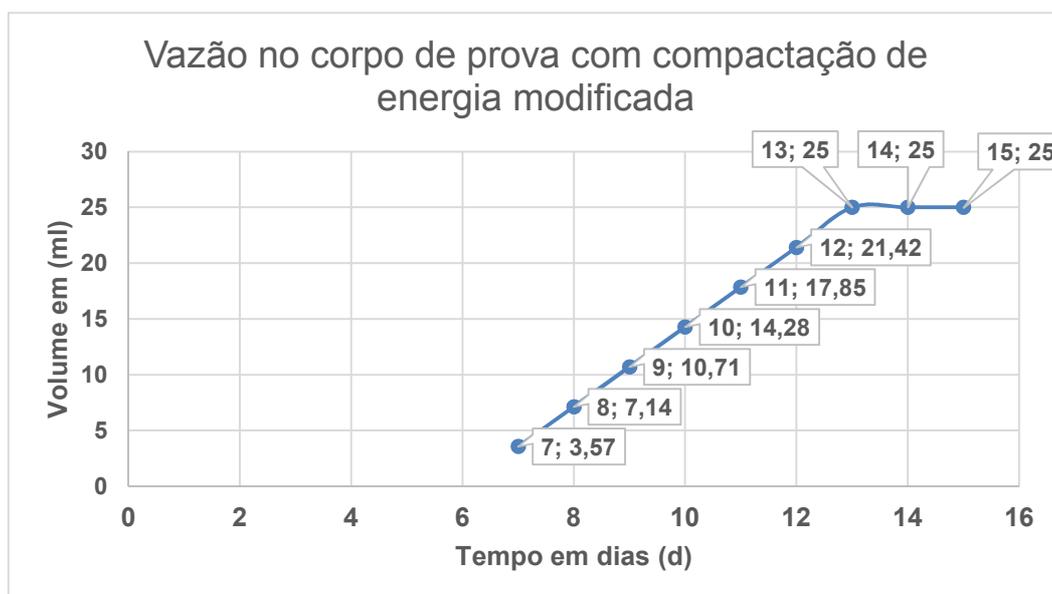
Figura 48 - Ensaio de permeabilidade do corpo de prova na energia modificada



Fonte: (Autor, 2022)

Assim com esse resultado para melhor visualização dos dados obtidos foi elaborado o gráfico de vazão, conforme a Figura 49.

Figura 49 – Vazão no corpo de prova com compactação de energia modificada



Fonte: (Autor, 2022)

Da mesma forma também baseado no ensaio de permeabilidade do solo de acordo com ABNT NBR 14545:2000 foi feito o ensaio com o corpo de prova coletado (in situ) no local da barragem.

Assim, com o corpo de prova coletado *in situ* (amostra indeformada) devidamente preparado no interior do permeâmetro, novamente foi feita a passagem da água, por gravidade, pelo do corpo de prova para comparar com o mesmo ensaio de permeabilidade do solo do corpo de prova na energia modificada, conforme Figura 50.

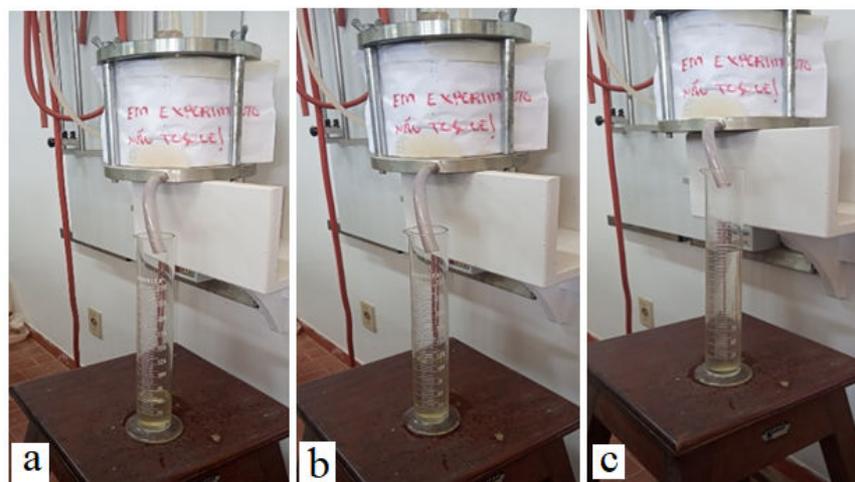
Figura 50 - Esquema do ensaio de permeabilidade da amostra indeformada



Fonte: (Autor, 2022)

No decorrer do ensaio, em 24 horas de observação, o acúmulo do volume na proveta graduada foi de 51 ml, Figura 43a; depois de mais 24 horas acumularam-se 107 ml na proveta graduada, Figura 43b; depois de mais de 24 horas acumularam-se mais 219 ml na proveta graduada Figura 43c.

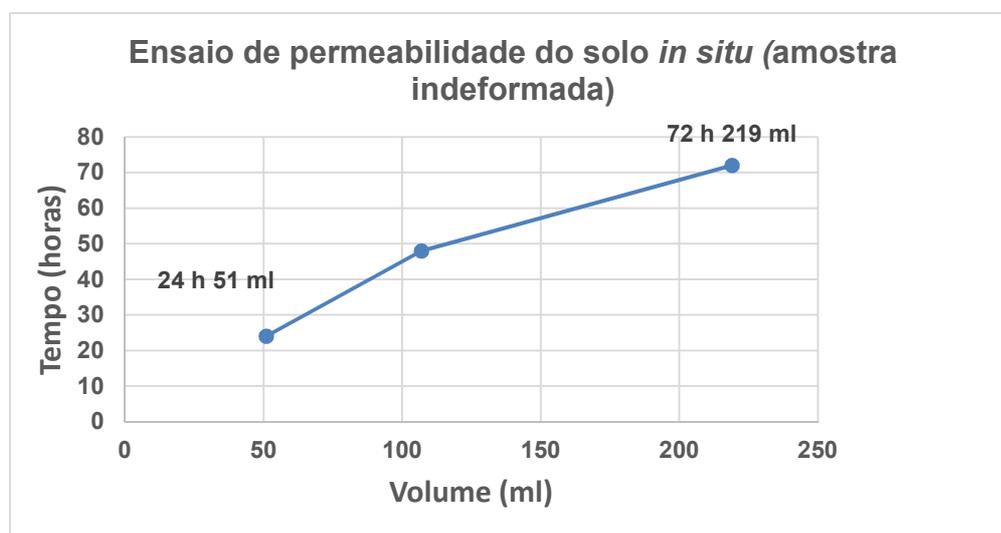
Figura 51 - Ensaio de permeabilidade do solo amostra indeformada



Fonte: (Autor, 2022)

Em resumo, para melhor exemplificar os dados observados no ensaio de permeabilidade do corpo de prova coletado *in situ*, elaborou-se o gráfico de volume x tempo, Figura 52.

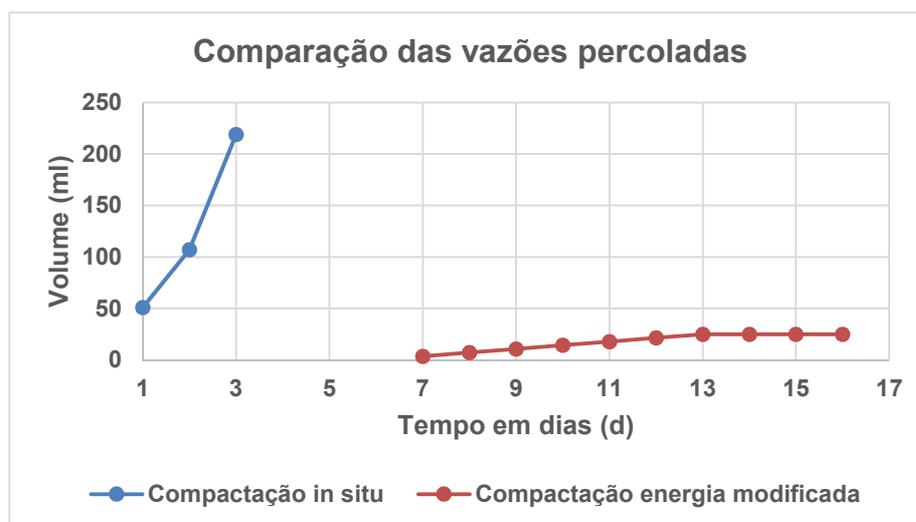
Figura 52 - Ensaio de permeabilidade do solo *in situ* (amostra indeformada)



Fonte: (Autor, 2022)

E assim para melhor exemplificar os resultados obtidos tanto no ensaio de permeabilidade do solo energia modificada, com no ensaio de permeabilidade do solo com o corpo de prova coletado (*in situ*) no local da barragem pode-se fazer a comparação das vazões nas duas situações em que a água percolou, por gravidade, pelo eixo axial do corpo de prova inserido do permeômetro, Figura 53.

Figura 53 – Comparação das vazões percoladas



Fonte: (Autor, 2022)

Analisando os resultados verificou-se uma significativa diferença entre os dois graus de compactação. No corpo de prova coletado *in situ* no local da barragem, no primeiro dia de observações, houve um acúmulo na proveta graduada de pouco mais de 50ml de água (no gráfico linha azul). A partir do segundo dia de observação da compactação feita na barragem linha azul ou quase o dobro do volume acumulado no primeiro dia, pouco mais de 100 ml. Já para o corpo de prova com compactação na energia modificada, feita no laboratório, nos 7 primeiros dias não percolou uma gota de água na proveta graduada, linha vermelha.

7 CONCLUSÕES

As barragens são estruturas muito importantes na engenharia civil. Desde a antiguidade já se tem notícias de suas construções. Essa importância vem, dentre outros, do fato de que muitos indivíduos dependem de uma só barragem em uma localidade, quer seja para produção de peixes e outros animais, ou para o abastecimento humano, ou geração de energia, e até para contenção de cheias nos rios.

Assim, uma barragem precisa de ter segurança garantida para uma longa vida útil. É necessário prevenir o acidente de desmoronamento do maciço quando a barragem é de terra. Esse acidente poderá ocorrer, principalmente, se houver percolação de água no maciço, de modo a romper sua estrutura. Um acidente com barragem é sempre uma tragédia que permanece na lembrança dos atingidos por décadas.

A garantia de mínima percolação de água no maciço vem de uma boa compactação do núcleo da barragem, ou seja, a compactação em umidade ótima, que foi o estudo da presente pesquisa. Não se esquecendo das estruturas coadjuvantes dos drenos verticais e horizontais, além do constante monitoramento.

Assim diversos desastres que ceifaram vidas humanas com danos ambientais como os Acidentes com Barragens em Brumadinho e Mariana no Estado de Minas Gerais, as Barragens no Estado do Acre sendo a maioria delas é feita sem nenhum acompanhamento técnico, onde o peso próprio do equipamento no caso tratores faz a compactação da barragem, além do risco da escolha de jazida muitas vezes inadequada para o material a ser utilizado na barragem.

Essa pesquisa mostrou que para se construir uma barragem é preciso o trabalho de laboratório, feito por profissional habilitado, em que se faz o estudo do solo e calcula-se o melhor grau de compactação a ser utilizado na construção da barragem para garantir a mínima percolação de água no maciço, o que poderia provocar a ruína da estrutura. A esse fato juntam-se o cálculo da base (largura mínima) do maciço para prevenir o tombamento e deslizamento.

Chegou-se à conclusão de que a barragem construída e utilizada no experimento de compactação tem uma densidade absoluta (massa específica) de 80,5 % da ideal. Esse fato, considerado isoladamente, pode não ter grande importância à primeira vista, mas, quando associado à percolação de água no maciço, em que se notou uma vazão de água de cerca de 8 vezes maior, torna-se então preocupante em termos de segurança e vida útil da barragem.

Recomenda-se que em pesquisas futuras se possa fazer o acompanhamento da percolação dessa barragem do estudo, bem como repetir a verificação da compactação para outras barragens no estado do Acre, fazendo-se a correlação com a vida útil.

8 REFERÊNCIAS

ABREU, I. D.; NETO, M. A. A. **Física para universitários-Mecânica**. 1ª. ed. São Paulo: AMGH, v. I, 2012. 171 p.

ABNT. **Solo - Determinação da massa específica aparente in situ, com emprego de cilindro de cravação-NBR 9813:1987**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 1987.

ABNT. **Ensaio de permeabilidade do solo a carga variável- NBR 14545:2000**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 12. 2000.

ABNT. **Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização- NBR 6457:2016**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2016.

ABNT. **Análise granulométrica- NBR 7181:2016**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro. 2016.

ABNT. **Ensaio de compactação do solo- NBR7182:2016**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 9 paginas. 2016.

ARAÚJO, E. A. D. **Pontencialidades, restrições e uso da terra no Acre**. 1ª. ed. Curitiba: Editora CRV, v. 1, 2011.

ABNT. **Ensaio de compactação do solo- NBR7182:2016**. Associação Brasileira de Normas Técnicas. Rio de Janeiro, p. 9 paginas. 2016.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. 3ª. ed. Rio de Janeiro: Livro Técnico S/A, v. I, 2015.

CAVALCANTE, L. M. **Aspectos Geológicos do Estado do Acre**. Embrapa. Rio Branco. 2006.

CONTENCO. Permeâmetro completo para carga constante. **contenco produtos para ensaios de engenharia**, 2020. Disponível em: <<https://contenco.com.br/produto/permeametro-completo-para-carga-constante-o-4-6/>>. Acesso em: 02 dezembro 2020.

DOURADO, K. A. **Codutividade hidraulica de materiais de baixa permeabilidade;desevolvimento, construção e teste de um sistema de medida(tese de mestrado)-orientador;Orencio Monge vilar**. São Carlos: [s.n.], 2003. 11 p. Disponível em: <<https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-02042007-155703/publico/dissertacao.pdf>>.

FERNANDES, M. D. M. **Mecânica dos solos introdução a engenharia geotécnica**. 1. ed. Porto: FEUP Edições, v. 2, 2011.

GAGLIARDO, D. P. **Engenharia Civil Conceção, Teoria E Prática**. 1. ed. São Paulo: Clube de Autores, v. 1, 2017.

GARCIA, D. S. **Panorama Geotécnico das Rupturas de Barragens e Gestão de Risco**. 1. ed. Curitiba: Editora Appri, v. 1, 2021.

GARCIA, J. B.; PACHECO, A. Centro Universitário de Brasília. **Uniceub Educação superior**, 2016. Disponível em: <<https://repositorio.uniceub.br/jspui/handle/235/9712>>. Acesso em: 29 julho 2020.

GUIDICINI, G.; NIEBLE, C. M. **Estabilidade de taludes naturais e de escavação**. 3ª. ed. São Paulo: Edgard Blucher Ltda, v. III, 1983.

MASSAD, F. **Mecânica dos solos experimental**. 1ª. ed. São Paulo: Oficina de textos, v. II, 2016.

NUNES, J. C. Monitoramento de barragens no Acre será reforçado. **Agencia Brasil**, 2019. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/radioagencia-nacional/geral/audio/2019-02/monitoramento-de-barragens-no-acre-sera-reforcado>>. Acesso em: 2022

OCDE. **Governança dos recursos hídricos no Brasil**. Paris: OECD Publishing, 2015.

PINTO, C. D. S. **curso básico de mecânica dos solos**. 3ª. ed. São Paulo: Câmara brasileira do livro, v. 3, 2012.

QUEIROZ, R. C. **Geologia e Geotecnia básica para a Engenharia Civil**. 1ª Edição. ed. Sao Paulo: Blucher, v. 1, 2016.

RODRIGUES, I. **g1.Acre**, 2019. Disponível em: <<https://g1.globo.com/ac/acre/noticia/2019/02/03/>>. Acesso em: 2021.

SUPORTE. **Suporte**, 2011. Disponível em: <<https://www.suportesolos.com.br/blog/a-natureza-dos-solos-textura-granulometria-e-forma-das-particulas/66/>>. Acesso em: 20 maio 2022.

VIANA, A. B. revistas.uninorteac.com.br/. **DêCiência em Foco**, Rio Branco, 2019. Disponível em: <<http://revistas.uninorteac.com.br/index.php/DeCienciaemFoco0/article/view/256>>. Acesso em: 28 julho 2020.

VOLS, G. **Fing a grave**, 2010. Disponível em: <<https://pt.findagrave.com/memorial/47545724/ralph-roscoe-proctor>>. Acesso em: 2022.