



UEPB

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DA PARAÍBA
CAMPUS VIII
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLOGIA E SAÚDE
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

ALICE OLIVEIRA JUSTO

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE SOLO RESIDUAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO
DE MARMORARIA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

**ARARUNA - PB
2020**

ALICE OLIVEIRA JUSTO

**ESTUDO DA ESTABILIDADE DE SOLO RESIDUAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO
DE MARMORARIA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Área de concentração: Geotecnia.

Orientador: Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti.

**ARARUNA / PB
2020**

É expressamente proibido a comercialização deste documento, tanto na forma impressa como eletrônica. Sua reprodução total ou parcial é permitida exclusivamente para fins acadêmicos e científicos, desde que na reprodução figure a identificação do autor, título, instituição e ano do trabalho.

J96e Justo, Alice Oliveira.
Estudo da estabilidade de solo residual com adição de resíduo de marmoraria para fins de pavimentação [manuscrito] / Alice Oliveira Justo. - 2020.
51 p. : il. colorido.
Digitado.
Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Estadual da Paraíba, Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde , 2020.
"Orientação : Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti , Coordenação do Curso de Engenharia Civil - CCTS."
1. Expansibilidade. 2. Desenvolvimento sustentável. 3. Propriedades mecânicas. I. Título
21. ed. CDD 624

ALICE OLIVEIRA JUSTO

ESTUDO DA ESTABILIDADE DE SOLO RESIDUAL COM ADIÇÃO DE RESÍDUO DE
MARMORARIA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Engenharia Civil, da Universidade Estadual da Paraíba, como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

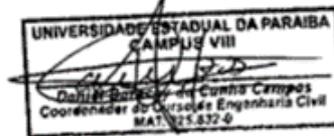
Área de concentração: Geotecnia.

Aprovado em: 02 / 12 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Alan Barbosa Cavalcanti

Prof. Me. Alan Barbosa Cavalcanti (Orientador)
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)



Prof. Dr. Daniel Baracuy da Cunha Campos
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

Lauandes Marques de Oliveira

Prof. Me. Lauandes Marques de Oliveira
Universidade Estadual da Paraíba (UEPB)

RESUMO

Quando há incompatibilidade entre o solo disponível no local e o tipo de carga solicitante em obras de pavimentação, se faz a correção do solo por meio da estabilização a fim de melhorar as propriedades mecânicas, promover a redução dos custos e viabilizar a obra. Entre os principais métodos, destaca-se a estabilização química que faz uso de materiais como o cimento e a cal, porém a produção destes acarretam danos ao meio ambiente. Nesse contexto, surgiram técnicas alternativas que fazem o uso de resíduos industriais como estabilizantes, contribuindo para um bom desenvolvimento sustentável. O objetivo do trabalho foi aproveitar o resíduo de marmoraria afim de avaliar o desempenho mecânico do solo estabilizado com esse resíduo, verificando sua aplicabilidade para fins de pavimentação como material de construção em sub-bases. Inicialmente o solo utilizado foi coletado nas proximidades do sítio lagoa dos Homens, em Araruna-PB. Em seguida foram feitas dosagens com adição de resíduo de marmoraria nos percentuais de 5, 10 e 15% e por fim foram realizados ensaios de caracterização física, química e mineralógica. Os ensaios de compactação e Índice de Suporte Califórnia para o solo natural e todas as misturas, mostraram uma redução de 66,7% na expansibilidade do solo para o teor de 15%, diminuição da umidade ótima em até 4% e um aumento na resistência mecânica. Entretanto, o teor de 10% apresentou os melhores resultados obtidos, com acréscimo de 56,7% no ISC em relação ao solo natural, chegando a adquirir características para ser aplicado em sub-base. Portanto, o uso do resíduo de marmoraria como material alternativo na estabilização do solo mostrou-se viável frente aos benefícios relacionados as propriedades mecânicas e ao meio ambiente.

Palavras-Chave: Expansibilidade. Desenvolvimento sustentável. Propriedades mecânicas.

ABSTRACT

When there is incompatibility between the soil available at the site and the type of load requesting in paving works, the soil is corrected through stabilization and in order to improve its mechanical properties, to promote cost reduction and makes the work feasible. Among the main methods, chemical stabilization that uses materials such as cement and lime stands out, but the production of these causes damage to the environment. In this context, alternative techniques have emerged that make use of industrial waste as stabilizers, contributing to a good sustainable development. The purpose of this work was to take advantage of the marble waste in order to evaluate the mechanical performance of the soil stabilized with this residue, verifying its applicability for paving purposes as construction material in sub-bases. Initially, the soil used was collected near the Sítio Lagoa dos Homens, in Araruna-PB. Then dosages were made with the addition of marble waste in the percentages of 5, 10 and 15% and finally physical, chemical and mineralogical characterization tests were realized. The California Compaction and Support Index tests for natural soil and all mixtures, attenuating a 66,7% reduction in soil expandability to 15% content, decreasing optimum moisture by up to 4% and increasing resistance mechanics. However, the 10% content shows the best results obtained, with an increase of 56,7% in the ISC in relation to the natural soil, even acquiring characteristics for application in sub-base. Therefore, the use of marble waste as an alternative material in soil stabilization is known to be viable in view of the benefits related to mechanical properties and the environment.

Keywords: Expandability. Sustainable development. Mechanical properties.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Fluxograma da metodologia geral do trabalho.....	22
Figura 2 – Resíduo passante na peneira de n° 200.....	23
Figura 3 – Localização geográfica do solo.....	23
Figura 4 – Aspecto visual do solo coletado.....	24
Figura 5 – Difratorômetro XDR 7000.....	27
Figura 6 – Espectrômetro por energia dispersiva EDX-7000/8000.....	28
Figura 7 – Corpo de prova no período de embebição.....	30
Figura 8 – Difratoograma de raios X do solo natural.....	31
Figura 9 – Difratoograma de raios X do resíduo de marmoraria.....	32
Figura 10 – Gráfico da distribuição granulométrica do solo estudado.....	35
Figura 11 – Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo natural.....	36
Figura 12 – Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo + 5%.....	37
Figura 13 – Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo + 10%.....	37
Figura 14 – Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo + 15%.....	38
Figura 15 – Curvas de fluidez do solo e das misturas.....	38
Figura 16 – Gráfico comparativo entre os índices de plasticidades.....	39
Figura 17 – Curva de compactação para o solo natural.....	41
Figura 18 – Curva de compactação para o teor de resíduo 5%.....	41
Figura 19 – Curva de compactação para o teor de resíduo 10%.....	42
Figura 20 – Curva de compactação para o teor de resíduo 15%.....	42
Figura 21 – Curvas de compactação para solo natural e misturas.....	43
Figura 22 – Expansões do solo e misturas ao longo de 96 horas.....	44
Figura 23 – Resultado comparativo de ISC para solo natural e misturas.....	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Características dos materiais aplicados no pavimento.....	16
Tabela 2 – Ensaio de caracterização física.....	25
Tabela 3 – Ensaio de resistência mecânica.....	28
Tabela 4 – Espectroscopia de raios X do solo natural.....	33
Tabela 5 – Espectroscopia de raios X do resíduo de marmoraria.....	34
Tabela 6 – Coeficiente de uniformidade e de curvatura do solo.....	35
Tabela 7 – Dados do solo residual para classificação.....	40

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	11
1.1	Objetivos	12
<i>1.1.1</i>	<i>Objetivo Geral</i>	12
<i>1.1.2</i>	<i>Objetivos Específicos</i>	13
1.2	Justificativa	13
2.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Solo	14
2.2	Classificação dos solos	14
<i>2.2.1</i>	<i>Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)</i>	15
<i>2.2.2</i>	<i>Sistema de Classificação HBR</i>	15
2.3	Pavimentos	16
2.4	Estabilização dos solos para pavimentação	17
<i>2.4.1</i>	<i>Estabilização química</i>	18
<i>2.4.2</i>	<i>Estabilizantes alternativos</i>	19
<i>2.4.3</i>	<i>Estabilização com resíduos de mármore e granito</i>	20
2.5	Considerações finais	21
3.	MATERIAIS E MÉTODOS	22
3.1	Preparação das amostras	24
3.2	Dosagem	24
3.3	Ensaio de caracterização física do solo	24
<i>3.3.1</i>	<i>Análise granulométrica do solo</i>	25
<i>3.3.2</i>	<i>Limite de liquidez</i>	26
<i>3.3.3</i>	<i>Limite de plasticidade</i>	26
3.4	Ensaio de caracterização químico-mineralógica	27
<i>3.4.1</i>	<i>Difração por raios-X (DRX)</i>	27
<i>3.4.2</i>	<i>Espectroscopia de raios X (EDX)</i>	28

3.5	<i>Ensaio de resistência mecânica</i>	28
3.5.1	<i>Ensaio de compactação</i>	28
3.5.2	<i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)</i>	29
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	31
4.1	Análise química e mineralógica	31
4.1.1	<i>DRX</i>	31
4.1.2	<i>EDX</i>	33
4.2	Propriedades físicas do solo e misturas estudadas	34
4.2.1	<i>Análise granulométrica do solo</i>	34
4.2.2	<i>Limites de Atterberg</i>	35
4.2.3	<i>Classificação do solo</i>	39
4.3	Comportamento mecânico	40
4.3.1	<i>Ensaio de compactação</i>	40
4.3.2	<i>Ensaio de Índice de Suporte Califórnia</i>	43
5.	CONCLUSÕES	46
5.1	Sugestões para trabalhos futuros	47
	REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

O solo, composto por sais minerais, é a camada mais superficial da crosta terrestre e apresenta inúmeras variações, devido ao que podemos chamar de fatores de formação, onde incluem-se: origem, relevo, clima, tempo e organismo. “Tais fatores combinados são determinantes para a formação do solo, ressaltando-se ainda que a maior ou menor intensidade pela qual um ou mais desses fatores agem na formação do mesmo, influi diretamente para a sua caracterização”. (SARTORI, 2015, p. 13).

O estudo dos solos sob o ponto de vista do Engenheiro Civil visa entender e prever seu comportamento quando solicitado por diferentes tipos de tensões. A ausência desse estudo numa etapa de construção pode colocar toda uma obra em risco, incluindo a vida dos colaboradores e da população, causando uma grande tragédia. Segundo Bernucci *et al.* (2008), numa obra de pavimentação a matéria-prima de execução das camadas do corpo de aterro, subleito, reforço de subleito, sub-base e base é o solo, destinado a resistir aos esforços produzidos pelo tráfego. A fim de alcançar boas condições de rolamento, segurança e vida útil, o dimensionamento deve ser realizado de acordo com o tipo de solo existente e tráfego, garantindo uma boa sustentação do pavimento rodoviário.

A pavimentação visa revestir um piso ou chão com uma cobertura, sendo definida, de acordo com Bernucci *et al.* (2008), como uma estrutura de múltiplas camadas executadas sobre a superfície final de terraplanagem, destinada a resistir aos esforços provenientes do tráfego e do clima, além de proporcionar conforto, economia e segurança aos usuários nas condições de rolamento. Entretanto, muitas vezes os solos não apresentam propriedades adequadas para suportar as cargas impostas ao pavimento e se faz necessário a correção do solo disponível no local, para que ele satisfaça os requisitos de projeto.

Makusa (2013), afirma que um dos métodos utilizados para modificar as propriedades dos solos inapropriados para atender às especificações do projeto chama-se: estabilização do solo. A estabilização surgiu com o intuito de melhorar o desempenho de suas características, aumentando a produtividade em obra e diminuindo os custos através do uso do solo local.

“A estabilização pode ser alcançada de diversas formas tais como: mecânica, com a estabilização granulométrica ou com a variação da energia de compactação e a química, através da adição de produtos como cal, cimento, materiais asfálticos e aditivos específicos” (TEIXEIRA, 2014, p. 2). A utilização de materiais alternativos na estabilização de solos vem crescendo devido à preocupação mundial com o meio ambiente, visto que produtos como cal e cimento estão associados a grandes impactos ambientais em seus processos produtivos, como

a elevada emissão de gases poluentes durante o processo de queima. Inúmeras pesquisas têm sido feitas com o objetivo de tornar processos produtivos mais sustentáveis, diminuindo a extração de matéria-prima e utilizando resíduos que seriam descartados pelo homem em lugares inapropriados como aditivos na melhoria dos solos.

Zorluer e Gucek (2020), analisaram a usabilidade de resíduos industriais como pó de mármore e granito, resíduos de boro e cinzas volantes em diferentes proporções e misturados na estabilização de solos granulares. Os resultados mostraram que o pó de mármore e granito com a cinza volante podem ser usados de forma eficiente nas aplicações de estabilização, pois aumentam a resistência e a resiliência do solo.

Os resíduos de mármore e granito são formados durante o beneficiamento de rochas ornamentais e seu uso na estabilização de solos são devidos as propriedades e os constituintes minerais das rochas. Segundo Demartini (2017), o mármore é uma rocha metamórfica predominantemente composta por calcita (CaCO_3) e dolomita ($\text{CaMg}[\text{CO}_3]_2$) em variadas proporções, de modo que esses minerais determinam suas propriedades físicas. Por outro lado, o granito é uma rocha ígnea, constituída principalmente por feldspatos, quartzo e micas, e, no geral, os resíduos provenientes destas rochas apresentam comportamento não plástico.

De acordo com Carraro (1997), a partir do contexto mundial ao qual o mercado está inserido, a difusão efetiva na valorização dos meios alternativos relacionados ao meio ambiente e ao desenvolvimento econômico podem mudar os projetos de engenharia, já que deixariam de ter soluções particulares e passariam a estar em maior conformidade com a conjuntura sócio-econômico-ambiental na qual estão inseridos.

Desta forma, o presente trabalho busca a estabilização química de um solo residual através do incremento de pó de mármore e granito, com o objetivo de aumentar a resistência mecânica do solo para ser utilizado em sub-bases, propondo um destino sustentável para os resíduos.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Realizar a análise do solo e verificar qual o efeito da adição de resíduos finos, proveniente de uma marmoraria, que possa lhe conferir maior estabilidade e resistência mecânica para fins de pavimentação.

1.1.2 *Objetivos específicos*

- Classificar o tipo de solo e avaliar as características físicas e químicas do solo e do resíduo, submetendo amostras aos ensaios de Análise Granulométrica, Limites de Atterberg, Difração de Raios X e Eflorescência de Raios X;
- Avaliar o comportamento mecânico do solo com adições de resíduos, submetendo as amostras aos ensaios de Compactação e Índice de Suporte Califórnia;
- Indicar e sugerir a dosagem ideal para a estabilização do solo.

1.2 Justificativa

Observando a conjuntura atual do país e do mundo, a redução da utilização, do preparo, da aplicação e da extração de materiais é alvo de diversas pesquisas. Busca-se amenizar os impactos causados, por tais, além de evitar possíveis produtos nocivos depositados na natureza. Entre os principais métodos de estabilização de solos estão compactação, a correção granulométrica e a adição de estabilizantes químicos.

Os estudos sobre a estabilização química de solos, além de muito difundidos no Brasil, desde a década de 40, mostram esse método de melhoramento como importante alternativa para a viabilidade econômica e ambiental no reforço de solos utilizados para fins de pavimentação. As perdas nas serrarias e marmorarias geram um grande acúmulo de rejeitos, que geralmente são descartados erroneamente, podendo impactar em profundos problemas ambientais. Esse resíduo fino é constituído basicamente de quatro minerais, sendo eles a mica, feldspato, quartzo e calcita, já que são resíduos de duas rochas ornamentais, o granito e o mármore.

Em concordância com Carraro (1997), o aproveitamento racional de resíduos tem caráter fundamental e estratégico em casos de países em desenvolvimento, como acontece no Brasil, uma vez que subprodutos indesejáveis e sumariamente descartados em determinados processos produtivos, na maior parte das vezes com consequências danosas ao meio ambiente, podem vir a constituir-se em insumos de razoável ou até mesmo excelente qualidade para outros tipos de aplicação, quando utilizados com uma tecnologia adequada.

Então, justifica-se a proposta da estabilização química através da adição do resíduo de marmoraria, devido ao aproveitamento de um subproduto que implica na diminuição do impacto ambiental, impedindo seu descarte incorreto. Também, devido a sua própria condição de resíduo, o pó possui um baixo valor agregado, o que pode tornar sua aplicação viável até mesmo em grande escala.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solo

Na perspectiva de Das (2007 apud SARTORI, 2015), o solo é definido como um agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquidos e gás nos espaços vazios entre as partículas sólidas. Winterkorn (1955), citado por Azevêdo (2010), relata que, do ponto de vista da engenharia, define-se o solo como sendo o material proveniente da desagregação das rochas, impregnado ou não com matéria orgânica, que se encontra na superfície da terra; suas partículas podem variar desde diâmetros da ordem de micra a poucos centímetros, e que os solos finos são um produto natural dos processos de alteração.

De acordo com Caputo (1988), a desintegração mecânica acontece através de agentes como a água, a temperatura, a vegetação e o vento, formando pedregulhos e areias (solos de partículas grossas). Já a decomposição química entende-se pelo processo em que há modificação química ou mineralógica das rochas de origem. O principal agente é a água e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, a hidratação, a carbonatação e os efeitos químicos da vegetação, sendo as argilas o último produto do processo de decomposição.

Os processos de intemperismos são determinantes na classificação geológica do solo. Solos residuais, por exemplo, são originados a partir do intemperismo químico, que ocorre através da desagregação e decomposição da rocha matriz. Estes têm sua composição mineralógica, plasticidade e comportamento mecânico semelhantes a rocha que lhe deu origem.

O solo como material de construção de rodovias é utilizado nas camadas de base, sub-base e subleito de acordo com suas características físicas, químicas e geológicas. Dessa forma, faz-se necessário o conhecimento de suas propriedades como origem, distribuição granulométrica, capacidade de drenagem, compressibilidade, resistência ao cisalhamento, capacidade de carga etc., para entender seu comportamento quando sujeito a solicitações em obras de pavimentação.

2.2 Classificação dos solos

A diversidade de comportamento dos inúmeros solos perante as solicitações, levou ao seu natural agrupamento em conjuntos distintos, aos quais podem ser atribuídas algumas propriedades. Nesse contexto, surgiu a necessidade de criar os sistemas de classificação dos

solos. Conforme Pinto (2006), o objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise de um problema.

Os solos podem ser classificados de várias formas, pela sua evolução, pela estrutura, pela quantidade de vazios presente etc. Pode-se citar os dois principais sistemas de classificação: o Sistema Rodoviário de Classificação ou “Highway Research Board” (HRB) que foi originalmente proposto nos Estados Unidos, e o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS), elaborado pelo Professor Arthur Casagrande.

2.2.1 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Esse sistema é muito utilizado pelos geotécnicos que trabalham em barragens de terra. Nele, todos os solos podem ser caracterizados por duas letras, a primeira indica o tipo principal do solo de acordo com a granulometria e a segunda diz respeito a plasticidade. Para realizar a classificação, o primeiro passo é fazer a análise granulométrica e verificar a porcentagem passante em cada peneira. Além disso, é necessário ter em mãos o valor do IP (índice de plasticidade) do solo, bem como os limites de Atterberg, pois para solos de granulação fina, a classificação se faz com auxílio da Carta de Plasticidade.

2.2.2 Sistema de Classificação HBR

A Highway Research Board (HBR), é um dos sistemas de classificação mais empregados no mundo para análise de solo com finalidades rodoviárias. Segundo Santos (2006), o sistema foi aprovado em 1945 e constituído através de um aperfeiçoamento do antigo sistema criado pelo órgão governamental americano Bureau of Public Roads, proposto em 1929.

Os solos podem ser classificados em oito grupos diferentes que variam de A1 a A8 de acordo com a granulometria, com o limite de liquidez e de plasticidade e com o cálculo do índice de grupo. Um parâmetro inserido nesta classificação é o índice de grupo (IG), número que varia de 0 a 20 definindo a capacidade de suporte do terreno de fundação. Em posse dos dados, pode-se realizar a classificação da esquerda para a direita por meio da tabela de classificação, definindo o grupo ao qual o solo pertence.

2.3 Pavimentos

“A definição e os objetivos de um pavimento se tornam necessários para o entendimento do papel que os solos têm dentro desse universo, devido a vasta utilização desse elemento de apoio a toda a estrutura rodoviária até sua utilização como material para compor camadas dessa estrutura”. (TEIXEIRA, 2014, p. 13).

Para Senço (2001), o pavimento é a estrutura construída sobre a terraplenagem que se destina, técnica e economicamente, a resistir e distribuir os esforços verticais do tráfego, a melhorar as condições de rolamento levando conforto e segurança aos usuários e a resistir aos esforços horizontais. Os pavimentos flexíveis são constituídos por várias camadas com espessuras diferentes, de modo que a capacidade de suporte é definida com base nas características físicas dos materiais que compõe cada camada.

Um típico pavimento flexível pode apresentar as seguintes camadas: subleito, regularização do subleito, reforço do subleito, sub-base, base e o revestimento. A escolha das camadas está ligada ao volume de tráfego, as condições ambientais e a qualidade do subleito, ou seja, quanto mais resistente o subleito menos espesso serão os pavimentos, consequentemente o uso de algumas camadas podem ser dispensadas.

As camadas de subleito, regularização de subleito e reforço, tem sua composição formada principalmente por solos, e, para um bom dimensionamento a seleção e caracterização das propriedades do solo são fundamentais, além disso, o material constituinte deve ter características tecnológicas superiores ao material da camada que antecede. Por fim, as camadas de reforço estrutural, sub-base, base e revestimento, são responsáveis por resistir aos esforços provenientes do tráfego e distribuí-los.

De acordo com o DNIT (2006), os materiais empregados em pavimentos flexíveis devem apresentar valores mínimos de CBR e máximos de expansão, como segue na Tabela 1 abaixo.

Tabela 1 - Características dos materiais aplicados no pavimento.

Camadas	CBR	Expansão
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$
Reforço do subleito	Maior que o do subleito	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$

Fonte: Adaptado DNIT (2006).

Quanto pior as características de material do subleito, maior deverá ser a espessura do pavimento, exigindo camadas que supram a falta de resistência. Por outro lado, quanto melhor as características do subleito, menor será a espessura do pavimento, sob as mesmas condições de carregamento. Entretanto, durante as obras de pavimentação, nem sempre é possível encontrar solos que se encaixam nas especificações determinadas pelo DNIT, e, tendo em vista a redução no tempo de execução e a vantagem econômica, emprega-se técnicas de estabilizações de solos.

2.4 Estabilização dos solos para pavimentação

Durante obras de pavimentação, aproveitar o solo local contribui para um melhor desenvolvimento e aproveitamento econômico. Porém, muitas vezes o material da região não atende as especificações necessárias para pavimentos rodoviários e torna-se necessário melhorar as propriedades do solo através da estabilização.

Conforme Marques (2006), estabilizar um solo significa conferir-lhe capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego normalmente aplicados sobre o pavimento, além de garantir a constância destas melhorias no tempo de vida útil das obras de engenharia.

Vargas (1977 apud ALMEIDA, 2016) considera estabilização de solos o processo que confere ao solo uma maior resistência estável às cargas ao desgaste ou à erosão, através da compactação, da correção granulométrica ou da adição de substâncias que lhe confirmam uma coesão proveniente da cimentação ou aglutinação dos seus grãos.

Segundo Mukesh e Patel (2012), há quatro benefícios com a estabilização do solo, tais como a economia ao optar por estabilizar o subleito evitando custos relacionados a escavação do solo e sua substituição por um solo adequado; a redução no atraso devido as condições meteorológicas; a eliminação de problemas associados ao custo de abastecimento de materiais em áreas de localização difíceis; e, por fim, a redução na seção do pavimento, ou seja, redução de material adicional pois o subleito existente é estabilizado para criar resistências suficientes.

Oliveira (1994) destaca que os principais objetivos visados pela estabilização são: alcançar melhores características mecânicas, ou seja, aumentando as resistências à compressão, à tração e ao cisalhamento; melhorar a coesão; reduzir a porosidade e as variações de volume devido à ação da água. Ele indica que há três procedimentos básicos para a estabilização do solo, a estabilização mecânica, a estabilização física e a estabilização química.

2.4.1 Estabilização química

“A estabilização química pode ser definida como a adição de uma ou mais substâncias químicas ao solo, a fim de gerar uma mudança no seu comportamento quanto ao ganho de resistência e estabilidade quanto às intempéries, tais mudanças podem influenciar também na permeabilidade e deformabilidade atingindo o objetivo previsto”. (PEREIRA, 2012, p. 30).

Para, Silva (2007), a estabilização química de um solo é dada pelas alterações produzidas na sua massa pela introdução de uma pequena quantidade de aditivo que lhe confere propriedades através de quatro mecanismos: a substituição das moléculas de água e cátions adsorvidos por cátions hidrorrepelentes; estabelecimento de ligações reforçadas entre agregados de partículas pela adição de ligantes; floculação e dispersão. Conforme Marques (2006), nos solos argilosos há estruturas floculadas e dispersas que são sensíveis a presença de água, estas influenciam diretamente a resistência ao cisalhamento, desse modo, é comum a adição de agentes químicos, que provoquem dispersão, floculação ou substituição prévia das partículas de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidro-repelentes.

Existem dois tipos de estabilizações químicas mais conhecidas que são o solo-cimento e o solo-cal, porém o primeiro é mais utilizado já que quase todos os tipos de solos podem ser estabilizados com o aumento da resistência. A mistura solo-cimento é derivada de um produto endurecido resultante da cura de uma mistura compactada de solo, cimento e água em proporções estabelecidas através de métodos de dosagem, conforma a definição estabelecida pela norma ABNT NBR 12253/2012. Para Bechara *et al.* (2010), o procedimento de melhora das qualidades da mistura ocorre pelo processo de cimentação com o aumento do tempo de cura, conferindo ganho de coesão, tendo como resultado materiais com características superiores quando comparados aos materiais originais; como, por exemplo, capacidade de suporte a esforços de compressão e tração, redução de compressibilidade e permeabilidade.

“Pode-se definir solo-cal como o produto resultante da mistura íntima compactada de solo (geralmente argila) cal e água, em proporções estabelecidas através de dosagem”. (USBR, 1998 apud LOPES, 2011, p. 28). De acordo com Azevêdo (2010), denomina-se solo melhorado com cal, quando se busca melhorar algumas propriedades consideradas prejudiciais no ramo da pavimentação, trata-se da expansibilidade, umidade excessiva e plasticidade elevada, porém, quando a necessidade é estrutural denomina-se solo estabilizado com cal. Como no Brasil não existe norma que informe a metodologia utilizada para a dosagem e o dimensionamento de misturas solo-cal, são utilizadas dosagens experimentais com base em ensaios.

Sherwood (1993 apud CRUZ E JALALI, 2010), cita que sob o ponto de vista ambiental, econômico e de segurança, a estabilização química pode trazer benefícios como: a minimização da perda de material ocasionada pela erosão ou pelo tráfego nas estradas de terra; a redução dos custos de compra, transporte e distribuição de agregados; a minimização da agressão ambiental causada pela instalação de pedreiras a britagem; a redução do uso de combustível associado às frequentes manutenções rodoviárias; e, o resguardo das jazidas de bons materiais para usos mais nobres.

2.4.2 *Estabilizantes alternativos*

O cimento e cal são os materiais químicos mais utilizados desde o início do emprego da estabilização como solução na construção de pavimentos rodoviários. No entanto, o grande consumo desses materiais além de ser economicamente elevado, são responsáveis por impactos ambientais durante o processo de produção (alta emissão de gases poluentes) e extração, causando desmatamentos, erosão e deposição incorreta de sedimentos. Neste âmbito, o uso de estabilizantes alternativos podem ser uma opção viável para minimizar os problemas associados ao uso de estabilizantes convencionais.

Oliveira (1994), distingue os estabilizantes não convencionais em quatro grupos, os produtos naturais, os produtos industriais, os estabilizantes comerciais e os rejeitos industriais e minerários. Este último, tem sido alvo de muitas pesquisas na atualidade devido à preocupação com o meio ambiente e sua possível viabilidade econômica. O autor ainda cita alguns rejeitos estudados, como as cinzas volantes, a cal de carbureto, o fosfogesso (gipsita), a lama vermelha, a salmora e as escórias de alto forno.

Teixeira (2014) estudou o emprego do cimento e da bioenzima composta basicamente por extrato fermentado de melaço de cana na estabilização de um solo específico. Os resultados dos ensaios de CBR e módulo de resiliência apresentaram valores satisfatórios com ganhos variando de 9% e 25% com imersão dos corpos de prova e 81% quando ensaiados sem imersão.

Almeida (2016) avaliou a incorporação do resíduo de escória de cobre pós-jateada para aplicação em camadas de base de pavimentos. A escória de cobre foi adicionada ao solo nos teores de 10, 20, 30 e 40% e foram analisados por ensaios de resistência à compressão simples, módulo de resiliência, perda de massa, tração indireta etc. A mistura de solo estabilizados com 30% de escória foi a de maior resistência à compressão alcançada, sendo essa a melhor porcentagem de estabilização.

Carraro (1997) avaliou a utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo observando a contribuição no comportamento mecânico. Foi adicionado cinza volante e cal residual de carbureto, originadas como subprodutos em indústrias, nos teores de 16% e 4% respectivamente. As amostras de solo foram submetidas aos ensaios de resistência à compressão simples, diametral e triaxial e os resultados indicaram um desempenho bastante superior em termos de resistência ao cisalhamento e deformabilidade, podendo ser comparados aos solos estabilizados com cimento e a cal hidratada.

2.4.3 Estabilização com resíduos de mármore e granito

Moura *et al* (2002), afirmam que a produção de rochas ornamentais, na maioria das empresas brasileiras, é feita a partir da serragem de grandes blocos de pedra que se transformam em chapas e, que durante a serragem cerca de 25% a 30% dos blocos são transformados em pó. É sabido que muitas vezes não se tem uma destinação correta para esse resíduo sólido e muitas vezes ele acaba sendo depositado em rios, lixões ou nos pátios das empresas gerando impactos ambientais.

“No Brasil, a quantidade estimada da geração conjunta do resíduo de corte de mármore e granito é de 240000 toneladas/ano, distribuídas entre Espírito Santo, Bahia, Ceará, Paraíba, entre outros estados”. (MOURA *et al.*, 2002, p. 50). O aproveitamento desse resíduo vem sendo estudado e empregado em diversas pesquisas na construção civil, como na produção de argamassa, de massas argilosas, de concreto autoadensável, de material cerâmico, entre outros (MENDONÇA, *et al.*, 2017; SILVA, *et al.*, 2005; KUMAYAMA, 2015; ALMEIDA, 2014). Além disso, o pó de mármore e granito vêm se destacando como aditivo alternativo em estabilizações químicas dos solos.

Yilmaz e Yurdakul (2017) fizeram o uso do pó de mármore para melhorar um solo siltoso de alta plasticidade, juntamente com 10% de bentonita, em porcentagens que variaram de 5 a 40 %. Nos ensaios de compressão não confinada foi visto que a adição do pó de mármore aumentava gradativamente os valores da resistência do solo conforme o aumento do teor, chegando ao valor máximo de resistência à compressão de 212 kPa.

Tenório (2019), estudou o controle da expansão dos solos utilizando resíduos de mármore e cal, avaliando a influência da porosidade sobre a expansão e a resistência mecânica do solo estabilizado com esse resíduo. O resíduo de mármore foi adicionado nos teores de 30%, 40% e 50% e a cal 2%, 4%, 6% e 8%, as amostras foram submetidas aos ensaios de compressão simples, expansão em uma dimensão e compressão triaxial consolidado não drenado. Os

resultados mostraram que o resíduo de mármore é capaz de conter a expansão do solo e promoveu um ganho de 13 kPa na coesão efetiva do solo.

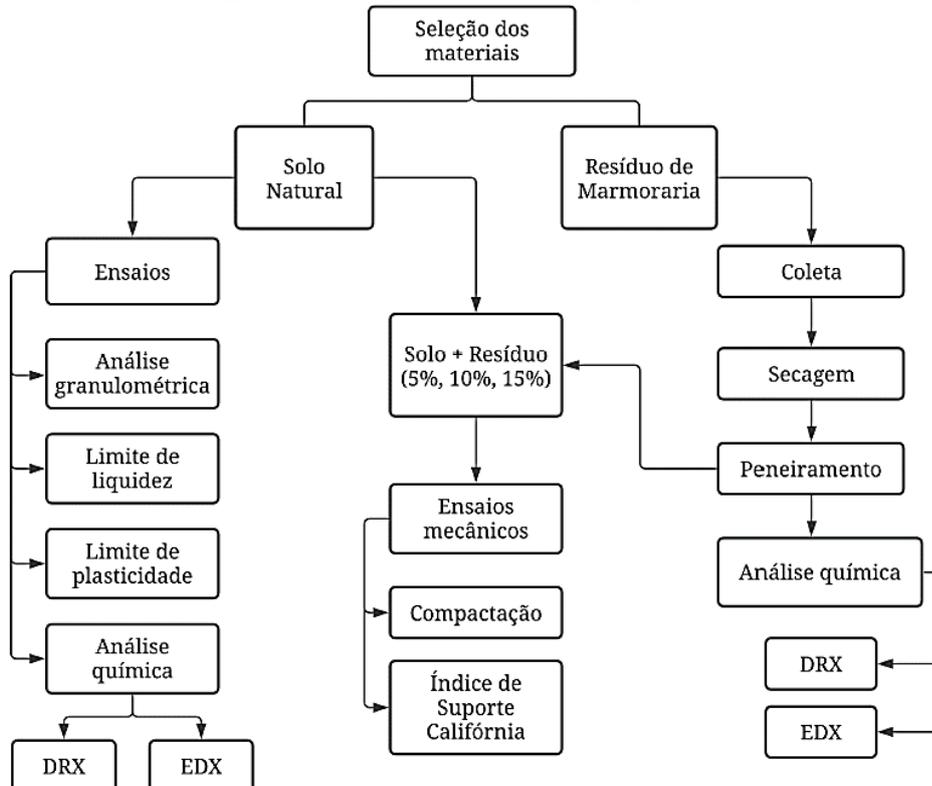
2.5 Considerações

A revisão bibliográfica apresentada possibilitou a ampliação do conhecimento acerca da importância das características do solo em obras de pavimentação, bem como um dos métodos mais utilizados nos processos de melhoramento da capacidade de suporte dos solos, a estabilização química e seus principais aditivos. Diante a busca por materiais e métodos que sejam sustentáveis, foi apresentado também sobre as atuais pesquisas envolvendo o uso de resíduos de mármore e granito, visto que há uma grande disponibilidade do material e a sua composição química.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

A seguir, apresenta-se a descrição dos materiais e da metodologia utilizada na pesquisa, além das normas empregadas nos ensaios. Na Figura 1 são mostradas as etapas desenvolvidas ao longo deste trabalho.

Figura 1 - Fluxograma da metodologia geral do trabalho.



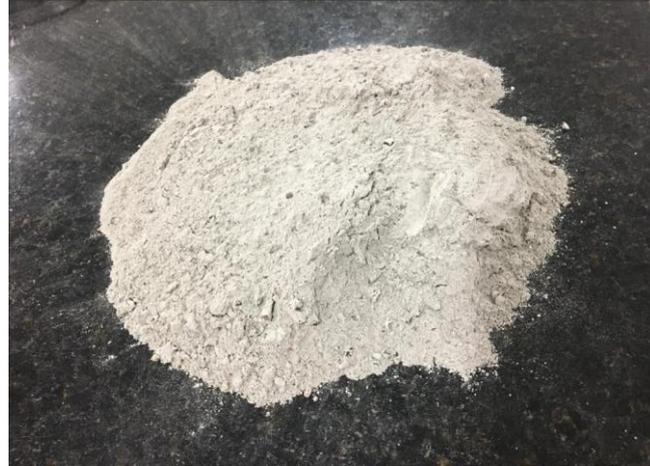
Fonte: Própria, 2020.

Para o desenvolvimento desta pesquisa utilizou-se a água destilada, o resíduo de marmoraria e o solo residual. O resíduo utilizado foi coletado na JB Marmoraria, localizada na cidade de Araruna-PB, sendo proveniente do beneficiamento de materiais naturais como mármore e granitos, transformando em peças que são utilizadas em bancadas, revestimentos etc. O pó gerado após os procedimentos é armazenado em sacos plásticos e direcionado para o lixão que fica próximo à cidade.

O resíduo foi coletado em sacos plásticos, ainda úmido, e levado ao laboratório de geotecnia, da Universidade Estadual da Paraíba (UEPB). A preparação iniciou-se pela secagem em estufa à 105° C durante vinte e quatro horas, em seguida, foi feito o peneiramento na peneira com diâmetro de 0,075 mm, n° 200, afim de obter as mesmas características dos estabilizantes

convencionais. Então, o material passante permaneceu armazenado até a realização dos experimentos. A Figura 2, apresenta o pó de marmoraria peneirado e pronto para o uso.

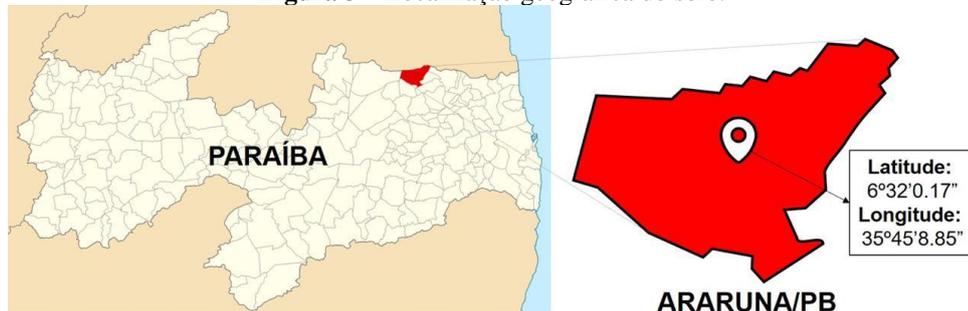
Figura 2 - Resíduo passante na peneira de nº 200.



Fonte: Própria, 2020.

O solo estudado é oriundo da região rural do município de Araruna-PB, conhecido como Sítio Lagoa dos Homens, encontra-se localizado a 2,5 km da Igreja Matriz, a localização geográfica encontra-se na Figura 3. Para escolha do material, levou-se em consideração a identificação visual e tátil, buscando solos com pequenas quantidades de grossos e torrões que, quando secos, se dividissem em frações distintas e, quando umedecidos, se desmanchassem.

Figura 3 – Localização geográfica do solo.



Fonte: Própria, 2020.

A Figura 4 mostra o aspecto visual do solo. Dessa forma, nos bordos da estrada que passam pelo Sítio, a camada superficial foi retirada, e, com auxílio de uma picareta, coletou-se aproximadamente 60 kg de amostras deformadas. Após a coleta, as amostras foram levadas as dependências do laboratório de geotecnia e armazenados para consecutiva caracterização.

Figura 4 - Aspecto visual do solo coletado.



Fonte: Própria, 2020.

3.1 Preparação das amostras

As amostras de solo utilizadas nos ensaios de análise granulométrica, determinação dos limites de liquidez e plasticidade, e no ensaio de compactação foram preparadas de acordo com a NBR 6457/1986.

3.2 Dosagem

O teor de resíduo adicionado foi escolhido após a classificação do solo (HBR) com base na ABNT NBR 12253:1992, que sugere teores em massa (%) de cimento de acordo com o tipo de solo. Assim, para que fosse possível analisar e comparar diferentes resultados, foi escolhido os teores de 5%, 10% e 15% para os ensaios de limite de liquidez, limite de plasticidade, compactação e Índice Suporte Califórnia.

3.3 Ensaios de caracterização física do solo

Os ensaios necessários para caracterização do solo se deram através do ensaio de granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade. Todos foram realizados de acordo com as normas apresentadas na Tabela 2.

Os ensaios do limite de liquidez e de plasticidade foram realizados tanto para o solo natural, quanto para as misturas com diferentes teores de resíduo, a fim de avaliar a influência no índice de plasticidade.

Tabela 2 - Ensaio de caracterização física.

Ensaio	Norma
Análise granulométrica	ABNT NBR 7181/1984
Limite de liquidez	ABNT NBR 6459/1984
Limite de plasticidade	ABNT NBR 7180/1984
Compactação	ABNT NBR 7182/1986
Índice de Suporte Califórnia	DNIT 172/2016 - ME

Fonte: Própria, 2020.

3.3.1 *Análise granulométrica do solo*

A análise granulométrica busca o reconhecimento da distribuição granulométrica (tamanho dos grãos) e de sua proporção na composição do solo. O ensaio divide-se entre o peneiramento e a sedimentação, o primeiro limita-se a partículas de solo até 0,075 mm, enquanto o segundo define o diâmetro das partículas menores por meio da velocidade de queda. Os resultados são representados através da curva granulométrica formada pelo eixo das abscissas em escala logarítmica fornecendo o diâmetro dos grãos e o eixo das coordenadas com a porcentagem em massa de solo passante.

A análise granulométrica foi realizada por peneiramento e sedimentação, seguindo o que se prescreve na ABNT NBR 7181:1984. Inicialmente a amostra foi seca ao ar chegando próxima a umidade higroscópica. Os torrões foram desmanchados e, com auxílio do quarteamo, foi separado aproximadamente 1 kg de amostra. Para o peneiramento grosso utilizou-se as peneiras com diâmetros de 50, 38, 25, 19, 9,5 e 4,8 mm, e para o peneiramento fino as peneiras com 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 1,15, e 0,075 mm de diâmetro. Após a agitação, o material retido em cada peneira foi pesado, para que os cálculos pudessem serem feitos.

Na sedimentação, o material passante na peneira de 2,0 mm, tomou-se 120 gramas e transferiu para um béquer que continha uma solução com hexametáfosfato de sódio (defloculante). Após 12 horas, a mistura foi transferida para o copo de dispersão e submetida ao aparelho dispersor por 15 minutos, em seguida o material foi despejado numa proveta e colocada no tanque para as leituras serem feitas, com auxílio de um densímetro, assim que iniciasse a sedimentação. Então, com os valores obtidos no peneiramento e na sedimentação, o resultado foi apresentado graficamente pela curva granulométrica.

3.3.2 Limite de liquidez

O limite de liquidez é o teor de umidade que define a mudança de consistência do solo, ou seja, é quando o solo passa do estado plástico para o estado líquido. O limite de liquidez é determinado através do aparelho normalizado de Casagrande com seus métodos descritos na ABNT NBR 6459:1984.

Para realização dos ensaios, obteve-se uma amostra de solo correspondente a 200 g de material com diâmetro inferior a 0,42 mm, conforme a ABNT NBR 6457:1984. Com todos os equipamentos em mãos, a água destilada foi adicionada aos poucos até obter uma mistura homogênea. Em seguida, a amostra foi transferida para concha do aparelho de Casagrande e com auxílio do cinzel, abriu-se uma ranhura em sua parte central. Posteriormente, golpeou-se a concha contra base através da manivela, contando o número de golpes, até que as duas bordas inferiores se unissem numa extensão de 1 cm. Feito isso, com auxílio da espátula, retirou-se a porção que se uniu, transferindo-a para cápsula com a finalidade de determinar a umidade. As operações foram repetidas por mais quatro vezes, visando obter cinco pontos para construção do gráfico. Por fim, com auxílio da equação da reta, obteve-se o teor de umidade correspondente a 25 golpes e o limite de liquidez pôde ser encontrado.

3.3.3 Limite de plasticidade

O limite de plasticidade é o teor de umidade no qual o solo passa do estado semissólido para o estado plástico, sendo empregado apenas na determinação do índice de plasticidade. O limite de plasticidade é determinado quando se atinge o diâmetro de 3 mm e o cilindro se fragmenta, com seus procedimentos de ensaio preconizados na ABNT NBR 7180:1984.

O ensaio foi realizado com adição da água destilada em pequenos incrementos a amostra previamente preparada, conforme a ABNT NBR 6457:1984, obtendo uma pasta homogênea com consistência plástica. Em seguida, tomou-se aproximadamente 10 gramas da amostra, e, com as mãos, foi rolando-a sobre a placa de vidro até formar um cilindro. Todos os cilindros que se romperam ao atingir o diâmetro de 3 mm foram transferidos para cápsulas com posterior determinação de umidade. Após obtenção das umidades os valores que não diferiram mais de 5% entre si foram considerados satisfatórios, dessa forma o valor do limite de plasticidade pôde ser determinado com o cálculo da média aritmética.

3.4 *Ensaios de caracterização químico-mineralógica*

Os ensaios de caracterização química e mineralógica foram feitos para o solo natural e para o resíduo de marmoraria, por meio da difração de raios X e da fluorescência de raio X. A realização destes ensaios buscou identificar os principais minerais/argilominerais e os óxidos que constituem as amostras.

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Tecnologia de Nanosistemas Carreadores de Substâncias Ativas, no Departamento de Farmácia, localizado na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), Maceió/AL, com material passante na peneira de número 200 (0,075 mm).

3.4.1 *Difração por raios-X (DRX)*

Conforme Motta (2016), dentre as várias técnicas de caracterização dos materiais, a difração de raios-X é a mais indicada para extrair dados de materiais cristalinos. “O princípio da técnica da difração de raios X é a representação do fenômeno de interação entre o feixe de raios X incidente e os elétrons dos átomos componentes de um material, relacionados ao espalhamento coerente”. (SILVA, 2014, p. 72).

Os difratogramas de raios X foram adquiridos utilizando um difratômetro da marca Shimadzu, modelo XRD 7000 (Figura 5) com radiação K_{α} de cobre, voltagem de 30 kV e corrente de 30 mA. As varreduras foram realizadas no intervalo de 2θ entre 3° e 70° com um passo de $0,02^{\circ}$ e velocidade de $2^{\circ} s^{-1}$. Fez-se a caracterização das amostras através da comparação entre seu respectivo difratograma com padrões referência disponíveis nos bancos de dados de DRX, pelo International Centre for Diffraction Data – ICDD (antigo JCPDS), através das fichas cristalográficas que fornecem distâncias interplanares e as intensidades difratadas.

Figura 5 – Difratômetro XDR 7000.



Fonte: Shimadzu XDR - 7000.

3.4.2 Espectroscopia de raios X (EDX)

A espectroscopia de fluorescência de raios X por dissipação em energia (EDX), é uma técnica de microanálise utilizada para fornecer dados qualitativos e quantitativos referentes a composição química de uma amostra. Realizou-se os ensaios através do espectrômetro modelo 7000 (Figura 6), marca Shimadzu, em termos de óxidos elementares. Como a técnica não requer preparação mínima, as amostras foram introduzidas no equipamento, submetidas aos raios X e, após alguns minutos, adquiriu-se os dados.

Figura 6 – Espectrômetro por energia dispersiva EDX-7000/8000.



Fonte: Shimadzu - EDX 7000/8000.

3.5 Ensaios de resistência mecânica

Visando identificar a capacidade do aditivo em ser um estabilizador químico foram realizados os ensaios de compactação e CBR para avaliar as propriedades mecânicas comparando os valores referência do solo natural com os valores obtidos na mistura solo-resíduo. Os procedimentos seguem as normas citadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Ensaios de resistência mecânica.

Ensaio	Norma
Compactação	ABNT NBR 7182/1986
Índice de Suporte Califórnia	DNIT 172/2016 - ME

Fonte: Própria, 2020.

3.5.1 Ensaio de compactação

A compactação de um solo tem o objetivo de aumentar o contato entre os grãos, diminuindo o espaço de vazios do solo, melhorando a rigidez e a resistência mecânica. Para

isso, é necessário o conhecimento da umidade ótima, pois de acordo com a energia aplicada há um teor de umidade que leva a uma densidade seca máxima. Através do ensaio de compactação, padronizado pela ABNT NBR 7182:1986, chega-se à umidade ótima do solo.

Nos procedimentos experimentais, foi utilizado a energia de compactação Proctor Normal e molde cilíndrico grande. As amostras foram preparadas com secagem prévia até a umidade higroscópica. Os torrões foram desmanchados e homogeneizados e, em seguida, foi feito o peneiramento na peneira com 4,8 mm de diâmetro afim de verificar se a amostra passava integralmente. Após o peneiramento tomou-se cerca de 7 kg, justificado pelo reuso do material durante o ensaio.

A amostra de solo foi colocada numa bandeja metálica e, com auxílio da proveta de vidro, adicionou-se 5% de água destilada, misturando até obter uma completa homogeneização. Em seguida, iniciou-se a compactação respeitando as cinco camadas, sendo aplicado doze golpes, em cada, distribuídos de forma uniforme. Após a compactação da última camada, foi retirado o cilindro complementar e rasado o corpo de prova com a régua biselada para sua posterior pesagem. Removeu-se o corpo de prova do molde para ser destorroado até ser atingido o diâmetro de 4,8 mm, depois, juntou-se ao material remanescente na bandeja, adicionando mais 2% de água destilada para obtenção do segundo ponto na curva de compactação. Os procedimentos descritos anteriormente foram repetidos até ser alcançado os cinco pontos. Em cada corpo de prova compactado foi coletado do centro uma pequena amostra para determinação da umidade.

O ensaio de compactação foi realizado para o solo puro e para o solo modificado com adições de 5%, 10% e 15%. As porcentagens foram acrescentadas e homogeneizadas após o solo ser passado na peneira com diâmetro igual a 4,8 mm, sendo calculadas com base no peso total utilizado no ensaio.

Posteriormente, com a obtenção das umidades, determinou-se a massa específica aparente seca para a construção da curva de compactação, com o eixo das abcissas marcando os teores de umidade e o eixo das coordenadas marcando as massas específicas aparentes secas correspondentes, chegando-se à umidade ótima e ao peso específico seco máximo.

3.5.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)

Por definição, ISC expressa a relação entre a resistência à penetração de um cilindro padronizado numa amostra de solo compactado e a resistência do mesmo cilindro em uma pedra britada padronizada. Essa relação é medida em porcentagem. Além disso, o ensaio permite obter

um índice de expansão do solo durante o período de saturação do corpo de prova. Os procedimentos realizados para determinação do ISC utilizando amostras deformadas e não trabalhadas são fixados pela norma do DNIT 172:2016 – ME.

Tendo em vista a limitação de apenas um molde, no laboratório de geotecnia da UEPB, para realização do ensaio, com os resultados obtidos mediante o ensaio de compactação, a amostra foi preparada na umidade ótima seguindo os mesmos procedimentos feitos na compactação, porém, após a pesagem do conjunto solo e molde, retirou-se o disco espaçador, o molde foi invertido e fixado no prato-base. Em seguida, colocou-se sobre o solo uma haste de suspensão com peso anelar igual a 4,536 kg e um extensômetro fixado na borda do cilindro para medir as expansões a cada 24 horas.

O corpo de prova permaneceu imerso em água durante 96 horas no interior de um balde, como mostrado na Figura 7, e após o período de embebição o conjunto permaneceu durante 15 minutos escoando a água e foi encaminhado para prensa de penetração. Neste momento, aplicou-se uma carga de 45N pelo acionamento da manivela a uma velocidade de 1,27 mm/min até o tempo máximo de 10 minutos. Nos intervalos de tempo determinados pela norma obteve-se as leituras pelo extensômetro do anel dinamométrico para posterior cálculo do Índice de Suporte Califórnia.

Após os cálculos, foram traçados os gráficos que relacionam carga e penetração, com intuito de verificar se havia necessidade de correção da curva. Por fim, de acordo com as fórmulas indicadas na norma do DNIT 172:2016, a expansão foi calculada dividindo-se a variação na leitura do extensômetro pela altura inicial do corpo de prova e o ISC foi determinado pela pressão calculada dividida pela pressão padrão nas penetrações de 2,50 mm e 5,00 mm, tomando como ISC do solo o maior valor obtido.

Figura 7 – Corpo de prova no período de embebição.



Fonte: Própria, 2020.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

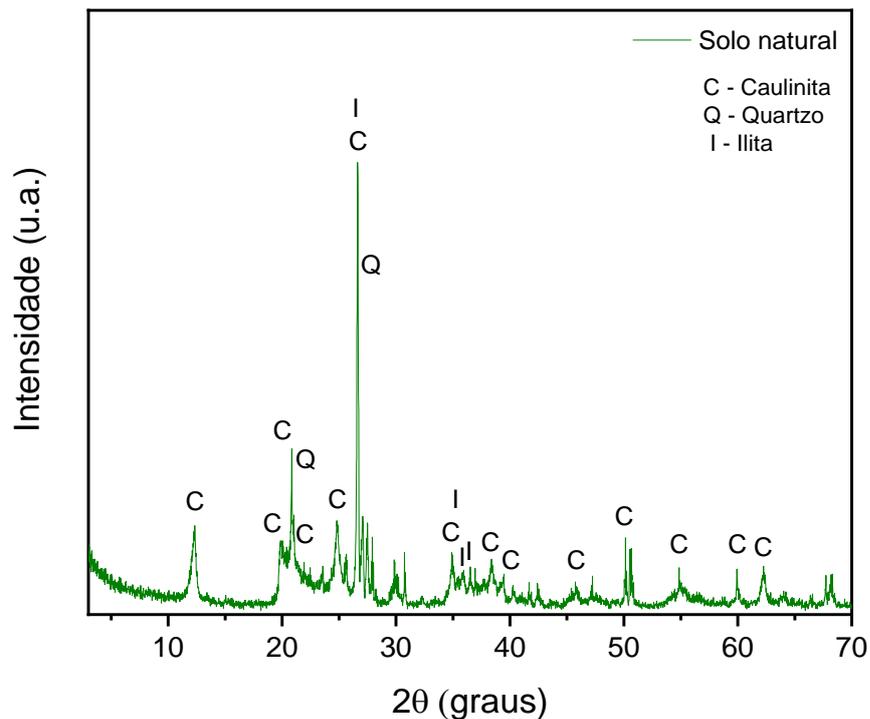
4.1 Análise química e mineralógica

4.1.1 DRX

Por meio do ensaio de difração de raios X, foi possível identificar as principais fases mineralógicas constituintes do solo natural e do resíduo de marmoraria através das fichas cristalográficas 14-0164 (Caulinita), 46-1045 (Quartzo), 26-0911 (Ilita), 25-0649 (Muscovita) e 00-041-1480 (Albita).

A sobreposição de picos observadas nas Figuras 8 e 9 é devido ao ângulo ser atribuído a mais de uma fase mineralógica. Na Figura 8, é visto o difratograma correspondente ao solo natural, indicando a presença de dois argilominerais (caulinita e ilita) e um mineral, quartzo. A caulinita é um argilomineral não expansivo e possui baixa plasticidade, por outro lado, a ilita é parcialmente expansiva, desse modo, como os argilominerais são determinantes quando se trata da plasticidade e da coesão, o solo não se apresentará expansivo visto que o difratograma aponta a predominância da caulinita.

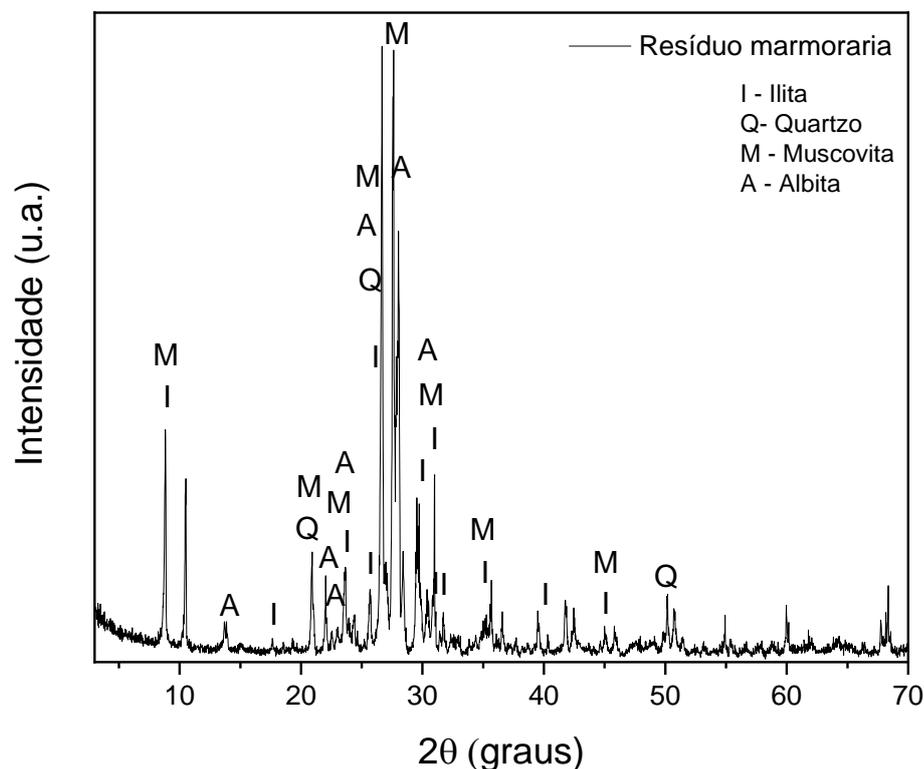
Figura 8 – Difratograma de raios X do solo natural.



Fonte: Própria, 2020.

Observa-se, na Figura 9, a heterogeneidade de fases presente no resíduo de marmoraria, onde foram identificados três minerais e um argilomineral. O granito é uma rocha magmática, formado essencialmente por quartzo, mica, feldspato e carbonato de cálcio. O quartzo, representa cerca de 60% da composição mineralógica do granito, com estrutura cristalina formada por dióxido de silício. A mica é um aluminossilicato, seu grupo inclui diversos minerais, como a muscovita, que faz parte dos minerais acessórios do granito e é o tipo de mica mais comum no Brasil. Por fim, o difratograma indica a presença da albita, um mineral essencial ao granito, pertencente aos feldspatos alcalinos. Desse modo, pode-se assegurar que o resíduo de marmoraria possui pó de mármore.

Figura 9 – Difratoograma de raios X do resíduo de marmoraria.



Fonte: Própria, 2020.

Por outro lado, o mármore é uma rocha metamórfica, e o aparecimento da ilita no difratograma não pode ser justificado, já que as ilitas aparecem muito com as micas em algumas rochas argilosas sedimentares. Entretanto, o mármore é originado do calcário e sua mineralogia é constituída principalmente da calcita e da dolomita, podendo ocorrer o quartzo, ou seja, não é possível afirmar a não existência do pó de mármore no resíduo.

4.1.2 EDX

Os resultados obtidos através da fluorescência de raios X para o solo natural e para o resíduo de marmoraria indicam a concentração de diversos óxidos presentes nas amostras. Na Tabela 4 é apresentada a espectroscopia para o solo natural, e, identifica-se que o dióxido de silício corresponde a mais de 50% dos óxidos encontrados no solo, confirmando a grande quantidade de quartzo presente. O óxido de alumínio e o óxido férrico também representam frações significativas da composição, o que corrobora com os dados encontrados no DRX, visto que a caulinita possui alumínio e a ilita alumínio e ferro.

Tabela 4 - Espectroscopia de raios X do solo natural.

Óxidos	Fração (%)
SiO₂ (dióxido de silício)	52,42
Al₂O₃ (óxido de alumínio)	32,843
Fe₂O₃ (óxido férrico)	6,926
BaO (óxido de bário)	2,596
K₂O (óxido de potássio)	2,474
TiO₂ (óxido de titânio)	1,270
P₂O₅ (pentóxido de fósforo)	0,251
ZrO₂ (dióxido de zircônio)	0,18
SrO (óxido de estrôncio)	0,139
Outros óxidos	0,901
TOTAL	100

Fonte: Própria, 2020.

A Tabela 5 faz referência a espectroscopia do resíduo de marmoraria, indicando aproximadamente 62% de dióxido de silício, 14,3% de óxido de alumínio e 8,2% de óxido de cálcio como os principais óxidos presentes na amostra. A grande quantidade SiO₂ é em consequência dos minerais silicatos, o quartzo, a mica e o feldspato, indicando que o resíduo possui mais quantidade de pó granítico do que pó de mármore. A presença de 8,201% de óxido de cálcio, pode ser justificado tanto pela pequena quantidade de pó de mármore, quando pela presença do cálcio na composição química da albita. Como a muscovita e a ilita, indicadas no DRX do resíduo, possuem potássio em sua fórmula química, a fração de 4,82% de óxido de potássio deve-se a presença desse mineral e argilomineral.

Tabela 5 - Espectroscopia de raios X do resíduo de marmoraria.

Óxidos	Fração (%)
SiO₂ (dióxido de sílicio)	61,953
Al₂O₃ (óxido de alumínio)	14,375
CaO (óxido de cálcio)	8,201
Fe₂O₃ (óxido férrico)	6,785
K₂O (óxido de potássio)	4,820
BaO (óxido de bário)	2,023
TiO₂ (óxido de titânio)	0,995
P₂O₅ (pentóxido de fósforo)	0,400
Outros óxidos	0,448
TOTAL	100

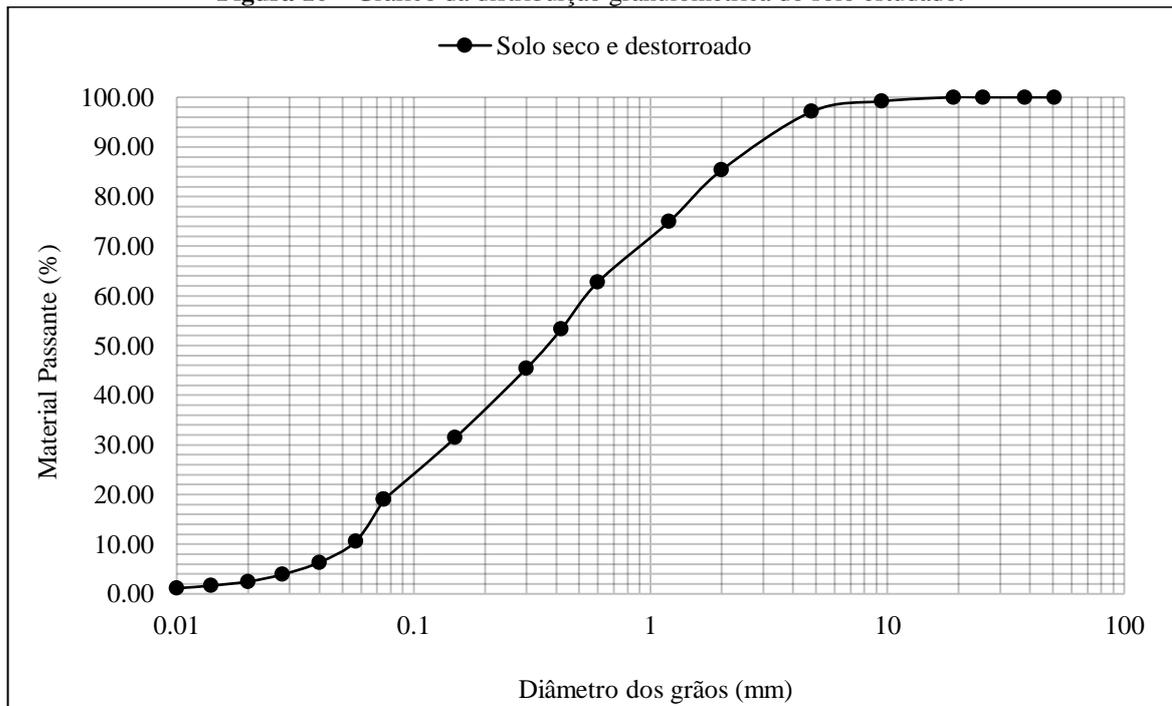
Fonte: Própria, 2020.

Desse modo, através do ensaio mineralógico e químico pode-se afirmar que o solo residual não é expansivo, devido aos argilominerais presentes, e que o resíduo de marmoraria é constituído basicamente pelo pó de granito, conferindo ao solo um maior ganho de resistência, uma vez que é mais resistente que o mármore.

4.2 Propriedades físicas do solo e misturas estudadas

4.2.1 Análise granulométrica do solo

A composição granulométrica do solo utilizado pode ser observada através da curva granulométrica mostrada na Figura 10, obtida no ensaio por peneiramento e sedimentação. Avaliando a figura, observa-se que o solo é composto por 2,87% de pedregulho, 11,77% de areia grossa, 32,06% de areia média, 34,27% de areia fina e 19,03% de argila e silte.

Figura 10 – Gráfico da distribuição granulométrica do solo estudado.

Fonte: Própria, 2020.

Além disso, na Tabela 6 observa-se através dos cálculos do Coeficiente de Não Uniformidade (CNU) e do Coeficiente de Curvatura (CC), que a areia é bem graduada (há grãos de diversos diâmetros) e que há descontinuidades em relação a eles, pois quando o CC é menor que 1, indica a falta de grãos com um certo diâmetro. Segundo Pinto (2006), areias com CC menores que um é muito raro, e o formato dos grãos de areia tem grande influência no seu comportamento mecânico, pois determina o encaixe, o entrosamento e como deslizam entre si quando solicitados por forças externas.

Tabela 6 - Coeficiente de uniformidade e de curvatura do solo.

% < 0,075 mm	D_{10} mm	D_{30} mm	D_{60} mm	CNU	CC
19,03 %	0,06	0,15	0,52	8,66	0,72

Fonte: Própria, 2020.

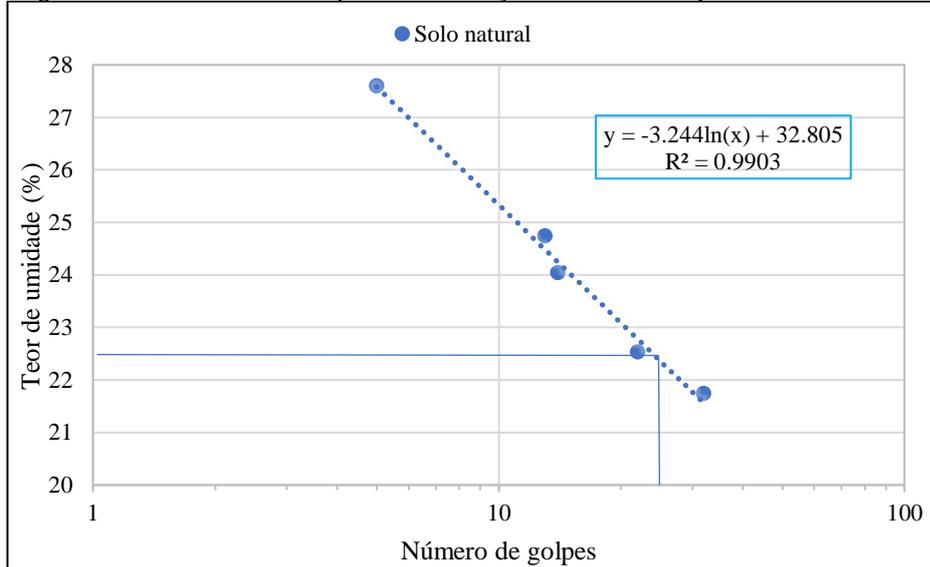
4.2.2 Limites de Atterberg

Como a distribuição granulométrica não é suficiente para a caracterização do comportamento do solo, foram realizados ensaios de limite de liquidez e limite de plasticidade que se baseiam no comportamento do solo na presença de água. Conjuntamente com a

caracterização física do solo estudado, buscou-se analisar a influência do resíduo de marmoraria no índice de plasticidade do solo.

Para o solo natural, o limite de liquidez pôde ser obtido através do rebatimento na reta onde o teor de umidade correspondesse a 25 golpes. O gráfico para determinação do LL é representado pela Figura 11, indicando um valor de 22,5%.

Figura 11 – Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo natural.

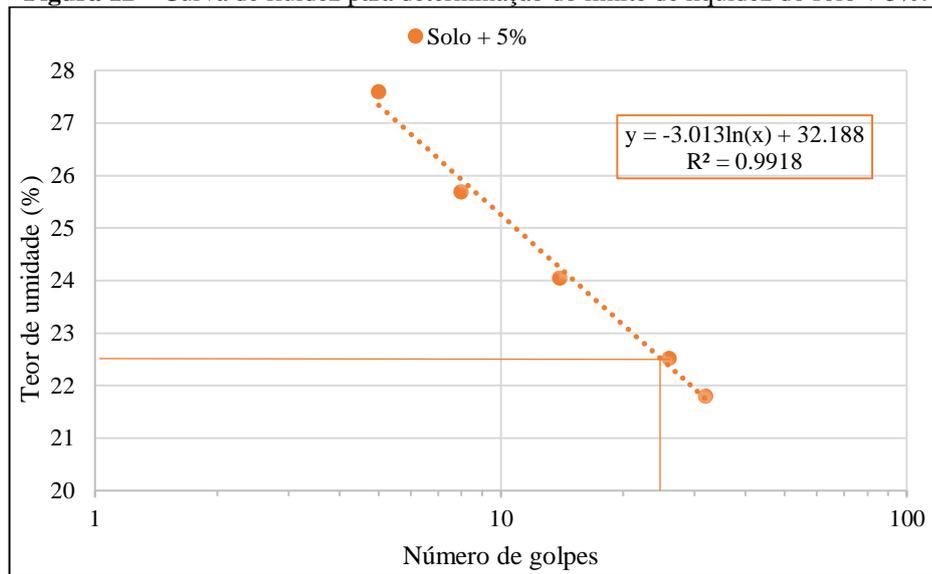


Fonte: Própria, 2020.

O limite de plasticidade foi determinado para obtenção do IP, apresentando limite de plasticidade de 19%. Logo, como o índice de plasticidade é a diferença entre o LL e o LP, o solo natural possui IP igual a 3,5%, sendo classificado como fracamente plástico.

O solo misturado com resíduo de marmoraria nos teores de 5%, 10% e 15% também foi ensaiado e os gráficos para determinação do limite de liquidez são representados pelas Figuras 12, 13 e 14, respectivamente. O limite de liquidez e o limite de plasticidade para o solo com 5% de resíduo foi de igual valor ao solo puro, com LL de 22,5% e LP de 19%.

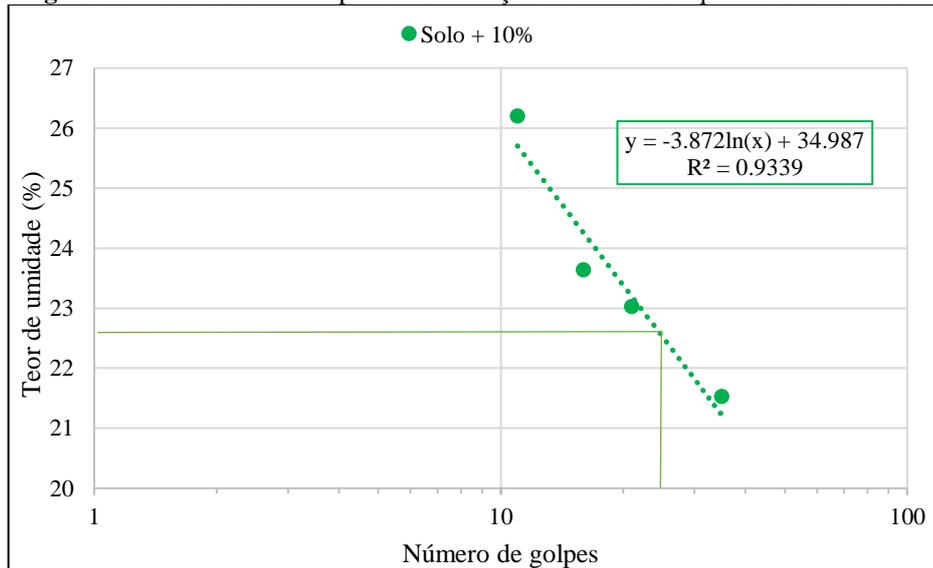
Figura 12 – Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo + 5%.



Fonte: Própria, 2020.

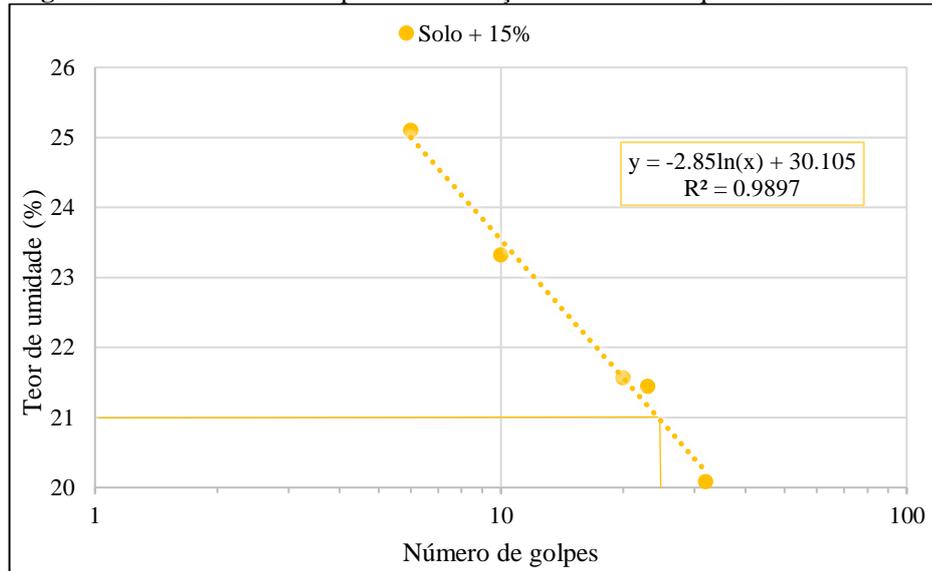
Conforme a Figura 13, o limite de liquidez para o solo com 10% de resíduo foi de igual valor ao solo puro, com LL de 22,5%, já o limite de plasticidade obteve-se valor de 18%.

Figura 13 - Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo + 10%.



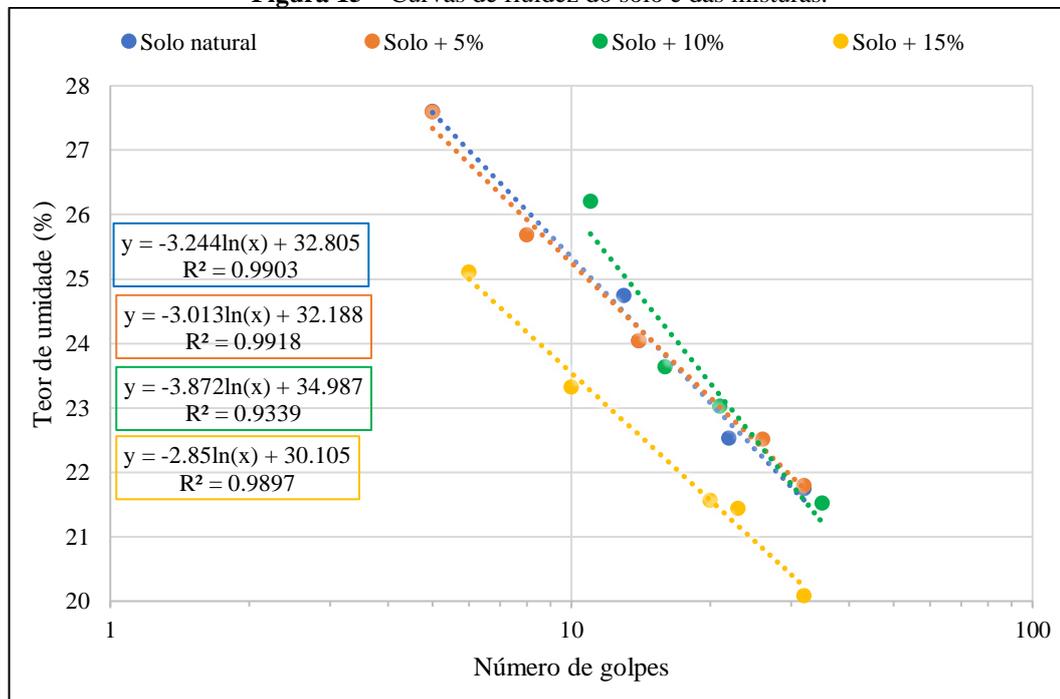
Fonte: Própria, 2020.

De acordo com a curva de fluidez, apresentada na Figura 14, o limite de liquidez para o solo com 15% de resíduo foi de 21%, por outro lado o limite de plasticidade reduziu com valor igual a 15%.

Figura 14 – Curva de fluidez para determinação do limite de liquidez do solo + 15%.

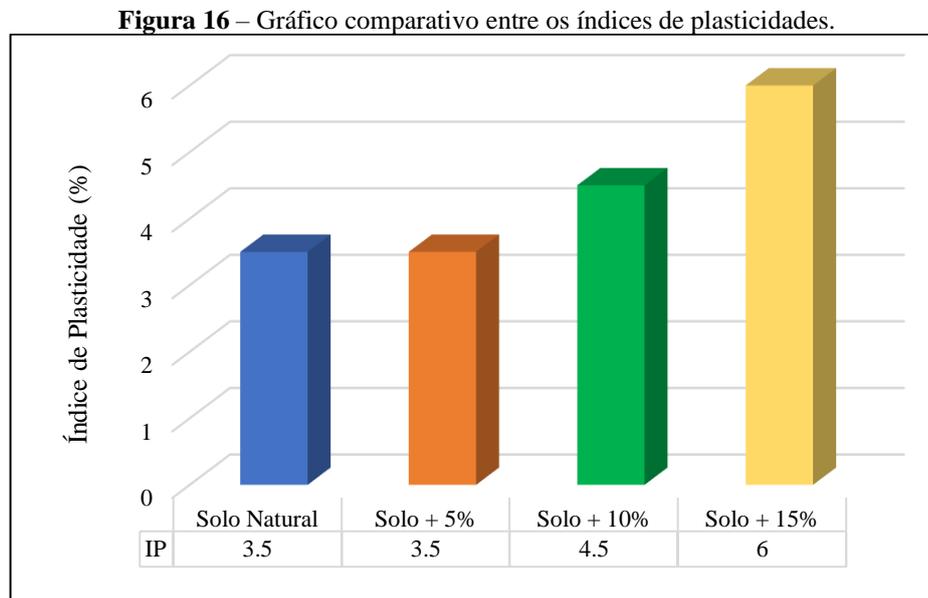
Fonte: Própria, 2020.

Analisando sob o ponto de vista das curvas de fluidez, pode-se perceber através da Figura 15 que houve um paralelismo entre as curvas do solo puro e solo com teor de 5%, indicando a semelhança na interação com a água. Em razão da possível diminuição na porcentagem da fração de argila do solo, a curva de fluidez para o solo com 15% de resíduo apresenta um distanciamento em relação as outras curvas, indicando menores teores de umidade de acordo com o número de golpes.

Figura 15 – Curvas de fluidez do solo e das misturas.

Fonte: Própria, 2020.

No gráfico indicado pela Figura 16, uma melhor análise comparativa foi feita entre os resultados do índice de plasticidade obtidos. Nota-se a tendência no aumento do IP conforme acrescenta resíduo de marmoraria ao solo, como foi visto anteriormente, o LL diminuiu como esperado, porém o LP diminuiu mais que o previsto, aumentando o IP nas adições de 10% e 15%, visto o aumento de material fino no solo.



Fonte: Própria, 2020.

Además, como o limite de liquidez é o mais interessante sob o ponto de vista da engenharia e está associado a resistência ao cisalhamento do solo correspondente a umidade que apresenta nos 25 golpes, conclui-se que não houve grande variação nos solos misturados com resíduo.

4.2.3 Classificação do solo

A classificação do solo foi feita através dos resultados encontrados a partir da análise granulométrica e dos limites de Atterberg. Os dados necessários para classificação do solo de acordo com o Sistema Unificado e com o Sistema Rodoviário encontram-se na Tabela 7.

Tabela 7 - Dados do solo residual para classificação.

Característica	Valores
% Passante na #200	19,03
% Passante na #4	97,13
% Passante na #2	85,36
% Passante na #0,42	53,3
Limite de Liquidez	22,5
Limite de Plasticidade	19
Índice de Plasticidade	3,5
% de argila < 0,022 mm	2,4

Fonte: Própria, 2020.

Pela classificação do Sistema Rodoviário, o solo é definido como A-2-4 com $IG = 0$, representando uma areia siltosa ou argilosa apontando comportamento geral como subleito de excelente a bom. Já pelo Sistema Unificado o solo se enquadra como SM, uma areia siltosa com muitos finos.

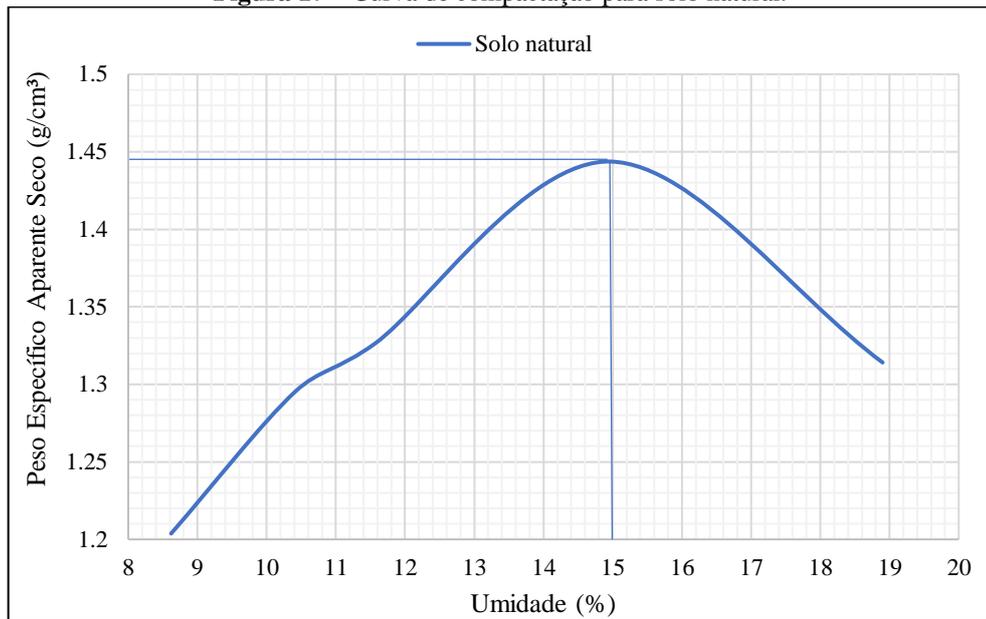
Em relação a atividade da argila presente no solo, Shempton (1953) indica que o índice de plasticidade é diretamente proporcional a fração de argila mais fina que 0,002 mm, podendo definir a atividade da argila como sendo o IP dividido pela porcentagem de argila presente no solo. Assim, a argila presente no solo estudado apresentou uma atividade maior que 1,25, sendo classificada como ativa.

4.3 Comportamento mecânico

4.3.1 Ensaio de compactação

Os ensaios de compactação foram realizados com a energia Proctor Normal para determinação da umidade ótima e do peso específico aparente seco do solo natural e de cada mistura. A curva de compactação do solo natural indica como resultado uma umidade ótima de 15% e peso específico aparente seco de 1,44 g/cm³, conforme a Figura 17.

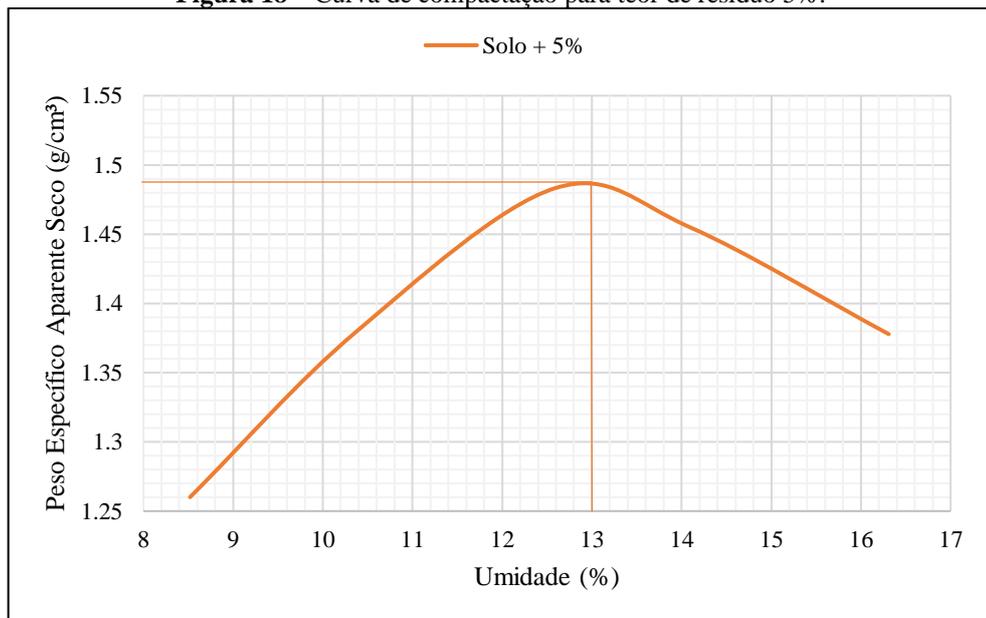
Figura 17 – Curva de compactação para solo natural.



Fonte: Própria, 2020.

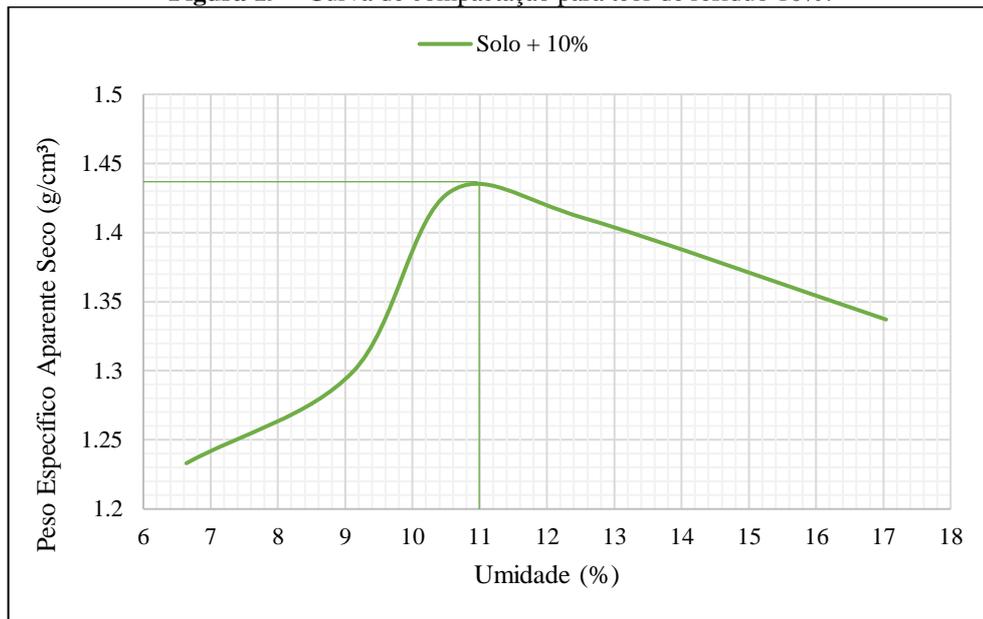
Na Figura 18, nota-se que para o teor de resíduo de marmoraria igual a 5%, obteve-se uma umidade ótima de 13% e peso específico aparente seco de 1,49 g/cm³.

Figura 18 – Curva de compactação para teor de resíduo 5%.



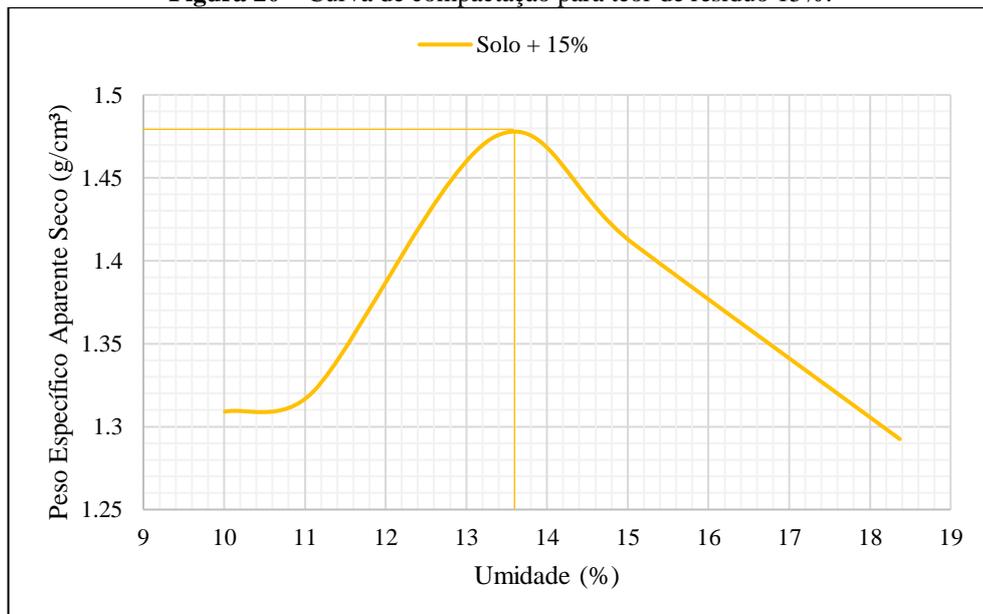
Fonte: Própria, 2020.

A curva de compactação do solo com adição de 10% pode ser visualizada na Figura 19. Observa-se que o maior peso específico aparente seco foi de 1,45 g/cm³ para uma umidade ótima de 11%.

Figura 19 – Curva de compactação para teor de resíduo 10%.

Fonte: Própria, 2020.

Por fim, para o teor de resíduo de 15% obteve-se, através da curva de compactação indicada na Figura 20, um peso específico aparente seco de 1,48 g/cm³ e uma umidade ótima de 13,6%.

Figura 20 – Curva de compactação para teor de resíduo 15%.

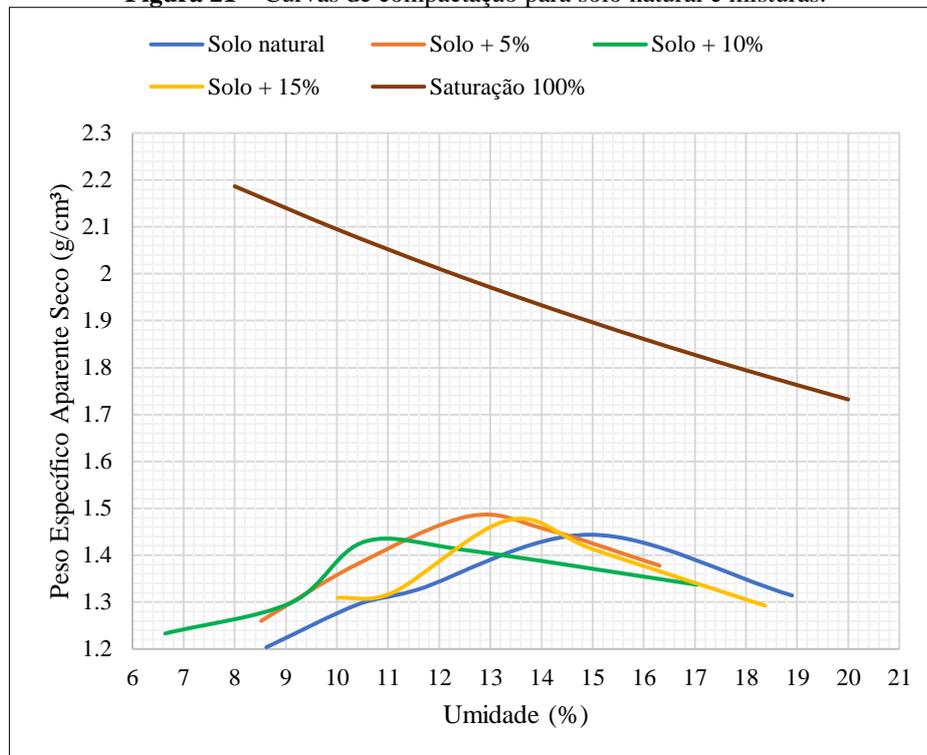
Fonte: Própria, 2020.

Comparando os resultados obtidos nos ensaios de compactação, nota-se a diminuição da umidade ótima com o incremento de resíduo, por outro lado, em relação ao peso específico

aparente seco não houve uma variância significativa, visto que os valores se deram entre 1,44 e 1,48 g/cm³.

Ao analisar a Figura 21, é notório que as curvas de compactação se encontram distantes da curva de saturação 100%, a qual foi elaborada em função da densidade média dos sólidos, igual a 2,65 g/cm³.

Figura 21 – Curvas de compactação para solo natural e misturas.



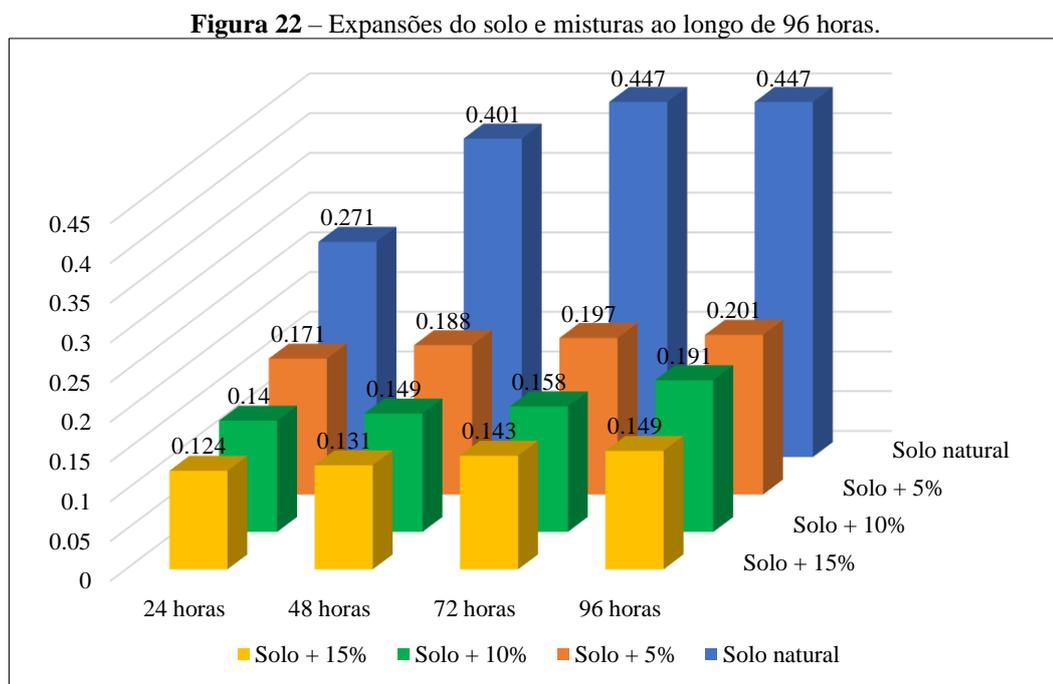
Fonte: Própria, 2020.

Entretanto, convém inferir que os pontos ótimos das curvas de compactação geralmente situam-se entre as curvas de saturação de 80 e 90% e as obtidas possuem grau de saturação médio de 50%, indicando a presença de vazios no solo. Possivelmente, aumentando-se a energia de compactação o número de vazios seria reduzido, tendendo a deslocar a curva de compactação para cima.

4.3.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Após os ensaios de compactação, foi possível definir a umidade ótima e o peso específico seco aparente máximo do solo e das misturas. Em posse desses valores, realizou-se o ensaio de ISC conjuntamente com o de expansão para avaliação do comportamento do solo com adição do resíduo, tomando como base a comparação com os resultados do solo natural.

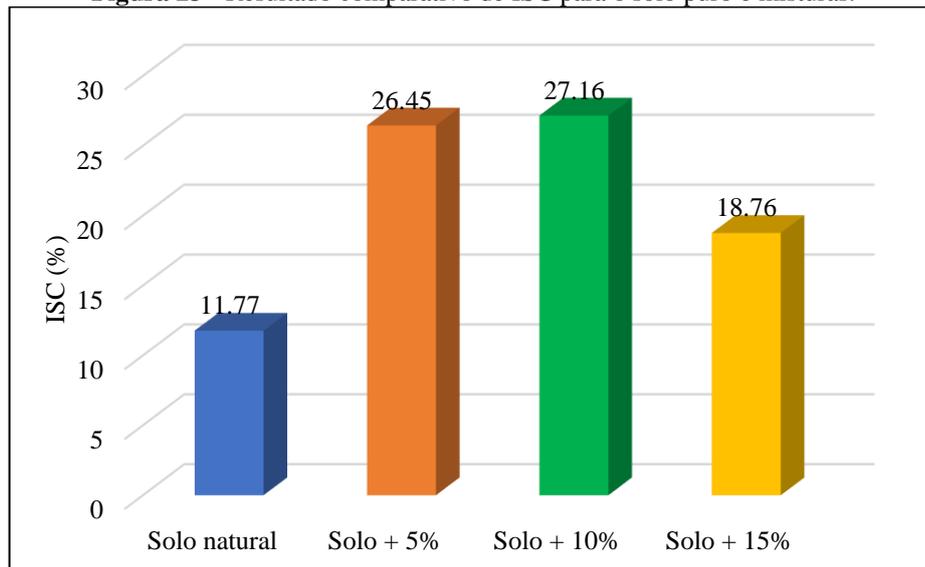
A Figura 22 apresenta os resultados de expansão para o solo natural e para o solo com adição de 5%, 10% e 15% de resíduo de marmoraria, obtidos ao longo dos quatro dias em imersão, mostrando que a adição de resíduo gera uma redução significativa da expansão do solo. Observa-se que, em relação a estabilidade, conforme aumenta-se o teor de pó a variação da expansão entre as primeiras 24 horas e as 96 horas diminui. Aos 4 dias, comparando o solo natural com o solo + 15% constata-se uma redução na expansibilidade de 66,7%.



Fonte: Própria, 2020.

A Figura 23 ilustra a comparação dos resultados de ISC obtidos no rompimento dos corpos de prova após as 96 horas de embebição para o solo natural e para o solo com adição de 5%, 10% e 15% de resíduo. Identifica-se que, diferentemente da expansão, os valores de ISC não aumentaram progressivamente, como evidenciado no teor de 15% e deve-se provavelmente ao grande acréscimo na porcentagem de finos

Figura 23 - Resultado comparativo de ISC para o solo puro e misturas.



Fonte: Própria, 2020.

A Figura 23 ainda demonstra que a mistura com teor de 10% foi a que apresentou maior ISC, e, quando comparada ao solo natural teve sua resistência aumentada em 56,7%.

5. CONCLUSÕES

As pesquisas a respeito da utilização dos resíduos gerados na ornamentação de rochas crescem a cada dia devido à preocupação com o descarte incorreto desses materiais no meio ambiente, e, sendo a construção civil o setor que mais demanda recursos naturais, o mesmo se torna conveniente no reaproveitamento dos resíduos sólidos. Desse modo, após realização da revisão bibliográfica e dos ensaios definidos na metodologia, pôde-se atingir os objetivos propostos neste trabalho.

Baseado nos resultados obtidos, o solo natural pode ser classificado como A 2-4, um solo arenoso siltoso ou argiloso, classificado pela HBR para finalidades rodoviárias. Em relação ao índice de plasticidade e a expansão do solo, não requerem correção, porém apresenta baixa capacidade de suporte para ser empregado em sub-base, por exemplo. De acordo com os ensaios de EDX e DRX, o solo é composto, em sua maioria, por dióxido de silício e óxido de alumínio, possuindo caulinita, ilita e quartzo, sendo a caulinita um argilomineral não expansivo com baixa plasticidade e a ilita um argilomineral parcialmente expansivo o que se comprova nos ensaios de expansão.

A incorporação do resíduo de marmoraria no solo não acarretou mudanças significativas para os limites de Atterberg. Por outro lado, ao observar as curvas de compactação nota-se a redução da umidade ótima e aumento no peso específico aparente seco. Os resultados de ISC realizados com adição do resíduo apresentam um aumento em relação ao solo natural inicial de 55,5% para teor de 5%, chegando ao valor máximo de 56,7% para o teor de 10%, demonstrando potencial na melhora das propriedades mecânicas.

Em relação a expansibilidade das misturas, verificou-se uma redução considerável quando comparado ao solo natural, indicando que mesmo o solo não sendo expansivo, o resíduo ainda foi capaz de diminuir em 66,7% a expansão, podendo ser empregado em solos com expansões que fogem das recomendações sugeridas pelo DNIT. Diante do exposto, é possível inferir que os melhores resultados obtidos foram para o teor de 10%, considerado ideal, uma vez que com a diminuição da umidade ótima, o consumo de água será reduzido durante a compactação e a resistência do solo juntamente com a expansibilidade se adequam aos parâmetros utilizados em sub-bases.

Portanto, conclui-se que o uso do resíduo de marmoraria como material alternativo na estabilização de solo residual mostra-se viável frente aos benefícios relacionados a resistência mecânica do solo, a expansibilidade e ao meio ambiente, sob condição de análise prévia do resíduo, em razão das frações de pó de mármore e granito variarem em função da produção.

5.1 Sugestões para trabalhos futuros

Na tentativa de incentivar cada vez mais o aproveitamento de resíduos de marmoraria na estabilização dos solos, fica como sugestão para próximos trabalhos a realização de estudos que mostrem através de ensaios como, por exemplo, compressão triaxial e tração por compressão diametral, o ganho de resistência proporcionado pelo estabilizante alternativo.

Outro ponto que pode ser analisado, é a comparação entre estabilizantes convencionais e resíduos de marmorarias quanto ao ganho de resistência mecânica e sob o ponto de vista custo-benefício, realizando um orçamento com base nos custos totais para o trecho que será pavimentado.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, G. B. O. **Incorporação de escória de cobre pós-jateada a um solo areno-argiloso de Sergipe para aplicação em base de pavimentos.** 2016. 193 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Pontífica Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.
- ALMEIDA, T. F. **Reaproveitamento de resíduo de pó de mármore e chamote na produção de material cerâmico para isolamento térmico.** 2014. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciência dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2014.
- AZEVÊDO, A. L. C. **Estabilização de solos com adição de cal: um estudo a respeito da reversibilidade das reações que acontecem no solo após a adição de cal.** 2010. 114 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geotécnica) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12253 – Solo – Cimento – Dosagem para emprego como camada de pavimento.** Rio de Janeiro, 1992.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6457 – Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização.** Rio de Janeiro, 1986.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6459 – Solo – Determinação do limite de liquidez.** Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7180 – Solo – Determinação do limite de plasticidade.** Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7181 – Solo – Análise granulométrica.** Rio de Janeiro, 1984.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7182 – Solo – Ensaio de compactação.** Rio de Janeiro, 1986.
- BECHARA, M. F.; FURLAN, A. P.; GIGANTE, A. C. e FABRI, G. T. P. Propriedades mecânicas de misturas solos-cimento com solo laterítico e solo não-laterítico. **Anais.** Rio de Janeiro: ANPET, 2010.
- BERNUCCI, L. B. et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros.** Rio de Janeiro: Petrobras, ABEDA, 2008. 504 p.
- BRITO, L. C.; PARANHOS, H. S. Estabilização de Solos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, v. 1, n. 2, p. 425-438. 2017. Disponível em: <<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estabilizacao-de-solos>>. Acessado em: 8 nov. 2020.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: LTC, 1988. 234 p.

CARRARO, J. A. H. **Utilização de resíduos industriais na estabilização de um solo residual de arenito**. 1997. 150 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Porto Alegre, 1997.

CRUZ, M. L.; JALALI, S. Melhoramento do desempenho de misturas de solo-cimento com recurso a activadores de baixo custo. **Revista Luso-Brasileira de Geotecnia**, São Paulo, n. 120, p. 49-64, nov. 2010.

DEMARTINI, T. J. C. **Produção e caracterização de mármore artificial com resíduo fino de mármore dolomítico beneficiado em teares de lâminas diamantadas**. 2017. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Ciências dos Materiais) – Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes, 2017.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSPORTES (DNIT) – **DNIT 172/2016 – Solos - Determinação do índice de suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas**. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE TRANSPORTES (DNIT) – **Manual de pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro, 2006.

KUMAYAMA, R. et al. Estudo da viabilidade do emprego de pó de mármore para produção de concreto autoadensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (EPS). **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 10, n. 2, p. 56-71. 2015. Disponível em: <<https://revistas.ufg.br/index.php/reec/article/view/33117>>. Acesso em: 8 nov. 2020.

LOPES, L. S. **Metodologia de previsão do comportamento mecânico de solos tratados com cal**. 2011. 226 f. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Lulea, University of Technology, 2013. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997144/FULLTEXT01.pdf>>. Acessado em: 8 nov. 2020.

MARQUES, G. L. O. **Pavimentação**: Notas de aula da disciplina. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>>. Acesso em: 20 out. 2020.

MENDONÇA, A. M. G. D. et al. Utilização do resíduo de mármore para produção de argamassa. In: VIII Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental, 8., 2017, Campo Grande. **Anais...** Campo Grande: IBEAS, 2017. p. 1-6.

MOTTA, R. J. B. **Estudo da estabilidade coloidal de argilas na presença de polifosfatos**. 2016. 55 f. Monografia (Especialização em Química Industrial) – Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2016.

MOURA, W. A.; GONÇALVES, J. P.; LEITE, R. S. Utilização do resíduo de corte de mármore e granito em argamassas de revestimento e confecção de lajotas para piso. **Sitientibus**, Feira de Santana, n. 26, p. 49-61, jan./jun. 2002.

MUKESH, A. P.; PATEL, H. S. A review on effects of stabilizing agentes for stabilization of weak soil. **Civil and Environmental Research**, Mehsana, v. 2, n. 6. 2012. Disponível em: <<https://www.iiste.org/Journals/index.php/CER/article/viewFile/2432/2455>>. Acesso em: 8 nov. 2020.

OLIVEIRA, L. C. D. **A estabilização de solos aplicada a habitação, um estudo de misturas solo-cimento**. 1994. 236 f. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1994.

PEREIRA, K. L. A. **Estabilização de um solo com cimento e cinza de lodo para uso em pavimentos**. 2012. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos em 16 aulas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2006. 367 p.

SANTOS, E. F. **Estudo comparativo de diferentes sistemas de classificação geotécnicas aplicadas aos solos tropicais**. 2006. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

SARTORI, G. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. 2015. 54 f. Monografia (Especialização em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, 2015.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. São Paulo: PINI, 2001. 671 p.

SHIMADZU. **Analytical and measuring instruments: EDX – 7000/8000 Espectrômetro de fluorescência de raios X por energia dispersiva**. Disponível em: <https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/elemental/raios_x/eds/edx7000_8000-1.shtml>. Acesso em: 21 out. 2020.

SHIMADZU. **Analytical and measuring instruments: XRD – 7000 Difrátômetro de Raios X**. Disponível em: <<https://www.shimadzu.com.br/analitica/produtos/difratometros/xrd-7000.shtml>>. Acesso em: 21 out. 2020.

SILVA, C. C. **Comportamento de solos siltosos quando reforçados com fibras e melhorados com aditivos químicos e orgânicos**. 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) – Universidade Federal do Paraná, 2007.

SILVA, J. B.; HOTZA, D.; ACCHAR, W. Incorporação de lama de mármore e granito em massas argilosas. **Cerâmica**, São Paulo, v. 51, n. 320, out./dez. 2005. Disponível em: <https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0366-69132005000400004>. Acesso em: 20 ago. 2020.

SILVA, P. B. **Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos viários**. 2014. 172 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SKEMPTON, A.W. **The colloidal activity of clays**. III ISSMGE, Zurich, v. 1, p. 57-61, 1953. Disponível em: <https://www.issmge.org/uploads/publications/1/42/1953_01_0014.pdf>. Acessado em: 15 de novembro de 2020.

TEIXEIRA, I. **Estabilização de um solo laterítico argiloso para utilização como camada de pavimento**. 2014. 109 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2014.

TENÓRIO, E. A. G. **Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal**. 2019. 108 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.

YILMAZ, F.; YURDAKUL, M. Evaluation of marble dust for soil stabilization. In: 3rd International Conference on Computational and Experimental Science and Engineering. **Acta Physica Polonica**, v. 132, n. 3, p. 710-711. 2017. Disponível em: <<http://przyrbwn.icm.edu.pl/APP/PDF/132/app132z3p082.pdf>>. Acesso em: 8 nov. 2020.

ZORLUER, I.; GUCEK, S. The usability of industrial wastes on soil stabilization. **Revista de la Construcción**, Santiago, v. 19, n. 1, abr. 2020. Disponível em: <https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-915X2020000100080>. Acesso em: 8 ago. 2020.