



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

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO
NO COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM SOLO
LATERÍTICO DA REGIÃO DE RIO BRANCO - AC**

MARCELO VICTOR DE ASSIS MORAIS

RIO BRANCO, AC
Junho/2021

MARCELO VICTOR DE ASSIS MORAIS

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO
NO COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM SOLO
LATERÍTICO DA REGIÃO DE RIO BRANCO - AC**

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

Orientador: Dr. ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ

Co-orientador: Dr. RICARDO RIBEIRO DO NASCIMENTO

RIO BRANCO, AC
Junho/2021

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

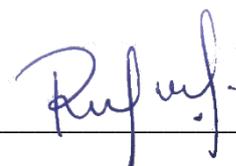
INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE NANOTUBOS DE CARBONO NO
COMPORTAMENTO FÍSICO DE UM SOLO LATERÍTICO DA
REGIÃO DE RIO BRANCO – AC

MARCELO VICTOR DE ASSIS MORAIS

DISSERTAÇÃO APROVADA EM: 28/06/2021



ANSELMO FORTUNATO RUIZ RODRIGUEZ
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE



RICARDO RIBEIRO DO NASCIMENTO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE



JASON JERRY ATOCHE MEDRANO
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

Aos meus pais, José Raimundo da Silva Morais e Neyla Maria Meireles de Assis Morais, e minha esposa Fernanda Viana Diniz, que me deram toda o suporte e condição para que eu chegasse até esta etapa de minha vida.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por ter me dado força e sabedoria para superar as dificuldades. Agradeço principalmente pela saúde, nesta época tão difícil em que a humanidade está vivendo.

Aos meus pais, José Raimundo da Silva Morais e Neyla Maria Meireles de Assis Morais, que não mediram esforços para me proporcionar a melhor educação possível e desde pequeno me ensinaram a importância e o privilégio do estudo. A minha esposa Fernanda Viana por todo o apoio, paciência e por acreditar em mim quando nem mesmo eu acreditava. Aos meus irmãos André Matheus e Andressa Morais e minha cunhada Aline Lima, com menção especial ao presente de Deus que nos foi dado, meu sobrinho Miguel.

À minha família de modo geral, meus avós, tios, primos, que apesar da distância sempre torceram para meu sucesso, e citação especial ao meu tio José Augusto (*in memoriam*).

Aos amigos e colegas de mestrado/laboratório Carlos Drumond, Marcelo Ramon, que tanto me auxiliaram na realização de ensaios, experimentos, escritas de artigo e compartilhamento de conhecimento, meu muito obrigado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Anselmo Fortunato Ruiz Rodriguez, pela orientação e conhecimento sobre nanotecnologia. Ao meu coorientador Prof. Dr. Ricardo Ribeiro do Nascimento, por acreditar em meu projeto de pesquisa e me auxiliar nos caminhos a serem tomados. A todo o corpo docente do PPG – CITA que contribuíram para meu crescimento pessoal e profissional. A Universidade Federal do Acre, por possibilitar a execução deste trabalho de forma gratuita.

A todos os colegas do Laboratório de Nanobiotecnologia do Complexo Bionorte da UFAC, por auxiliarem nos ensaios relacionados a caracterização dos nanotubos de carbono. Ao Prof. Dr. José Carlos “Ponciano”, por gentilmente ceder suas amostras de nanotubos de carbono e sempre me auxiliar no presente trabalho.

A todos os colaboradores da FUNTAC, em especial ao técnico Carlos, pelo auxílio na realização dos ensaios físicos e mecânicos do solo.

Ao departamento de perícia da Polícia Civil do Estado do Acre, em especial ao perito Giuliano, pelo auxílio na realização dos ensaios químicos e por permitir utilizar a estrutura da unidade.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa do mestrado.

À todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização desta pesquisa,
meu muito obrigado.

“I am a man of fortune, and I must seek my fortune”
Henry Avery

RESUMO

Neste trabalho avaliamos o comportamento físico-mecânico de solo laterítico com adição de nanotubos de carbono. O solo foi coletado em uma jazida comercial localizada em Rio Branco – AC e posteriormente caracterizado através dos ensaios de granulometria, Difração de Raios-X, Espectroscopia por Dispersão de Raios-X e ensaio MCT. Foi realizada a dispersão dos nanotubos de carbono em solução e verificado o tamanho das nanopartículas através do Espalhamento de Luz Dinâmica - DLS, Potencial Zeta e PDI. Foram avaliadas três porcentagens de adições (0,05%, 0,1% e 0,2%) de nanotubos de carbono e foram comparados com o grupo controle de acordo com os parâmetros de limites de Atterberg, massa específica real, densidade seca máxima e umidade ótima. Os resultados obtidos demonstram que se trata de um solo argiloso de textura média, com presença do argilomineral caulinita em sua composição e de óxidos de silício e ferro. A dispersão dos nanotubos de carbono alcançou partículas com diâmetro hidrodinâmico médio de 68,9 nm e Potencial Zeta de -24,87 mV e PDI de 0,231, caracterizando uma solução como moderadamente dispersa e estável cineticamente. Os resultados dos ensaios de limite de liquidez e de plasticidade apresentaram uma redução de 10 e 13%, respectivamente, com a adição dos nanotubos de carbono, enquanto que para os parâmetros de índice de plasticidade, densidade real, densidade seca máxima e umidade ótima, não apresentaram variação significativa.

Palavras-chave: Solos lateríticos; Nanotubos de carbono; Melhoramento de solo.

ABSTRACT

In this work we evaluate the physical-mechanical behavior of lateritic soil with addition of carbon nanotubes. The soil was collected in a commercial deposit located in Rio Branco – AC and later characterized through particle size tests, X-Ray Diffraction, X-Ray Dispersion Spectroscopy and MCT assay. The dispersion of nanotubes in solution was carried out and the size of the nanoparticles was verified using Dynamic Light Spreading - DLS, Zeta Potential and PDI. Three percentages of additions (0.05%, 0.1% and 0.2%) of carbon nanotubes were evaluated and compared with the control group according to the parameters of Atterberg limits, real density, dry density maximum and optimum humidity. The results obtained demonstrate that it is a clayey soil of medium texture, with the presence of clay mineral kaolinite in its composition and silicon and iron oxides. The dispersion of carbon nanotubes reached particles with an average hydrodynamic diameter of 68,9 nm and Zeta Potential of -24,87 mV and PDI of 0,231, characterizing a solution as moderately dispersed and kinetically stable. The results of the liquidity limit and plasticity tests showed a reduction of 10 and 13%, respectively, with the addition of carbon nanotubes, while for the parameters of plasticity index, real density, maximum dry density and optimal moisture, they did not show significant variation.

Keywords: Lateritic soils; Carbon nanotubes; Soil improvement.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Distribuição geográfica dos solos do Brasil.....	18
Figura 2. Solos presentes no estado do Acre.....	19
Figura 3. Representação espacial da unidade tetraédrica.....	20
Figura 4. Representação espacial da unidade octaédrica.....	20
Figura 5. Ocorrência de solos tropicais no território brasileiro.....	23
Figura 6. Solo saprolítico na estrada de ferro de Carajás, em Açailândia – MA.....	23
Figura 7. Jazida com ocorrência de solo laterítico.....	24
Figura 8. Ábaco de classificação MCT.....	25
Figura 9. Folha de grafeno e SWCNT.....	32
Figura 10. Folhas de grafeno e MWCNT.....	32
Figura 11. Localização da jazida de retirada do solo laterítico.....	37
Figura 12. Realização do ensaio MCT.....	39
Figura 13. Equipamento para espectroscopia dispersiva de Raios-X.....	39
Figura 14. Caixa de CTube 120 contendo os nanotubos de carbono (MWCNT).....	40
Figura 15. Solução para dispersão dos nanotubos de carbono.....	41
Figura 16. Processo de dispersão dos nanotubos de carbono.....	41
Figura 17. Processo de preparação das amostras utilizadas para os ensaios físicos e mecânicos.....	42
Figura 18. Delineamento estatístico e experimental da pesquisa.....	43
Figura 19. Gráfico de granulometria do solo.....	46
Figura 20. Ábaco de classificação MCT com os resultados do solo utilizado na pesquisa.....	47
Figura 21. Carta de plasticidade com classificação do solo.....	48
Figura 22. Composição Química do solo.....	48
Figura 23. Difratograma de Raios-X do solo laterítico.....	49
Figura 24. Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) dos nanotubos de carbono.....	50
Figura 25. DLS com a dispersão a solução com 0,15% de Tween 80 e 0,01% de MWCNT.....	51
Figura 26. Gráfico do Potencial Zeta da solução com 0,15% de Tween 80 e 0,01% de MWCNT.....	53
Figura 27. Médias dos limites de Atterberg para as amostras (grupos controle e com diferentes adições de CNTs).....	54
Figura 28. Médias da massa específica real das amostras dos grupos controle e com diferentes adições de CNTs.....	55
Figura 29. Curvas de compactação das amostras do solo (grupo controle e com diferentes adições de CNTs).....	55
Figura 30. Médias das densidades secas máximas e umidade ótima das amostras de solo (grupos controle e com diferentes adições de CNTs).....	56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Composição granulométrica do solo	46
Tabela 2. Propriedades dos nano tubos de carbono (CTube 120).	50
Tabela 3. Diâmetro médio obtido de MWCNT em soluções com diferentes tensoativos, com 0,01% de MWCNT.....	51

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

Θ - Theta

μm - Micrômetro

Ω.cm – Ohm por centímetro

μL - Microlitro

A/cm² - Ampére por centímetro quadrado

CBR - *California Bear Rating* (Índice de Suporte Califórnia)

CNT – *Carbon Nanotubes* (Nano tubos de carbono)

DLS – *Dynamic Light Scattering* (Espalhamento Dinâmico de Luz)

DNER – Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

DNIT – Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes

DRX - Difratorômetro de Raios-X

EDS – *Energy Dispersive Spectroscopy* (Sistema de Energia Dispersiva)

EMURB – Empresa Municipal de Urbanização de Rio Branco

FUNTAC – Fundação de Tecnologia do Estado do Acre

g/cm³ - gramas por centímetro cúbico

GPa - GigaPascal

HRB – *Highway Research Board* (Conselho de Pesquisa Rodoviária)

m²/g – Metros quadrados por grama

MCT – Miniatura Compactado Tropical

MCV – *Moisture Condition Value* (Valor da Condição de Umidade)

MEV – Microscopia Eletrônica de Varredura

MWCNT – *Multi Wall Carbon Nanotubes* (Nano tubos de Carbono de Paredes Múltiplas)

mV - Milivolts

NBR – Norma Brasileira

nm - Nanômetro

PDI – *Polidispersivity Index* (Índice de Polidispersividade)

pH – Potencial Hidrogeniônico

SiBCS – Sistema Brasileiro de Classificação de Solos

SPT – *Standard Penetration Test* (Ensaio de Penetração Padrão)

SUCS – Sistema Unificado de Classificação de Solos

SWCNT – *Single Wall Carbon Nanotubes* (Nano tubos de Carbono de Paredes Simples)

TPa – Tera Pascal

W/m.K – Watts por metro Kelvin

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	14
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	16
2.1 Tipos de solos no Brasil	16
2.1.1 Solos na região do Acre	18
2.2 Solos Argilosos.....	19
2.2.1 Mineralogia das argilas	20
2.2.2 Comportamento físico e mecânico dos solos argilosos.....	21
2.3 Solos expansivos	21
2.4 Solos tropicais	22
2.4.1 Solos saprolíticos.....	23
2.4.2 Solos lateríticos	24
2.4.3 Classificação MCT.....	25
2.5 Estabilização de solos.....	26
2.5.1 Estabilização mecânica	26
2.5.2 Estabilização granulométrica	27
2.5.3 Estabilização química.....	27
2.6 Uso da nanotecnologia na engenharia geotécnica	29
2.6.1 Mecanismos de estabilização de solos com nano materiais.....	29
2.6.2 Nano materiais usados na estabilização de solos	30
2.7 Características dos nanotubos de carbono	31
2.7.1 Classificação dos nanotubos de carbono.....	31
2.7.2 Propriedades dos CNTs	32
2.7.3 Nanotubos de carbono na estabilização de solos	33
3. OBJETIVOS.....	35
3.1 Geral	35
3.2 Específicos.....	35
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	36
4.1 Descrição do local de estudo	36
4.2 Coleta das amostras	36
4.3 Caracterização do solo.....	37
4.3.1 Análise granulométrica	37

4.3.2	Ensaio MCT	38
4.3.3	Análise química.....	39
4.3.4	Análise mineralógica.....	39
4.4	Preparação e caracterização dos nanotubos de carbono	40
4.4.1	Obtenção dos nanotubos de carbono	40
4.4.2	Dispersão dos nanotubos de carbono	40
4.4.3	Tamanho médio, Índice de Polidispersividade (PDI) e Potencial Zeta.....	42
4.5	Delineamento estatístico e experimental	43
4.6	Ensaio físicos e mecânicos do solo	43
4.6.1	Limites de Atterberg.....	43
4.6.2	Densidade seca máxima e umidade ótima.....	44
4.6.3	Massa específica real.....	45
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	Caracterização do solo.....	46
5.1.1	Granulometria.....	46
5.1.2	Ensaio MCT	47
5.1.3	Análise química (EDX).....	48
5.1.4	Análise mineralógica (DRX).....	49
5.2	Nanotubos de carbono	49
5.2.1	Caracterização dos nanotubos	49
5.2.2	Dispersão dos nanotubos de carbono (Tamanho médio, PDI e Potencial Zeta)	50
5.3	Ensaio físicos	53
5.3.1	Limites de Atterberg.....	53
5.3.2	Massa específica real.....	54
5.3.3	Densidade seca máxima e umidade ótima.....	55
6.	CONCLUSÕES	57
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59

1. INTRODUÇÃO

A construção civil é a grande responsável pela economia do país, sendo que são encontradas fortes evidências de que os investimentos em infraestrutura influenciam diretamente na ascensão dos demais setores industriais, e, portanto, contribui de forma essencial para o desenvolvimento econômico do país (NUNES et al., 2020). Neste sentido, diversos setores são essenciais para o desenvolvimento econômico de um país, em especial aqueles que desempenham grande influência na economia e que se vinculem com as outras áreas (VIEIRA; NOGUEIRA, 2018).

O setor da construção civil ocupa um papel importante no panorama econômico brasileiro, sendo responsável, em 2019, por um faturamento de mais de R\$ 302 bilhões de reais, gastos salariais de R\$ 406 milhões de reais, envolvendo direta ou indiretamente mais de 1,9 milhões de pessoas (IBGE, 2019).

Um dos maiores desafios na realização de obras de infraestrutura ou de pavimentação está relacionado ao encontro de depósitos de solos com propriedades geotécnicas de baixa qualidade, como por exemplo baixa resistência e alta deformabilidade, exigindo da engenharia geotécnica a aplicação de técnicas de melhoramento do terreno que minimizem os problemas de recalque e estabilidade que são típicos destes solos (DA SILVA et al., 2020).

Situado no extremo sudoeste da Amazônia brasileira, o estado do Acre caracteriza-se geologicamente por uma bacia sedimentar com um horizonte espesso de material fino, ocupando quase toda a superfície do estado, onde cerca de 70% do solo da região é composta por solos argilosos, do tipo 2:1, que possuem baixa capacidade de suporte e alta expansibilidade em presença de água (ACRE, 2010). De acordo com o Grupo de Estudos e Serviços Ambientais AcreBioClima (2017), o estado possui índices pluviométricos acima de 200 mm mensais, fatores estes que dificultam a execução de rodovias com os índices mínimos de resistência adotados pelos métodos convencionais, como o do CBR.

Dentre os solos finos amplamente utilizados em bases e sub-bases de pavimentos, destaca-se os solos que apresentam comportamento laterítico, onde apesar de seu estado natural apresentar baixa capacidade de suporte, ao ser compactado adquire uma alta resistência, fator que, em conjunto com a abundância do mesmo em território brasileiro, justifica o seu uso em obras de pavimentação urbana (ARRUDA, 2020).

No entanto, apesar de suas propriedades possibilitarem o seu uso na construção de vias de tráfego, os solos com comportamento laterítico podem necessitar do uso de técnicas de melhoramento para aumento da resistência em função dos mais variados carregamentos que a

rodovia deverá suportar (SILVA; CASTRO, 2020). A estabilização química de solos é o melhoramento das propriedades geotécnicas de solos, notadamente a resistência, durabilidade e a deformabilidade, e geralmente ocorre por meio da adição de materiais cimentícios ao solo *in situ* (CORRÊA-SILVA et al., 2020).

Entre os principais tipos de agentes estabilizantes, pode-se citar a cal, cimento Portland, asfalto, emulsões e polímeros acrílicos (MACHADO et al., 2017). No entanto, os significativos impactos ambientais associados com a produção destes elementos trazem uma preocupação global (EYO et al., 2020). Com isso, a nanotecnologia vem se mostrando como uma área promissora, pois o uso de nanomateriais, além de ser viável do ponto de vista técnico, também se demonstra como uma alternativa econômica, devido a baixíssima quantidade necessária de nanomateriais no solo para atingir a melhora nos parâmetros geotécnicos (KARUMANCHI, 2020).

Dentre os nanomateriais, os nanotubos de carbono (CNT) são tidos como um dos mais promissores na indústria da construção civil. Os CNT's possuem propriedades excelentes, como alta resistência a tração, módulo de elasticidade elevado e ótimo condutor de eletricidade (TAHA et al., 2018). Além disso, estes nanomateriais já estão amplamente disponíveis no mercado, com produtos de boa qualidade e com preços relativamente baixos, o que favorece o seu uso para pesquisas (TAHA, ALSHAREF, 2018).

Apesar deste cenário, ainda há poucas pesquisas relacionadas ao uso de nanomateriais em solos para verificação de melhorias nas propriedades geotécnicas, e ainda menos para a investigação destes materiais em solos com comportamento laterítico, tornando este trabalho pioneiro na área de conhecimento.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Tipos de solos no Brasil

O território brasileiro possui uma área de mais de 8,5 milhões de km² (IBGE, 2018), o que faz com que exista uma grande variedade de tipos de solo por toda a sua extensão. Existem 13 classes de solos contidas no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), onde é possível ver a influência desta variedade em diversas características químicas, física e morfológicas (SANTOS et al., 2013)

Os 13 tipos de solos contidos no SiBCS, de acordo com a Santos et al. (2018) são:

- **Argissolos:** Identificados pelo maior teor de argila nos horizontes subsuperficiais em relação aos superficiais. Os minerais predominantes são argilas de atividade baixa (caulinita) e/ou óxidos.
- **Cambissolos:** Caracterizados pela pouca diferenciação dos horizontes nas características morfológicas, principalmente pela cor e estrutura. A grande variabilidade da natureza e transformação do material de origem proporciona ampla variação em sua composição química e granulométrica.
- **Chernossolos:** Caracterizados pela presença de horizonte superficial relativamente espesso, escuro, com boa agregação e presença de argilominerais 2:1.
- **Espodossolos:** Apresentam horizonte subsuperficial com acúmulo de matéria orgânica e alumínio. De maneira geral a composição granulométrica tem o predomínio da fração areia. São solos muito pobres e ácidos.
- **Gleissolos:** Material predominantemente argiloso que passou por processos de oxidação e redução em ambiente saturado por água. Geralmente estão associados ao material sedimentar recente nas proximidades de cursos d'água.
- **Latossolo:** São altamente intemperizados e sem incremento de argila em profundidade. Os minerais predominantes na fração argila são caulinita e óxidos de ferro e alumínio.
- **Luvissolos:** Solos com acúmulo de argila em subsuperfície associado à argila de atividade alta.
- **Neossolos:** São solos pouco evoluídos pedogeneticamente, constituídos por material mineral ou por material orgânico com menos de 20 cm de espessura.

- **Nitossolos:** Apresentam textura argilosa ou muito argilosa, com coloração variando de vermelho a bruno. São normalmente profundos, bem drenados, estruturados, moderadamente ácidos e de fertilidade natural muito variável.
- **Organossolos:** Formados por elevados teores de matéria orgânica. Possui elevados teores de carbono e coloração preta, cinzenta muito escura ou brunada, resultantes de acumulação de restos vegetais.
- **Planossolos:** Apresentam textura predominantemente arenosa em superfície, com grande aumento de argila em subsuperfície. Apresenta as cores acinzentadas ou variegadas.
- **Plintossolos:** As cores predominantemente cinzentas, vermelhas e amareladas no padrão variegado ou mosqueado e muitas vezes com moderado aumento de argila em subsuperfície. Frequentemente são ácidos e com baixa reserva de nutrientes.
- **Vertissolos:** Identificados pelo baixo grau de desenvolvimento pedogenético e altos teores de argila. Podem apresentar argilominerais 2:1. São de coloração acinzentada ou preta, sem diferença significativa no teor de argila entre a parte superficial e a subsuperficial do solo, com elevada fertilidade química.

No território nacional predominam os Latossolos, Argissolos e Neossolos, que se distribuem em aproximadamente 70% na área do país, conforme Figura 1. Os latossolos e argissolos, também chamados de solos argilosos, são solos profundos, altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural, e prevalecem na região norte do país (EMBRAPA, 2011).

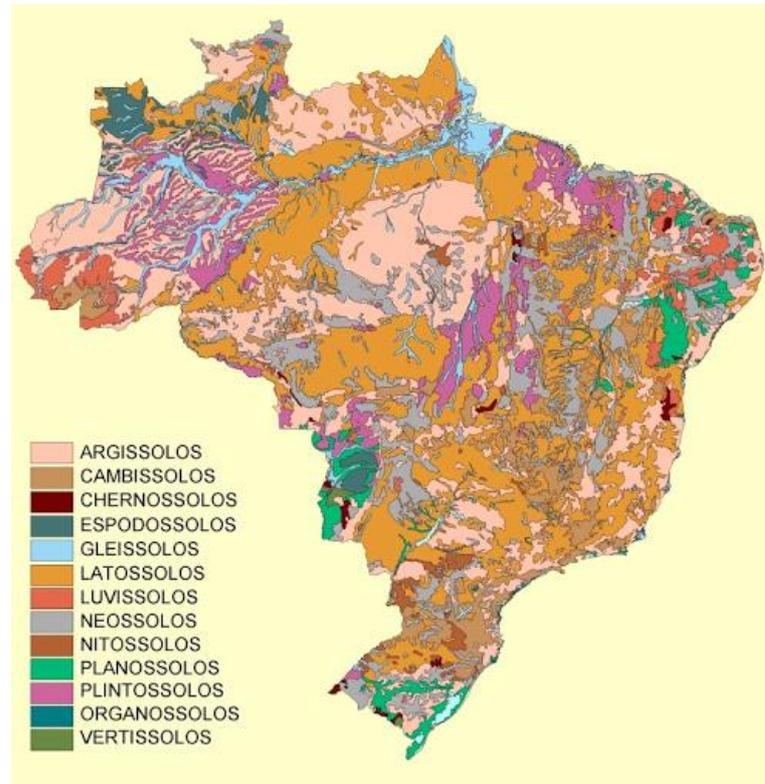


Figura 1. Distribuição geográfica dos solos do Brasil.
Fonte: EMBRAPA, 2011

2.1.1 Solos na região do Acre

Dentre as classes de solo dominantes no Acre, os argissolos compreendem praticamente 40% da área do estado, seguidos por cambissolos cobrindo uma área de mais de 30% do estado e luvisolos, com 15%, conforme Figura 2. O restante está dividido em pequenas porcentagens entre gleissolos, latossolos, vertissolos, plintossolos e os neossolos (ADAMY, 2015).

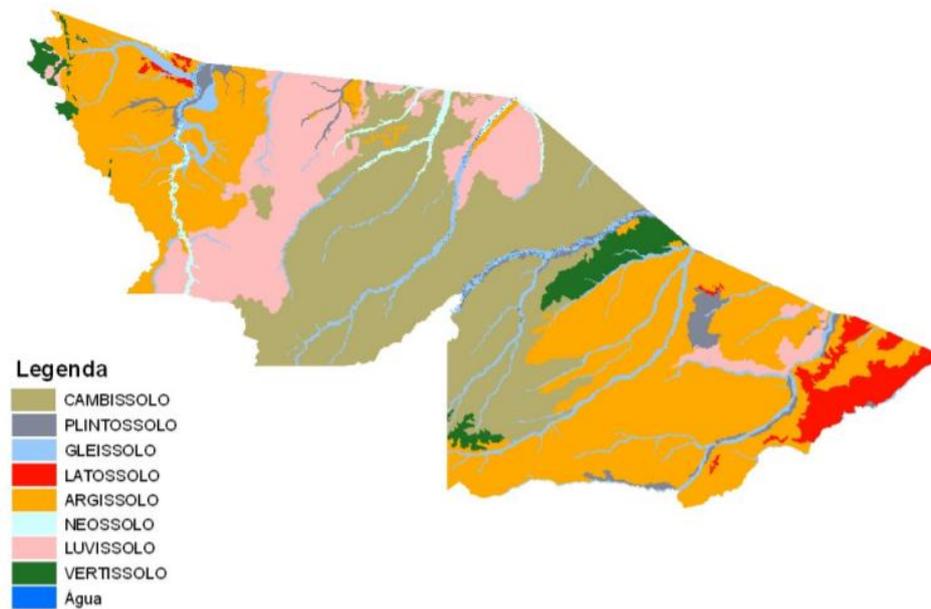


Figura 2. Solos presentes no estado do Acre.
Fonte: ZEE, 2010.

Por serem originados de sedimentos da região dos Andes, os solos acreanos são bastante diversificados e com características que os diferenciam dos demais solos da Amazônia, como a ocorrência de solos com características vérticas (alternância de compressão e expansão significativas em decorrência da variação da umidade) (AMARAL, 2010). Também se destaca a grande ocorrência de solos com baixa permeabilidade, grande teor de silte e argilas de elevada atividade (BERNINI, 2010).

2.2 Solos Argilosos

De acordo com a NBR 6502/95, argila é um “Solo de granulação fina constituído por partículas com dimensões menores que 0,002 mm, apresentando coesão e plasticidade”. É possível perceber que o termo argila não possui uma conotação mineralógica, sendo aplicado a todas as partículas com granulação fina, encontrada em sedimentos e solos.

Solos argilosos, também conhecidos como solos moles, são um dos tipos de solos mais problemáticos, que cobrem boa parte do planeta, incluindo várias áreas litorâneas e regiões industriais onde frequentemente são encontrados projetos de engenharia civil (SASANIAN, 2012).

Solos moles são solos com baixa consistência, altamente deformáveis, baixa capacidade de suporte, baixa permeabilidade, alta plasticidade e grande deformação, constituído principalmente por depósitos de partículas siltsas, argilosas e matérias orgânicas (SANTOS et al., 2018). São basicamente solos sedimentares, com formação geológica

recente, baixa resistência a penetração (valores de SPT não superiores a 4 golpes), em que a fração argila imprime as características de solo coesivo e compressível (MASSAD, 2010).

2.2.1 Mineralogia das argilas

As argilas possuem uma estrutura formada por lamelas cristalinas, como um baralho de cartas, onde possuem pouco menos que 1 nm de espessura e poucas centenas de nanômetros de diâmetro médio, e cada lamela é formada pelo arranjo de dois tipos de folhas cristalinas, com estrutura tetraédrica ou octaédrica (TEIXEIRA-NETO; TEIXEIRA-NETO, 2009). Os diferentes grupos de argila são definidos de acordo com a maneira que as folhas tetraédricas e octaédricas se arranjam (MITCHELL, 1992). As unidades básicas são:

- Unidade tetraédrica: Constituída por um átomo de silício (SiO_4) no centro e quatro de oxigênio igualmente distanciados do primeiro, conforme mostrado na Figura 3.

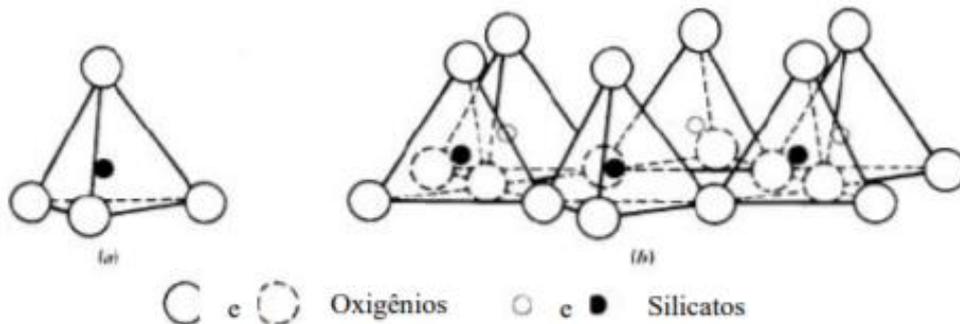


Figura 3. Representação espacial da unidade tetraédrica.
Fonte: MITCHELL, 1976

- Unidade octaédrica: Constituída por um átomo de alumina (Al^{-3}) equidistante de seis de oxigênio ou hidroxilas, formando a configuração octaédrica conforme Figura 4.

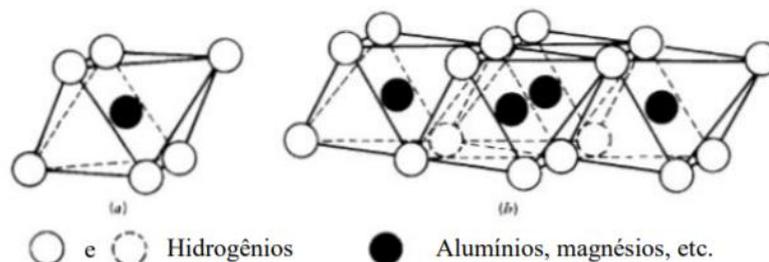


Figura 4. Representação espacial da unidade octaédrica.
Fonte: ALSHAWABKEH, 2001.

Alguns argilominerais são formados por uma camada tetraédrica e uma octaédrica (estrutura de camada 1:1), como a caulinita. Em outros minerais, o arranjo octaédrico é encontrado entre duas estruturas do arranjo tetraédrico (estrutura de camada 2:1), como as esmectitas e as ilitas (PINTO, 2006).

O estudo da composição mineralógica de um solo, ajuda a compreender o seu comportamento, já que a mineralogia possui influência no comportamento do solo, visto que parâmetros como: índice de plasticidade, atividade e sensibilidade dos solos são fortemente influenciados pelo argilomineral presente na sua composição (SILVA, 2017).

2.2.2 Comportamento físico e mecânico dos solos argilosos

O comportamento do solo é função da distribuição granulométrica do material, bem como da mineralogia, índices físicos, teor de umidade, estado de tensões a que está submetido, entre outros (DA SILVA, 2016). A porcentagem de fração argila desempenha papel fundamental na determinação das características e propriedades dos solos, tais como a compressibilidade, resistência e permeabilidade (SILVA, 2017).

Com relação aos parâmetros para a engenharia, a consistência é a característica mais importante dos solos coesivos, pois refere-se à força e resistência a penetração do solo em condições *in situ* (WAGNER, 2013). Em função do teor de umidade, o solo pode apresentar característica iguais às de um líquido ou de um sólido, onde entre estes dois estados limites, o solo passará ainda por outros dois estados, o plástico e o semissólido, sendo estes denominados estados de consistência dos solos, e são medidos através dos Limites de Atterberg (RIBEIRO; SOUZA, 2018). Os Limites de Atterberg são os Limites de Liquidez (LL), Limites de Plasticidade (LP) e Limite de Contração (LC).

O conhecimento destes parâmetros oferece importantes informações sobre a performance mecânica do solo usado como elemento de fundação ou material de construção, além de ser utilizado para determinar a quantidade de argila e silte presente em solos finos (KLOPP, 2019).

Outros importantes parâmetros referentes ao solo são o de umidade ótima e densidade seca máxima, que através do ensaio de Proctor, permite identificar a qual teor de umidade é obtido a densidade máxima do solo, onde este ensaio é amplamente utilizado para prever estabilidade de bases de rodovias e fundações de edificações (BAYAT, 2020).

2.3 Solos expansivos

Solos expansivos são caracterizados pelas significativas variações volumétricas de acordo com as modificações no teor de umidade da massa de solo (TIWATI; SATYAM, 2020). Este solo, por sofrerem variação de volume, experimentam em períodos de estiagem uma aparência bastante fissurada, causada pela contração que são submetidos com a perda de umidade (SILVA et al., 2018). Ao chegar o verão, estes solos perdem a umidade contida neles

devido à evaporação, tornando-os frágeis e com alto índice de vazios (INDIRAMMA et al., 2020).

A mudança do volume do solo é um fator bastante complexo com várias variáveis, como o tipo de solo, o estado de tensão que o solo se apresenta e o clima da região (PAIVA, 2016). A causa mais comum para a variação volumétrica dos solos expansivos é a presença de determinados argilominerais, onde os três principais grupos são: as ilites (glauconita e vermiculita), as esmectites (montmorilonita) e as caulinitas (SANTOS, 2017b). Fatores como hidratação de cátions, repulsão osmótica e atração superficial das partículas são classificados como mecanismos físico-químicos que influenciam na expansão de argilominerais além de que a propriedade mais importante dos argilominerais expansivos é a capacidade de mudar de volume pela absorção de moléculas de água ou outros íons polares em sua estrutura (SOARES et al., 2013).

2.4 Solos tropicais

Solos tropicais são solos que apresentam peculiaridades de propriedades e de comportamentos, que dependem de fatores como condições climáticas, tipo da rocha-mãe, grau de laterização, variando significativamente dentro do próprio país e da região. São típicos de países tropicais, como Brasil, Índia, Indonésia, Austrália, entre outros, e diferem consideravelmente dos solos de países temperados (DE FREITAS et al., 2020).

Gomes et al. (2018) descrevem as principais fases de formação de solos tropicais:

- **Decomposição:** Etapa inicial de formação dos solos. Ocorre ruptura físico-química dos minerais primários e posterior desagregação dos elementos que se transformam em íons simples.
- **Laterização:** Fase caracterizada pelo enriquecimento no solo de óxidos hidratados de ferro e/ou alumínio, com a permanência da caulinita como argilomineral predominante, conferindo a estes solos uma coloração peculiar: vermelho, marrom, alaranjado, amarelo. Para este fim, é necessária uma boa drenagem.
- **Desidratação:** Nesta etapa ocorre a desidratação dos materiais enriquecidos com óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, que originam minerais cristalinos densos, a limonita e a goethita.

Considerando o intemperismo, os solos tropicais compreendem os solos saprolíticos, que são pouco intemperados, e os solos lateríticos, profundamente intemperados (JOAQUIM, 2017). Observa-se a presença destes tipos de solos em todo o território brasileiro, sendo que o solo com comportamento laterítico é encontrado predominantemente nas regiões Norte e

Centro-Oeste, enquanto os saprolíticos são encontrados majoritariamente nas regiões Sul, Sudeste e Nordeste, conforme mostrado na Figura 5.



Figura 5. Ocorrência de solos tropicais no território brasileiro.
Fonte: VILLIBOR et al., 2009.

2.4.1 Solos saprolíticos

Solos saprolíticos são aqueles resultantes da desagregação da rocha matriz pela ação de múltiplas intempéries, com a manutenção da estrutura da rocha-mãe (BAIA et al., 2018). Os horizontes podem variar de algumas a várias dezenas de metros e apresentarem diferentes comportamentos e cores, sendo encontrada em horizontes subjacentes a solos lateríticos, conforme Figura 6 (ROCHA, 2018).

Os solos saprolíticos são mais heterogêneos e compreendem uma mineralogia complexa, contendo muitas vezes fase mineral em decomposição, e também são chamados de solos residuais jovens, em contraste com os solos lateríticos que são solos residuais maduros (GOMES et al., 2018).



Figura 6. Solo saprolítico na estrada de ferro de Carajás, em Açailândia – MA.
Fonte: GOMES et al., 2018.

2.4.2 Solos lateríticos

Os solos lateríticos são formados pela ação do intemperismo em um processo de laterização, ou seja, ocorre seu endurecimento (LIMA, 2019). São compostos por óxidos de ferro e outros óxidos de metais, o que lhes conferem uma coloração vermelho alaranjada, (SANI et al., 2018) como é possível ver na Figura 7. Os minerais primários mais comumente presentes neste tipo de solo são quartzo, mica e feldspato, enquanto os secundários são hematita, goetita e caulinita (BISWAL et al., 2016).

Os solos com comportamento laterítico são típicos das regiões tropicais úmidas e bem drenadas, caracterizados por apresentarem horizonte B textural, latossólico, nítico ou concrecionário (EMBRAPA, 2018). A presença de solos lateríticos em países tropicais e subtropicais, como o Brasil, gerou um grande aumento no seu uso aplicado em bases de rodovias com baixo tráfego (JEREZ et al., 2018).

Do ponto de vista geotécnico, solos com comportamento lateríticos, especialmente os de grão finos (siltes e argilas), são geralmente associados a alta compressibilidade, altas taxas de fluência e baixas taxas de permeabilidade, o que aumenta o risco de falhas em fundações de edificações e em rodovias (MENGUE et al., 2017). Nogami e Villibor (1991), pioneiros no estudo de solos tropicais no Brasil, destacam algumas propriedades geotécnicas peculiares deste tipo de solo. Há uma discrepância muito grande nos parâmetros deste solo, mesmo em áreas similares. O tamanho dos grãos inclui uma ampla variedade de texturas, desde arenosos até os tipicamente argilosos. A plasticidade de solos lateríticos finos vão desde solos não plásticos até muito plásticos, nas quais o limite de liquidez é acima de 70% e o índice de plasticidade é acima de 35%. É explícito que os solos lateríticos possuem uma ampla variedade de propriedades geotécnicas que depende de fatores gênicos e pedogênicos para confirmar os respectivos parâmetros (BISWAL et al., 2016).



Figura 7. Jazida com ocorrência de solo laterítico.
Fonte: VILLIBOR; NOGAMI, 2009.

2.4.3 Classificação MCT

A metodologia Miniatura Compactada Tropical (MCT) propõe uma classificação alternativa a solos tropicais baseada em características distintas das utilizadas pelas metodologias tradicionais e segmentadas em regiões de solos temperados (ZIMMERMANN et al., 2019). Proposta por Nogami e Villibor (1991) e normatizadas pelo Departamento Nacional de Estradas e Rodagem (DNER), a técnica permite avaliar propriedades fundamentais dos solos associados à contração, permeabilidade, expansão, coeficiente de penetração d'água, coesão, capacidade de suporte e famílias de curvas de compactação, utilizando corpos-de-prova de dimensões reduzidas (DNIT, 2006).

A classificação MCT possibilita determinar as características dos solos quanto ao seu comportamento laterítico ou saprolítico, mensurando parâmetros importantes para o uso em pavimentação rodoviária (DNIT, 2006). Assim, essa sistemática caracteriza o solo em laterítico (L) e não laterítico (N), e também em areias (A), arenosos (A'), siltosos (S') e argilosos (G').

Essa metodologia de classificação engloba os seguintes grupos de ensaios: Mini-CBR, Mini-MCV e perda de massa por imersão. Com o ensaio de Mini-CBR é possível determinar se o solo é adequado para uso em base, sub-base ou reforço de subleito, avaliando sua capacidade de suporte. Já com os ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão é possível a determinação dos parâmetros c' , d' , e' e P_i . A partir deles o solo será então classificado segundo a classificação MCT (DNIT, 2006).

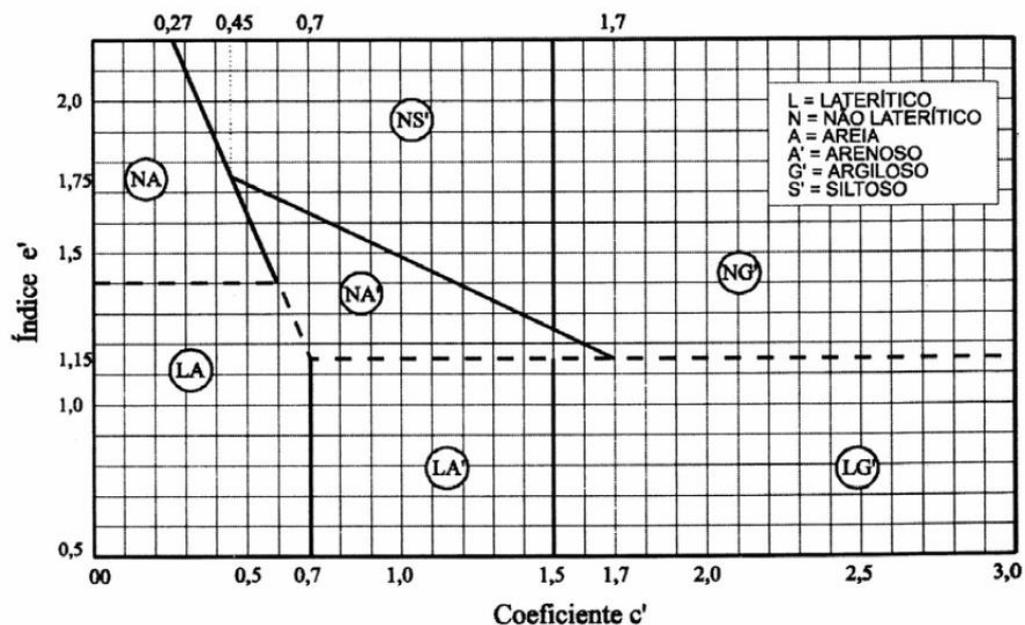


Figura 8. Ábaco de classificação MCT.
Fonte: NOGAMI; VILLIBOR, 2009.

2.5 Estabilização de solos

Nas estruturas de engenharia civil, são utilizados diversos tipos de solos. No entanto, alguns depósitos de solo em sua forma natural não são adequados para construção, de forma que precisam ser substituídos ou devem ter suas propriedades modificadas antes que possam sustentar as cargas aplicadas pelas estruturas superiores (IKEAGWUANI; NWONU, 2019).

Este tipo de situação acontece principalmente em solos expansivos, onde este tipo de solo já causou diversos danos em edificações no mundo, devido a sua alta suscetibilidade à mudança de volume, sendo sensível a variações no teor de umidade (ABIODUN; NALBANTOGLU, 2015). As características inerentes as mudanças de volume em solos expansíveis são principalmente resultantes do tipo de argilomineral (HUSSEY et al., 2010).

Devido ao alto custo, os engenheiros geotécnicos preferem modificar as propriedades de solos finos *in situ* através de técnicas de estabilização em comparação com a substituição total ou parcial do solo no local (BUHLER; CERATO, 2007). O objetivo dos engenheiros na estabilização do solo expansivo é, principalmente, minimizar a alteração de volume, plasticidade ou trabalhabilidade características, ao mesmo tempo em que se procura melhorar significativamente as propriedades de resistência (SOLTANI et al. 2019).

A estabilização do solo é um método para melhorar as propriedades do solo, através de manipulação do solo e/ou misturando com outros materiais de qualidade superior para emprego em construção civil, especialmente em rodovias (ALCÂNTARA et al., 2017). As melhorias incluem o aumento da densidade, capacidade de suporte, redução nas mudanças de volume para fortalecer superfícies de estradas e outras aplicações geotécnicas (FIROOZI et al., 2017).

Os tipos de estabilização dos solos podem ser divididos em três: estabilidade mecânica, granulométrica e química (RODRIGUES, 2018). Os métodos não tradicionais também são aplicados na estabilização dos solos, aumentando a resistência e melhorando suas características naturais. (SILVA, 2012).

2.5.1 Estabilização mecânica

Os processos de estabilização mecânica são aqueles que não é adicionado nenhum material ao solo. Geralmente se utiliza a compactação, um método amplamente utilizado para tratamento de solos expansivos. Envolve a redução do volume de vazios *in situ* através da energia imposta, o que acarreta em um aumento na densidade do solo, melhorando sua resistência mecânica e sua durabilidade (PAIVA, 2016; IKEAGWUANI; NWONU, 2019)

2.5.2 Estabilização granulométrica

A estabilização granulométrica consiste na combinação e manipulação de solos, em proporção adequada, de forma a obter um produto final de estabilidade maior que os solos de origem, e adequado para aplicação em cada caso particular (RODRIGUES, 2018). O mecanismo de funcionamento desta técnica é que, ao alterar a distribuição e o tamanho das partículas do solo pela adição ou subtração de diferentes solos, obtenha-se uma variação nas propriedades físicas do solo *in situ*, como a plasticidade e a capacidade de suporte (PATEL, 2019).

Como exemplo desta técnica pode-se citar a adição de pequenas frações de siltes e argilas em solos arenosos, para preencher os vazios do solo ou o reforço de solos moles com o uso de materiais fibrosos, que podem estar na forma de geossintéticos, como geogrelha, geotêxtil, geocompósitos, geocélulas ou fibras de origem natural ou sintéticas (HEJAZI et al., 2012).

2.5.3 Estabilização química

A técnica de melhorar as propriedades do solo adicionando materiais quimicamente ativos é conhecida como estabilização química (GANGWAR; TIWARI, 2021). O resultado dessa mistura são interações físico-químicas que ocorrem entre as partículas do solo, os ligantes e a água presente no solo, resultando em um novo material compósito com melhor comportamento mecânico que o original (CORREIA et al., 2015). Este efeito estabilizador é consequência de ligações cimentícias entre as partículas do solo, que promovem a formação de uma nova matriz mais forte e rígida. (CASALEIRO, 2014; SOLTANI et al., 2019).

Troca catiônica, floculação e aglomeração, reação pozolânica, neutralização de ácidos ou de bases, modificação de forças capilares e cimentação com carbonato foram identificados como alguns mecanismos de estabilização de solos através dos meios químicos (ALSWAIDANI et al., 2016; FIROOZI et al., 2017). A seguir serão apresentados alguns materiais tradicionais utilizados na estabilização química de solos.

- **Estabilização com cal**

A cal é um dos materiais mais antigos utilizados para estabilização de solos, onde o mecanismo de estabilização envolve troca de cátions, o que leva a floculação e aglomeração de partículas do solo (PATEL, 2019). O ambiente com alto pH causa uma reação pozolânica entre as moléculas de cálcio livres na cal e as partículas de sílica e alumina no solo, dissolvidas no meio aquoso (ANDAVAN; INDIRAMMA et al., 2019). O solo tratado com cal

de maneira eficaz aumenta a resistência, a durabilidade e a trabalhabilidade do solo, além de melhorar a compressibilidade. (PAGADALA, 2020).

No entanto, há algumas desvantagens no uso da cal como agente estabilizador, como a carbonatação do solo, o ataque de sulfatos e o impacto ambiental, de forma que são necessárias mais pesquisas para tentar amenizar estes efeitos negativos (JAWAD et al., 2014).

- **Estabilização com cinzas volantes**

As cinzas volantes são um subproduto da produção de energia à base de carvão e possuem um alto impacto ambiental na sua produção e descarte (RENJITH et al., 2021). O mecanismo básico de estabilização do solo usando cinzas volantes é a reação pozolânica e o preenchimento dos vazios na mistura, o que ocasiona em um aumento na resistência mecânica, na densidade seca máxima e uma diminuição na plasticidade e na condutividade hidráulica do solo (SINGHAI; SINGH, 2014). A literatura científica demonstra que as cinzas volantes podem ser utilizadas principalmente em solos arenosos ou com particular grossas, com pouco ou nenhum fino, de modo que este material atua como pozolana e/ou filler, preenchendo os vazios entre as partículas de tamanho maior (INDIRAMMA; SUDHARANI, 2016).

- **Estabilização com cimento Portland**

O cimento Portland é um dos materiais mais estabelecidos e amplamente aceitos para utilização em estabilização de solos, onde o hidróxido de cálcio presente no cimento ocasiona em uma reação pozolânica com a sílica e alumina presente em solos finos, resultando em uma massa de solo cimentado com boa resistência e durabilidade (PONGSIVASATHIT et al., 2019). No entanto, o teor orgânico do solo geralmente deve ser limitado a 2%, e o ambiente deve estar livre de agentes deletérios ao cimento, como sulfatos, além de que ao ser utilizado em grandes extensões, torna-se um material bastante oneroso (PHANIKUMAR; RAJU, 2020).

- **Estabilização com materiais betuminosos**

O betume em diferentes formas (cimento asfáltico, alcatrão, betume de emulsão) pode ser usado para estabilização de solos. O tipo e a proporção do betume a ser utilizado depende do tipo de solo a ser tratado, dos métodos construtivos disponíveis e das condições meteorológicas do local (ANDAVAN; KUMAR, 2020)

A aplicação do betume confere ligação junto as partículas do solo, o que ocasiona em um aumento na coesão e na capacidade de carga do solo. Além disso, devido a prevenção de infiltração da água no solo, a sua resistência a intempéries é aumentada significativamente (AFRIN, 2017).

2.6 Uso da nanotecnologia na engenharia geotécnica

Prevê-se que o valor global de mercado dos produtos que incorporam nanotecnologia está projetado para ser de \$3 trilhões de dólares até o ano de 2021(HE et al., 2019). A nanotecnologia refere-se ao estudo, criação e aplicação de produtos em escala nanométrica (TOMKELSKI et al., 2019). Esta área examina as moléculas em escala atômica, além de realizar o processamento e a manipulação molecular para criar materiais com novas propriedades e funções fundamentais (HUANG; WANG, 2016).

Devido ao seu rápido avanço em diversas áreas industriais (têxteis, roupas, cosméticos, medicamentos), não demorou muito para que o conceito de nanotecnologia comece a ser aplicado na engenharia geotécnica afim de obter melhores resultados na estabilização de solos moles (VANCE et al., 2015). Com resposta ao uso dos tradicionais materiais estabilizadores de solos, a nanotecnologia tem se mostrado como uma área promissora, onde os nanomateriais são adotados como elementos de estabilização (MAJEED et al., 2014).

2.6.1 Mecanismos de estabilização de solos com nano materiais

A importância de se utilizar estes materiais para a estabilização de solos é devido a sua alta superfície específica, finura e sua rápida ligação com as partículas do solo, onde mesmo uma pequena quantidade de nano material pode influenciar drasticamente nas propriedades físicas e químicas do solo (KULANTHAIVEL et al., 2020). Os nano materiais não são cimentícios, mas uma vez adicionados ao solo, reduzem o espaçamento entre as partículas, tornando a ligação ainda mais forte entre as partículas do solo (CHOORBASTI; KUTANAELI, 2017). O uso destes materiais em solos moles tende a aumentar a resistência ao cisalhamento, reduzindo também a permeabilidade e a plasticidade do solo (IRANPOUR et al., 2016)

A alteração da escala para nano modifica completamente o comportamento destes materiais, pois nestas dimensões há um aumento drástico na superfície específica dos materiais, além de ocorrer uma troca catiônica com maior efetividade (MAJEED et al., 2014). As nanopartículas interagem ativamente com outras partículas, de forma que pequenas porções podem levar a efeitos consideráveis nas propriedades físicas e químicas do material, onde pode-se destacar uma maior capacidade de troca catiônica entre os íons existentes no solo (TAHA, 2018).

Há outros elementos descritos por Majeed e Taha (2013) que destacam as especificidades ocasionadas pelos nanomateriais. Movimentos moleculares aleatórios têm maior significado na escala nano. Solos que contêm nanopartículas com vazios

intraparticulares geralmente exibem limites líquidos e plásticos mais altos, por causa das seguintes razões:

- Uma maior superfície específica leva a uma quantidade maior de água que abrange a superfície externa das células;
- A presença de nano poros causa um acúmulo de água interno, resultando em um aumento da capacidade de água disponível no solo;
- A existência de nano fibras no solo geralmente melhora a propriedade tixotrópica do solo e aumenta sua resistência ao cisalhamento. Além disso, estes solos possuem uma densidade aparente muito menor devido à ocorrência de nano poros.

2.6.2 Nano materiais usados na estabilização de solos

- **Óxido de nanoalumina**

Luo et al. (2012) investigaram o uso de óxido de nano alumina para estabilizar solos coesivos. As porcentagens usadas do nano material foram de 0, 1, 2 e 3% do peso da amostra. Os resultados indicam que a adição de 1% do óxido de nanoalumina no solo foi capaz de aumentar a resistência ao cisalhamento em até 4,2 vezes em comparação com o solo original, além de aumentar os valores de CBR e diminuir o índice de plasticidade.

- **Nanoargila**

Estudos conduzidos por Baziar et al. (2010) avaliaram os efeitos nas propriedades plásticas de um solo coesivo com a adição de partículas de nanoargila. Foram testadas porcentagens de 1, 2, 4 e 8% do peso da amostra com nanoargilas, e os resultados comparados com o solo sem nanomateriais. Os resultados demonstraram que a adição de nanoargila aumentou o limite de liquidez, e com 8% de nanoargila presente no solo, o limite de plasticidade aumentou em 60%, o que pode ser útil em diversos projetos geotécnicos, como por exemplo em barragens, onde um alto índice de plasticidade reduz o risco de formação de trincas e aumenta a estabilidade da barragem.

Outro estudo conduzido por Nikookar et al. (2013) determinou as resistências de solos siltsos com alta e baixa compressibilidade, estabilizados com nanoargilas. Os parâmetros avaliados foram os de resistência a compressão não confinada e de CBR, com amostras contendo 0,5, 1, 1,5 e 2% de nanoargila. Os valores de CBR para o solo sem tratamento foram de 8 e 5 para o solo siltoso de baixa e alta compressibilidade, respectivamente. Adicionando 1,5% de nanoargila, os valores de CBR foram para 36 e 16 para os solos siltsos de baixa e

alta compressibilidade, respectivamente. A nanoargila funciona como um filler para os vazios entre as partículas, criando uma micro estrutura no solo que aumenta a sua resistência.

- **Nanosílica**

Cui et al. (2018) estudaram os efeitos da adição de nanosílica em um solo siltoso, com adição de 1, 2 e 3% do peso da amostra de partículas de nanosílica. Os resultados demonstraram que a adição de nanosílica aumentou em 117% a coesão do solo, além de aumentar consideravelmente a resistência a compressão do solo. A principal razão do aumento na coesão foi devido ao efeito de preenchimento dos vazios do solo, ocasionado por nano materiais.

Outro estudo conduzido por Bahmani et al. (2014) avaliou os efeitos da adição de nanosílica nos limites de Atterberg, condutividade hidráulica e resistência a compressão de um solo residual com adição de cimento. As porcentagens de nanosílica foram de 0,2, 0,4, 0,8 e 1% com relação ao peso da amostra. Os resultados indicaram que houve uma diminuição no índice de plasticidade, e que a amostra com 0,4% de nano sílica obteve um aumento significativo de 80% na resistência a compressão, comparado com a amostra controle, além de ter atingido o menor coeficiente de condutividade hidráulica dentre todas as amostras.

2.7 Características dos nanotubos de carbono

Devido às suas características únicas, tais como a alta resistência mecânica e rigidez, alta condutividade térmica e elétrica, os CNTs (*Carbon nanotubes*, ou nanotubos de carbono) abriram um enorme leque de aplicações nas quais podem ser empregues. (DE VOLDER, 2013). O carbono é um dos elementos mais versáteis na natureza, por isso ele é capaz de formar diferentes materiais com características bastante diversas, de acordo com o tipo de hibridação (sp³, sp², sp) e do arranjo espacial dos átomos, sendo que os nanotubos de carbono são um alótropo do carbono, assim como a grafite e o diamante (TANAKA, 2014).

Devido ao fato de os CNTs apresentarem ótimas propriedades mecânicas junto com proporções extremamente elevadas (relação comprimento/diâmetro), eles são projetados para criar compósitos significativamente mais fortes e resistentes que as tradicionais fibras de vidro ou de carbono (ALSHAREF et al., 2016).

2.7.1 Classificação dos nanotubos de carbono

- **Nanotubos de carbono de paredes simples (*Single-Wall Carbon Nanotubes*, ou SWCNT)**

Os SWCNT consistem em uma folha de grafeno, a qual se enrola de forma a produzir uma estrutura em forma de cilindro, conforme Figura 9, e produzem um elemento com o

diâmetro que varia de 1 a 2 nanômetros e comprimentos de 300 nm a 1 μm (micrômetro) (ABOZIED et al., 2021). Os SWCNT são mais flexíveis, porém mais difíceis de serem produzidos que os MWCNT (KIM et al., 2019).

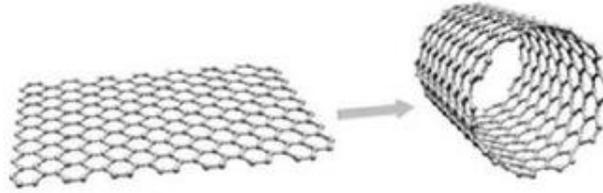


Figura 9. Folha de grafeno e SWCNT.
Fonte: FORTE, 2017.

- **Nano tubos de carbono de paredes múltiplas (*Multi-Wall Carbon Nanotubes*, ou MWCNT)**

Os MWCNT consistem em várias folhas de grafeno, formando nano tubos concêntricos que circundam um ao outro, conforme exemplificado na Figura 10, sendo que o diâmetro destes elementos varia de 2 a 50 nm e comprimentos de 300 nm a 1 μm (AZEEM; SALEEM, 2020). Os MWCNT são mais fáceis de produzir em larga escala que os SWCNT, porém a estrutura do MWCNT é mais difícil de se compreender devido a sua maior complexidade e variedade (FERREIRA et al., 2019).

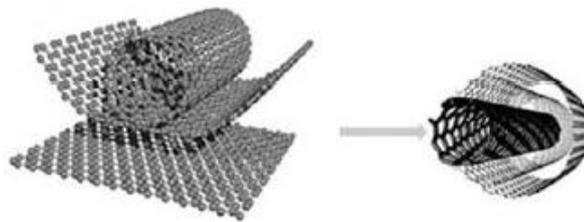


Figura 10. Folhas de grafeno e MWCNT.
Fonte: FORTE, 2017.

2.7.2 Propriedades dos CNTs

Os CNTs têm causado um grande interesse ao redor do mundo devido as suas extraordinárias propriedades mecânicas, térmicas e elétricas (AKBAR et al., 2021). De modo geral, os CNTs mostram uma combinação única de rigidez, resistência e tenacidade em comparação com outras fibras que geralmente são deficientes em uma ou mais destas propriedades (FIROOZI et al., 2017).

- **Propriedades mecânicas**

Os CNTs possuem uma superfície específica de 250 m^2/g , mas com tratamentos químicos esses valores podem chegar a até 1350 m^2/g para SWCNT. A densidade dos SWCNT é de cerca de 1,3-1,5 g/cm^3 , enquanto a densidade dos MWCNT é de 1,8-2,0 g/cm^3

(MONTHIOUX et al., 2010). O módulo de Young de MWCNT foi avaliado na ordem de 1 a 1,8 TPa, além de estudos mostrarem que é possível chegar em valores de resistência a tração na ordem de 150 GPa (KIM et al., 2019).

- **Propriedades elétricas**

As propriedades elétricas excepcionais dos CNTs podem ser atribuídas a sua característica unidimensional e a peculiar estrutura eletrônica do grafite, já que devido ao formato do elemento ser de um tubo, há um confinamento quântico dos elétrons ao longo do eixo do tubo, significando que os mesmos não se espalham facilmente, fator este responsável por sua resistividade elétrica extremamente baixa (na ordem de $10^{-5} \Omega \cdot \text{cm}$) (PENG et al., 2016). Outro fator atribuído à sua baixa resistividade elétrica é a sua densidade de corrente que é a mais alta de qualquer material conhecida (10^9 A/cm^2) (KANG et al., 2020).

- **Propriedades térmicas**

A condutividade térmica dos CNTs é extremamente alta e possivelmente a maior entre todos os materiais já conhecidos, porém, as propriedades térmicas dos mesmos não são extensivamente estudadas como as propriedades elétricas e mecânicas, devido a dificuldade em manipular e medir os parâmetros em um nível nanométrico (HASSANZADEH-AGHDAM, et al., 2019). O método de medição é indireto, de forma que estudos demonstram que a condutividade térmica dos CNTs podem chegar a valores de até 6600 W/m.K (KIM et al., 2019).

2.7.3 Nanotubos de carbono na estabilização de solos

Estudos conduzidos por Taha e Ying (2010) avaliou os efeitos de nanotubos de carbono em um solo argiloso, composto principalmente pelo argilomineral caulinita. As proporções de CNTs variaram de 0% (grupo controle) a 1% da massa de solo nos ensaios, e foi possível observar que o índice de plasticidade aumentou em 22%, índice de compressão aumentou em 32% e reduziu a condutividade hidráulica.

Outra pesquisa realizada por Al Sharef et al. (2016) determinou os efeitos da adição de pequenas porcentagens de MWCNTs (0,05 a 0,2%) em solos residuais da Malásia, com base nos parâmetros de limites de Atterberg, teor de umidade ótimo, densidade seca máxima, superfície específica e condutividade hidráulica. Os valores de condutividade hidráulica foram reduzidos em 230%, houve uma diminuição no teor de umidade ótima e um aumento na densidade seca máxima e reduções no limite de liquidez e no índice de plasticidade. Estes resultados diferem de outros materiais que são focados em diminuir rachaduras no solo, mas acabam por aumentar a condutividade hidráulica.

Correia et al. (2015) estudou a adição de MWCNTs em uma mistura de solo residual com cimento Portland. A quantidade de nano tubos utilizadas foram de 0 a 0,1g, para aferir os parâmetros de resistência a compressão não confinada e módulo de elasticidade. Os resultados demonstraram que foi possível obter aumento de 77% e 110% nos valores de resistência a compressão não confinada e módulo de elasticidade, respectivamente.

Através destes estudos, é possível perceber que a presença de nanopartículas (especialmente CNTs) na matriz de um solo tem a capacidade de reduzir o espaçamento entre as partículas constituintes do solo, o que promoverá a construção de uma matriz esquelética mais rígida, melhorando as propriedades mecânicas do mesmo (GHASABKOLAEI et al., 2017).

Diante do exposto, espera-se que a adição de CNTs ao solo laterítico do estado do Acre possa vir a ser uma solução para a estabilização de solos, onde poderão promover melhorias nos parâmetros geotécnicos, afim de promover economias para edificações da região. Ultimamente, passos importantes têm sido dados para avaliar o potencial de uso da nanotecnologia na engenharia geotécnica e em virtude dos resultados promissores já obtidos neste campo de estudo, faz-se necessário que novas pesquisas sejam realizadas com este tipo de nanotecnologia, oferecendo aos engenheiros mais opções para melhorar as propriedades do solo.

3. OBJETIVOS

3.1 Geral

- Avaliar o comportamento físico-mecânico de um solo laterítico com adição de nanotubos de carbono;

3.2 Específicos

- Obter amostras de solo com comportamento laterítico;
- Realizar a dispersão dos nanotubos de carbono na matriz de solo, atingindo a escala nanométrica;
- Perceber a influência da adição de diferentes porcentagens de nanotubos de carbono nos parâmetros de limites de Atterberg, densidade real, umidade ótima e densidade seca máxima.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição do local de estudo

O Estado do Acre está situado no extremo sudoeste da Amazônia brasileira, entre as latitudes de 07°07'S e 11°08'S e as longitudes de 66°30'W e 74°WGr. Sua superfície territorial é de 164.221,36 km², correspondente a 4% da área amazônica brasileira e 1,9% do território nacional (ZEE, 2010). O estado faz fronteiras internacionais com o Peru e a Bolívia, e nacionais com os estados do Amazonas e Rondônia.

O clima é do tipo equatorial quente e úmido, caracterizado por altas temperaturas, elevados índices de precipitação pluviométrica e alta umidade relativa do ar. A temperatura média anual está em torno de 24,5 °C, enquanto a máxima fica em torno de 32 °C (ACREBIOCLIMA, 2017).

Entre as unidades geológicas, a Formação Solimões ocupa cerca de 85% do território acreano, sendo que esta formação se originou de sedimentos vindos dos rios do período cretáceo, que cederam lugar a grandes lagos de água doce e rasa (ZEE, 2010). Gleissolos Háplicos e Neossolos Flúvicos eutróficos dominam as planícies de inundação e terraços fluviais das várzeas amazônicas, apresentando solos hidromórficos de boa fertilidade natural. Argissolos e Latossolos Vermelho-Amarelo distróficos dominam os tabuleiros do leste do Estado, apresentando solos profundos e bem drenados, lixiviados, com baixa fertilidade natural e ocorrência de crostas lateríticas. Tais características decorrem do fato de que a composição mineralógica da Formação Solimões consiste de argilas do tipo 2:1, de alta atividade (SHINZATO et al., 2012).

4.2 Coleta das amostras

As amostras do solo laterítico advém de uma jazida comercial localizada na BR 317, km 15, coordenadas 10° 06' 29.37" S e 67° 38' 39.66" O, Rio Branco – AC, conforme Figura 11. Trata-se de um solo muito utilizado em construção de rodovias locais, sendo inclusive utilizados pela empresa local responsável pela manutenção dos pavimentos na cidade de Rio Branco, a EMURB (Empresa Municipal de Urbanização). Caracterizado por apresentar coloração avermelhada, situa-se na região como um material de ocorrências pontuais, geralmente em pontos elevados do relevo.

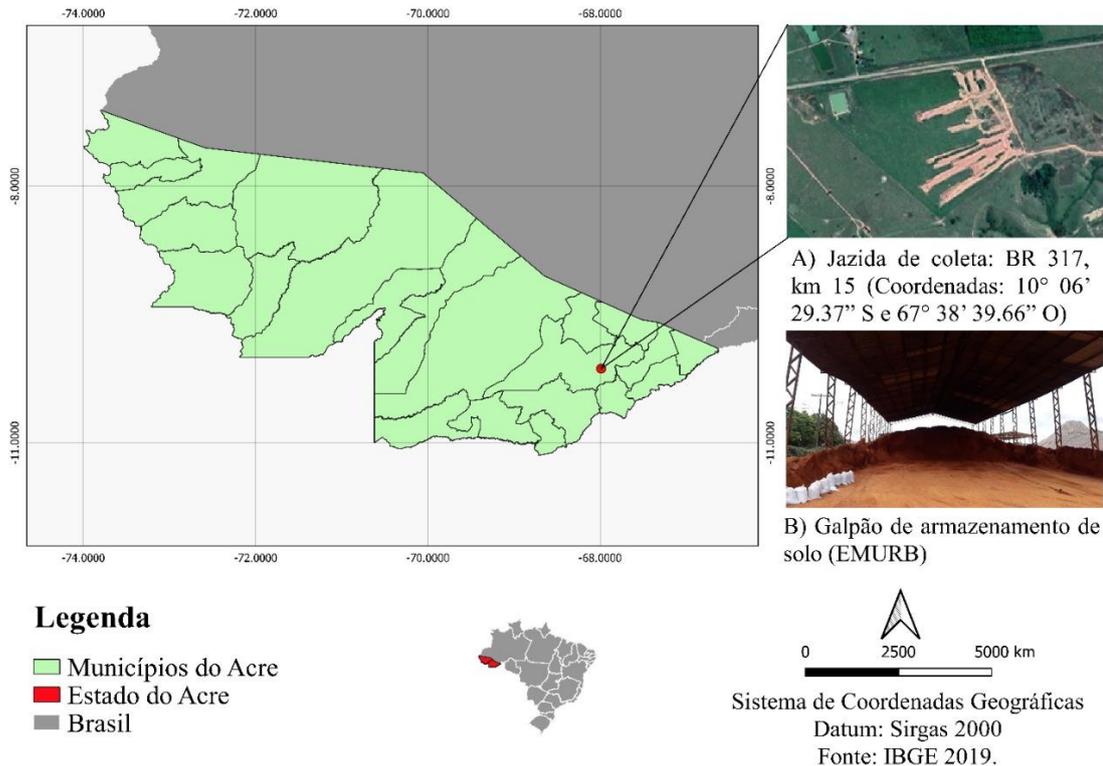


Figura 11. Localização da jazida de retirada do solo laterítico.

Após a coleta, os materiais foram armazenados, homogeneizados e selados em temperatura ambiente no Laboratório de Solos da Universidade Federal do Acre (UFAC).

4.3 Caracterização do solo

4.3.1 Análise granulométrica

Para determinar as dimensões das partículas do solo laterítico, bem como os seus percentuais, realizou-se o ensaio de granulometria por peneiras e por sedimentação de acordo com a NBR 7181/94. A análise granulométrica por peneiras foi realizada no Laboratório de Solos da Ufac, enquanto a análise granulométrica por sedimentação foi realizada na Fundação de Tecnologia do Estado do Acre (FUNTAC).

Para a análise granulométrica através de peneiras, secou-se ao ar a amostra de solo previamente armazenada. Em seguida, desagregou-se completamente os torrões no almofariz com a mão de gral recoberta de borracha, de maneira que evitou-se reduzir o tamanho natural das partículas do solo. Realizou-se o peneiramento com cerca de 1,5 kg do solo. Inicialmente, peneirou-se o material na peneira #10, cuja parte retida foi desagregada com o auxílio de um almofariz. Então, lavou o material na #10 colocando-o em seguida na estufa. Do material que passou na peneira #10, foi retirada 2 amostras para a determinação do teor de umidade do solo, a qual foi pesada e posteriormente submetida a secagem em estufa. O peneiramento fino foi realizado utilizando-se cerca de 120 g de solo que consegue passar na #10, assim põe-se o

material na #200, lavando-o e em seguida colocando-o na estufa. Após a secagem, junta-se e empilha as peneiras #16, #30, #40, #60, #100 e #200, nesta sequência, e foi colocado o material seco no conjunto de peneiras e realizado a agitação do conjunto manualmente. Por fim, pesou-se a fração de solo retida em cada peneira, feito na sequência o percentual individual e acumulado para a elaboração da curva granulométrica.

Para o ensaio de sedimentação, separou-se cerca de 1500 g do solo em questão, prosseguiu-se com o destorroamento no almofariz com o auxílio da mão de gral e em seguida passou o material na peneira #10. Da porção que passou nesta peneira, separou-se uma parte para determinação da umidade higroscópica do material e selecionou-se cerca de 120g para realização do ensaio de sedimentação. O processo do ensaio de sedimentação se iniciou pelo preparo da amostra separada anteriormente através de imersão em solução defloculante de hexametáfosfato de sódio por 12 h. Após o tempo de repouso da solução, a amostra submergida foi depositada em um recipiente metálico utilizado para dispersão do material, onde permaneceu por 15 minutos de agitação constante. No final do processo de agitação, a solução foi vertida em uma proveta graduada até atingir 1 L de mistura na proveta. O material permaneceu na proveta até atingir a temperatura de equilíbrio, e após atingi-la, a solução foi agitada por 1 minuto e em seguida foram realizadas leituras de temperatura e densidade, nos intervalos de tempo pré-determinados pela norma. Correlacionando os valores obtidos, foi possível traçar uma curva granulométrica com as partículas do solo com diâmetro menor que 0,075 mm.

4.3.2 Ensaio MCT

Para verificação do comportamento laterítico do solo, foi realizado o ensaio MCT, de acordo com as normas DNER ME-258/94 e DNER ME-256/94, que são os ensaios de Mini-MCV e perda de massa por imersão, respectivamente. Todas as etapas foram realizadas no Laboratório de Solos da FUNTAC. Foram preparadas 5 porções de 200 g do solo destorroado e seco ao ar. Em seguida, cada amostra foi umedecida e homogeneizada, aumentando o teor de umidade em 2% na porção seguinte. O solo homogeneizado e umedecido foi inserido em sacos plásticos devidamente identificados e levados a uma câmara úmida permanecendo nesta por 24h. Os moldes foram preparados passando vaselina nas paredes internas e colocados um anel de vedação na parte superior e inferior. Em seguida, realizou-se a compactação dos solos com os diferentes teores de umidade até se atingir os critérios de parada, conforme Figura 12(a), e posteriormente foram registrados os valores obtidos em uma planilha. Em seguida, realizou a extração de uma saliência dos corpos de prova de aproximadamente 10 mm e os

corpos-de-prova foram imergidos por cerca de 24 h, para verificação do comportamento do solo quanto à perda de massa, conforme Figura 12(b).



Figura 12. Realização do ensaio MCT. (a) Ensaio de Mini-MCV; (b) Ensaio de perda de massa por imersão.

4.3.3 Análise química

A composição química da amostra de solo laterítico foi realizada através de um sistema de energia dispersiva de raios-X (EDX), no laboratório de perícia da Polícia Civil do Estado do Acre. O equipamento utilizado foi um EDX 720, da Shimadzu, conforme Figura 13. Neste ensaio são analisados os raios X emitidos pela amostra em resposta à incidência de um feixe de elétrons sobre o material. Como cada elemento químico possui uma determinada energia, é possível determinar quais elementos estão presentes em determinada amostra.



Figura 13. Equipamento para espectroscopia dispersiva de Raios-X

4.3.4 Análise mineralógica

Para realizar a análise mineralógica da fração argila existente no solo laterítico estudado (fração inferior a 0,002 mm), foi utilizado a técnica de difração de raios X, por meio do equipamento Difrátômetro de Raios X. O ensaio foi realizado no Departamento de Geociência da Universidade Federal do Amazonas, com equipamento modelo Shimadzu XRD

6000®, utilizando tubo de raios X com radiação Cu K α , comprimento de onda de 0,15418 nm. A configuração utilizada foi monocromador com fendas (1, 1, 0,30), a 40kV e corrente de 30 mA e velocidade de 2000 deg/min. A identificação dos argilominerais presentes no solo foi realizada com o auxílio do software Match!. Ao se caracterizar argilominerais, a utilização da técnica de difração de raios X torna-se ainda mais indicada, pois o elevado teor de quartzo da amostra e sua facilidade de orientar-se resultam em picos bem definidos e de grande intensidade desta fase cristalina, o que auxilia na identificação das fases (ALBERS et al., 2002).

4.4 Preparação e caracterização dos nanotubos de carbono

4.4.1 Obtenção dos nanotubos de carbono

Os CNTs utilizados na pesquisa são do tipo de paredes múltiplas (MWCNT), e foram obtidos comercialmente através da empresa *CNTCompany*, localizada na Coreia do Sul, e o produto em questão leva o nome de CTube120, conforme Figura 14.



Figura 14. Caixa de CTube 120 contendo os nanotubos de carbono (MWCNT).

4.4.2 Dispersão dos nanotubos de carbono

Os nanotubos de carbono são partículas muitíssimo pequenas e com uma superfície específica muito grande, o que faz com que eles apresentem uma tendência de se atrair e se aglomerar (CWIRZEN et al., 2008). Para se poder tirar benefícios reais das suas potencialidades, é necessário efetuar uma boa dispersão das partículas. A metodologia usada neste trabalho foi adaptada de TAHA et al., 2018 e RAFAEL, 2017.

Primeiramente, preparou-se uma solução a 0,15% tensoativo Twenn 80, para promover uma melhor solubilização dos nanotubos no meio aquoso. O uso do tensoativo se justifica pois possui a propriedade de reduzir a tensão interfacial entre dois componentes de afinidades distintas (LEITE, 2020), no exemplo a água e os nanotubos, formando uma mistura

homogênea. A solução foi posta em um agitador magnético por 2 h, para em seguida adicionar os nanotubos de carbono a uma concentração de 0,01% em relação a solução (Figura 15).



Figura 15. Solução para dispersão dos nanotubos de carbono. (a) Solução com o tensoativo Tween 80 (antes do agitador); (b) Solução durante o agitador magnético; (c) Solução após o período de 2 h no agitador; (d) Nanotubos utilizados na solução.

No entanto, apenas a inserção dos nanotubos na solução não é o suficiente, visto que os nano tubos tendem a se aglomerar na dispersão. Com isso, utilizou-se um homogeneizador ultra-sônico marca Sonoplus Bandelin modelo UW 2070, equipado com haste de titânio. Forte (2017) verificou que o aumento da temperatura produz efeitos negativos na dispersão dos MWCNT, e com isso armazenou-se a solução em um recipiente contendo gelo picado, para controlar a temperatura durante o ensaio. O ultrassom foi utilizado com uma frequência de 20 kHz e potência de 500 W por um período de 10 minutos (Figura 16).

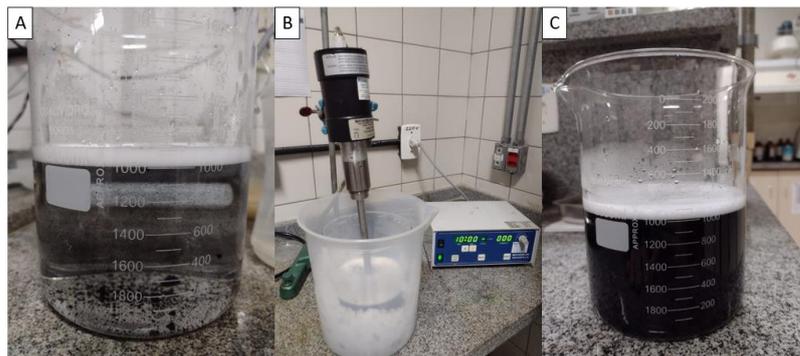


Figura 16. Processo de dispersão dos nanotubos de carbono. (a) Adição dos nano tubos à solução, antes do ultrassom; (b) Solução em recipiente com temperatura controlada para uso no ultrassom; (c) Solução após o período de 10 minutos no homogeneizador ultra-sônico.

Após o processo de dispersão dos nanotubos através do homogeneizador ultra-sônico, adicionou-se a quantidade de solo necessária para a realização de cada ensaio a ser realizado dentro do recipiente com a solução, fez-se o uso do agitador magnético durante 15 minutos e em seguida o material foi levado a estufa à 100 °C, para secagem completa da água. Por fim, o material seco foi destorroado levemente no almofariz com auxílio da mão de gral e separou-

se em frascos identificados referentes ao ensaio a ser feito com as devidas porcentagens de nanotubos de carbono para a presente pesquisa (Figura 17).

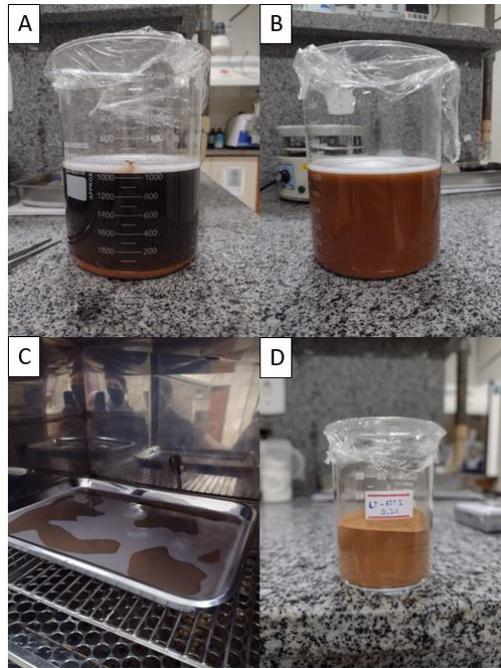


Figura 17. Processo de preparação das amostras utilizadas para os ensaios físicos e mecânicos. (a) Adição do solo à solução, antes do agitador; (b) Solução de solo + nanotubos após o agitador; (c) Secagem da solução em estufa; (d) Amostra a ser utilizada nos ensaios físicos (Limite de plasticidade – Repetição 1 – 0,2% de MWCNT).

4.4.3 Tamanho médio, Índice de Polidispersividade (PDI) e Potencial Zeta

O tamanho das partículas após o processo de dispersão dos nanotubos de carbono, o índice de polidispersividade e o Potencial Zeta foram determinados com equipamento Zetasizer Nano ZS 90 (Malvern Instruments; Malvern, UK), realizado através da técnica de Espalhamento Dinâmico de Luz (EDL). Esta técnica é amplamente utilizada para avaliação das dimensões de partículas em suspensão, pois quando a partícula é iluminada por uma fonte de luz, ela irá espalhar luz em todas as direções, e esta técnica consiste em analisar as flutuações de intensidade da luz espalhada em um determinado ângulo, o que fornece informações sobre o movimento da partícula e, conseqüentemente, seu diâmetro hidrodinâmico médio (NOMURA et al., 2014).

Além disso, através do PDI e do Potencial Zeta, é possível avaliar a qualidade e a estabilidade das soluções. Em um tubo *eppendorf* foi preparada uma solução com 100 μL de cada amostra juntamente com 2 mL de água ultrapura, sendo a solução agitada por aproximadamente 2 min. Foram retirados 900 μL de cada solução para análise do tamanho das partículas, do PDI e potencial Zeta. As análises foram feitas a partir de 10 corridas com 3 ciclos de leitura e ângulo de espalhamento de 173° e temperatura de 25°C . O diâmetro médio

das partículas e o PDI foram calculados a partir da distribuição de tamanho das partículas e os valores de Potencial Zeta foram determinados pela medição da mobilidade eletroforética, expresso em mV.

4.5 Delineamento estatístico e experimental

Foram adicionadas diferentes porcentagens de nanotubos de carbono (0, 0,05, 0,1 e 0,2%) nas amostras de solo, conforme proposto por Al Sharef (2016), e posteriormente avaliadas e comparadas as propriedades físicas do solo com adição de nanotubos de carbono com relação aos do solo original.

Para estes ensaios foi utilizado um experimento fatorial instalado em um delineamento inteiramente casualizado, em triplicata, e os dados obtidos nos ensaios mecânicos foram analisados estatisticamente conforme a normalidade dos erros e a homogeneidade das variâncias dos dados, sendo que caso atendido pressupostos, realizou-se a análise de variância (ANOVA) e Teste de Tukey com 5% de probabilidade para comparação entre as médias, conforme ilustrado na Figura 18. A homogeneidade das variâncias foi realizada no software Prophet, enquanto a normalidade dos erros e a ANOVA foi realizada com o auxílio do programa Sisvar.

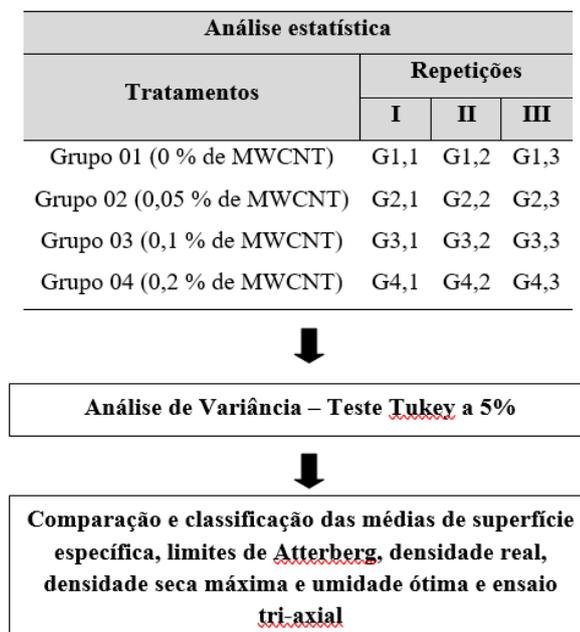


Figura 18. Delineamento estatístico e experimental da pesquisa.

4.6 Ensaios físicos e mecânicos do solo

4.6.1 Limites de Atterberg

Para realizar o ensaio de limite de liquidez, seguiu-se as recomendações da norma DNER-ME 122/94. Já para o ensaio de limite de plasticidade, foi realizada conforme a norma

DNER-ME 082/94. Para a determinação do índice de plasticidade, foi feita a subtração das médias dos limites de liquidez com as dos limites de plasticidade. Os ensaios dos limites de Atterberg foram feitos com as amostras do grupo controle e das amostras com adição de nanotubos de carbono. Para a determinação dos limites de Atterberg, foi separado aproximadamente 200 g de material (seco ao ar) que passa na peneira #40 (0,42 mm).

Primeiro para a determinação do limite de liquidez, foi colocada parte da amostra no recipiente de porcelana e aos poucos adicionada água até a homogeneização da massa a uma consistência pastosa. Então, colocou-se a mistura na concha do aparelho de Casagrande em certa quantidade, para que ocupasse 2/3 da concha, aplainando a massa com uma espátula, de tal forma que a parte central fique com 1 cm de espessura. Fez-se com o cinzel uma ranhura no meio da massa, no sentido do maior comprimento do aparelho. No aparelho de Casagrande, girou-se a manivela com velocidade constante de duas voltas por segundo, contando o número de golpes até que foi verificado o fechamento da ranhura com comprimento de 1,2 cm, quando parou a operação. Então, foi retirada uma pequena quantidade do material no local onde as bordas da ranhura se tocaram para a determinação da umidade e transferiu-se o material de volta ao recipiente de porcelana, adicionou-se mais um pouco d'água e repetiu-se o processo por mais quatro vezes. A determinação do limite de plasticidade procedeu-se com separação de parte da amostra no recipiente de porcelana e adição de água até a homogeneização da massa. Assim, moldou-se certa quantidade da massa em forma elipsoidal rolando-a em seguida sobre uma placa de vidro, até que fissurou-se em pequenos fragmentos quando essa atingiu dimensões de 3 mm de diâmetro e 10 cm de comprimento. Então, coletou-se alguns fragmentos fissurados para a determinação da umidade, pesando-se antes e depois da secagem em estufa. Repetiu-se o processo por mais quatro vezes.

4.6.2 Densidade seca máxima e umidade ótima

Para determinação da densidade seca máxima e da umidade ótima, foi seguida as recomendações da norma DNIT 164/2013-ME, que dispõe sobre a compactação utilizando amostras não trabalhadas. Assim, para o início do ensaio, utilizou-se uma amostra de 6 kg de solo, onde foi adicionada água com uma posterior homogeneização. Então, o solo foi colocado dentro do cilindro com um disco espaçador, em cinco camadas sucessivas de 1/5 da altura do cilindro, aplicando-se em cada camada 12 golpes distribuídos uniformemente em sua superfície com o soquete caindo de 0,45 m. Removeu-se o colarinho e a base, aplainou-se a superfície do material com uma régua biselada à altura do molde e pesou o conjunto cilindro

+ solo úmido compactado, para determinar o peso úmido do solo compactado, sua umidade e com estes a densidade seca. Tal procedimento foi realizado mais quatro vezes, sempre com a adição de mais 2% de água. Com os resultados de massa específica seca e umidade, foi traçado a curva de compactação, a qual descreve a variação da densidade seca em função da variação do teor de umidade. Os dois ramos foram unidos por uma curva parabólica e no topo desta parábola foi determinada a densidade seca máxima e a umidade ótima.

4.6.3 Massa específica real

Para determinação da massa específica real do solo laterítico antes e depois da adição de diferentes porcentagens de nano tubos de carbono, foi seguido as recomendações da norma DNER-ME 093/94. Pesou-se um picnômetro vazio, seco e limpo, foi colocada a amostra no picnômetro e pesada. Em seguida, colocou-se água destilada no picnômetro até cobrir, com excesso, a amostra, aqueceu o picnômetro, deixando ferver por pelo menos 15 minutos. Depois, deixou o picnômetro esfriar ao ambiente e encheu-o completamente com água destilada e colocou em banho maria à temperatura ambiente durante 15 minutos com a rolha perfurada de modo que a água aflore à sua parte superior e anotou-se a temperatura do banho. Retirou do banho e enxugado com um pano limpo e seco e pesou o picnômetro e o conteúdo. Em seguida, retirou-se todo o material de dentro do picnômetro, lavou e encheu completamente com água destilada, colocando-o no banho maria à temperatura ambiente, durante 15 minutos com a rolha perfurada, e anotou-se a temperatura do banho; retirou-se o picnômetro do banho e pesou-o a seguir.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Caracterização do solo

5.1.1 Granulometria

Através do ensaio de granulometria, foi possível obter a curva granulométrica do solo, conforme Figura 18.

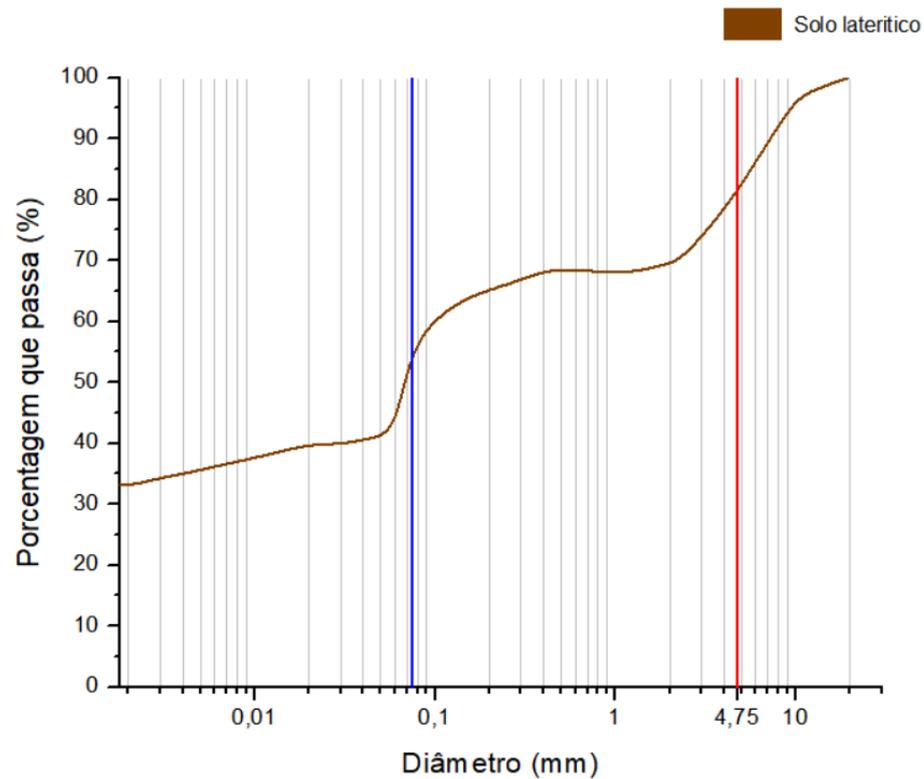


Figura 19. Gráfico de granulometria do solo.

Além disso, através das porcentagens de material que passa em determinadas peneiras, foi possível obter a composição granulométrica do solo, conforme Tabela 1.

Tabela 1. Composição granulométrica do solo

RESUMO	
Pedregulho (> 4,8)	19,05%
Areia grossa (4,8 - 2,0)	11,43%
Areia média (2,0 - 0,42)	0,94%
Areia fina (0,42 – 0,075)	10,77%
Silte (0,075 – 0,002)	24,76%
Argila (< 0,002)	33,05%
Total	100,00%

Através da Tabela 1, é possível perceber que se trata de um solo com mais de 50% de sua composição constituído por partículas finas (silte e argila), sendo composto majoritariamente por argila. A partir das porcentagens de cada componente do solo, é possível classificar o solo como sendo um solo de textura média (SANTOS, 2018). A textura é um dos principais indicadores de qualidade do solo, uma vez que influencia na dinâmica da adesão e coesão entre as partículas de solo, bem como na dinâmica da água no solo (CENTENO et al., 2017).

5.1.2 Ensaio MCT

Através do ensaio MCT, foi possível determinar se o solo em questão possui comportamento laterítico ou não. Com isso, conforme Figura 19 e após os ensaios realizados, o solo foi classificado como laterítico arenoso.

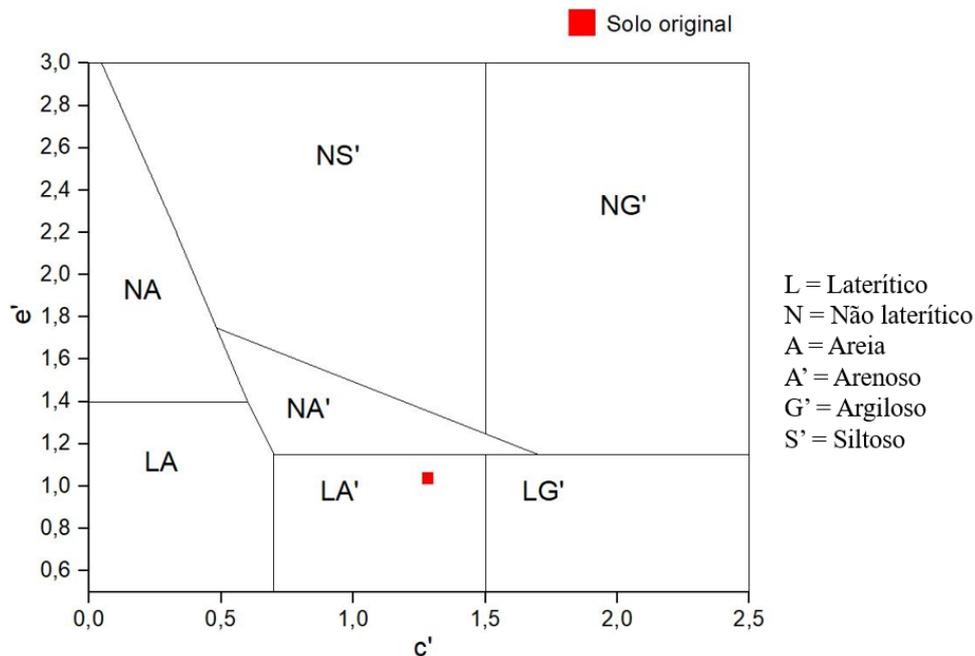


Figura 20. Ábaco de classificação MCT com os resultados do solo utilizado na pesquisa.

De acordo com o Sistema Unificado de Classificação do Solo (SUCS), o solo utilizado na pesquisa foi determinado como sendo entre uma argila ou silte de baixa compressibilidade, o que corrobora com a afirmação de que o solo é laterítico, com comportamento não plástico e não expansivo, de acordo com Figura 21.

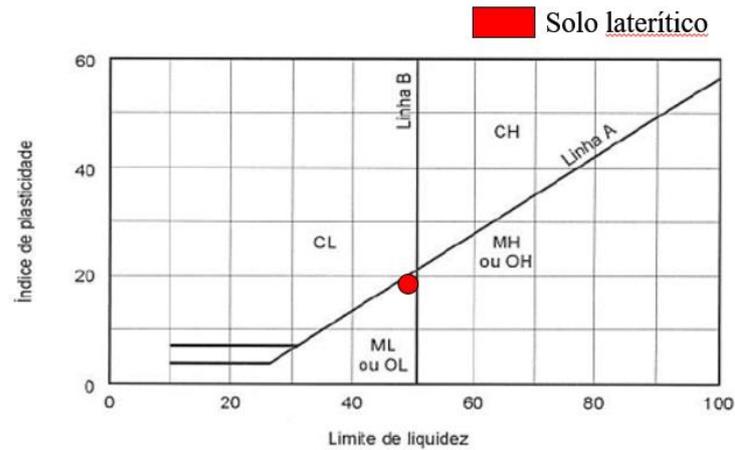


Figura 21. Carta de plasticidade com classificação do solo.

Já no sistema HRB de classificação, o solo foi classificado como sendo um solo argiloso do grupo A-7-5, apresentando comportamento geral como subleito de fraco a pobre. No entanto, é importante salientar que o uso de técnicas consideradas tradicionais para classificação de solos não é adequado para solos tropicais, dada as peculiaridades inerentes a este tipo de solo (NOGAMI; VILLIBOR, 1991).

5.1.3 Análise química (EDX)

A Figura 22 mostra a composição química do solo, obtido através da técnica de EDX. Os principais constituintes do solo são os minerais silício, ferro e titânio, onde provavelmente estão presentes na forma de óxidos. Os elementos Si e Fe são considerados os elementos químicos mais importantes dos solos lateríticos (BORBA, 1981). Isto colabora, juntamente com os resultados obtidos no DRX, que o material analisado tem as características de um solo laterítico.

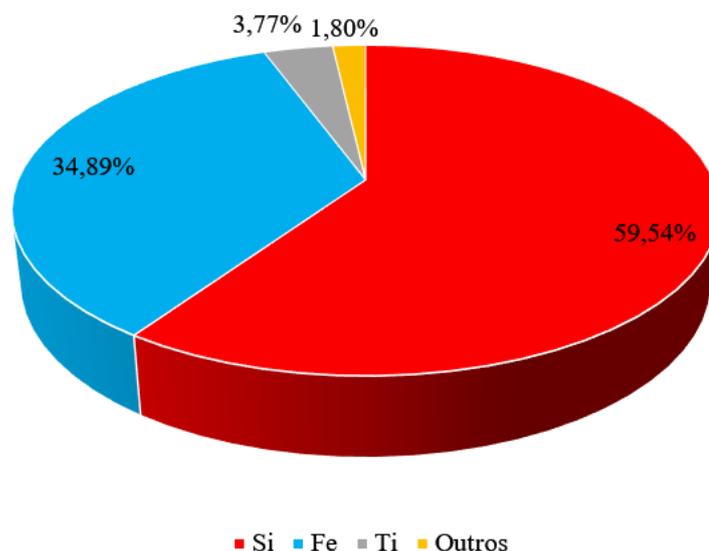


Figura 22. Composição Química do solo

5.1.4 Análise mineralógica (DRX)

O difratograma de Raios-X do solo utilizado na pesquisa está exposto na Figura 23. Apesar de haver picos bem definidos em $2\theta = 26,66^\circ$ e $2\theta = 20,86^\circ$, estes picos correspondem aos minerais de quartzo presentes na amostra (HAZEN et al., 1989). Os picos de $2\theta = 50,12^\circ$, $22,15^\circ$ e outros correspondem ao argilomineral caulinita (GRUNER, 1932). A caulinita possui estrutura lamelar formada pelo empilhamento regular de camadas 1:1, na qual cada camada consiste de uma folha de tetraedros de silício e oxigênio e uma folha de octaedros de alumina com espaçamento basal de aproximadamente 0,7 nm, de composição química $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot 2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$ (SCORZELLI et al., 2008). Este argilomineral, por possuir baixo potencial de expansão, é indicado para utilização em barreiras impermeáveis, além de apresentar menor dispersão de água (DE BORBA et al., 2019).

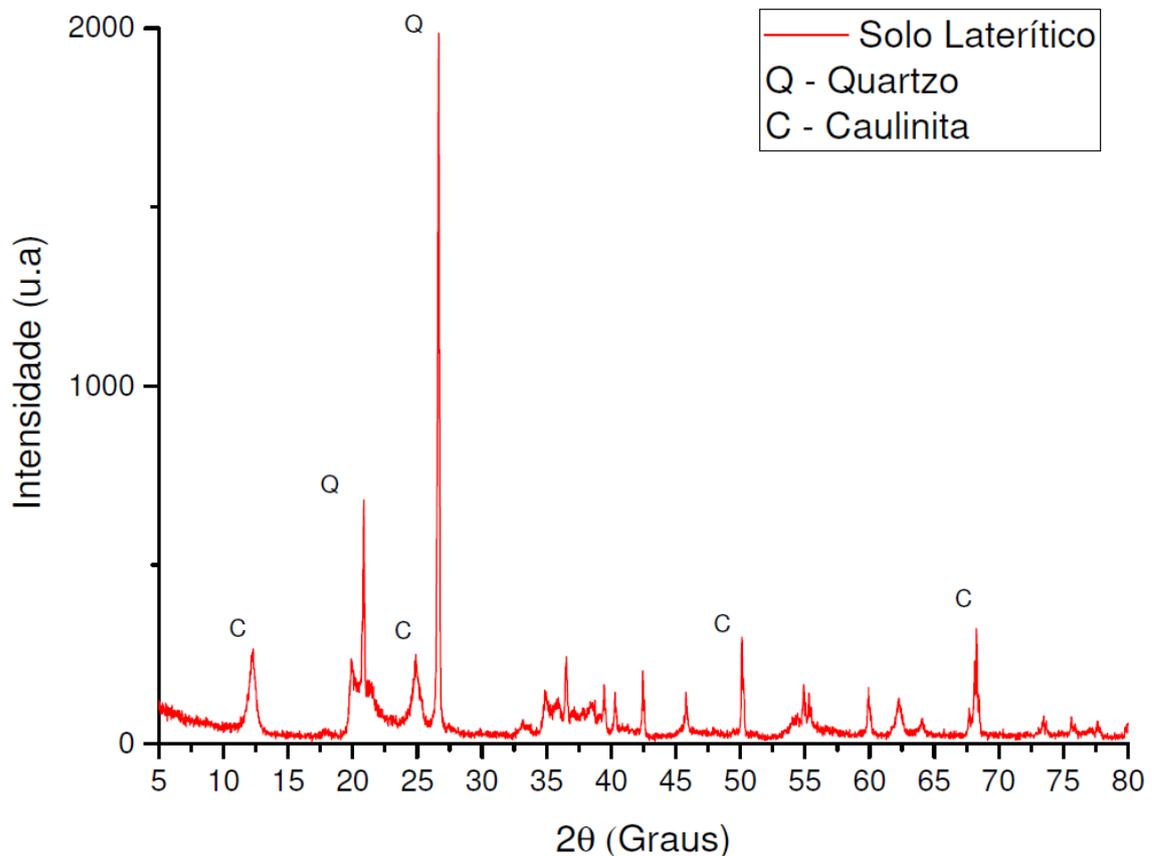


Figura 23. Difratograma de Raios-X do solo laterítico.

5.2 Nanotubos de carbono

5.2.1 Caracterização dos nanotubos

As propriedades dos nanotubos estão mostradas na Tabela 2.

Tabela 2. Propriedades dos nanotubos de carbono (CTube 120).

Propriedade	CTube 120
Aparência	Pó preto
Pureza de carbono (%)	≥ 97
Diâmetro médio (nm)	20
Comprimento (μm)	1 – 25
Óxido de metal (%)	≤ 3
Densidade aparente (g/cm^3)	0,030 – 0,050
Superfície específica (m^2/g)	150 - 250

Fonte: CNTCompany, 2020.

As imagens dos nanotubos de carbono através de microscopia eletrônica de varredura estão expostas na Figura 24.

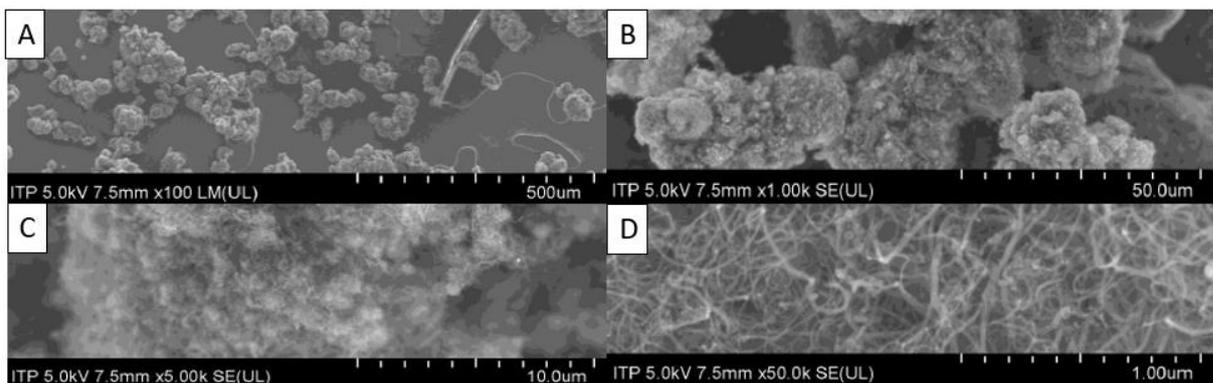


Figura 24. Imagem do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) dos nanotubos de carbono. (a) Ampliação de 20x; (b) Ampliação de 200x; (c) Ampliação de 1.000x; (d) Ampliação de 10.000 x.

Fonte: CNTCompany, 2020.

5.2.2 Dispersão dos nanotubos de carbono (Tamanho médio, PDI e Potencial Zeta)

Através do DLS, foi possível analisar o diâmetro hidrodinâmico médio das nanopartículas dispersas nas soluções. O resultado está exposto na Figura 25, onde se obteve partículas com diâmetro hidrodinâmico médio de 68,9 nm, atingindo satisfatoriamente os requisitos de que as partículas continuaram em escala nanométrica após a dispersão. Os resultados apresentam resultados melhores do que pesquisas feitas com outros tipos de surfactantes, conforme Tabela 3.

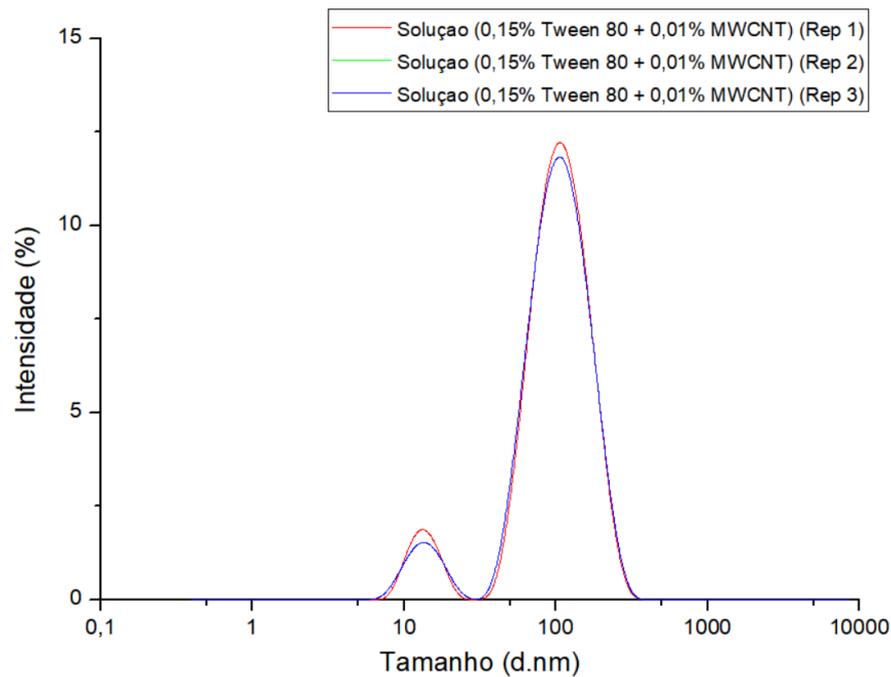


Figura 25. DLS com a dispersão a solução com 0,15% de Tween 80 e 0,01% de MWCNT.

Tabela 3. Diâmetro hidrodinâmico médio obtido de MWCNT em soluções com diferentes tensoativos, com 0,01% de MWCNT.

Autor	Tensoativos	Diâmetro médio (nm)
FIGUEIREDO et al., 2015	Glycerox 0,5%	197,2
	Glycerox 1%	167,6
	Glycerox 3%	175,2
	Amber 4001 0,5%	521,45
	Amber 4001 1%	322,85
	Amber 4001 3%	316,8
FORTE, 2017	Pluronic F-127 0,03%	198,4
	Policarboxilato 0,05%	221,1
	SDBS 0,03%	206,9
	SDOCO 0,03%	207,1
	Triton X-100 0,1%	174,0
	SDBS 0,015 % + Pluronic F-127 0,015%	191,3
	SDBS 0,015% + Policarboxilato 0,25%	200,2
	SDBS 0,015% + SDOCO 0,015%	205,1
	SDBS 0,015% + Triton X-100 0,05%	188,0
	SDOCO 0,015% + Pluronic F-127 0,015%	191,0
MOURA, 2015	Amber 2006 0,1%	354,9
	Amber 2006 0,5%	431,1
	Amber 2006 1%	514,9

		Continua
Autor	Tensoativos	Diâmetro médio (nm)
MOURA, 2015	Amber 2006 2%	816,0
	Amber 2002 0,1%	424,0
	Amber 2002 0,5%	304,1
	Amber 2002 1%	399,9
	Amber 2002 2%	623,9
	Amber 2001 0,1%	550,0
	Amber 2001 0,5%	548,0
	Amber 2001 1%	871,6
	Amber 2001 2%	985,0

De modo geral, é possível perceber que a solução se torna mais homogênea com baixos níveis de surfactantes, seguidos por uma relativa tendência de estabilidade conforme se aumenta a concentração. Esta variação pode ser dividida em dois estados: um onde o tensoativo é limitado e outro onde há o excesso. Em baixas concentrações, não há tensoativo suficiente para proteger todas as partículas presentes na solução. Consequentemente, pequenas gotas de óleo colidem umas com as outras, o que aumenta o tamanho das partículas. As dimensões das partículas, neste estado, são definidas basicamente pelo tipo e pela concentração de tensoativo presente na solução (YANG et al., 2013; ZHU et al., 2019). O tensoativo utilizado na pesquisa, Tween 80, é altamente recomendado para obter soluções homogêneas e nano partículas altamente ordenadas, devido ao seu caráter hidrofílico (HAMZA et al., 2020).

A Figura 26 mostra o gráfico do Potencial Zeta da solução. O potencial Zeta médio obtido em todas as corridas experimentais foi em torno de -24,87 mV e o PDI obtido foi da ordem de 0,231. De forma geral, $PDI < 0,1$, $0,1 - 0,4$ e $> 0,4$ representam soluções altamente dispersas, moderadamente dispersas e coloidais, respectivamente (ZAIB et al., 2020). Quanto mais próximo de 0 mV o valor do Potencial Zeta, maior a tendência de aglomeração da solução, enquanto valores próximos a -40 mV representam soluções com boa estabilidade (SALOPEK et al., 1992; CLOGSTON; PATRI, 2011). Estes resultados indicam que a solução se apresenta como moderadamente dispersa, e o Potencial Zeta distante de 0 mV indica que as partículas presentes na solução apresentam repulsão suficiente para mantê-la estável.

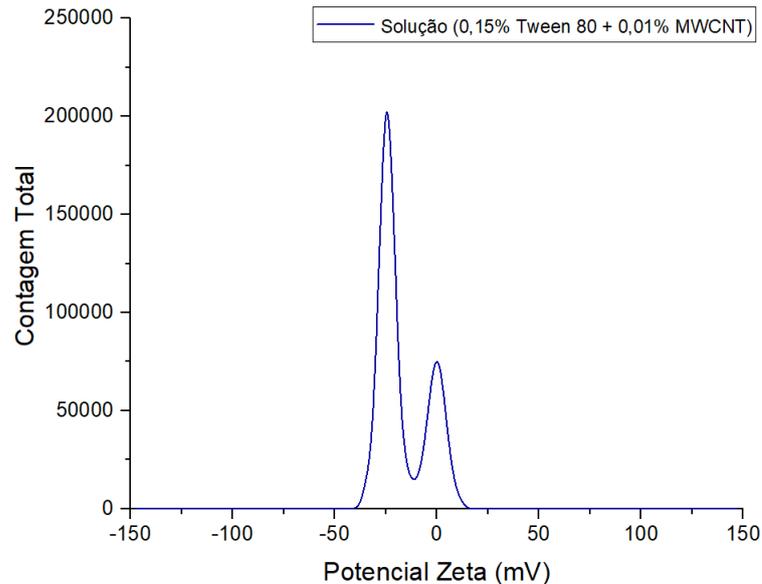


Figura 26. Gráfico do Potencial Zeta da solução com 0,15% de Tween 80 e 0,01% de MWCNT.

5.3 Ensaios físicos

5.3.1 Limites de Atterberg

Os resultados dos limites de Atterberg realizados com solo laterítico do grupo controle estão expostos na Figura 27. Primeiramente, calculou-se a homogeneidade das variâncias dos dados pelo teste de Bartlett e normalidade dos erros pelo teste de Shapiro-Wilk, onde rejeitou-se a hipótese de diferença nas variâncias e de anormalidade nos erros. Com isso, prosseguiu-se com a ANOVA.

A partir dos resultados obtidos, a adição dos CNTs ao solo apresentou uma diferença significativa nos parâmetros de limite de liquidez e limite de plasticidade, enquanto que para o índice de plasticidade não houve diferença significativa. A porcentagem de adição que se mostrou mais eficiente foi a de 0,2%, apresentando uma redução de cerca de 10% no LL e de 13% no LP, seguida pelas porcentagens de 0,1% que apresentou redução de 15% no LP e 0,05% com valores parecidos para LL e LP.

Os limites de Atterberg desempenham um importante papel na identificação e classificação do solo. Estes parâmetros podem indicar alguns possíveis problemas geotécnicos que venham a surgir no solo, como potencial de expansão e trabalhabilidade (ALSHAREF, 2016). Reduções nos limites de Atterberg são indicadores de melhoramento de solo (MAJEED; TAHA, 2012). Uma possível explicação na redução destes índices é que os nanotubos de carbono formam uma camada de revestimento ao redor das lamelas da argila, o que ocasiona uma supressão na reatividade da mesma diminuindo a possível absorção de água do solo (KRISHNAN; SHUKLA, 2019).

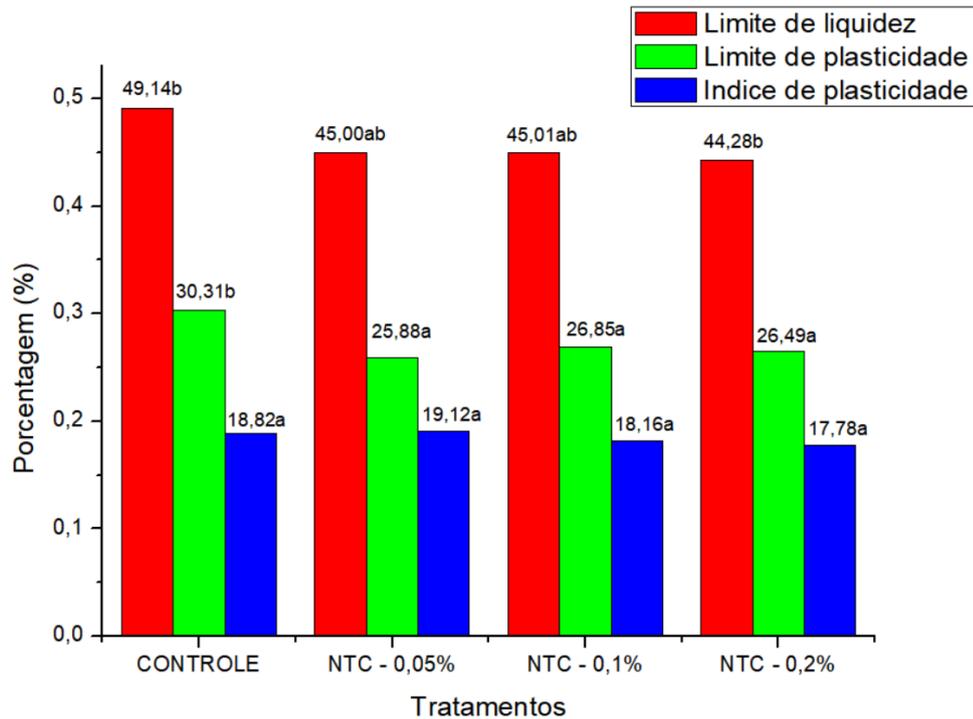


Figura 27. Médias dos limites de Atterberg para as amostras (grupos controle e com diferentes adições de CNTs).

Obs: Grupos com mesma letra não diferem significativamente em relação as suas médias, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha = 5\%$).

5.3.2 Massa específica real

Os resultados dos ensaios de massa específica real estão expostos na Figura 28. Primeiramente, calculou-se a homogeneidade das variâncias dos dados pelo teste de Bartlett e normalidade dos erros pelo teste de Shapiro-Wilk, onde rejeitou-se a hipótese de diferença nas variâncias e de anormalidade nos erros. Com isso, prosseguiu-se com a ANOVA.

Apesar de ter havido uma certa redução na média da densidade real conforme aumentava-se a porcentagem de CNTs nas amostras, esta redução não se mostrou significativa. Esta redução é esperada, devido à baixa densidade dos CNTs, além de irem de encontro com os resultados obtidos por Taha e Alsharef (2018). No entanto, devido ao resultado não significativo, é possível que maiores porcentagens de adição dos nanotubos de carbono no solo possam levar a resultados relevantes, devido a tendência de redução conforme aumenta a porcentagem de CNTs observado na Figura 28.

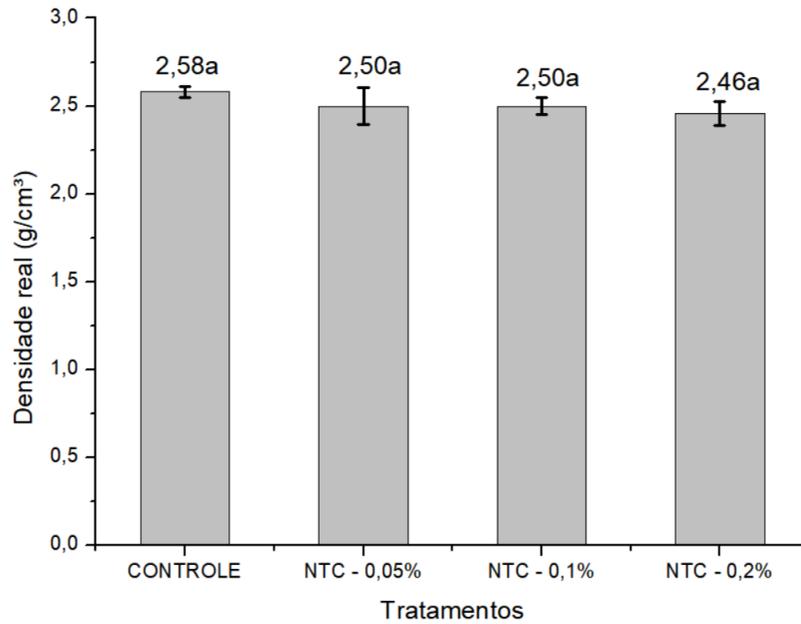


Figura 28. Médias da massa específica real das amostras dos grupos controle e com diferentes adições de CNTs. **Obs:** Grupos com mesma letra não diferem significativamente em relação às suas médias, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha = 5\%$).

5.3.3 Densidade seca máxima e umidade ótima

Os resultados dos ensaios de compactação realizados com o grupo controle estão expostos na Figura 29. As curvas de compactação se mostraram bem semelhantes, sendo possível observar um aumento nos grupos de amostras com 0,05% e 0,1% de CNT.

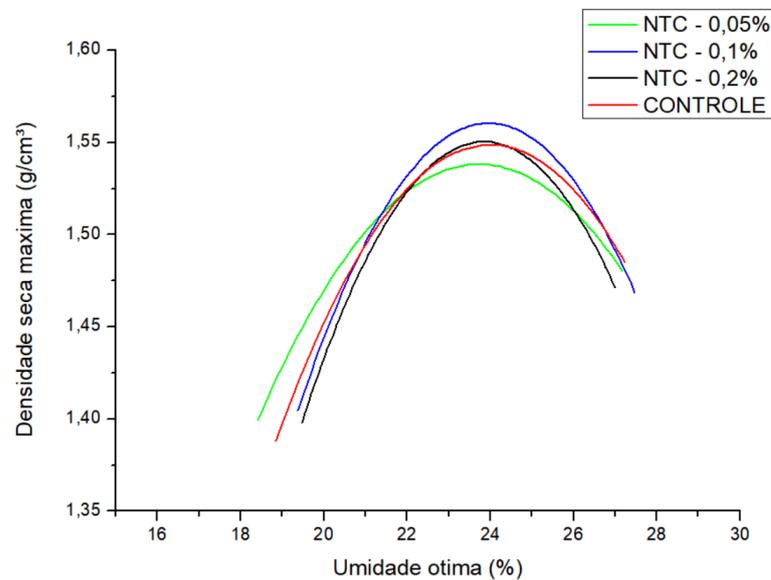


Figura 29. Curvas de compactação das amostras do solo (grupo controle e com diferentes adições de CNTs)

Calculou-se a homogeneidade das variâncias dos dados pelo teste de Bartlett e normalidade dos erros pelo teste de Shapiro-Wilk, onde rejeitou-se a hipótese de diferença nas variâncias e de anormalidade nos erros. Com isso, prosseguiu-se com a ANOVA. Os

resultados das médias de densidade seca máxima e umidade ótima das amostras do grupo controle e com diferentes adições de CNTs está exposto na Figura 30.

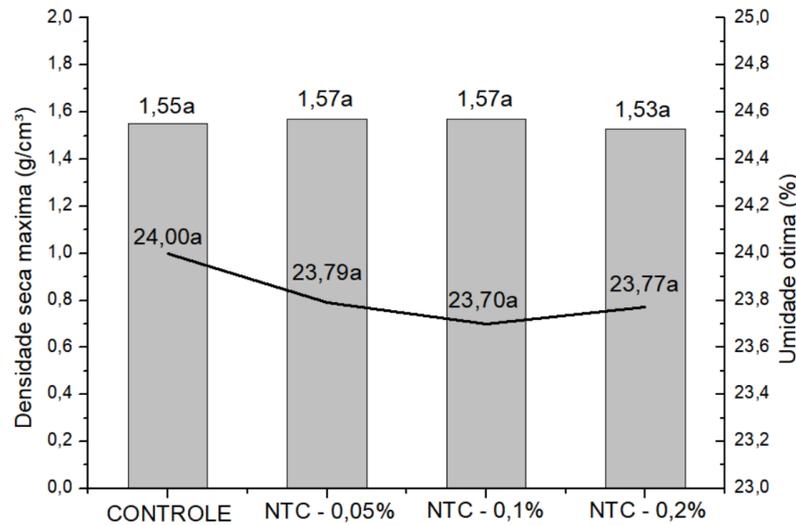


Figura 30. Médias das densidades secas máximas e umidade ótima das amostras de solo (grupos controle e com diferentes adições de CNTs)

Obs: Grupos com mesma letra não diferem significativamente em relação às suas médias, de acordo com o Teste de Tukey ($\alpha = 5\%$).

Os valores de densidade seca máxima apresentaram um aumento nas porcentagens de adição de 0,05% e 0,1% de CNTs, enquanto houve uma redução nos valores de umidade ótima nos tratamentos observados. No entanto, não houve variação significativa tanto nos valores de densidade seca máxima quanto nos valores de umidade ótima. O aumento e a redução nos valores de densidade seca máxima e umidade ótima, respectivamente, vão de encontro com os obtidos por Alsharif (2016), que também houve uma pequena variação nestes valores de 2% e 6%, respectivamente.

O aumento na densidade possivelmente pode ser ocasionado pelo rearranjo e consolidação das partículas do solo promovido pelo preenchimento das nanopartículas nos vazios presentes no corpo de prova (KRISHNAN; SHUKLA, 2019). Já a redução no teor de umidade ótima pode ser explicada pela formação de nanocompósitos (junção do solo com as nanopartículas) que preenchem os vazios do solo, ocupando o espaço da água, onde o mecanismo de troca de íons é o principal fenômeno que mantém a conexão entre os argilominerais e os nanotubos de carbono (AZZAM, 2014). Entretanto, apesar desses mecanismos, os resultados aqui obtidos não demonstram que houve uma alteração expressiva nestes parâmetros, de modo que a realização de tratamentos com diferentes porcentagens pode levar a valores com diferença significativa.

6. CONCLUSÕES

O ensaio de granulometria revelou que o solo possui mais de 50 % de seu peso passando na peneira #200, sendo composto predominantemente por silte com 24,76% e argila 33,05%, podendo classificar o solo como sendo um solo argiloso de textura média. A metodologia MCT permitiu classificar o solo do tipo laterítico arenoso. Através dos resultados de granulometria e dos Limites de Atterberg, o solo foi classificado como argila/silte de baixa compressibilidade no sistema SUCS de classificação de solos e A-7-5 no sistema HRB, classificando-o como um solo argiloso com comportamento fraco como subleito. A análise de Difração de Raios-X permitiu identificar os argilominerais presentes no solo, onde a caulinita se apresentou como o principal componente do solo, e juntamente com o ensaio químico através do EDX permitiu identificar os principais compostos químicos presentes no solo, com predominância para o silício e o ferro. Os resultados obtidos a partir destes ensaios corroboram com a afirmação de que o solo utilizado na pesquisa foi um solo com comportamento laterítico.

As medidas de Espalhamento Dinâmico de Luz mostraram que as soluções com dispersão dos nanotubos de carbono resultaram em um diâmetro hidrodinâmico médio das partículas de 68,9 nm, resultado considerado de melhor qualidade em comparação com outros estudos, e o Potencial Zeta foi de -24,87 mV e PDI de 0,231. Estes resultados confirmam que a dispersão foi realizada adequadamente e que a solução é considerada moderadamente dispersa, com boa tendência a estabilidade cinética, onde foi possível atingir a escala nanométrica dos nanotubos de carbono na solução. Estes fatores colaboram para que os resultados dos ensaios mecânicos e físicos sejam confiáveis.

De acordo com os ensaios físicos, a adição das diferentes porcentagens de nanotubos de carbono apresentou redução de 10 e 13%, respectivamente, nos parâmetros de limite de liquidez e limite de plasticidade, sendo que estes resultados indicam uma tendência de melhoramento no solo, pois a medida que o limite de liquidez diminui, também diminui a compressibilidade do solo, entre outras variáveis. No entanto, apesar da variação nas médias dos valores de massa específica real, densidade seca máxima e umidade ótima do solo, não foi possível observar uma diferença significativa nos resultados destes parâmetros após a adição das diferentes porcentagens de nanotubos de carbono em comparação com as amostras de solo do grupo controle. A execução destes ensaios com diferentes porcentagens de nanotubos podem levar a resultados com variação significativa, de modo que são necessários mais estudos para investigar estas variações.

Por meio deste trabalho, é possível afirmar que os nanotubos de carbono apresentam uma interação com solos de comportamento laterítico, e que maiores estudos são fundamentais para compreender melhor os mecanismos por trás desta interação. No decorrer da pesquisa, não foi possível encontrar na literatura científica trabalhos que utilizam nanotubos de carbono na região do Acre ou até mesmo do Norte, de modo que este trabalho se constitui como pioneiro na investigação relacionada a adição de nanomateriais em solos da região, estabelecendo-o como base científica para que outras pesquisas com a utilização de nanopartículas em solos da região tenham embasamento científico-técnico.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIODUN, A. A.; NALBANTOGLU, Z. Lime pile techniques for the improvement of clay soils. **Canadian Geotechnical Journal**, v. 52, n. 6, p. 760-768, 2015.
- ABOZIED, A. M. et al. Preparation, characterization, and nonlinear optical properties of graphene oxide thin film doped with low chirality metallic SWCNTs. **Journal of Materials Research and Technology**. 2021.
- ACRE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente. **Livro temático II: Recursos Naturais I - Geologia, Geomorfologia e Solos do Acre**. Programa Estadual de Zoneamento ecológico-econômico do Acre Fase II - Escala 1:250.000. SEMA Acre, Rio Branco, 2010.
- AFRIN, H. A review on different types soil stabilization techniques. **International Journal of Transportation Engineering and Technology**, v. 3, n. 2, p. 19-24, 2017.
- AKBAR, A. et al. Exploring mechanical performance of hybrid MWCNT and GNMP reinforced cementitious composites. **Construction and Building Materials**, v. 267, p. 120-131, 2021.
- AL-SWAIDANI, A. et al. Effect of adding natural pozzolana on geotechnical properties of lime-stabilized clayey soil. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 8, n. 5, p. 714-725, 2016.
- ALBERS, A. P. F. et al. Um método simples de caracterização de argilominerais por difração de raios X. **Cerâmica**, v. 48, n. 305, p. 34-37, 2002.
- ALCÂNTARA, M. A. M. et al. Efeito da cinza de casca de arroz na plasticidade e compactação de uma mistura solo-cal. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 2017.
- ALSHAREF, J. et al. Potential of using nanocarbons to stabilize weak soils. **Applied and Environmental Soil Science**, v. 2016, 2016.
- ALSHAWABKEH, A. **Basic and Applications of Electrokinetic Remediation**. In: mini curso em geotecnia ambiental no PEC/COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, p. 95, 2001.
- ANDAVAN, S.; KUMAR, B. M. Case study on soil stabilization by using bitumen emulsions—A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 1200-1202, 2020.
- ANDAVAN, S.; PAGADALA, Vamsi Krishna. A study on soil stabilization by addition of fly ash and lime. **Materials Today: Proceedings**, 2020.
- ARRUDA, Mauro Sergio Zakia Jabur. **Caracterização do material proveniente de usinas de beneficiamento de materiais de construção para análise de sua influência na estabilização de solos lateríticos**. 2020. 124f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Estadual Paulista, Sorocaba, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT . **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.

_____. **NBR 7181: Solo – Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, 1984.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **ASTM D4767-95. Consolidated undrained triaxial compression test for cohesive soils**. West Conshohocken, PA, USA, 1995.

AZZAM, W. R. Behavior of modified clay microstructure using polymer nanocomposites technique. **Alexandria Engineering Journal**, v. 53, n. 1, p. 143-150, 2014.

AZEEM, M.; SALEEM, M. A. Role of electrostatic potential energy in carbon nanotube augmented cement paste matrix. **Construction and Building Materials**, v. 239, p. 117-128, 2020.

BAHMANI, S. H. et al. Stabilization of residual soil using SiO₂ nanoparticles and cement. **Construction and Building Materials**, v. 64, p. 350-359, 2014.

BAIA, M. V. M. et al. Análise Comparativa de Metodologias para Classificação Geotécnica de Dois Solos Oriundos da Margem de Corpos Hídricos na zona Central de Manaus-AM. Engenharia no século XXI. Belo Horizonte, Ed. Poisson, 2018. 260p.

BAYAT, H. et al. Estimating Proctor parameters in agricultural soils in the Ardabil plain of Iran using support vector machines, artificial neural networks and regression methods. **CATENA**, v. 189, p. 104467, 2020.

BAZIAR, M. H. et al. Effect of nanoclay additives on the properties of engineering–geotechnical soil. In: **Proc. of 4th International Conference on Geotechnical Engineering and Soil Mechanics, Tehran**. p. 2-3, 2010.

BERNINI, Thiago Andrade et al. **Caracterização mineralógicas, identificação das substâncias húmicas e quantificação de Alumínio em solos da Formação Solimões, Acre**. 2010. 70p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Seropédica, 2010.

BISWAL, D. R. et al. Characterization of granular lateritic soils as pavement material. **Transportation Geotechnics**, v. 6, p. 108-122, 2016.

BORBA, S. M. C. **Estudo das Propriedades Químicas e Mineralógicas dos Solos Vermelhos Tropicais do Norte e Nordeste do Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 1981.

BUHLER, Russell L.; CERATO, Amy B. Stabilization of Oklahoma expansive soils using lime and class C fly ash. In: **Problematic soils and rocks and in situ characterization**. 2007. p. 1-10.

CASAGRANDE, A. **Classification and identification of soils**. Transactions ASCE 113: p. 901–932, 1948.

CENTENO, L. N. et al. Textura do solo: Conceitos e aplicações em solos arenosos. **Revista Brasileira de Engenharia e Sustentabilidade**, v. 4, n. 1, p. 31-37, 2017.

CLOGSTON, J. D.; PATRI, A. K. Zeta potential measurement. In: Characterization of nanoparticles intended for drug delivery. **Humana press**, p. 63-70, 2011.

CORRÊA-SILVA, Manuela et al. Geomechanical behavior of a soft soil stabilized with alkali-activated blast-furnace slags. **Journal of Cleaner Production**, v. 267, p. 122017, 2020.

CORREIA, A. A. S. et al. Applying multiwall carbon nanotubes for soil stabilization. **Procedia engineering**, v. 102, p. 1766-1775, 2015.

CHOOBBASTI, A. J.; KUTANAELI, S. S. Microstructure characteristics of cement-stabilized sandy soil using nanosilica. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 981-988, 2017.

CUI, H. et al. Effect of carbon fiber and nanosilica on shear properties of silty soil and the mechanisms. **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 286-295, 2018.

CWIRZEN, A. et al. Surface decoration of carbon nanotubes and mechanical properties of cement/carbon nanotube composites. **Advances in cement research**, v. 20, n. 2, p. 65-73, 2008.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**, 6^a ed., Thomson Learning, São Paulo. 2007.

DA SILVA, I F. F. **Avaliação do comportamento mecânico de um solo do Distrito Federal compactado em diferentes umidades para ser utilizado na conformação de aterros rodoviários**. Programa de Iniciação Científica-PIC/UniCEUB-Relatórios de Pesquisa, v. 1, n. 1, 2016.

DA SILVA, R. R. C. et al. Avaliação dos parâmetros mecânicos e físicos de solos moles através da injeção de colunas de argamassa associada a geodrenos verticais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 12, p. 490-506, 2020.

DE BORBA, W. F. et al. Identificação de Argilominerais em Solo de Aterro Sanitário na Região Noroeste no Estado do Rio Grande do Sul, Brasil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 42, n. 2, p. 178-183, 2019.

DE FREITAS, J. B. et al. Prediction of the resilient modulus of two tropical subgrade soils considering unsaturated conditions. **Engineering Geology**, p. 105-580, 2020.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Manual de Pavimentação**. Rio de Janeiro, RJ, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/manuais/Manual%20de%20Pavimentação%20E3o_05.12.06.pdf> Acesso em: 13 mai. 2020.

_____. **DNIT 164: Solos – Compactação utilizando amostras não trabalhadas – Método de Ensaio**. Rio de Janeiro, 2013.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM - DNER. DNER-ME 082: **Solos – determinação do limite de plasticidade**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER-ME 093: **Solos – determinação da densidade real**. Rio de Janeiro, 1994.

_____. DNER-ME 122: **Solos – determinação do limite de liquidez – método de referência e método expedito**. Rio de Janeiro, 1994.

_____, ES 256/94, **Solos compactados em equipamento miniatura: determinação da perda de massa por imersão**, Rio de Janeiro, RJ. 1994.

_____, ME 258/94, **Solos compactados em equipamento miniatura Mini-MCV**, Rio de Janeiro, RJ. 1994.

DE VOLDER, M. F. L. et al. Carbon nanotubes: present and future commercial applications. **Science**, v. 339, n. 6119, p. 535-539, 2013.

DOS SANTOS, Sânia Marques. **Influência da adição de montmorilonita nas propriedades térmicas e mecânicas de nanocompósitos com matriz de epóxi**. 2011. 124 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Materiais). Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

EYO, E. U. et al. Incorporation of a nanotechnology-based additive in cementitious products for clay stabilization. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 12, n. 5, p. 1056-1069, 2020.

FERREIRA, F. V. et al. Synthesis, Characterization, and Applications of Carbon Nanotubes. In: **Carbon-Based Nanofillers and Their Rubber Nanocomposites**. Elsevier. p. 1-45, 2019

FIROOZI, A. A. et al. Fundamentals of soil stabilization. **International Journal of Geo-Engineering**, v. 8, n. 1, p. 26, 2017.

GANGWAR, P.; TIWARI, S. Stabilization of soil with waste plastic bottles. **Materials Today: Proceedings**, 2021.

GHASABKOLAEI, N. et al. Geotechnical properties of the soils modified with nanomaterials: A comprehensive review. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**, v. 17, n. 3, p. 639-650, 2017.

GOMES, M. S. et al. Estudo da influência do tipo de finos no comportamento resiliente de solos tropicais para uso em pavimentos. **Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 5, p. 78-87, 2018.

GRUNER, J. W. The crystal structure of kaolinite. **Zeitschrift für Kristallographie-Crystalline Materials**, v. 83, n. 1-6, p. 75-88, 1932.

HAMZA, M. A. et al. The critical role of Tween 80 as a ‘green’ template on the physical properties and photocatalytic performance of TiO₂ nanoparticles for Rhodamine B photodegradation. **Journal of Materials Science: Materials in Electronics**, v. 31, n. 6, p. 4650-4661, 2020.

HASSANZADEH-AGHDAM, M. K. et al. Effect of adding carbon nanotubes on the thermal conductivity of steel fiber-reinforced concrete. **Composites Part B: Engineering**, v. 174, p. 106-118, 2019.

HAZEN, R. M. et al. High-pressure crystal chemistry and amorphization of α -quartz. **Solid State Communications**, v. 72, n. 5, p. 507-511, 1989.

HE, J. et al. Transport and retention of silver nanoparticles in soil: Effects of input concentration, particle size and surface coating. **Science of the Total Environment**, v. 648, p. 102-108, 2019.

HEJAZI et al. A simple review of soil reinforcement by using natural and synthetic fibers. **Construction and Building Materials**, vol. 30, p. 100-116, 2012.

HUANG, Yu; WANG, Lin. Experimental studies on nanomaterials for soil improvement: a review. **Environmental Earth Sciences**, v. 75, n. 6, p. 497, 2016.

HUSSEY, N. L. et al. An assessment of soil parameters governing soil strength increases with chemical additives. In: **GeoFlorida 2010: advances in analysis, modeling & design**. 2010. p. 2702-2711.

IKEAGWUANI, C. C.; NWONU, D. C. Emerging trends in expansive soil stabilization: A review. **Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering**, v. 11, n. 2, p. 423-440, 2019.

INDIRAMMA, P. et al. Utilization of fly ash and lime to stabilize the expansive soil and to sustain pollution free environment—An experimental study. **Materials Today: Proceedings**, v. 22, p. 694-700, 2020.

INDIRAMMA, P.; SUDHARANI, D. C. Use of Quarry Dust for Stabilizing Expansive Soil. **Department of Civil Engineering, Tirupati, AP, India. IJIRSET**, v. 5, n. 1, 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Pesquisa Anual da Indústria da Construção – PAIC. Rio de Janeiro, 2019.** Disponível em: <<https://www.ibge.gov.br/estatisticas/economicas/industria/9018-pesquisa-anual-da-industria-da-construcao.html?=&t=destaques>>. Acesso em: 07 mai. 2020.

IRANPOUR, Behnam et al. The influence of nanomaterials on collapsible soil treatment. **Engineering Geology**, v. 205, p. 40-53, 2016.

JAWAD, I. T. et al. Soil stabilization using lime: Advantages, disadvantages and proposing a potential alternative. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 8, n. 4, p. 510-520, 2014.

JEREZ, L. D. et al. Stabilization of Colombian lateritic soil with a hydrophobic compound (organosilane). **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 11, n. 6, p. 639-646, 2018.

JOAQUIM, Amaro Gabriel et al. **Estudo de dois solos tropicais melhorados com cimento ou cal para emprego em camadas superiores de estradas não pavimentadas.** 161f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade de Campinas, Campinas, São Paulo, 2017.

KANG, S. et al. Compliant Characteristics of Carbon Nanotube Electrodes for Electromechanical Applications. **Thin Solid Films**, p. 138-149, 2020.

KARUMANCHI, Meeravali et al. Improvement of consistency limits, specific gravities, and permeability characteristics of soft soil with nanomaterial: Nanoclay. **Materials Today: Proceedings**, v. 33, p. 232-238, 2020.

KIM, G. M. et al. Carbon nanotube (CNT) incorporated cementitious composites for functional construction materials: The state of the art. **Composite Structures**, p. 111-244, 2019.

KLOPP, H. W., et al. Atterberg limits and shrink/swell capacity of soil as indicators for sodium sensitivity within a gradient of soil exchangeable sodium percentage and salinity. **Geoderma**, v. 353, p. 449-458, 2019.

KRISHNAN, J.; SHUKLA, S. The behaviour of soil stabilised with nanoparticles: an extensive review of the present status and its applications. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 12, n. 14, p. 1-25, 2019.

KULANTHAIVEL, P. et al. Experimental investigation on stabilization of clay soil using nano-materials and white cement. **Materials Today: Proceedings**, 2020.

LEITE, João Paulo da Costa. **Obtenção de regiões em diagramas ternários utilizando óleos de coco e milho.** 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Ciência e Tecnologia) – Universidade Federal Rural do Semiárido, Mossoró, Rio Grande do Norte, 2020.

LIMA, Ricardo Paganelli de et al. **Estabilização de Solo Laterítico Utilizando Resíduo de Cana de Açúcar (cinza)**. 2019. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana) – Pontifícia Universidade Católica, Campinas, São Paulo, 2019.

LUO, H. et al. Cohesive soil stabilized using sewage sludge ash/cement and nano aluminum oxide. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 1, n. 1, p. 83-99, 2012.

MACHADO, L. F. M. et al. Adição de uma associação polimérica a um solo argilo-arenoso com vistas à estabilização química de materiais para pavimentos. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 22, n. 3, 2017.

MAGALHÃES, J. L.; SEGRE, T. S. P.; URBAN, R. C. Importância de ensaios geotécnicos em obras de pequeno porte: uma abordagem estatística multivariada. **Integração Engenharia**, v. 1, 2020.

MAJEED, Z. H. Stabilization of soft soil using nanomaterials. **Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology**, v. 8, n. 4, p. 503-509, 2014.

MAJEED, Z.H.; TAHA, M. R. Effect of nanomaterial treatment on geotechnical properties of a Penang soft soil. **Journal of Asian Scientific Research**, v. 2, n. 11, p. 587, 2012.

MAJEED, Z. H.; TAHA, M. R. A review of stabilization of soils by using nanomaterials. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 7, n. 2, p. 576-581, 2013.

MASSAD, F. **Obras de terra: curso básico de geotecnia**. Editora Oficina de Textos, 2ª edição, São Paulo, 2010.

MENGUE, E. et al. Physicochemical and consolidation properties of compacted lateritic soil treated with cement. **Soils and Foundations**, v. 57, n. 1, p. 60-79, 2017.

MILITITSKY, J.; CONSOLI, N. C.; SCHNAID, F. **Patologia das fundações**. 2. ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2015.

MITCHELL, B., The Six Sigma Appeal. **Engineering Management Journal**, p. 41-47, 1992.

MITCHELL, J. K., **Fundamentals of Soil Behavior**. 1ª ed., John Wiley & Sons, Inc. New York, USA, 1976.

MONTHIOUX, M. et al. Introduction to carbon nanotubes. In: **Springer handbook of nanotechnology**. Springer, Berlin, Heidelberg, p. 47-118, 2010.

NEGRETTO, C. M. U. et al. Análise de transportador lipídico nanoestruturado contendo vitamina e através da espectrofotometria UV/VIS. **Disciplinarum Scientia Naturais e Tecnológicas**, v. 14, n. 1, p. 89-98, 2013.

NIKOOKAR, M. et al. The strength characteristics of silty soil stabilized using nanoclay. In: **Proc. of 7th Symposium on Advances in Science & Technology (7thsastech)**. p. 7-8, 2013.

NOGAMI, J.S.; VILLIBOR, D.F. **Pavimentos econômicos: tecnologia do uso dos solos finos lateríticos**. São Paulo: Arte e Ciência, 2009.

NOGAMI, J. S. et al. **“Pavimentos com Solos Lateríticos e gestão de manutenção de Vias Urbanas”**. São Paulo, 2000.

NOGAMI, J. S.; VILLIBOR, D. F. Use of lateritic fine-grained soils in road pavement base courses. **Geotechnical & Geological Engineering**, v. 9, n. 3-4, p. 167-182, 1991.

NOMURA, D. A. et al. Espalhamento dinâmico de luz. **Apostila para a 2a Escola de Colóides da USP**, p. 1-18, 2014.

NUNES, J. M. et al. O setor da Construção Civil no Brasil e a atual crise econômica. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. 39-70, 2020.

PAIVA, Sergio Carvalho De. **Estudo do comportamento geomecânico dos solos expansivos dos municípios de cabrobó, paulista e ipojuca - pe e de suas misturas com cal**. 196 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal De Pernambuco, Recife, 2016.

PATEL, A. Soil stabilization. **Geotechnical Investigations and Improvement of Ground Conditions**. Chapter 3, p. 19-27, 2019.

PENG, H. et al. **Industrial applications of carbon nanotubes**. William Andrew, 2016.

PHANIKUMAR, B. R.; RAJU, E. R. Compaction and strength characteristics of an expansive clay stabilized with lime sludge and cement. **Soils and Foundations**, 2020.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos - 3ª edição**. Ed. Oficina de Textos. São Paulo, 2006.

PONGSIVASATHIT, S. et al. Assessment of mechanical properties of cement stabilized soils. **Case Studies in Construction Materials**, v. 11, p. e00301, 2019.

RAFAEL, Nuno Forte. **Estabilização química de solos com recurso a nanopartículas**. 2017. 98f. Tese (Doutorado em engenharia química) - Universidade de Coimbra, Coimbra, 2017.

RENJITH, R. et al. Optimization of fly ash based soil stabilization using secondary admixtures for sustainable road construction. **Journal of Cleaner Production**, v. 294, p. 126-264, 2021.

RIBEIRO, K. D.; SOUZA, L. K. Limites de atterberg e sua correlação com a granulometria e matéria orgânica dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia de Biosistemas**, v. 12, n. 2, p. 185-196, 2018.

RILHO, Andry Soares. **Melhoramento de um solo mole com a utilização de agentes cimentantes**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2014.

ROCHA, Breno Padovezi. **Caracterização geotécnica de solos tropicais não saturados por meio de ensaios de campo**. 272 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, São Paulo, 2018.

RODRIGUES, Klaus Henrique de Paula. **Estudo de estabilização granulométrica de solos utilizando rejeito de mineração**. 108 f. Dissertação (Mestrado em Geotecnia) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, 2018.

SALOPEK, B.; KRASIC, D.; FILIPOVIC, S. Measurement and application of zeta-potential. **Rudarsko-geolosko-naftni zbornik**, v. 4, n. 1, p. 147, 1992.

SANI, J. E. et al. Effect of rice husk ash admixed with treated sisal fibre on properties of lateritic soil as a road construction material. **Journal of King Saud University-Engineering Sciences**, v. 32, n. 1, p. 11-18, 2020.

SANTOS, H. G. et al. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed., Brasília, DF: Embrapa, 353 p. 2013.

SANTOS, A. S. L. **A importância da geotecnia na infraestrutura ferroviária**. Tese de Doutorado. Instituto Superior de Engenharia de Lisboa. 2017a.

SANTOS, M. D. D. **Problemas geotécnicos associados a solos expansivos em Lisboa**. 2017. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2017b.

SANTOS, H. G. M. et al., **Sistema Brasileiro de Classificação de solos**. 5. ed., Brasília, DF : Embrapa, 2018.

SASANIAN, Saeed. **The behavior of cement stabilized clay at high water contents**. 2011. Pg. 287. Thesis (Phd in Civil and Environmental Engineering) – University of Western Ontario, 2011.

SCORZELLI, R.B. et al. Spectroscopy studies of kaolin from different Brazilian regions. **Clay Minerals**, n° 43, p. 1-7, 2008.

SHINZATO, Edgar et al. Análise morfopedológica: um instrumento para elaboração do mapa geodiversidade do estado do Acre. In: **Embrapa Solos-Resumo em anais de congresso (ALICE)**. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 46., 2012, Santos. Sociedade Geológica de Portugal, 2012.

SILVA, J. A. et al. Caracterização de Misturas Solo-Cal e Solo-Cinza Aplicadas na Estabilização de Um Solo Expansivo da Cidade de Agrestina-PE. **XIX Congresso Brasileiro de Mecânica dos solos e Engenharia Geotécnica**, COBRAMSEG, Salvador, Bahia, 2018.

SILVA, J. S.; CASTRO, R. M. Análise da influência do comprimento e teor de fibras adicionadas em reforço de solos lateríticos. **RENEFARA**, v. 15, n. 2, p. 76-84, 2020.

SILVA, O. S. **Estudo de propriedades geotécnico de um solo argiloso, potencialmente expansivo, compactado com e sem adição de cal**. 150p. Dissertação (Mestrado) da Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2012.

SINGHAI, A. K.; SINGH, S. S. Laboratory study on soil stabilization using fly ash and rice husk ash. **International Journal of Research in Engineering and Technology**, v. 3, n. 11, 2014.

SOARES, J. M. D. et al. Solos Expansivos: Estudo de Caso em Santa Maria/RS. **SEMINÁRIO DE ENGENHARIA GEOTÉCNICA DO RIO GRANDE DO SUL, VII**, 2013.

SOLTANI, A. et al. A sulphonated oil for stabilization of expansive soils. **International Journal of Pavement Engineering**, v. 20, n. 11, p. 1285-1298, 2019.

TAHA, Mohd Raihan et al. Ultrasonic Dispersion of Nanocarbons in Soil-water Mixture. **Materials Science**, v. 26, n. 1, p. 3-9, 2020.

TAHA, Mohd Raihan; ALSHAREF, Jamal M. A. Performance of soil stabilized with carbon nanomaterials. **Chemical Engineering Transactions**, v. 63, p. 757-762, 2018.

TAHA, M. R. Recent Developments in Nanomaterials for Geotechnical and Geoenvironmental Engineering. In: **MATEC Web of Conferences**. EDP Sciences. p. 20-34, 2018.

TAHA, M. R. et al. Effects of nano-carbon reinforcement on the swelling and shrinkage behavior of soil. **Sains Malaysiana**, v. 47, n. 1, p. 195-205, 2018.

TAHA, M. R.; YING, T. Effects of carbon nanotube on kaolinite: basic geotechnical behavior. **ICCE-18, Anchorage, Alaska, USA**, 2010.

TANAKA, K. Classification of Carbon. In: **Carbon Nanotubes and Graphene**. Elsevier, p. 1-5, 2014.

TEIXEIRA-NETO, É.; TEIXEIRA-NETO, Â. A. Modificação química de argilas: desafios científicos e tecnológicos para obtenção de novos produtos com maior valor agregado. **Química Nova**, v. 32, n. 3, p. 809-817, 2009.

TIWARI, N.; SATYAM, N. An experimental study on the behavior of lime and silica fume treated coir geotextile reinforced expansive soil subgrade. **Engineering Science and Technology, an International Journal**, 2020.

TOMKELSKI, M. L. et al. Ensino de Nanociência e Nanotecnologia: perspectivas manifestadas por professores da educação básica e superior. **Ciência & Educação (Bauru)**, v. 25, n. 3, p. 665-683, 2019.

VANCE, M. E. et al. Nanotechnology in the real world: Redeveloping the nanomaterial consumer products inventory. **Beilstein journal of nanotechnology**, v. 6, n. 1, p. 1769-1780, 2015.

VIEIRA, B. A.; NOGUEIRA, L. Construção civil: crescimento versus custos de produção civil. **Sistemas & Gestão**, v. 13, n. 3, p. 366-377, 2018.

VILLIBOR, D. F. et al. **Pavimentos de baixo custo para vias urbanas**. 2ª ed., São Paulo: Arte e Ciência, 196 p., 2009.

YANG, Y. et al. Formation and stability of emulsions using a natural small molecule surfactant: Quillaja saponin (Q-Naturale®). **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 2, p. 589-596, 2013.

ZAIB, Qammer et al. Deep Eutectic Solvent Assisted Dispersion of Carbon Nanotubes in Water. **Frontiers in Chemistry**, v. 8, 2020.

ZHU, Z. et al. Comparison of natural and synthetic surfactants at forming and stabilizing nanoemulsions: Tea saponin, Quillaja saponin, and Tween 80. **Journal of colloid and interface science**, v. 536, p. 80-87, 2019.

ZIMMERMANN, Diogo Marcelo et al. Classificação das Unidades Geotécnicas contidas na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira em Joinville/SC através do ensaio de Miniatura Compactada Tropical–MCT. In: **XII Simpósio de Práticas de Engenharia Geotécnica da Região Sul**, GEOSUL, Joinville, Santa Catarina, 2019.