



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO,
CIÊNCIA E TECNOLOGIA DA PARAÍBA

COORDENAÇÃO DO CURSO SUPERIOR DE
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL



ALEXANDRA AMADOR DE ABREU

**ESTABILIZAÇÃO DO SUBLEITO COM ADIÇÃO DE CAL E RESÍDUOS DO
POLIMENTO DO PORCELANATO**

Cajazeiras - PB
2020

ALEXANDRA AMADOR DE ABREU

**ESTABILIZAÇÃO DO SUBLEITO COM ADIÇÃO DE CAL E RESÍDUOS DO
POLIMENTO DO PORCELANATO**

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

Orientadora: Cinthya Santos da Silva
Coorientador: Robson Arruda dos Santos

Cajazeiras - PB
2020

IFPB / Campus Cajazeiras
Coordenação de Biblioteca
Biblioteca Prof. Ribamar da Silva
Catálogo na fonte: Daniel Andrade CRB-15/593

A162e

Abreu, Alexandra amador de

Estabilização do subleito com adição de cal e resíduos do polimento do porcelanato / Alexandra amador de Abreu; orientadora Cinthya Santos da Silva; coorientador Robson Arruda dos Santos.- Cajazeiras, 2020.
66 f.: il.

Orientador: Cinthya Santos da Silva.

TCC (Bacharelado em Eng) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2020.

1. Cal 2. Pavimentação 3. Porcelanato I. Título

666.924(0.067)

ALEXANDRA AMADOR DE ABREU

**ESTABILIZAÇÃO DO SUBLEITO COM A ADIÇÃO DE CAL E RESÍDUOS
DO POLIMENTO DO PORCELANATO**

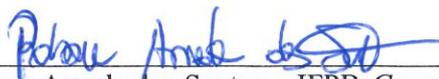
Trabalho de Conclusão de Curso
submetido à Coordenação do Curso de
Bacharelado em Engenharia Civil do
Instituto Federal de Educação, Ciência e
Tecnologia da Paraíba, como parte dos
requisitos para a obtenção do Título de
Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em 10 de fevereiro de 2020.

BANCA EXAMINADORA



Cinthya Santos da Silva – IFPB-Campus Cajazeiras
Orientadora



Robson Arruda dos Santos – IFPB-Campus Cajazeiras
Coorientador



Ornella Almeida Lacerda Lira – IFPB-Campus Cajazeiras
Examinadora

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio
e o suporte em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado saúde e forças para realizar essa conquista.

Aos meus pais, Frassinete Amador e José Geraldo, por toda a paciência, por todo o carinho, amor e dedicação que sempre me criaram, ensinando os valores e princípios fundamentais.

À minha avó Maria de Sousa por toda a confiança e força que me deu nos seus dias de vida.

Aos demais familiares, pelo apoio e por nunca terem medido esforços para o meu desenvolvimento como pessoa, especialmente aos meus primos, Rodolfo Sinésio, Renata Laiana, Felipe David, Filipe Frágoso, Glória Larissa, Mirely Abreu e Micaela de Sousa.

À minha orientadora, Cinthya Santos da Silva, por toda assistência, confiança e paciência no decorrer do curso, que mesmo com todos os problemas enfrentados sempre me estimulou e me orientou ao longo de todo esse período.

Ao meu coorientador, Robson Arruda Santos, por toda dedicação e por contribuir diretamente com esse trabalho, sendo um conselheiro valioso nessa etapa.

Aos demais professores que fizeram parte da minha formação acadêmica e pessoal.

Aos meus colegas do curso que se tornaram muito especiais, principalmente, Aurélia Emanuela, Geovany Barrozo, Breno Francisco, Bianca Anacleto, Larisse Ferreira, Dário Neto e Wamon Salomão.

A André Albino e a Leonardo Dias por todo o companheirismo e esforço para que esse trabalho fosse finalizado.

À minha amiga, Kelliani Nadiene, por todo cuidado e o abrigo nos dias de maior desespero.

Ao Instituto Federal da Paraíba, IFPB, *Campus* Cajazeiras pela oportunidade e pela realização da pesquisa.

Aos envolvidos do Laboratório de Geotecnia do IFPB e do Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Faculdade Santa Maria, que orientaram e ajudaram durante as realizações dos ensaios, em particular a Mary Ângela, Gastão Coelho e Kelcylany Nathany.

À Elizabeth Porcelanatos em João Pessoa – PB, pelo fornecimento do resíduo utilizado nessa pesquisa.

E a todos que contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização desse trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

Os muitos problemas ambientais causados pelo descarte de diversos materiais da construção civil e consumo desordenado dos recursos naturais, têm se tornado um desafio constante para os administradores, esse cenário inclui, por exemplo, as indústrias que produzem os materiais cerâmicos. Um dos processos que mais produzem rejeitos é a etapa de polimento do porcelanato, onde durante a produção são geradas grandes quantidades de resíduo, composto por restos de cerâmica e substâncias abrasivas utilizadas durante o polimento. Se beneficiando das características do resíduo, conhecido como Resíduo do Polimento do Porcelanato (RPP), e pensando na diminuição do descarte destes produtos em aterros, é possível encontrar uma saída viável do material com sua reutilização na pavimentação. Dessa forma, este estudo busca analisar a viabilidade de realizar a estabilização de solos de subleito de pavimentos por meio da adição do RPP e da cal hidratada. Visto que, a cal em contato com o solo úmido modifica as características do mesmo, o tornando mais friável e menos deformável quando submetido à grandes cargas. Essas adições foram realizadas em um solo silte-argiloso com pouca plasticidade, compostas de 8% de cal, obedecendo os métodos de dosagem do *Lime Fixation Point* (LFP) e de Thompson adaptado por Ingles & Metcalf, e em seguida adicionadas à massa do solo 6%, 9% e 12% de resíduo. Os materiais e as misturas foram verificados mediante a realização dos ensaios de granulometria, dos limites de Atterberg e da massa específica. Posteriormente, realizou-se os ensaios de expansão e Índice de Suporte Califórnia (ISC) preparados com a umidade ótima conhecida no ensaio de compactação Proctor Normal. Dentre todas as combinações, a mistura da cal hidratada com 9% de RPP demonstrou valores significativos, tornando essa adição eficaz para o uso em obras rodoviárias por meio da otimização do solo natural.

Palavras-Chave: Cal; Estabilização; Pavimentação; Resíduo do Polimento do Porcelanato.

ABSTRACT

The many environmental problems caused by the disposal of several construction materials and disordered consumption of natural resources, have become a constant challenge for administrators, this scenario includes, for example, the industries that produce ceramic materials. One of the processes that most produces wastes is the polishing step of porcelain tiles, where during production large amounts of residue are generated, compound of ceramic remains and abrasive substances used during polishing. Taking advantage of the characteristics of the waste, known as Porcelain Polishing Residue (RPP), and thinking about reducing the disposal of these products in landfills, it is possible to find a viable outlet for the material with its reuse in paving. Therefore, this study seeks to analyze the feasibility of stabilizing subgrade pavement soils through the addition of RPP and hydrated lime. Since, lime in contact with moist soil modifies its characteristics, making it more friable and less deformable when subjected to high loads. These additions were made in silt-clay soil with little plasticity, composed of 8% lime, following the dosage methods of Lime Fixation Point (LFP) and Thompson adapted by Ingles & Metcalf, and then added to the soil mass 6%, 9% and 12% residue. The materials and mixtures were verified by carrying out the granulometry tests, the Atterberg limits and the specific mass. Subsequently, the expansion tests and the California Support Index (ISC) were performed with the optimum humidity known in the Proctor Normal compaction test. Among all combinations, the mixture of hydrated lime with 9% RPP showed significant values, making this addition effective for use in road works through the optimization of natural soil.

Keywords: Lime; Stabilization; Paving; Porcelain Polishing Residue.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Esquema de classificação do SUCS.....	21
Figura 2 – Estrutura do Pavimento Rígido.....	23
Figura 3 – Estrutura do Pavimento Flexível.....	24
Figura 4 - Curva de Compactação.....	26
Figura 5 – Fluxograma resumo com as atividades desenvolvidas.....	32
Figura 6 – Fluxograma dos ensaios realizados para determinar as propriedades dos materiais.	33
Figura 7 – Solo natural: a) solo no pátio da cerâmica; b) solo depositado no IFPB.....	34
Figura 8 – Preparação das amostras para os ensaios de caracterização: a) destorroamento com a mão de gral e o almofariz; b) quarteamento da amostra.....	36
Figura 9 – Amostras utilizadas no ensaio de teor de umidade.....	36
Figura 10 – Determinação da massa específica: a) amostra no aparelho dispersor; b) aplicação da bomba à vácuo no picnômetro; c) verificação da temperatura; d) a mistura antes da estufa.	37
Figura 11 – Ensaio de granulometria por peneiramento com o auxílio do agitador de peneiras.	37
Figura 12 – Ensaio de sedimentação: a) amostra com o defloculante; b) amostra no aparelho dispersor; c) transferência da amostra para a proveta; d) solução na proveta para que sejam realizadas as leituras; e) lavagem da suspensão na peneira #200.....	38
Figura 13 – Determinação do limite de liquidez: a) solo passante na peneira #40; b) material no aparelho de Casagrande.....	38
Figura 14 – Ensaio de limite de plasticidade.....	39
Figura 15 – Resíduo do Polimento do Porcelanato: a) material coletado; b) material depois de destorroado.....	40
Figura 16 – Cal hidratada utilizada.....	40
Figura 17 – Definição da percentagem de cal: a) ensaio de limite de plasticidade; b) amostras na estufa.....	41
Figura 18 – Ensaio de compactação: a) amostra do solo; b) processo de uniformização da umidade; c) equipamentos utilizados para o ensaio; d) processo de compactação; e) rasamento do excesso; f) extração do corpo de prova.....	42

Figura 19 – Etapas dos ensaios de expansão e CBR: a) imersão do corpo-de-prova; b) penetração do pistão.	43
Figura 20 – Curva granulométrica do solo.	45
Figura 21 – Gráfico de determinação do LFP.	48
Figura 22 – Gráfico que relaciona os percentuais granulométricos das amostras.	50
Figura 23 – Comparação das curvas granulométricas das amostras.	50
Figura 24 – Curva de Compactação do Solo Natural.	52
Figura 25 – Curva de Compactação do Solo + Cal.	53
Figura 26 – Curva de Compactação do Solo + Cal + RPP.	53
Figura 27 – Gráfico para a análise da Expansão e o CBR.	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Os ensaios de caracterização dos solos.....	19
Tabela 2 – Classificação quanto ao IP.....	20
Tabela 3 – Resumo das características da classificação TBR.	21
Tabela 4 – Classificação dos Solos pelo TBR.....	22
Tabela 5 – Energias de Compactação.....	26
Tabela 6 – Características das camadas do pavimento.....	27
Tabela 7 – Previsão do teor de cal em função do tipo de solo.	30
Tabela 8 – Índices Físicos do Solo.	44
Tabela 9 – Composição Granulométrica (%).	45
Tabela 10 – Classificação do Solo Natural.....	46
Tabela 11 – Composição química do RPP.	46
Tabela 12 –Determinação do LFP.....	47
Tabela 13 – Índices Físicos das Composições.....	48
Tabela 14 – Resultados do ensaio de granulometria para as composições.	49
Tabela 15 - Massa específica seca máxima e umidade ótima dos ensaios de compactação. ...	51
Tabela 16 – Análise do desvio padrão dos teores de umidade.	54
Tabela 17 – Resultados das composições para a Expansão e o CBR.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AASHTO	<i>American Association for State Highway and Transportation Officials</i>
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ASM	Metassilicato de Sódio Anidro
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBR	<i>Califórnia Bearing Ratio</i>
CC	Coeficiente de Curvatura
CCA	Cinzas de Casca de Arroz
CCR	Resíduos de Carbonetos de Cálcio
CNT	Confederação Nacional de Transporte
CU	Coeficiente Uniforme
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
FRX	Fluorescência de Raios X
ETA	Estação de Tratamento de Água
h	Teor de Umidade Inicial
HBR	<i>Highway Research Board</i>
HDPE	Polietileno de Alta Densidade
ICL	<i>Initial Consumption of Lime</i>
IFPB	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba
LFP	<i>Lime Fixation Point</i>
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
ISC	Índice Suporte Califórnia
LFP	<i>Lime Fixation Point</i>
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
ME	Método de Ensaio
ML	Solos Finos Não Plásticos
MO	Matéria Orgânica
NBR	Norma Brasileira Registrada
pH	Potencial Hidrogeniônico

PVC	Policloreto de Vinila
RPP	Resíduos do Polimento do Porcelanato
RRC	Resíduos de Retificação Cerâmica
SUCS	Sistema Unificado de Classificação de Solos
TBR	<i>Transportation Research Board</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

h_{ot}	Teor de Umidade Ótima
h_{mold}	Teor de Umidade do Molde
ρ	Massa Específica
$\rho_{dmáx}$	Massa Específica Seca Máxima

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
1.1 OBJETIVOS.....	17
1.1.1 Objetivo Geral	17
1.1.2 Objetivos Específicos	17
1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA.....	17
2 FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA.....	18
2.1 SOLOS	18
2.1.1 Caracterização dos Solos	18
2.1.2 Classificação dos solos	20
2.2 PAVIMENTAÇÃO	22
2.2.1 Classificação dos Pavimentos.....	23
2.2.2 Estruturas dos Pavimentos.....	24
2.3 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DAS RODOVIAS	25
2.3.1 Compactação	25
2.3.2 CBR.....	27
2.4 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO	27
2.4.1 Tipos de Estabilização	28
2.4.2 Estabilização com a cal hidratada.....	29
2.4.3 Novas alternativas para estabilização	30
3 MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA.....	32
3.1 MATERIAIS	33
3.1.1 Solo.....	33
3.1.2 Cal hidratada.....	34
3.1.3 Resíduo do polimento do porcelanato	34
3.2 METODOLOGIA.....	35

3.2.1 Ensaio de caracterização do solo	35
3.2.1.1 Teor de umidade.....	36
3.2.1.2 Massa Específica	36
3.2.1.3 Granulometria.....	37
3.2.1.4 Limites de Consistência	38
3.2.2 Determinação das propriedades dos aditivos.....	39
3.2.3 Definição da dosagem de cal	40
3.2.4 Procedimentos de comportamento mecânico	41
3.2.4.1 Compactação	41
3.2.4.2 Expansão e Califórnia Bearing Ratio (CBR)	43
4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS	44
4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	44
4.1.1 Solo.....	44
4.1.2 RPP	46
4.2 DEFINIÇÃO DA PORCENTAGEM DA CAL	47
4.3 EFEITOS FÍSICOS DAS COMPOSIÇÕES	48
4.4 COMPACTAÇÃO	51
4.5 EXPANSÃO E CBR	54
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES	57
5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	58
REFERÊNCIAS	59

1 INTRODUÇÃO

O âmbito da construção civil possui uma grande influência no desenvolvimento social e econômico, seja na geração de mão de obra e/ou no fornecimento de matérias-primas (VIEIRA; NOGUEIRA, 2018). No entanto, de acordo com Roth e Garcias (2007), esse setor é um dos grandes responsáveis pelos problemas ambientais existentes, principalmente por possuir um consumo indiscriminado dos recursos naturais para a produção de bens e insumos, e por não portar de um planejamento e gerenciamento dos resíduos oriundos dos próprios trabalhos.

Dentro desse ramo, a indústria de cerâmica brasileira é uma das que mais se destacam, em virtude da sua grande produção, uma vez que o Brasil é o segundo maior produtor e consumidor de revestimentos cerâmicos do mundo, perdendo apenas para a China, em 2017 (MOTTA *et al.*, 2018).

De acordo com Moraes (2002), cerca de 1% de revestimento cerâmico é perdido por dia durante o processo de produção, esse valor passa a ser bem significativo quando contabilizada toda a produção em uma empresa e ainda maior quando se analisa com relação às demais indústrias dessa área. Existem alguns métodos que realizam a reciclagem desses resíduos buscando soluções que conciliem a disposição econômica e o impacto ambiental, especialmente pelas características físico-químicas das matérias-primas das cerâmicas e suas particularidades nas etapas da produção.

Dentre os resíduos produzidos pela indústria da Cerâmica, destacam-se os resíduos do polimento do porcelanato (RPP ou torta), fabricado a partir da combinação de argilas e *caulim*, materiais argilosos, com feldspato, talco e quartzo (não argilosos), este último responsável pela baixa porosidade e alta resistência (CRUZ; OLIVEIRA, 2015).

O RPP é resultado do desgaste das peças de porcelanato por meio das máquinas polidoras com alta rotação que utilizam pressão, velocidade controlada e água gerando um resíduo fino e úmido, onde cerca de 0,8mm a 1cm do porcelanato bruto é retirado da peça durante o procedimento (MENEZES, 2018; SANTOS *et al.*, 2014). De acordo com Santos (2017), a popularização das peças de porcelanato no mercado da construção civil tem provocado um aumento na sua produção, causando preocupações quanto ao descarte da torta.

Uma das viabilidades existentes para esses resíduos é a utilização desse material como um elemento geotécnico, com a finalidade de realizar a estabilização das subcamadas dos pavimentos, posto que as rodovias brasileiras possuem dificuldades no desenvolvimento da infraestrutura atrelada à escassez de materiais que ofereçam melhorias nas propriedades do solo (ANTONIO *et al.*, 2018).

Segundo a Confederação Nacional de Transporte (CNT, 2019), em 2019 apenas 12,4% da malha rodoviária do país apresentava pavimentação, equivalente a 213.453 km, onde em uma área de 1.000 km², apenas 25,1 km das rodovias eram asfaltadas. O que apresenta um caráter insatisfatório, uma vez que o modal rodoviário é responsável por 61% da movimentação de mercadorias e 95% do traslado dos passageiros. Devido às manutenções ineficientes, à falta de investimento e o aumento do volume dos modais terrestres, ocorrem déficits na segurança e na eficiência, o que proporciona danos ao poder público e à sociedade.

A fim de solucionar os problemas geotécnicos que surgem no sistema rodoviário brasileiro e aproveitar o solo natural no lugar de removê-lo e substituí-lo, existem pesquisas que utilizam vários tipos de adições de materiais com propriedades cimentantes, como é o caso da cal e do cimento Portland. De acordo com Sartori (2015), o ideal, nessas situações, é aproveitar o solo já existente no local sem comprometer a estrutura das camadas dos pavimentos das rodovias, técnica essa denominada de estabilização.

Segundo Oliveira (2010), a estabilização é um processo que busca conferir uma melhor resistência ao solo quando submetido a cargas desgastantes, por meio da adição de materiais que confirmam uma coesão adequada, unida a redução do índice de plasticidade e da capacidade expansiva do material. As formas de realizar a estabilização vem sendo aprimoradas e aplicadas, focando sempre na durabilidade, velocidade de execução e baixo custo, evitando manutenções frequentes e retrabalhos (BERNUCCI, 2008).

Essas características podem ser adquiridas por meio da adição da cal hidratada, que quando em contato com o solo úmido, realiza um processo químico que o torna mais friável e proporciona uma diminuição na capacidade de deformação do material, facilitando assim a compactação (HERRIN; MITCHELL, 1968).

Apesar dos vários estudos direcionados para a otimização do solo natural durante a execução de obras rodoviárias, ainda há uma grande ineficácia dessas atividades que poderiam ser feitas com materiais que a própria indústria da construção civil descarta. Diante disso, este trabalho utiliza-se da alta resistência oferecida pelos resíduos produzidos durante o processo de polimento do porcelanato e das propriedades da cal como agente estabilizante, com a finalidade de verificar a melhor forma de realizar a estabilização das subcamadas dos pavimentos flexíveis, por meio de análises físico-químicas e mecânicas.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica da estabilização, por meio da adição dos resíduos do polimento do porcelanato e de dosagens da cal hidratada, de subcamadas dos pavimentos.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar o impacto de diferentes dosagens, de cal e RPP, nas características físicas de solos silto-argilosos;
- Verificar se o solo pós-adição atende aos critérios normativos estabelecidos pelo Departamento de Infraestrutura e Transporte (DNIT) para a estabilização;
- Identificar a dosagem de materiais que proporcionem melhorias na capacidade de suporte do solo e uma menor expansão.

1.2 ESTRUTURA DA PESQUISA

Esta pesquisa está estruturada e dividida em cinco capítulos. Na primeira parte é apresentada, por meio da introdução, onde é exibida uma breve contextualização e apontada a problemática vislumbrada, assim como os objetivos, gerais e específicos.

O segundo capítulo corresponde a revisão de literatura sobre os conteúdos relacionados aos estudos de caracterização e classificação dos solos, as determinações das propriedades geotécnicas das rodovias e as constituições das mesmas, além das análises dos solos diante dos agentes estabilizantes.

Os materiais e as metodologias aplicadas à execução e o detalhamento do estudo estão presentes no capítulo 3, apresentando todos os ensaios realizados e as recomendações técnicas utilizadas.

O quarto capítulo apresenta e discute os resultados obtidos no trabalho. Por fim, o quinto capítulo contém as considerações finais e sugestões para trabalhos futuros.

2 FUNDAMENTAÇÃO TÉORICA

Para a realização deste estudo foram reunidas informações bibliográficas que estão apresentadas nesse capítulo. Primeiramente, serão expostos os fundamentos do solo, suas características, ensaios e classificações de acordo com as normativas vigentes. A segunda parte, exhibe a definição e as especificações dos pavimentos, se atentando as particularidades de cada camada que constitui os mesmos. E ainda, será abordada a estabilização de solos para fins rodoviários, seus tipos e métodos, se atentando ao processo realizado com a cal hidratada, no entanto também são listadas outras pesquisas sobre a área.

2.1 SOLOS

Solo é um material oriundo da desagregação de rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, e pode possuir compostos orgânicos ou não (NBR 6502/2016). O processo de decomposição pode acontecer devido à ação de agentes do intemperismo, como a água e o vento (DNIT, 2006).

Das (2007), também afirma que o solo se trata de um agregado não cimentado de grãos minerais e partículas sólidas compostas de líquidos e gases nos espaços vazios entre os elementos, portanto dependendo dessa particularidade ele pode apresentar diferentes características.

Segundo Pinto (2011) é necessário analisar o comportamento dos solos de diferentes formas, como: a origem, as propriedades físicas, a compressibilidade e a capacidade de carga. Especialmente para que as atividades desenvolvidas pela engenharia civil sejam realizadas da melhor forma possível.

2.1.1 Caracterização dos Solos

Para Buffon (2014), o estudo dos solos é de fundamental importância, principalmente para o desenvolvimento de algumas atividades, como a execução de uma rodovia. Pois o conhecimento das propriedades do material estudado permite o melhor desempenho do mesmo nas atividades desejadas. Sabendo disto, foram criados alguns parâmetros que caracterizam o solo, tais como: teor de umidade, massa específica, granulometria e os limites de Atterberg (limite de liquidez e limite de plasticidade).

Os ensaios necessários para a obtenção dos índices físicos estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Os ensaios de caracterização dos solos.

Ensaio	Finalidades
Teor de umidade	Para o Caputo (1996), a umidade de um solo é a razão entre a massa da água inserida do volume e a massa do solo seco. Segundo a NBR 6457/2016, este parâmetro é obtido por meio do métodos da(o): estufa, frigideira, álcool etílico e o <i>Speedy</i> .
Massa Específica dos Grãos	Essa propriedade do solo é a relação entre a massa do material e o volume que este ocupa (RAMOS; SILVA, 2018). Segundo a NBR 6458/2016, o valor da massa específica exclui os vazios impermeáveis entre os grãos.
Análise Granulométrica	Permite determinar a faixa granulométrica do solo, de acordo com NBR 7181/2016, os resultados são adquiridos através dos ensaios de peneiramento e sedimentação. As peneiras possuem malhas quadradas com dimensões decrescentes e maiores que 0,075mm, e a sedimentação provoca a decantação das partículas do solo e a separação dos grãos agrupados com o auxílio do defloculante (DAS, 2007). Com os dados coletados é realizada a construção de um gráfico semilogarítmico que forma uma curva de distribuição granulométrica. Por meio desta, são determinados os índices granulométricos, o coeficiente de uniformidade (CU) e o coeficiente de curvatura (CC). O primeiro, determina a não uniformidade do material e o outro, identifica as possíveis descontinuidades dos grãos (CAPUTO, 1996).
Limite de Liquidez	Retratado por LL, marca a transição do estado plástico para o estado líquido (DNER, 1994). O ensaio é realizado com o Aparelho de Casagrande que corresponde a uma concha sobre um prato que conterà um sulco feito com o auxílio de um cinzel, submetido a repetidos golpes, quando o solo receber 25 golpes o limite de liquidez foi alcançado (NBR 6459/2016).
Limite de Plasticidade	Determinado pela porcentagem de umidade em que o solo pode fraturar quando se tenta moldá-lo em um cilindro de 3mm de diâmetro e de 10cm de comprimento, como indica a NBR 7180/2016. Este índice, representado por LP, reflete a transição do estado plástico e semissólido, que subtraído do LL define o índice de plasticidade (IP).

Fonte: Autor, 2020.

O IP determina o quão plástico é o material, quanto maior esse índice mais plástico será o solo, ou seja, mais argiloso (CAPUTO, 1996). Na Tabela 2 está apresentada a classificação desse parâmetro.

Tabela 2 – Classificação quanto ao IP.	
Índice de Plasticidade	
1<IP<7	Fracamente Plástico
7<IP<15	Medianamente Plástico
IP>15	Altamente Plástico

Fonte: Caputo, 1996.

2.1.2 Classificação dos solos

Como nem todos os solos possuem partículas visíveis a olho nu, devido à presença de grãos tão finos que não podem ser percebidos individualmente, foram criados sistemas de classificação que facilitam a determinação do material por meio das suas características (PINTO, 2011).

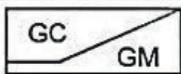
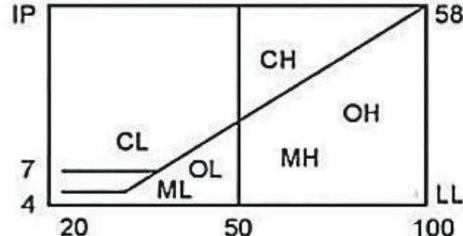
Cada classificação considera um aspecto diferente do solo, como a origem, a textura do material, a pedologia e os parâmetros geotécnicos. Porém segundo Caputo (1996), existem dois sistemas principais utilizados para a classificação dos solos: Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) adotado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e a classificação *Transportation Research Board* (TBR) determinada pela *American Association for State Highway and Transportation Officials* (AASHTO), antiga *Highway Research Board* (HBR), utilizada atualmente no sistema rodoviário.

O SUCS foi elaborado por Casagrande e fundamenta-se na identificação dos solos de acordo com o seu comportamento, sua textura e plasticidade (DNIT, 2006). Sem esquecer a porcentagem do solo fino, menor que 0,075mm presente na amostra (PINTO, 2011).

Ainda sobre esse sistema, Caputo (1996) menciona que os solos são identificados por um conjunto de letras e divididos em três categorias: grossos, quando grande parte dos grãos possuem diâmetros maiores que 0,075mm, representados pela letra G (pedregulho) ou S (areia); finos, compostos de 50% ou mais de materiais passantes na peneira N° 200 com os prefixos indicados pelas letras M (silte inorgânico) e C (argila inorgânica); e turfas, solos com alto teor orgânico em que é empregado o símbolo Pt.

Na Figura 1 é apresentado o esquema usado para a classificação do Sistema Unificado.

Figura 1 – Esquema de classificação do SUCS.

% P #200 < 50	G > S : G	% P #200 < 5	GW CNU > 4 e 1 < CC < 3
			GP CNU < 4 ou 1 > CC > 3
		% P #200 > 12	GC  GM
	5 < #200 < 12	GW-GC, GP-GM, etc.	
	S > G : S	% P #200 < 5	SW CNU > 6 e 1 < CC < 3
			SP CNU < 6 ou 1 > CC > 3
% P #200 > 12		SC  SM	
	5 < #200 < 12	SW-SC, SP-SC, etc.	
% P #200 > 50	C	CL	
		CH	
	M	ML	
		MH	
	O	OL	
		OH	

Fonte: Pinto, 2011.

Em contrapartida, a classificação TBR agrupa os solos em grupos e subgrupos correlacionando os resultados de alguns ensaios, tais como: granulometria, limite de liquidez e limite de plasticidade. Com o intuito de obter o índice de grupo (IG) que varia de 0 a 20 e de verificar a capacidade de sustentação do terreno (DNIT, 2006). Esse tipo de classificação divide o solo em granulares (tipos A1, A2, A3) e finos (A4, A5, A6 e A7), apresentada na Tabela 3.

Tabela 3 – Resumo das características da classificação TBR.

Classificação TBR	
A1	Bem graduado formado por pedregulho, areia e um ligante plástico ou não.
A2	Inclui todos os materiais com menos de 35% passados na peneira de N° 200.
A3	Formado por areia fina de praia ou de deserto, sem material siltoso ou argiloso.
A4	Solos siltsosos com presença ou não de areia e pouca estabilidade.
A5	Tem características semelhantes ao A4, porém seu LL > 41%.
A6	Os solos argilosos ou argilo-arenosos com grande contração.
A7	Semelhante ao A6, mas com o LL elevado e com uma grande variação de volume.

Fonte: DNIT (adaptado), 2006.

A Tabela 4 exibe um quadro de classificação dos solos segundo a classificação de acordo com o TBR.

Tabela 4 – Classificação dos Solos pelo TBR.

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira Nº 200							MATERIAIS SILTO - ARGILOSOS			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
	A - 1 - A	A - 1 - B		A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7				
Granulometria - % passando na peneira											
Nº 10	50 máx.										
Nº 40	30 máx.	30 máx.	51 min.								
Nº 200	15 máx.	25 máx.	10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira Nº 40:											
Limite de Liquidez				40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.	40 máx.	41 min.
Índice de Plasticidade	6 máx.	6 máx.	NP	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.	10 máx.	10 máx.	11 min.	11 min.*
Índice de Grupo	0	0	0	0	0	4 máx.	4 máx.	8 máx.	12 máx.	16 máx.	20 máx.
Materiais constituintes	Fragmentos de pedras, pedregulho fino e areia		Pedregulho ou areias siltosas ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos		
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

* O IP do grupo A - 7 - 5 é igual ou menor do que o LL menos 30.

Fonte: DNIT, 2006.

Além desses sistemas, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) estabelece por meio da NBR 6502/2016 as faixas dos solos de acordo com o diâmetro das partículas: pedregulho, varia entre 60mm e 2,0mm; areia, 2,0mm e 0,06mm; silte, 0,06mm e 0,002mm; e argila que possui diâmetros menores que 0,002mm.

2.2 PAVIMENTAÇÃO

Segundo a NBR 7207/2014, pavimento é uma estrutura sobre uma superfície que sofreu terraplenagem formada por várias camadas, com finalidade técnica e econômica de resistir aos esforços horizontais que nela atuam, melhorar as condições de rolamento, o conforto e segurança. De modo que ocorra a preservação das camadas inferiores das intempéries climáticas e das ações submetidas durante sua atividade, sem que sejam apresentadas deteriorações prematuramente (BALBO, 2007).

Quando se pretende usar determinado solo como material de uma camada de pavimento, este elemento deve possuir as propriedades físicas e químicas para ser estável em campo, por

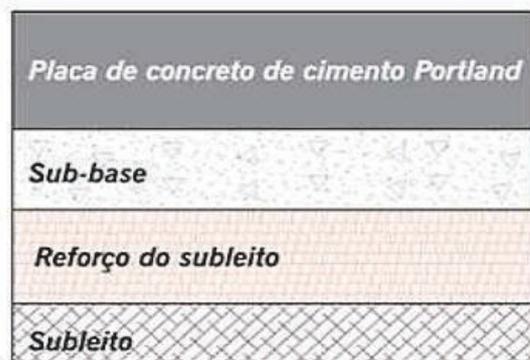
isso devem ser feitos estudos prévios de qualidade e controle rigoroso durante a execução da obra (SENÇO, 2008).

2.2.1 Classificação dos Pavimentos

Para Pinto e Preusseler (2010), existem três tipos de pavimentos: os rígidos, semirrígidos e flexíveis. O primeiro possui o revestimento formado por placas de concreto de cimento Portland e podem ser armadas ou não por barras de aço, com um módulo de elasticidade mais elevado e capazes de distribuir melhor as cargas (DNIT, 2006).

Os pavimentos rígidos são constituídos por camadas que trabalham à tração e seu dimensionamento é feito considerando as propriedades resistentes das placas de concreto, as quais podem ser apoiadas na sub-base (BERNUCCI *et al.*, 2008). A Figura 2 apresenta como é a estrutura dos pavimentos rígidos.

Figura 2 – Estrutura do Pavimento Rígido.



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008).

A camada superior constituída do cimento Portland possui uma eleva rigidez em relação às camadas inferiores, dessa forma absorvem praticamente todas as tensões geradas pelos carregamentos aplicados ao pavimento (DNIT, 2006).

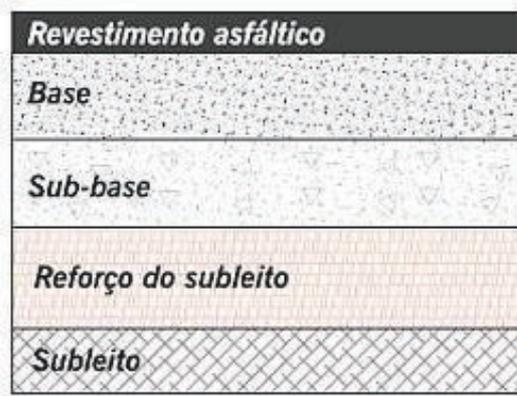
Os semirrígidos têm uma camada de materiais granulares constituídas com aglutinantes e seguidas por uma camada de agregados estabilizantes como o cimento e a cal (SENÇO, 2008). De acordo com Balbo (2007), esse tipo de pavimento pode possuir uma estrutura híbrida ou mista em que a base é composta por uma mistura betuminosa e a sub-base por um material tratado com cimento, ou ainda uma estrutura sanduíche, com uma base granular não tratada e sub-base de cimento.

Já os pavimentos constituídos por revestimento betuminoso de pequena espessura que não trabalham à tração são os flexíveis (MARQUES, 2006). Estes, possuem uma grande flexibilidade fazendo com que as cargas se distribuam de forma semelhante entre cada camada

(BERNUCCI *et al.*, 2008). São muito utilizados por causa das suas vantagens econômicas e suas propriedades que provocam uma melhor adaptação do pavimento ao recalque do solo (RODRIGUES, 2017).

A Figura 3 demonstra como são distribuídas as camadas que formam um pavimento do tipo flexível.

Figura 3 – Estrutura do Pavimento Flexível.



Fonte: BERNUCCI *et al.* (2008).

2.2.2 Estruturas dos Pavimentos

Bernucci *et al.* (2008) afirma que os pavimentos são múltiplas camadas sobre uma fundação chamada de subleito, em que todo o comportamento da estrutura depende da espessura e as características de cada uma das camadas.

Segundo o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), o pavimento flexível é constituído pelas seguintes camadas, em ordem de execução: subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. Porém, nem todos os casos possuem a necessidade de uma camada de sub-base ou de um reforço de subleito, dependendo do volume de tráfego e dos materiais disponíveis.

O subleito é composto por um material consolidado que deve ser regularizado com o objetivo de corrigir falhas na superfície, cuidando do seu acabamento e da sua compactação (PINTO; PREUSSLER, 2010).

O reforço de subleito deve ser constituído de materiais com capacidades melhores que as disposições do anterior, usado para diminuir a espessura elevada da camada de sub-base (DNIT 138/2010). A sub-base se torna necessária quando há uma má qualidade do subleito quando submetido às cargas dos veículos (PINTO; PREUSSLER, 2010).

A base, proporciona o suporte estrutural ao pavimento, promovendo resistência à fadiga e rigidez (PINTO; PREUSSLER, 2010). Esta, pode ser composta por misturas de solos e

agregados, brita graduada, e ainda de algum solo estabilizado quimicamente com ligante hidráulico ou asfáltico (BALBO, 2007). Essa camada não é utilizada no pavimento do tipo rígido (BERNUCCI et al., 2008).

E por último o revestimento ou capa de rolamento, a camada que recebe a ação dos veículos e deve oferecer conforto, segurança e durabilidade à rodovia (MARQUES, 2006). De modo que, esta deve ser impermeável e resistente aos esforços solicitantes exercidos pelo contato pneu-pavimento, que variam de acordo com a carga e a velocidade do veículo (BERNUCCI et al., 2008).

2.3 CARACTERÍSTICAS DOS SOLOS DAS RODOVIAS

De acordo com o Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), para a execução dos estudos em solos com fins rodoviários, são necessários os seguintes ensaios: granulometria, limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP), massa específica aparente, compactação, expansibilidade e Índice de Suporte Califórnia (CBR).

2.3.1 Compactação

É um processo que reduz a densidade do solo e depende da umidade do solo, essa observação serviu para a construção de toda a técnica empregada na estrutura das rodovias (SENÇO, 2008).

A compactação utiliza meios mecânicos para a expulsão de vazios na massa do solo, de modo que o mesmo consiga suportar cargas sem que aconteça mais compressão imediata (IKEAGWUANI; NWONU, 2019). Quanto menor for o teor de umidade, mais atrito será gerado entre as partículas, o que conseqüentemente não reduz o número de vazios, fazendo com o solo não obtenha as características necessárias para receber determinadas cargas (PINTO, 2011).

O ensaio parte do princípio que há um ponto ideal entre a relação água, ar e solo, determinado por um certo teor de umidade e uma densidade máxima que são modificados de acordo com a energia submetida ao solo. O teor de umidade que está associado à maior massa específica, é denominado de ótimo (h_{ot}), este é o que torna o solo mais trabalhável (CAPUTO, 1996).

A relação entre a massa específica e a umidade gera a curva de compactação, apresentada na Figura 4.

Figura 4 - Curva de Compactação.

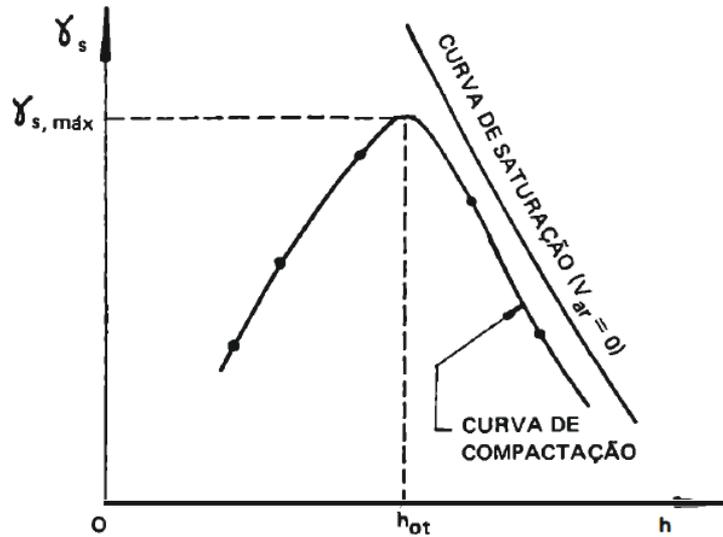


Fig. 12-1

Fonte: Caputo (1996).

Mesmo com esse procedimento, não é possível expulsar todo o ar existente nos vazios do solo, logo a curva de compactação não pode atingir a curva de saturação, que é quando teoricamente o índice de vazios preenchidos com ar é zero (CAPUTO, 1996).

De acordo com a NBR 7182/2016, o ensaio pode ser realizado em três níveis de energia (normal, intermediária e modificada) que são diferenciados pelo molde, o soquete, o número de camadas e a quantidade de golpes. A escolha da energia depende do material analisado e da camada de utilização, quanto maior for a solicitação de cargas geradas pelo tráfego maior será a energia de compactação que deverá ser utilizada (PINTO, 2011).

Na Tabela 5 está indicada as características pertencentes à cada energia de compactação especificada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

Tabela 5 – Energias de Compactação.

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia		
		Normal	Intermediária	Modificada
Pequeno	Soquete	Pequeno	Grande	Grande
	Número de camadas	3	3	5
	Número de golpes por camada	26	21	27
Grande	Soquete	Grande	Grande	Grande
	Número de camadas	5	5	5
	Número de golpes por camada	12	26	55
	Altura do disco espaçador (mm)	63,5	63,5	63,5

Fonte: NBR 7182/2016.

O corpo do aterro do subleito deve-se usar a energia normal, porém na parte final desta camada é a energia intermediária; no reforço do subleito e na sub-base recomenda-se a intermediária ou modificada; e a base deve ser realizada apenas com a energia modificada, já que este tipo oferece uma maior intensidade no solo (DNIT 108/2009; 138/2010; 139/2010; 141/2010).

2.3.2 CBR

O ensaio *California Bearing Ratio* (CBR), traduzido com Índice de Suporte Califórnia (ISC), é um procedimento que avalia a resistência de um solo saturado à penetração de um pistão de seção transversal de 3 polegadas com uma velocidade controlada de 0,05 pol/min (Fortes, 2015). O valor é expresso em porcentagem, definido pela relação entre o carregamento do pistão sobre um solo normal e o carregamento sobre uma pista britada (NBR 7182/2016).

Utilizado na avaliação do comportamento das camadas que formam o pavimento e o controle tecnológico dos materiais empregados no subleito (PINTO; PREUSSLER, 2010). A partir desse ensaio pode ser obtida a expansão do solo quando exposto a presença de água, verificada depois que a amostra fica embebida por 96 horas.

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) relata as características dos solos que devem ser empregadas em cada camada que forma a estrutura do pavimento, como é mostrada na Tabela 6.

Tabela 6 – Características das camadas do pavimento.

Camadas	CBR	Expansão
Subleito	$\geq 2\%$	$\leq 2\%$
Reforço do subleito	$2\% \leq \text{CBR} \leq 20\%$	$\leq 1\%$
Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
Base	$\geq 80\%$	$\leq 0,5\%$.

Fonte: DNIT, 2006.

2.4 ESTABILIZAÇÃO DOS SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO

A pavimentação depende das propriedades do solo de cada camada que a compõe, porém quando o material não possui as características geotécnicas exigidas são realizados descartes durante a execução da obra. Seria mais econômico e ecológico aproveitar os solos do local, ao invés de substituí-los, por isso surgiram vários métodos de correção, como a estabilização (SARTORI, 2015).

De acordo com Maier (2010), esse processo faz com que os solos de baixa qualidade suportem as cargas necessárias para sua função. Podendo ser feito por meio da adição de certos materiais, como os agregados, com o intuito de conferir força mecânica, ou ainda pode ser necessária a inserção de substâncias químicas, um estabilizante, mas em ambos os casos podem ser geradas vantagens técnicas e econômicas (YU et al., 2020).

O melhoramento do solo por meio da estabilização, só pode acontecer depois da análise das propriedades do solo natural e da avaliação dos processos envolvidos, como custo, melhorias requeridas e prazo (OLIVEIRA, 1994).

2.4.1 Tipos de Estabilização

Existem vários tipos de estabilização, porém de acordo com Batista (1976), as mais utilizadas são realizadas por meio da compactação (mecânica), da adição de estabilizantes (química) ou da correção da granulometria. A escolha da técnica deve ser baseada na economia e ainda na finalidade.

A estabilização mecânica de um solo é feita por meio da adição de uma energia externa compactadora aplicada ao solo, que provoca a redução de vazios e reduz a percolação da água, principal agente erosivo (CAPUTO, 1996). Dessa forma o solo adquire determinadas características que não deixam que ocorram deformações excessivas ou ruptura no material compactado (SOLIZ, 2007).

Por outro lado, a correção granulométrica é feita por meio da combinação de um ou mais solos, a fim de obter mais homogeneidade, com boa graduação e com propriedades aceitáveis para o uso na engenharia (SANTOS *et al.*, 1995). Isso é causado, pois esse processo facilita o contato entre os grãos maiores com as menores partículas, o que gera um aumento da resistência mecânica do solo, garantindo assim sua estabilidade (VILBOR, 1982).

Os mecanismos supracitados anteriormente não são suficientes para a obtenção das propriedades adequadas do solo em alguns casos, dessa forma passa-se a necessidade da utilização de outros métodos (MEDINA *et al.* 2005; SANTOS, 2012). Uma solução é a estabilização química que altera a estrutura do solo, com o propósito de obter uma maior resistência, menor permeabilidade e compressibilidade em relação ao solo natural (MAKUSA, 2013).

Dentre os aditivos químicos estabilizantes que se consolidaram no mercado e reagem ao solo, estão os ligantes hidráulicos (cimento Portland e a cal) e materiais betuminosos (MEDINA; MOTA 2005).

2.4.2 Estabilização com a cal hidratada

A cal hidratada é um dos materiais mais utilizados no processo de estabilização, por ser extremamente fino, leve e se adaptar fácil ao solo, fazendo com que o mesmo se torne impermeável e aplicável nas camadas de pavimentos urbanos e rodoviários.

De acordo com Guimarães (1998), esse material é formado basicamente de hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$) e hidróxido de magnésio ($Mg(OH)_2$). Devido essa composição, o solo quando é misturado com a cal provoca a formação de muitas reações pozolânicas, geradas pela sílica e a alumina do solo que ao reagirem resultam em vários agentes cimentantes, considerados o maior motivo para que ocorra o aumento da resistência mecânica do solo depois da adição (OLIVEIRA *et al.*, 2009).

A mistura de cal com o solo ainda altera o pH do mesmo transformando-o em um meio alcalino, provoca a floculação e a aglomeração depois do contato com a água, que associadas às trocas iônicas entre as argilas presentes no solo ocasionam mudanças na textura (SILVA, 2016; MALLELA *et. al* 2004).

A estabilização com a cal oferece modificações nas propriedades físicas do solo, como a plasticidade, massa específica, trabalhabilidade, resistência, tensão-deformação e fadiga (LOVATO, 2004). Porém segundo Oliveira (2005), em casos de solos com características siltosas ou argilosas, a mistura nem sempre atinge as propriedades adequadas, mesmo a longo prazo.

As dosagens das misturas de sol-cal podem ser estabelecidas por diversos métodos, tais como o método do pH, o método do ICL, o método do *Lime Fiction Point* e o método de Thompson.

O método pH, consiste na determinação do teor mínimo de cal que possua um pH de 12,4, com esse valor ocorre a solubilização da sílica e da alumina nas superfícies argilosas, deixando-as livres para reagirem com o cálcio (MEDEIROS, 2017).

O método ICL (*Initial Consumption of Lime*) é derivação do anterior, porém neste obtém-se o teor de cal necessário para que o pH possua valor constante máximo. O LFP foi proposto por Nuñez (1991) e é fundamentado no limite de plasticidade, em que utiliza o LP

para definir o teor de cal máximo com o intuito de propiciar a mistura uma melhor trabalhabilidade sem provocar grandes mudanças de resistência (Dalla Rosa, 2009).

E por último o método Thompson (1966), este apresenta o teor de cal que ao ser adicionado ao solo apresenta um aumento na resistência de 345kPa quando estabilizado, este valor foi determinado depois de análises feitas pelo próprio autor quando a amostra é submetida a resistência de compressão simples no solo natural e no modificado com a cal depois de sofrer o processo de cura. Essa técnica foi adaptada por Ingles & Metcalf em 1972, na Tabela 7 está simplificada a previsão do teor de cal ao ser adicionada ao solo.

Tabela 7 – Previsão do teor de cal em função do tipo de solo.

Tipos de Solo	Teor de Cal para Modificação	Teor de Cal para Estabilização
Pedra finamente britada	2 a 4	Não recomendado
Pedregulho argiloso bem graduado	1 a 3	≥ 3
Areias	Não recomendado	Não recomendado
Argila arenosa	Não recomendado	≥ 5
Argila siltosa	1 a 3	2 a 4
Argilas	1 a 3	3 a 8
Solos orgânicos	Não recomendado	Não recomendado

Fonte: Dalla Rosa, 2009.

2.4.3 Novas alternativas para estabilização

Há diversas análises sendo realizadas buscando novas adições estabilizantes, visando principalmente utilizar materiais da construção civil que seriam descartados e otimizar o solo. O uso de uma matriz pétreia composta de pó de pedra unida ao cimento Portland, é um exemplo, nesse caso os corpos de prova obtiveram ótimos resultados nas suas propriedades mecânicas depois do tempo de cura (Silva *et al.*, 2018).

Já Carneiro *et al.* (2001) utilizou os resíduos de construção e demolição em bases e sub-bases de pavimentos e os resultados indicaram melhorias significativas no desempenho do material podendo proporcionar vantagens nas questões ambientais e sociais.

Germano e Arns (2018) adicionou os resíduos do polimento do porcelanato (RPP) ao solo natural para que fosse verificada a capacidade de suporte e de expansão desse tipo de

mistura, com os teores de 3%, 6% e 9% de RPP, por meio deles foi comprovado que quanto maior a adição do rejeito maior é o CBR encontrado.

Silva (2016) também utilizou o RPP, porém em dosagens diferentes, 5%, 10%, 15%, 20% e 40% em relação à massa seca do solo, nessa pesquisa percebeu-se uma variação de comportamento quando analisado o índice de suporte das amostras e identificou-se que o teor de 5% do resíduo é a adição que apresenta as condições apropriadas para o uso na sub-base de pavimentos flexíveis.

Ainda estudando a viabilidade de reutilização de produtos oriundos da indústria Cerâmica, Antonio *et al.* (2018) incorporou ao solo os resíduos de retificação cerâmica (RRC) unidos com a cal, dentre todas as adições as misturas com 1% de cal e 10%, 20%, 30% e 40% de RRC demonstraram estar dentro dos parâmetros estabelecidos pelas normas rodoviárias brasileiras para a utilização dos materiais em subleitos, visto que a expansão foi menor que 2% e o ISC maior que 2%.

Do mesmo modo podem ser inseridas determinadas substâncias a fim de gerar economia, tais como a utilização de polímeros do tipo PVC e HDPE, no estudo realizado por Bekkouche *et al.* (2016), para garantir as propriedades adequadas e o período ideal de vida de toda a estrutura do pavimento. Moraes (2018) também utilizou o polímero, na tentativa de estabilização de um solo expansivo e percebeu que houve um aumento significativo no ISC, cerca de 500% e uma redução de cerca de 70% na expansão, em relação ao solo natural.

Du (2016) empregou os resíduos de carbonetos de cálcio (CCR) como agente estabilizante do subleito, os resultados indicaram que após a compactação 94% dos espaços vazios foram preenchidos e que o CBR aumentou. O CCR também foi inserido em solos expansivos junto às cinzas de cascas de arroz, na pesquisa de Liu (2019), onde percebeu-se um aumento no teor da ligação, tempo de cura e no teor inicial de água, e ainda obteve-se resultados satisfatórios quanto a estabilização, uma vez que houveram melhorias na resistência.

As cinzas de cascas de arroz (CCA) também foram utilizadas por Behak e Nuñez (2008), porém com a adição de cal em um solo arenoso, perceberam que esses materiais podem ser potencialmente usados na construção de camadas de pavimento de baixo a médio volume de tráfego.

A pesquisa realizada por Santos (2010) utilizou resíduos oleosos provenientes da exploração e produção de petróleo para a estabilização de bases e sub-bases, e notou que nas misturas de 4%; 5,5%; 7%; 8,5% e 10% geraram resultados significativos no CBR e essas adições podem ser utilizadas na sub-base.

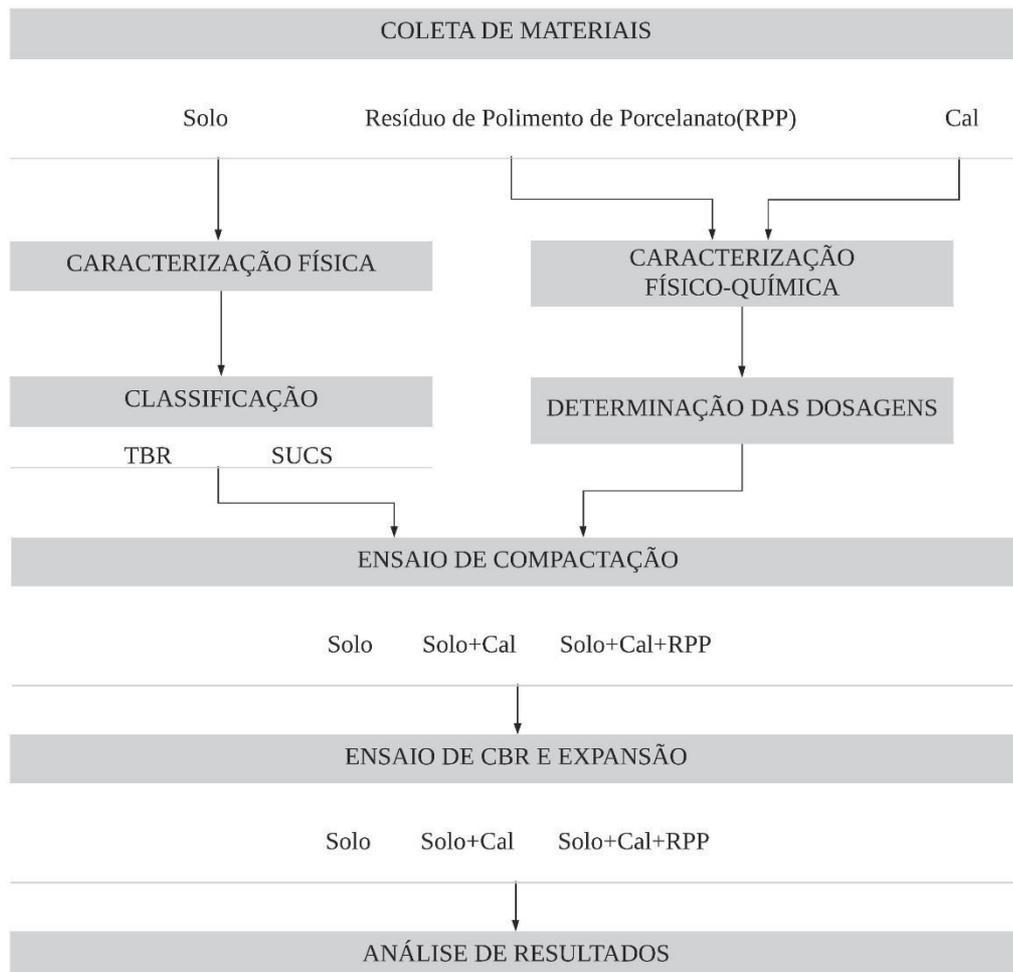
3 MATERIAIS E METODOLOGIA APLICADA

O estudo apresenta-se de forma experimental com a abordagem quantitativa dos dados, para alcançar os mesmos fez-se necessário investigar isoladamente cada material, de acordo com as normas vigentes. De modo que, sejam realizadas a determinação das dosagens e posteriormente avaliados os comportamentos das composições por meio da realização de ensaios mecânicos: compactação, expansão e CBR.

Estes procedimentos práticos foram desenvolvidos no Laboratório de Geotecnia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba-*Campus* Cajazeiras, no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Faculdade Santa Maria e no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Universidade Federal da Paraíba-*Campus* João Pessoa.

A Figura 5 abaixo apresenta o fluxograma que resume as atividades executadas durante o estudo.

Figura 5 – Fluxograma resumo com as atividades desenvolvidas.



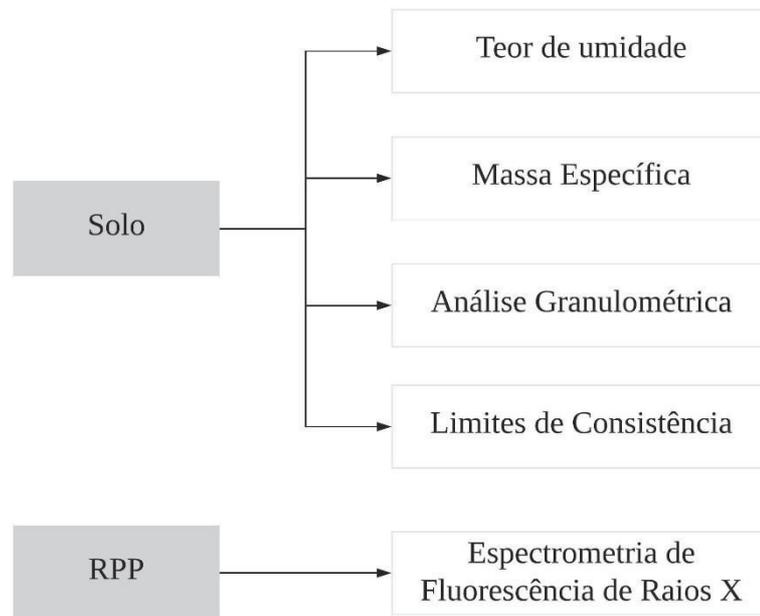
Fonte: Autor, 2020.

3.1 MATERIAIS

A fim de alcançar os objetivos da pesquisa foi necessário realizar a caracterização do solo e do resíduo do polimento do porcelanato (RPP), de modo que fossem avaliadas as suas propriedades, suas origens, o processo de coleta e a forma que estes materiais foram armazenados.

Abaixo na Figura 6 são apresentados os procedimentos executados durante a análise das características dos materiais.

Figura 6 – Fluxograma dos ensaios realizados para determinar as propriedades dos materiais.



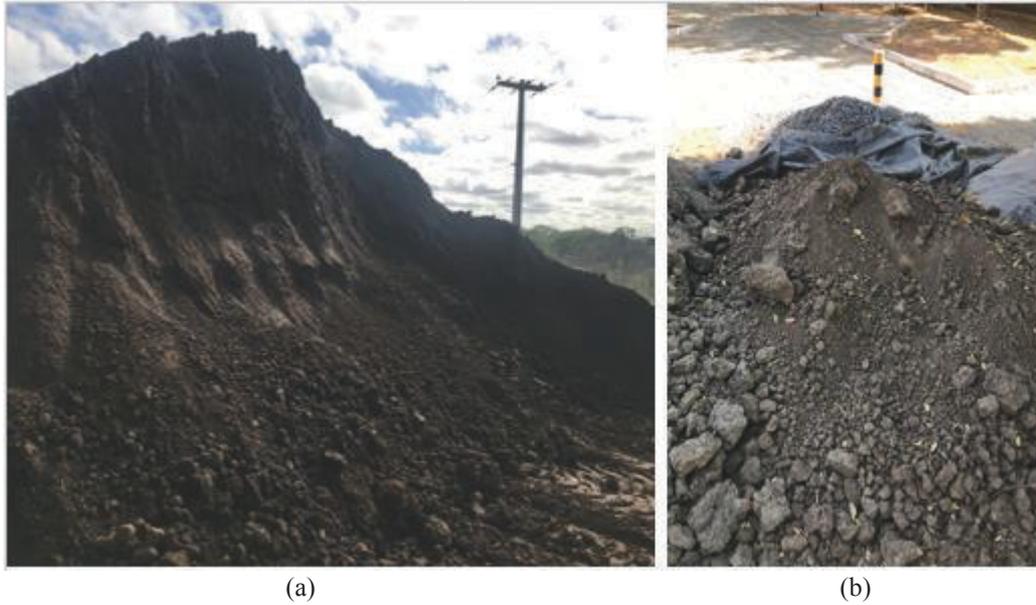
Fonte: Autor, 2020.

3.1.1 Solo

O solo foi coletado na Fábrica Irmãos Rolim Cerâmica, localizada no km 17,2 da rodovia estadual PB – 393 na zona rural do município de São João do Rio do Peixe (Figura 7a).

A retirada do material foi realizada no pátio de armazenamento da própria empresa e com o auxílio de uma caçamba o solo foi levado para o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba (IFPB), no *Campus* de Cajazeiras, como mostra a Figura 7b.

Figura 7 – Solo natural: a) solo no pátio da cerâmica; b) solo depositado no IFPB.



Fonte: Autor, 2020.

3.1.2 Cal hidratada

O presente estudo optou por utilizar a cal hidratada comercializada na região, da CALMISA MINERAÇÃO DE CAL LTDA.

3.1.3 Resíduo do polimento do porcelanato

Os resíduos foram coletados durante o processo de polimento das peças de porcelanato, ainda na forma de lama, na Cerâmica Elizabeth Porcelanato localizada em João Pessoa – PB. Como o processo necessita de uma capacitação na área e a própria empresa não permite que nenhum visitante tenha contato com o material, todo o processo foi feito pelo operador da fábrica.

O Grupo estudado percebeu que havia muita perda de material durante esse processo, por isso ele vem desenvolvendo técnicas para realizar da melhor forma possível a inserção desse tipo de resíduo nos cimentos que a própria marca produz, em outro setor. De acordo com o engenheiro responsável pela Elizabeth Porcelanatos foi gerada uma redução na perda de material e nos custos, e ainda foi percebida uma melhoria na qualidade dos cimentos com a inserção desses resíduos.

3.2 METODOLOGIA

A estrutura desse trabalho foi dividida e executada em três etapas. Na primeira, foram realizados os ensaios de caracterização do solo seguindo as especificações da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), do Sistema Unificado de Classificação (SUCS) e da *Transportation Research Board* (TBR) com o objetivo de classificar o material e obter as propriedades necessárias para os próximos passos.

Para a segunda etapa utilizou-se a classificação do solo para verificar em qual critério do método de Thompson o material se encaixa. Em seguida, foram realizados os ensaios de plasticidade com o objetivo de alcançar o valor esperado pelo critério do *Lime Fiction Point* (LFP), para que assim fosse possível determinar a percentagem adequada de cal para o solo.

Por fim, foram definidas as umidades ótimas com o intuito de determinar a capacidade resistente à penetração para o solo, a mistura com a cal e as proporções junto com o RPP, definidas por meio de uma revisão bibliográfica. As adições de 3%, 6% e 9% do resíduo incorporado ao solo, que geraram mudanças satisfatórias no CBR na pesquisa de Germano e Arns (2018), foram utilizadas como parâmetros para determinação das dosagens analisadas no presente trabalho. Definiram-se então, as adições de 6%, 9% e 12% do material, a fim de verificar se a tendência de melhora do solo continua crescente, com o aumento do percentual de material adicionado.

3.2.1 Ensaios de caracterização do solo

Para alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa fez-se necessário seguir as recomendações sugeridas pela ABNT, fundamentadas no SUCS e na classificação TBR. Os procedimentos físicos e a definição da umidade ótima foram realizados no Laboratório de Geotecnia do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba, *Campus Cajazeiras*.

Seguindo a NBR 6457/2016, realizou-se a coleta do solo e depois submeteu o mesmo ao ar livre para secagem até atingir a umidade higroscópica, posteriormente foi retirada algumas impurezas e matérias orgânicas. Logo após, foi feito o destorroamento com o almofariz e a mão de gral (Figura 8a), com o intuito de desfazer os torrões e tornar a amostra mais uniforme, em seguida executou-se o quarteamento para que a amostra utilizada nos ensaios fosse mais representativa (Figura 8b).

Figura 8 – Preparação das amostras para os ensaios de caracterização: a) destorroamento com a mão de gral e o almofariz; b) quarteamento da amostra.



Fonte: Autor, 2020.

3.2.1.1 Teor de umidade

Depois de possuir a amostragem do solo foi verificado o teor de umidade do mesmo, processo este realizado nesse caso em uma estufa a aproximadamente 105 °C durante 24 horas, para essa análise foram separadas 3 amostras (Figura 9) e em seguida encontradas as massas do solo úmido, solo seco e da água existentes em cada uma.

Figura 9 – Amostras utilizadas no ensaio de teor de umidade.

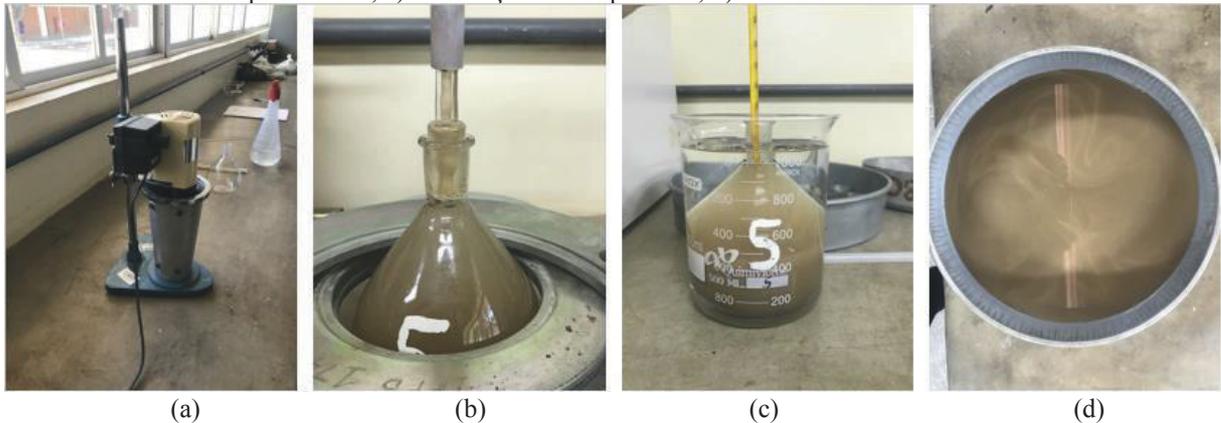


Fonte: Autor, 2020.

3.2.1.2 Massa Específica

Nesse ensaio, adicionou-se água destilada ao solo e em seguida o levou para o dispersor de partículas (Figura 10a), passados 15 minutos a mistura foi colocada no picnômetro cuidadosamente, sem demora foi acrescentada água até a metade e aplicou na bomba à vácuo, com o intuito de retirar todo o ar existente entre as partículas do solo (Figura 10b). Logo após, aumentou-se a quantidade de água até a borda e o procedimento foi repetido, posteriormente verificou-se as variações de temperatura e da massa do picnômetro com a mistura (Figura 10c). Depois das repetições desejadas, a mistura foi posta em uma cápsula e levada à estufa (Figura 10d), para que assim obtida a massa do solo seco.

Figura 10 – Determinação da massa específica: a) amostra no aparelho dispersor; b) aplicação da bomba à vácuo no picnômetro; c) verificação da temperatura; d) a mistura antes da estufa.



Fonte: Autor, 2020.

3.2.1.3 Granulometria

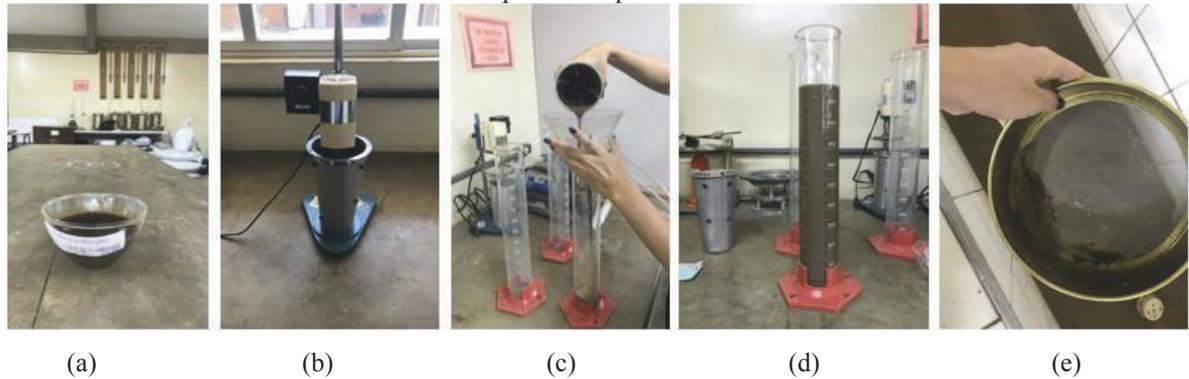
A análise granulométrica foi realizada por meio do peneiramento grosso (Figura 11) e fino, este último executado com a massa retida na peneira depois do ensaio de sedimentação, que tem como finalidade provocar a dissociação das partículas que ainda estavam unidas, processo esse feito com o auxílio de um defloculante (Figura 12a, b, c e d). Diante desses processos, foi possível realizar a curva de distribuição granulométrica que caracteriza o tamanho das partículas do solo e as quantifica.

Figura 11 – Ensaio de granulometria por peneiramento com o auxílio do agitador de peneiras.



Fonte: Autor, 2020.

Figura 12 – Ensaio de sedimentação: a) amostra com o defloculante; b) amostra no aparelho dispersor; c) transferência da amostra para a proveta; d) solução na proveta para que sejam realizadas as leituras; e) lavagem da suspensão na peneira #200.



Fonte: Autor, 2020.

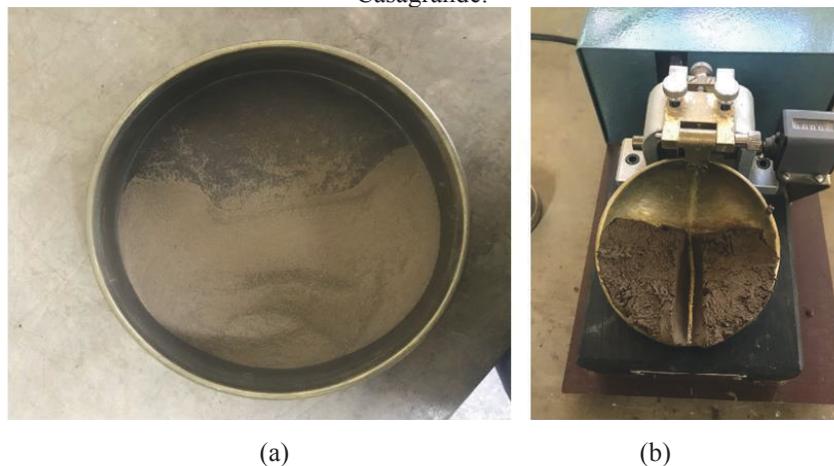
3.2.1.4 Limites de Consistência

O índice de consistência de um solo é obtido por meio dos ensaios dos limites de liquidez e plasticidade.

a) Limite de Liquidez (LL)

Para a realização desse ensaio foi necessário passar o solo na peneira de N°40 (Figura 13a) e com o auxílio do aparelho de Casagrande foram realizadas cinco amostras homogêneas quanto ao teor de umidade, onde as mesmas foram distribuídas de maneira uniforme em 2/3 do diâmetro concha do equipamento e com o cinzel foi feita uma ranhura no solo (Figura 13b). Posteriormente, observou-se a quantidade de golpes necessários para que a abertura feita se feche na extensão de 1 cm. Com os resultados obtidos traçou-se um gráfico em que o LL representa o teor de umidade correspondente a 25 golpes.

Figura 13 – Determinação do limite de liquidez: a) solo passante na peneira #40; b) material no aparelho de Casagrande.



Fonte: Autor, 2020.

b) Limite de Plasticidade (LP)

Este ensaio é feito por repetidos rolamentos sucessivos sob uma placa de vidro despolido até que o solo alcance o formato cilíndrico de 10cm de comprimento e aproximadamente 3mm de espessura (Figura 14), ao se fragmentar o cilindro deve-se ser imediatamente transferido para um recipiente para a determinação da umidade.

Depois de coletadas as amostras e colocadas na estufa, obtém-se a menor umidade em que pode se moldar o solo em forma de cilindro, esse valor corresponde ao limite de plasticidade do material.

Figura 14 – Ensaio de limite de plasticidade.



Fonte: Autor, 2020.

3.2.2 Determinação das propriedades dos aditivos

O resíduo do polimento do porcelanato, coletado na empresa foi seco em uma estufa a $105 \pm 5^\circ\text{C}$ e passou por desaglomeração manual com o auxílio da mão de gral e o almofariz. Na sequência, o RPP foi peneirado na malha com abertura de 0,42 mm, mesmo seu aspecto sendo pulverulento esse processo foi importante para retirar todos as partículas maiores que não tinham sido destorroadas por completo. Na Figura 15a pode-se observar o aspecto que material possuía antes, e depois (Figura 15b), do destorroamento.

Figura 15 – Resíduo do Polimento do Porcelanato: a) material coletado; b) material depois de destorroado.



Fonte: Autor, 2020.

Através da espectrometria de fluorescência de raios X é efetuada a caracterização química do RPP, ensaio esse desenvolvido no Laboratório de Materiais Cerâmicos da Instituto Federal da Paraíba (IFPB), *Campus* João Pessoa.

Já a cal hidratada não precisou de nenhum procedimento antes de serem realizados os ensaios, uma vez que esta já vem pronta para o uso da fábrica.

Figura 16 – Cal hidrata utilizada.



Fonte: Autor, 2020.

3.2.3 Definição da dosagem de cal

Essa etapa tem como objetivo identificar a quantidade de cal que fornecerá a resistência e a durabilidade adequada ao solo. Para que isso fosse possível, realizou-se uma relação entre duas técnicas, o método Thompson adaptado por Ingles & Metcalf e o método *Lime Fiction Point* (LFP) até chegar no valor utilizado neste trabalho.

Primeiramente foi verificada a classificação do solo usado, em seguida analisada Tabela 7 e feita a relação do tipo de material com os teores de cal estabelecidos para a estabilização. Com essas proporções foram realizados os ensaios de plasticidades imediatamente após a adição (Figura 17a e b), com 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas, 24 horas e 1 semana. Até que o limite de plasticidade máximo fosse alcançado, encontrando assim o LFP. Sabendo desse valor foi acrescentado posteriormente mais 4% de cal, como o método *Lime Fiction Point* recomenda.

Figura 17 – Definição da percentagem de cal: a) ensaio de limite de plasticidade; b) amostras na estufa.



(a)

(b)

Fonte: Autor, 2020.

3.2.4 Procedimentos de comportamento mecânico

Para obter a capacidade resistente do solo que avalia melhor se o mesmo está dentro dos padrões de utilização em uma obra de pavimentação foram realizados ensaios mecânicos, compactação e CBR, no Laboratório de Mecânica dos Solos e Pavimentação da Faculdade Santa Maria.

3.2.4.1 Compactação

Neste procedimento foi utilizada a energia de compactação normal seguindo as recomendações da norma ME-164/2013 do DNIT, com a análise para o solo puro e as modificações. Para a realização do ensaio escolheu-se não reutilizar o material, uma vez que ao adicionar a cal e o resíduo as propriedades do solo são modificadas imediatamente devido às características dos aditivos.

Após conhecida a umidade higroscópica inicial e realizados os processos de destorroamento, foi feita a uniformização da umidade da amostra e colocada em um cilindro pequeno onde o solo é disposto em três camadas, com a ajuda do soquete foram dados 26 golpes de forma homogênea e com alturas aproximadamente iguais. Esse método foi repetido no mínimo 5 vezes com diferentes teores de umidade, iniciando em 10%, acrescentando 2% a cada adição, até alcançar a umidade ótima.

Para cumprir os objetivos da pesquisa esse ensaio foi realizado no próprio solo natural, no solo adicionado apenas da cal e nas composições junto do RPP com 6%, 9% e 12%. A Figura 18 apresenta algumas etapas desse ensaio.

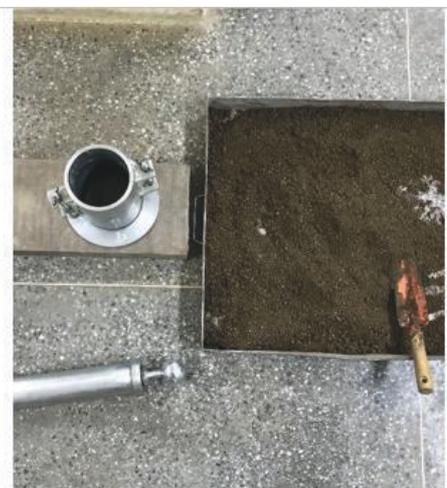
Figura 18 – Ensaio de compactação: a) amostra do solo; b) processo de uniformização da umidade; c) equipamentos utilizados para o ensaio; d) processo de compactação; e) rasamento do excesso; f) extração do corpo de prova.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Fonte: Autor, 2020.

3.2.4.2 Expansão e Califórnia Bearing Ratio (CBR)

Diante dos valores adquiridos de massa específica máxima e umidade ótima nos ensaios de compactação, foram moldados dois corpos-de-prova para cada dosagem e com esses valores foram observados seus comportamentos expansivos durante 96 horas quando inundados, realizando leituras a cada 24h no extensômetro graduado em 0,01mm.

Findo o período de 4 dias, os corpos de prova foram encaminhados para a prensa do CBR, onde os mesmos foram submetidos a um pistão com seção transversal de 3 pol² que penetra na amostra a uma velocidade de 0,05 pol/min, com o intuito de determinar a tensão necessária para que ocorra a penetração para cada amostra.

A realização desses ensaios seguiu as recomendações da ME-049/2016 do DNIT e da NBR 9895/2016, sendo os cálculos da expansão e do índice de suporte executados de acordo com última norma citada. Na Figura 19 estão apresentadas algumas etapas necessárias para a realização desses procedimentos.

Figura 19 – Etapas dos ensaios de expansão e CBR: a) imersão do corpo-de-prova; b) penetração do pistão.



(a)

(b)

Fonte: Autor, 2020.

4 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos ensaios realizados, cujas metodologias foram detalhadas no item 3.2, serão apresentados nessa seção. Com as respectivas análises realizadas do solo, dos aditivos e das suas respectivas composições.

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

As características das amostras e suas classificações foram obtidas por meio dos ensaios de: teor de umidade, massa específica, granulometria, limites de consistência e difração de raios X. Conforme são descritas nos itens seguintes por meio das tabelas e gráficos experimentais.

4.1.1 Solo

Inicialmente foram realizados ensaios de caracterização física do solo sem qualquer adição. Respeitando as normativas vigentes para cada procedimento foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 – Índices Físicos do Solo.

Propriedades	Valores Médios
Teor de umidade inicial (h)	2,6%
Massa Específica (ρ)	2,044 g/cm ³
Limite de Liquidez (LL)	24,8%
Limite de Plasticidade (LP)	18,05%
Índice de Plasticidade (IP)	6,75%

Fonte: Autor, 2020.

Usando como referência os parâmetros adotados pelo Caputo (1996) para o índice de plasticidade, considera-se esse solo como fracamente plástico, já que o mesmo possui um IP menor que 7.

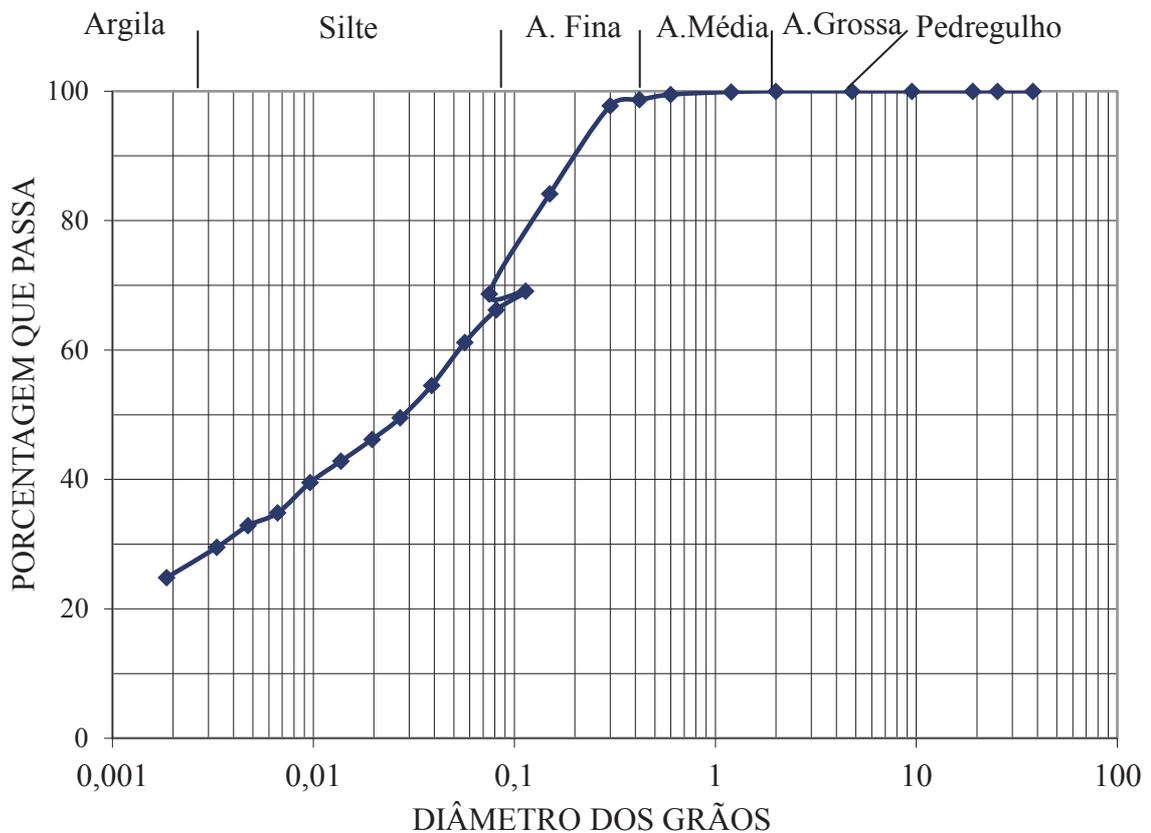
A análise granulométrica da amostra foi realizada por meio do peneiramento e por sedimentação seguindo as recomendações da NBR 6502/2016, desse modo o solo apontou as seguintes composições: 0,0% de pedregulho (acima de 2mm), 31,3% de areia (de 0,06 a 2mm), 39,2% de silte (de 0,02 a 0,06mm) e 29,5% de argila (abaixo de 0,02mm). Assim, verifica-se que o material é predominante fino, pois 68,7% é passante na peneira de N° 200. Como mostra a Tabela 9.

Tabela 9 – Composição Granulométrica (%).

Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
29,5	39,2	30,0	1,3	0,0	0,0

Fonte: Autor, 2020.

Por meio dos dados obtidos nos ensaios foi possível determinar a curva granulométrica para essa amostra de solo natural, como mostra a Figura 20.

Figura 20 – Curva granulométrica do solo.

Através desses resultados, realizou-se a classificação do solo apresentada na Tabela 10, de acordo com os sistemas TRB e SUCS. Posto que, a classificação TBR considera a porcentagem de material passante pelas peneiras de N°200, N°10 e N°40, além dos resultados obtidos para o os índices de Atterberg. E a classificação SUCS considera a peneira N°200 bem como o IP e o LL.

Tabela 10 – Classificação do Solo Natural.

Material	TBR	SUCS
Solo	A-4	ML

Fonte: Autor, 2020.

Assim, o solo natural apresenta-se como um A-4 conforme a classificação TBR determina, isto é um silte não plástico ou moderadamente plástico, podendo também ser uma mistura entre o silte, areia e pedregulho. E para o SUCS, o solo é um silte argiloso inorgânico com baixa plasticidade ou uma areia fina siltosa (ML). Conferindo essas classificações no Manual de Pavimentação (DNIT, 2006), esse solo apresenta um comportamento fraco a pobre para utilização em qualquer camada de um pavimento, mesmo no subleito.

4.1.2 RPP

Pelo ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX), obteve-se a composição química do resíduo do polimento do porcelanato, que se encontra Tabela 11.

Tabela 11 – Composição química do RPP.

Elemento	Teor (%)
SiO₂	71,122
Al₂O₃	10,131
CaO	7,389
K₂O	7,153
Fe₂O₃	2,318
TiO ₂	0,708
ZnO	0,561
MnO	0,200
ZrO ₂	0,136
CuO	0,086
RbO ₂	0,066

Cr₂O₅	0,036
SrO	0,033
V₂O₅	0,031
NiO	0,015
Y₂O₃	0,009
NbO	0,007

Fonte: Autor, 2020.

Analisando a tabela acima, conclui-se que o RPP é composto predominantemente por sílica e alumina, com percentuais de participação de 71,122% e 10,131%, respectivamente. Esse resultado constata que, conforme a NBR 12653/2014, o resíduo atende a um dos itens que caracteriza um material pozolânico, uma vez que a união entre $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe}_2\text{O}_3$ é superior a 70% (83,753%). Essa característica produz, normalmente, a melhoria da resistência mecânica (CARMO; PORTELLA, 2008).

4.2 DEFINIÇÃO DA PORCENTAGEM DA CAL

Como o solo encontrado nos ensaios de caracterização foi do tipo silte-argiloso, foram analisadas as adições de 2 a 4% de cal no solo, observando qual possui o maior valor de plasticidade. Para cada teor foram utilizadas 3 amostras e assim realizadas as 7 verificações, como o método exige, conforme o intervalo de tempo, dessa forma esse ensaio foi realizado 315 vezes para a obtenção dos resultados apresentados abaixo.

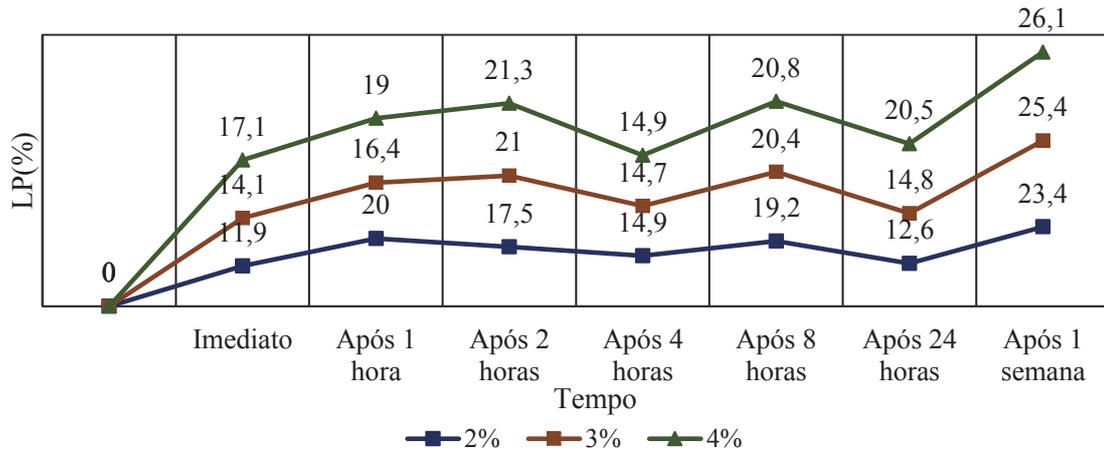
Dos valores encontrados realizou-se a média aritmética e com esses números foi possível determinar o teor de cal. Na Tabela 12 são apresentados os limites de plasticidades médios para teor de cal no intervalo de tempo desejado.

Tabela 12 –Determinação do LFP.

%	Média do LP (%)						
	Cal Imediato	Após 1 hora	Após 2 horas	Após 4 horas	Após 8 horas	Após 24 horas	Após 1 semana
2	17,1	19	21,3	14,9	20,8	12,6	23,4
3	14,1	16,4	21	14,7	20,4	14,8	25,4
4	11,9	20	17,5	14,9	19,2	20,5	26,1

Fonte: Autor, 2020.

Pelo o método de dosagem *Lime Fiction Point*, os maiores LP foram encontrados para o teor de 4% em quase todos os intervalos, com exceção dos ensaios realizados após 2 e 8 horas. Como é possível visualizar melhor na Figura 21.

Figura 21 – Gráfico de determinação do LFP.

Fonte: Autor, 2020.

Diante disso, nos demais procedimentos realizados nesse trabalho será acrescentado mais 4% ao teor de LFP, como a metodologia determina, obtendo assim uma adição de 8%.

4.3 EFEITOS FÍSICOS DAS COMPOSIÇÕES

Após a aplicação dos aditivos foram realizados os mesmos ensaios físicos do solo natural nas composições, os resultados destes estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 – Índices Físicos das Composições.

Composições	ρ (g/cm ³)	LL (%)	LP (%)	IP (%)
Solo + Cal	2,045	23,1	19,62	3,48
Solo + Cal + 6% de RPP	2,047	23,54	21,51	2,02
Solo + Cal + 9% de RPP	2,049	23,23	22,00	1,25
Solo + Cal + 12% de RPP	2,048	23,09	21,74	1,34

Fonte: Autor, 2020.

Com esses valores percebe-se um aumento na massa específica em todas as adições, até mesmo na adição só da cal hidratada, o que está associado ao tipo de solo estudado que possui baixa plasticidade, o Manual de Pavimentação do DNIT (2006) relaciona a queda desse parâmetro às características argilosas do solo.

Quanto as adições com o RPP, pode-se explicar os acréscimos da ρ às dimensões dos grãos que são menores, dessa forma pode-se afirmar que as composições geraram misturas mais entrosadas, sugerindo um melhoramento na granulometria.

Em relação aos índices de plasticidade das composições houveram diminuições, atrelado a isso aconteceram aumentos nos limites de plasticidade, estes resultados estão coerentes com as observações de Guimarães (1998). O autor relaciona essas mudanças físicas

com a troca iônica que acontece imediatamente após o contato que gera o aumento do limite de plasticidade.

Apenas na adição de 6% do RPP houve um aumento do LL, o que torna o solo mais suscetível a recalque quando submetido a esforços. Já nas adições de 9% e 12% houveram diminuições de 1,32% e 0,6%, respectivamente, quando relacionados com a amostra anterior, o que torna essas composições mais compressíveis do que as demais.

Já a adição com o teor de 12% de RPP constata-se um aumento no IP e uma diminuição no LP, desse modo pode-se concluir que o teor de 9 % é o ponto ótimo quanto ao índice de plasticidade entre todas as composições realizadas neste trabalho.

Quanto a análise granulométrica das adições, percebe-se acréscimos na quantidade de argila das amostras em contrapartida diminuições na quantidade de silte e areia, fato que se deve a inserção dos aditivos e suas características granulométricas. Mesmo com as reações químicas e a floculação que a cal hidratada provoca no solo, não houveram aumentos nas dimensões das amostras, isso está relacionado ao solo natural não ser totalmente coesivo.

Tabela 14 – Resultados do ensaio de granulometria para as composições.

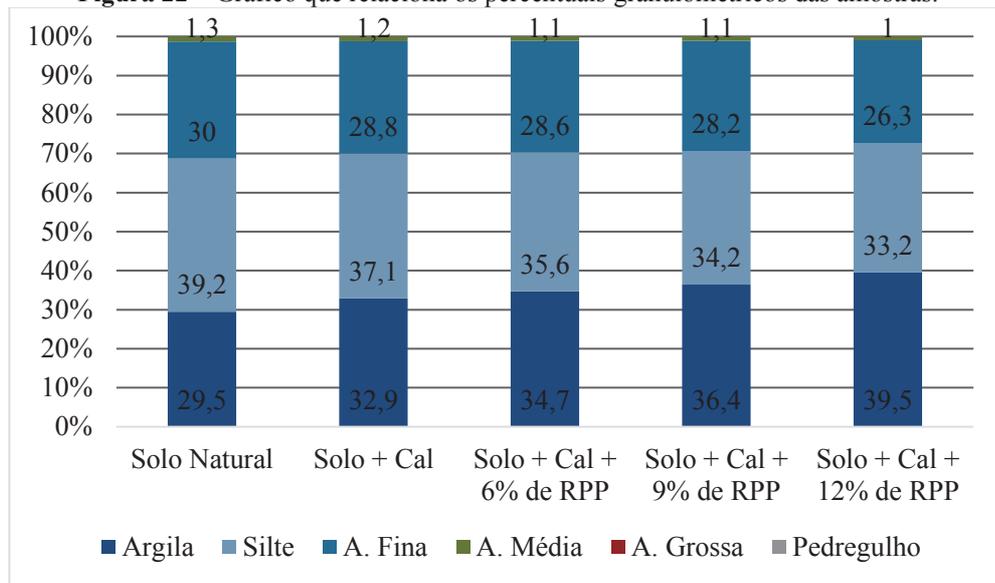
Composições	Argila	Silte	Areia			Pedregulho
			Fina	Média	Grossa	
Solo + Cal	32,9	37,1	28,8	1,2	0,0	0,0
Solo + Cal + 6% de RPP	34,7	35,6	28,6	1,1	0,0	0,0
Solo + Cal + 9% de RPP	36,4	34,2	28,2	1,1	0,0	0,0
Solo + Cal + 12% de RPP	39,5	33,2	26,3	1,0	0,0	0,0

Fonte: Autor, 2020.

Observa-se que com a adição da cal, a quantidade de argila aumentou 11,52% em relação ao solo natural. Porém houve uma diminuição no teor de silte de 5,35%, o que comprova a alteração granulométrica devido a ação dos aditivos, a cal e o resíduo. Este comportamento se repetiu nas demais composições inseridas no solo-cal, 6%, 9% e 12% do RPP. Esses valores condizem com os resultados de Germano e Arns (2018), em que todas as adições apresentaram percentuais maiores do material passante da peneira de N°200 em relação ao solo natural.

Na Figura 22, pode-se observar melhor como estão distribuídas as classes granulométricas de todas as amostras.

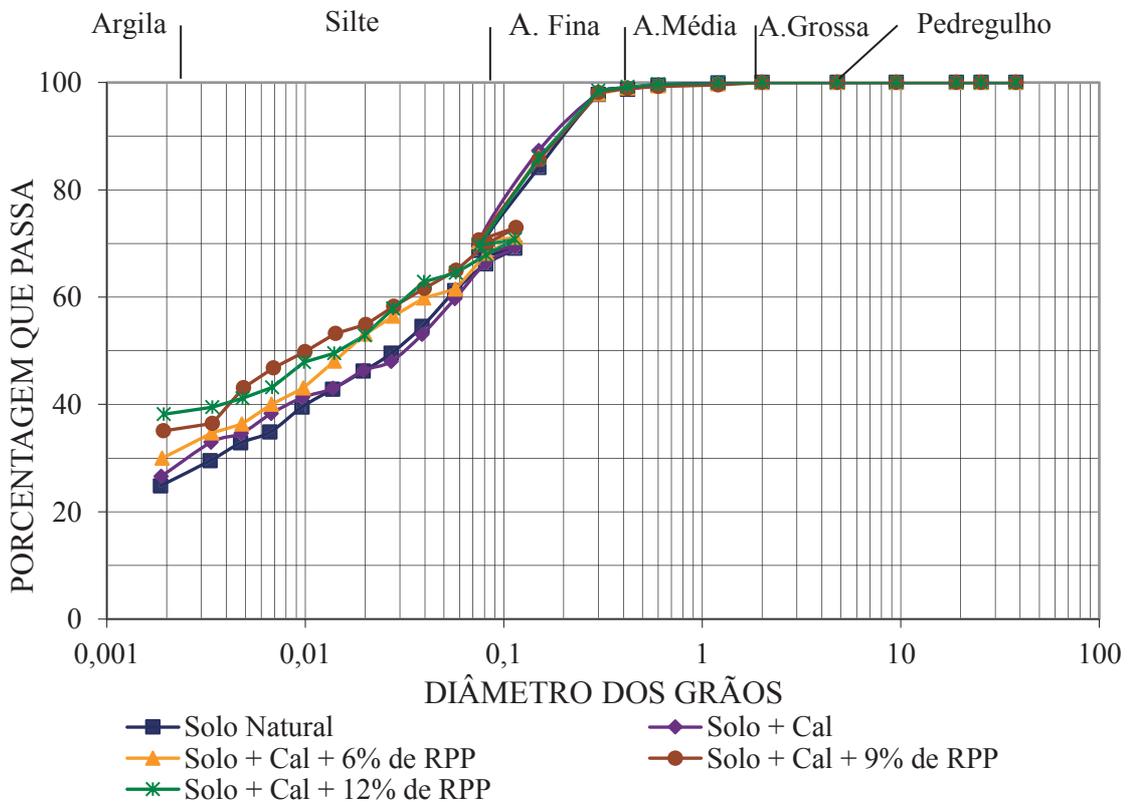
Figura 22 – Gráfico que relaciona os percentuais granulométricos das amostras.



Fonte: Autor, 2020

Com os valores encontrados nesse tipo de ensaio, foi possível construir uma comparação das curvas granulométricas das amostras deste estudo, apresentadas na Figura 23.

Figura 23 – Comparação das curvas granulométricas das amostras.



Fonte: Autor, 2020.

Por meio das curvas granulométricas das amostras percebe-se que não foi possível determinar índices granulométricos, o coeficiente de uniformidade (CU) e o coeficiente de

curvatura (CC), tendo em vista que para todas as composições não foram encontrados os seus diâmetros efetivos, resultado semelhante ao solo natural. Pode-se perceber que houveram deslocamentos em todos os casos para a esquerda, e que mesmo com a adição da cal e do resíduo, o solo ainda continua sendo silte argiloso misturado com areia, não plástico ou moderadamente plástico, de acordo com as metodologias TBR e SUCS.

4.4 COMPACTAÇÃO

Como descrito no item 3.2.4.1, o ensaio de compactação foi realizado com amparo na NBR 7182/2016, neste tópico serão apresentados os resultados obtidos para o solo natural, em seguida com o solo acrescido da cal e com as adições do RPP.

Com esse procedimento foram determinadas as massas específicas secas máximas ($\rho_{dm\acute{a}x}$) e as umidades ótimas (h_{ot}) dos corpos de prova, apresentados Tabela 15.

Tabela 15 - Massa específica seca máxima e umidade ótima dos ensaios de compactação.

Composições	$\rho_{dm\acute{a}x}$ (g/cm³)	h_{ot} (%)
Solo Natural	1,906	11,5
Solo + Cal	1,889	27,3
Solo + Cal + 6% de RPP	2,065	14,5
Solo + Cal + 9% de RPP	2,095	14,1
Solo + Cal + 12% de RPP	2,037	16,0

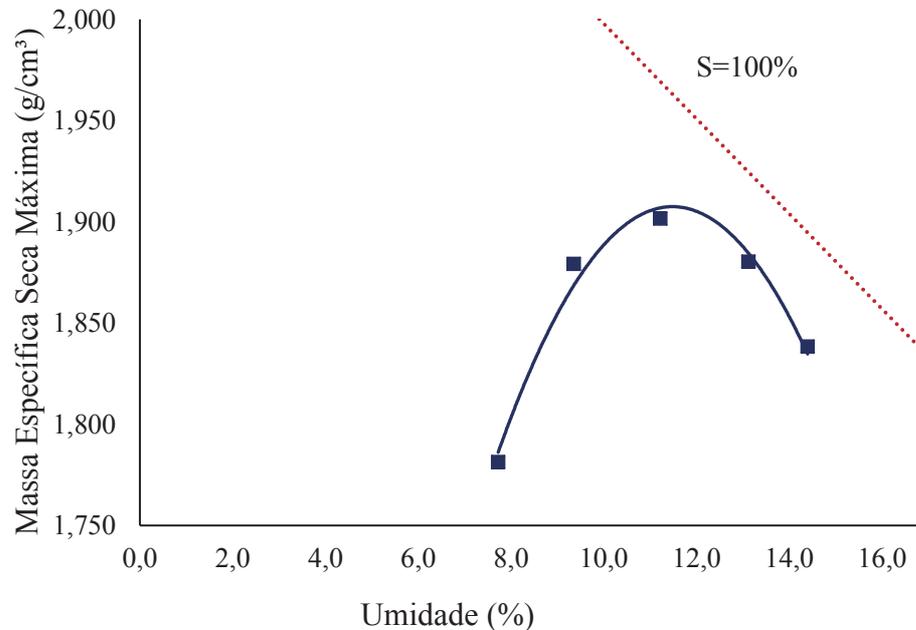
Fonte: Autor, 2020.

Percebe-se um aumento da umidade ótima em todos os casos quando comparados com o solo natural, isso ocorre nas adições que recebem a cal hidratada durante este ensaio. Pois, de acordo com Lovato (2004) à medida que o solo recebe a cal e determinada quantidade de água, é gerada a flocculação de forma mais rápida, do que na ausência do fluido. E por isso, o número de vazios na mistura é aumentado e a composição necessitará de uma maior quantidade de água para que seja realizada a compactação.

Quanto a massa específica aconteceu uma diminuição na adição só da cal hidratada aproximadamente de 1%, semelhante ao trabalho desenvolvido por Cavarsan (2018) que teve uma redução equivalente a 1,23%. No entanto houve aumento em todas as combinações que receberam o resíduo quando comparada com o solo de referência, sendo a adição de 9% a que mais se destaca devido o acréscimo de 9,9%, em relação às adições de 6% e 12%, onde ocorreu um acrescentamento de 8,34% e 6,87%, respectivamente.

Como os resultados desta análise foram obtidas as curvas de compactação que relacionam a massa específica seca máxima e a umidade ótima, estas foram divididas de acordo com as adições realizadas. O primeiro caso exposto na Figura 24 é a amostra do solo sem nenhuma adição.

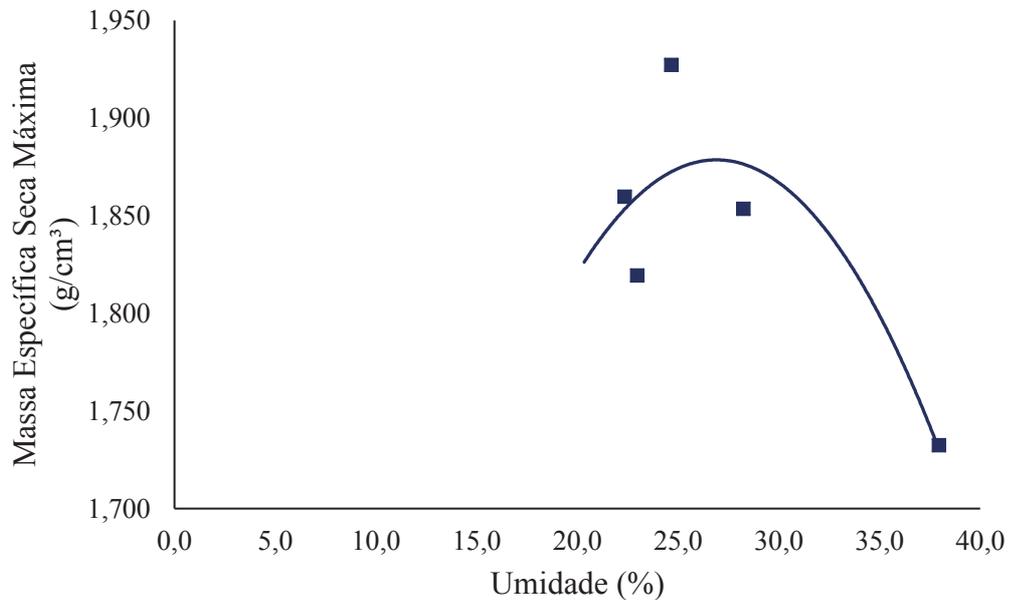
Figura 24 – Curva de Compactação do Solo Natural.



Fonte: Autor, 2020.

Diante da curva de compactação do solo natural é possível verificar que a curva se comporta como Pinto (2011) descreve os solos siltes-argilosos, com uma massa específica menor que $2,000\text{g/cm}^3$ e uma umidade ótima maior que 10%. Ainda percebe-se que esta não ultrapassa a curva de saturação, segundo Caputo (1996) este comportamento se deve ao fato de que o processo de compactação não conseguir expulsar todo ar aprisionado, e a curva de saturação corresponder à uma situação onde todo o ar é expulso.

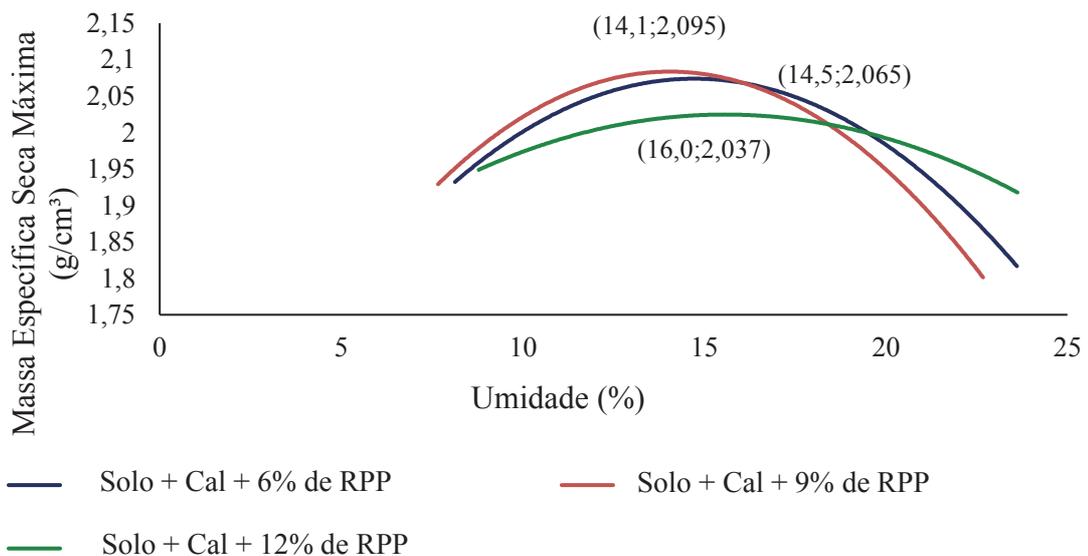
Para o ensaio do solo com a cal hidratada, o comportamento foi um pouco diferente, como é apresentada na Figura 25.

Figura 25 – Curva de Compactação do Solo + Cal.

Fonte: Autor, 2020.

Quando o solo recebeu a cal hidratada houve um aumento de aproximadamente 2,47% no teor de umidade ótima, isso se deve a necessidade de preencher os vazios gerados devido à aglomeração das partículas, esta situação também foi verificada em Guérios (2013). Já a massa específica seca com a adição da cal passou de 1,906 g/cm³ (solo natural) para o valor de 1,889 g/cm³, semelhante aos trabalhos realizados por Oliveira (2010) e Souza (2014).

Porém quando se adiciona o RPP junto a cal no solo, percebe-se um comportamento diferenciado, como é apresentado na Figura 26.

Figura 26 – Curva de Compactação do Solo + Cal + RPP.

Fonte: Autor, 2020.

Verifica-se um aumento na massa específica das adições com o RPP, ao contrário da adição apenas da cal hidratada, dessa forma pode-se afirmar que houve uma diminuição do número de vazios do solo, já que as granulometrias das amostras apresentam uma quantidade maior de grãos menores que 0,075mm. Resultados semelhantes às pesquisas desenvolvidas por Vasconcellos *et. al* (2018) e Germano e Arns (2018), em que as misturas evidenciaram um aumento nesse mesmo parâmetro.

Porém esse acréscimo na $\rho_{dmáx}$ não é contínuo, pois a adição de 12% sofre uma redução em relação a de 9%, que por sua vez aumenta quando comparada com a anterior, 6%. Dessa forma pode-se afirmar que o ponto ótimo de compactação é a adição de RPP com 9% junto à cal hidratada no solo.

4.5 EXPANSÃO E CBR

Nesse tópico são apresentados os resultados para o ensaio de CBR e expansão, realizados com o solo puro, solo acrescido de cal e dos resíduos. Todos os corpos de prova foram preparados de acordo com os teores de umidade ótima encontrados em compactação, porém no processo de moldagem das amostras do ensaio foram realizadas as análises dos teores de umidade novamente (h_{mold}), com o intuito de verificar se as mesmas condizem com os valores de h_{ot} , como mostra a Tabela 16.

Tabela 16 – Análise do desvio padrão dos teores de umidade.

Composições	h_{ot} (%)	h_{mold} (%)	Desvio Padrão
Solo Natural	11,5	11,6	0,035
Solo + Cal	27,3	27,1	0,071
Solo + Cal + 6% de RPP	14,5	14,1	0,141
Solo + Cal + 9% de RPP	13,9	13,6	0,106
Solo + Cal + 12% de RPP	16,0	16,0	0,00

Fonte: Autor, 2020.

Os teores de umidade para os corpos de prova moldados possuem desvios padrões pequenos, o que tornam os resultados obtidos semelhantes aos valores que os ensaios de compactação revelaram.

Depois de realizar a moldagem, as amostras foram inundadas com a intenção de conhecer sua capacidade expansiva e de suporte, para que assim fossem analisadas as

viabilidades dos materiais serem incorporados na pavimentação. A Tabela 17 expõe os resultados encontrados.

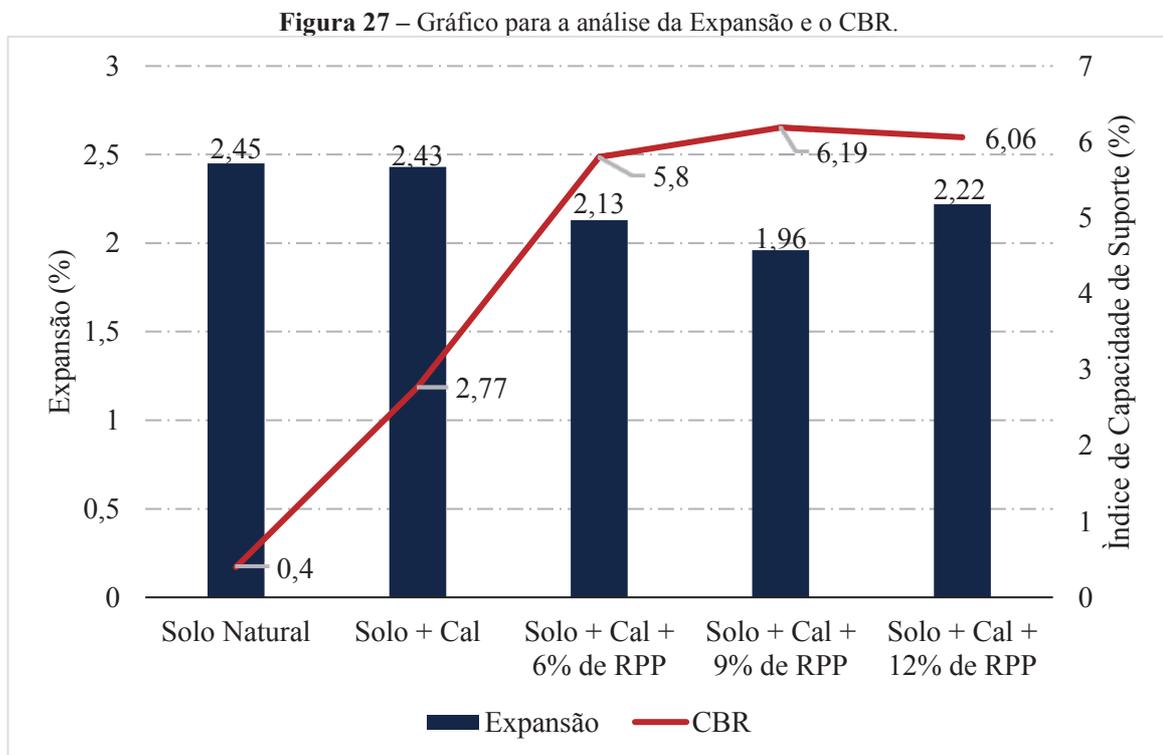
Tabela 17 – Resultados das composições para a Expansão e o CBR.

Composições	Expansão (%)	CBR (%)
Solo Natural	2,45	0,40
Solo + Cal	2,43	2,77
Solo + Cal + 6% de RPP	2,13	5,80
Solo + Cal + 9% de RPP	1,96	6,19
Solo + Cal + 12% de RPP	2,22	6,06

Fonte: Autor, 2020.

Diante dos valores obtidos é possível concluir que a expansão das composições apresentara um decréscimo e que na capacidade de suporte houveram mudanças significativas provocando um aumento crescente em todas as adições, com exceção da adição de cal com 12% de RPP. Dessa forma pode-se afirmar que a amostra composta de cal e 9% do resíduo possui o melhor resultado, com a menor capacidade expansiva e o maior CBR.

Na Figura 27 está exibido o gráfico que permite a análise dos resultados da expansão e do CBR.



Fonte: Autor, 2020.

O potencial de expansão do solo está atrelado principalmente ao arranjo estrutural de seus argilominerais e diante dos resultados pode-se afirmar que as combinações ofereceram melhorias ao solo natural quanto à expansão e também ao CBR. É notável que há tendência de diminuição na expansão à medida que há um acréscimo no valor de resíduo na mistura, apontando que o resíduo é um material menos expansivo.

A diminuição da expansão em todas as adições em relação ao solo natural deste trabalho está semelhante à pesquisa de Germano (2018) que analisou a ação do resíduo até os 9%. O aumento da expansão na adição de 12% de RPP significa que a mistura com a cal hidratada atingiu o valor máximo que o solo suporta sem formar poros, estes podem ser causados pelo borbulhamento da fase líquida e a liberação de gases do resíduo (MENEZES, 2018).

De acordo com as especificações do DNIT (2006), os CBR das adições podem ser aplicados no subleito, pois apresentam valores maiores que 2%. Porém ao se analisar a expansão apenas o material da combinação da cal e 9% do resíduo do polimento do porcelanato pode ser empregado, já que esta combinação foi a única que possuiu uma capacidade expansiva menor que 2%.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS E RECOMENDAÇÕES

5.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste presente trabalho foi estudada a adição da cal hidratada e do resíduo de polimento do porcelanato (RPP) a um solo com a finalidade de sua aplicação nas obras rodoviárias. Para avaliar a incorporação das adições, foi realizada uma série de ensaios físicos e de caráter mecânico dos materiais visando viabilizar uma destinação adequada para o RPP que possui uma produção em larga escala e apesar de existirem métodos de reutilização, ainda a demanda não é suprimida.

No estudo foi adicionado ao solo uma percentagem de 8% de cal hidratada, e posteriormente incorporados teores de 6%, 9% e 12% de resíduo. A caracterização das amostras foi realizada de acordo com as recomendações das normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), o Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS) e a classificação *Transportation Research Board* (TBR).

A partir dos ensaios realizados, pode-se concluir que:

- Para o solo em análise a quantidade máxima de cal hidratada corresponde a 8%, pois esse valor é o que vai apresentar o maior LP sem causar perdas na resistência da amostra.
- As adições da cal hidratada e do RPP no solo não geraram alterações significativas na granulometria do solo natural, pois todas as misturas continuaram sendo classificadas como um solo silte-argiloso com teores de areia.
- Incrementar os materiais no solo de estudo geraram aumentos nos limites de plasticidade e decréscimos nos índices de plasticidade, dessa forma todas as composições se mantiveram com IP menor que 7, sendo fracamente plásticos.
- Após a adição de cal, a massa específica máxima da mistura diminuiu e o teor de umidade aumentou, como o esperado depois da compactação.
- Os demais ensaios de compactação, nas composições com o RPP, aprontaram crescimento nos valores da massa específica e nas umidades ótima. De modo que, o ponto máximo destes ensaios foi a adição de 9% de RPP com a cal hidratada.
- O solo, por apresentar mais da metade da sua composição formada por finos, apresentou uma elevada expansão em presença de água, porém nas misturas realizadas esse parâmetro diminuiu relativamente.
- Nos ensaios de Índice de Suporte Califórnia, todas composições se enquadraram nos valores limites apresentados para esse parâmetro pelo DNIT na execução do subleito.

Com todos os dados obtidos nessa pesquisa, pode-se dizer que de forma geral, o resíduo na presença da cal não altera significativamente as propriedades deste solo, isso foi comprovado pelos os resultados dos ensaios de expansão e de CBR. Mas houve uma mistura que apresentou um valor aceitável para sua inserção no subleito, a adição de 8% de cal hidratada com 9% de resíduo de RPP.

5.2 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O estudo realizou uma avaliação inicial da incorporação da cal hidratada com o resíduo do polimento do porcelanato em um solo para analisar seu comportamento em caráter geotécnico em obras rodoviárias. Para a viabilização desses materiais no destino desejado são necessárias mais pesquisas que comprovem o potencial de aplicação destes.

Do ponto de vista rodoviário, seria interessante analisar outro tipo de solo nas misturas, para poder analisar a interação das adições com os diferentes tipos de solo. Podendo ser realizadas uma maior quantidade de repetições nos ensaios de expansão e CBR para encontrar um padrão no comportamento mecânico para as amostras.

Ainda seria interessante analisar o comportamento do solo aumentando os teores de cal hidratada e realizar ensaios apenas com o resíduo de polimento de porcelanato, pois isso forneceria informações mais completas sobre esse tipo de adição.

REFERÊNCIAS

- ANTONIO, Winie Canto *et al.* **Estabilização de solos argilosos com resíduos de retificação cerâmica (rrc) e cal para utilização em pavimentos.** Florianópolis: Engenharia Civil da UNESC, 2018. *E-book*.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12653:** Materiais Pozolânicos – Normas. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457:** Amostras de solo – Preparação para ensaios de compactação e ensaio de caracterização. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6458:** Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - Determinação da massa específica, da massa específica aparente e de absorção de água. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459:** Solo – Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502:** Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180:** Solo – Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181:** Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182:** Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7207:** Terminologia e classificação de pavimentação. Rio de Janeiro, 2014.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895:** Solo – Índice suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2016.
- BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projetos e restauração.** São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- BATISTA, C.F.N. **Ensaio fundamentais para a Pavimentação e Dimensionamentos dos Pavimentos Flexíveis.** 2^o Edição. Porto Alegre: Editora Globo, 1976.
- BEKKOUCHE, S. R. *et al.* Experimental Characterization of Clay Soils Behavior Stabilized by Polymers. **Journal of Fundamental and Applied Sciences**, Algeria, 2016. Disponível em: <https://www.ajol.info/index.php/jfas/article/viewFile/168224/157722>. Acesso em: 13 jan. 2020.

BEHAK, Leonardo; NUÑEZ, Washington Peres. Caracterización de un material compuesto por suelo arenoso, ceniza de cáscara de arroz y cal potencialmente útil para su uso en pavimentación. **Revista ingeniería de construcción**, Santiago, v. 23, n. 1, p. 34-41, 2008. Disponível em: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0718-50732008000100004&lng=es&nrm=iso. Acesso em: 13 jan. 2020.

BERNUCCI, L.B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 1 ed. Rio de Janeiro. PETROBRÁS: ABEDA, 2008. Acesso em: https://www.academia.edu/21661995/Pavimenta%C3%A7%C3%A3o_Asf%C3%A1ltica_Forma%C3%A7%C3%A3o_B%C3%A1sica_para_Engenheiros. Acesso em: 11 jan. 2020.

BUFFON, Cléber Augusto. **Ensaio de solos para pavimentação**. Universidade do Planalto Catarinense, UNIPLAC, Lajes, 2014. Disponível em: <https://revista.uniplac.net/ojs/index.php/engcivil/article/view/1411/747>. Acesso em: 21 dez. 2019.

CAPUTO, P. H. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: 6. ed., v. 1, 1996.

CASAGRANDE, Arthur. Classification and Identification of Soil; CAPUTO, P. H. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Rio de Janeiro: 6. ed., v. 1, 1996.

CARMO, J. B. M. do; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 330, p. 309-318, 2008. Disponível em: <http://www.scielo.br/pdf/ce/v54n331/a0754331.pdf>. Acesso em: 31 jan. 2020.

CARNEIRO, A. P. *et al.* Uso do Agregado Reciclado em Camadas de Base e Sub-base de Pavimentos. **Projeto entulho bom**. Salvador: Editora EDUFBA, 2001. Disponível em: https://www.pick-upau.org.br/mundo/reciclagem_entulho/capitulo_06.pdf. Acesso em: 13 jan. 2020.

CAVARSAN, Maria Paula Guillen. **Análise dos Efeitos da Adição de Cal e de Cimento para Estabilização de Solos**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Federal do Paraná, 2018.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. **Relatório gerencial: Pesquisa CNT de rodovias 2019**. Brasília: CNT: SEST SENAT, 2019.

CUNHA, G. H. R. I. **Estudo de compressibilidade de um solo da Formação Guabirotuba estabilizado com cal**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

CRUZ, C. M., OLIVEIRA D. C. **Caracterização Reológica de Porcelanatos como Fontes Alternativas de Alcalis**. Poço de Caldas: Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal de Alfenas, 2015.

DAS, Braja M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. São Paulo: Thomson Learning, 2007.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. Rio de Janeiro: 3 ed, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 108/2009 – ES**. Terraplenagem – Aterros – Especificações do Serviço. Rio de Janeiro, 2009.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 137/2010 – ES**. Pavimentação – Regularização do Subleito – Especificação do Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 138/2010 – ES**. Pavimentação – Reforço de Subleito – Especificação do Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 139/2010 – ES**. Pavimentação – Sub-base Estabilizada Granulometricamente – Especificação do Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT 141/2010 – ES**. Pavimentação – Base Estabilizada Granulometricamente – Especificação do Serviço. Rio de Janeiro, 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS E RODAGEM. **Solos – determinação do limite de liquidez**. Mato Grosso, 1994. Disponível em: http://www.ippuc.org.br/cd_caderno_de_encargos/volume%2003_PDF/DNER-ME%20122-94.pdf. Acesso em: 11 jan. 2020.

DU, Y-J. *et al.* Field evaluation of soft highway subgrade soil stabilized with calcium carbide residue. **Soils and Foundations**, v. 56, p-301-314, 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038080616000330>. Acesso em: 13 jan. 2020.

GERMANO, R. S.; ARNS P. **Estabilização mecânica de um solo com adição de resíduo de polimento de porcelanato destinado a pavimentação rodoviária**. Florianópolis: Engenharia Civil da UNESC, 2018. *E-book*.

GUÉRIOS, Eduan Maganhotto. **Estudo do melhoramento de solo com a adição de cal hidratada para o uso de pavimento urbano**. Curitiba: Trabalho de Conclusão de Curso para a Graduação em Engenharia de Produção Civil – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2013.

GUIMARÃES, J. E. P. **A cal: fundamentos e aplicações na engenharia civil**. 1 ed. São Paulo: Pini, 1998.

HERRIN, Moreland; MITCHELL, Henry. **Mistura de solo-cal**. Rio de Janeiro: IPR, 1968.

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

<https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1674775518301513?token=E38123C2249ECDEE7A600AF02B90C0221CF882CB62AF422CB2C817C2D5F4193EE566C0C5BB39D0ECE2822CD1069E361C>. Acesso em: 13 jan. 2020.

LIU, Y. *et al.* Stabilization of expansive soil using cementing material from rice husk ash and calcium carbide residue. **Construction and Building Materials**, v. 221, p. 1-11, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061819313364>. Acesso em: 13 jan. 2020.

LOVATO, R. S. **Estudo do comportamento mecânico de um solo laterítico estabilizado com cal, aplicado à pavimentação**. Porto Alegre: Mestrado em Engenharia Civil - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/6646>. Acesso em: 11 jan. 2020.

MAIER, Terry L. Soil Stabilization Method. **United States Patent**. Disponível em: <https://patentimages.storage.googleapis.com/2d/8f/af/8f1f79ad4fe621/US7651294.pdf>. Acesso em 13 jan. 2020.

MAKUSA, Gregory Paul. **Soil Stabilization Methods and Materials**. Sweden: Lulea University of Technology, 2013. Disponível em: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:997144/FULLTEXT01.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2020.

MALLELA, J. P.; HAROLD VON QUINTUS, K.L. **Consideration of Lime-stabilized Layers in Mechanistic-empirical Pavement Design**. The National Lime Association, Arlington, Virginia, USA, 2004.

MANSO, E. **Análise Granulométrica dos Solos de Brasília pelo Granulômetro a Laser**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade de Brasília, Brasília, 1999.

MARQUES, Geraldo Luciano de Oliveira. **Notas de Aula da Disciplina Pavimentação**. Juiz de Fora: Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006. Disponível em: <http://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2009/03/Notas-de-Aula-Prof.-Geraldo.pdf>. Acesso em: 11 jan. 2020.

MEDEIROS, Alisson Alberto de Lima. **Contribuição ao estudo da dosagem de cal para a estabilização de um solo de comportamento laterítico e um não laterítico**. São Carlos: Programa de Pós Graduação em Engenharia de Transportes e Área de Concentração em Infraestrutura de Transportes – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2017.

MEDINA, J. de; MOTTA, L. M. G. da. **Mecânica dos Pavimentos**. 2. ed. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2005.

MENEZES, Raquel Rodrigues do Nascimento. **Estudo da Potencialidade do Resíduo de Porcelanato para Fins de Reutilização como Agregado Leve**. João Pessoa: Departamento de Engenharia de Materiais – Universidade Federal da Paraíba, 2018.

MORAIS, Camila de Jesus. **Tentativa de estabilização de um solo expansivo com adição de polímero industrial**. São Cristóvão: Departamento de Engenharia Civil – Universidade Federal de Sergipe, 2018.

MORAIS, Marcia Rodrigues de. **Reciclagem de resíduos de indústria de placas cerâmicas: um estudo de caso**. São Carlos: Departamento de Ciência e Engenharia de Materiais - Interunidades da Escola de Engenharia de São Carlos, 2002.

MOTTA, J. *et al.* Comparativo das vantagens competitivas dos clusters de revestimento cerâmico de Criciúma com o de foshan na China. **Brazilian Applied Science Review**, Curitiba, v.2, n.1, p. 305-323, jan./mar. 2018.

OLIVEIRA, Eduardo de. **Emprego da cal na estabilização de solos finos de baixa resistência e alta expansão: estudo de caso no município de Ribeirão das Neves/MG**. Florianópolis: Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, 2010. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/xmlui/handle/123456789/93651>. Acesso em: 22 set. 2019.

OLIVEIRA, M. A. *et al.* Efeito da Adição do Resíduo do Polimento do Porcelanato - RPP na Durabilidade de Argamassa de Revestimento. **Cerâmica Industrial**, v.23, p. 42-49, out/dez. 2018.

OLIVEIRA, T. M. *et al.* Efeito da adição da cal na estabilidade e na resistência à compressão da mistura solo-grits. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 62, n. 1, p. 87-92, 2009.

OLIVEIRA, L. C. **A Estabilização de Solos Aplicada A Habitação, Um Estudo de Misturas Solo-Cimento**. Tese de Mestrado - COPPE/UFRJ. Rio de Janeiro. 1994. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/7837/1/Dias_2012.pdf. Acesso em: 11 jan. 2020.

OLIVEIRA, Shirley Minnel Ferreira de. **Estudo do comportamento mecânico de misturas de fosfogesso e cal para a utilização na construção rodoviária**. Dissertação (Mestrado em Transportes) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP, São Carlos, 2005.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. 3 ed. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária – Conceitos Fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2º Edição. Rio de Janeiro: Synergia: IBP, 2010.

RAMOS, Anderson Caciator; SILVA, Júlio César. **Utilização de aditivo para aumento da capacidade de suporte de solos utilizados em Pavimentação: um exemplo de caso a partir do produto underbold da empresa rodovias Ecológicas**. Palhoça: Curso de Engenharia Civil – Universidade do Sul de Santa Catarina, 2018. Disponível em: <https://riuni.unisul.br/bitstream/handle/12345/5939/TCC%20.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Disponível em: 11 jan. 2020.

RODRIGUES, T. N. **Estudo comparativo do CBR “in situ” & LWD para determinação da capacidade de suporte de subleitos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e

Ambiental) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Campina Grande, 2017. Disponível em:
<http://www.ppgeca.ufcg.edu.br/dissertacoes-menu/dissertacoes-2017/category/17-dissertacoes-2017>. Acesso em: 11 jan. 2020.

ROTH, Caroline das Graças; GARCÍAS, Carlos Mello. **Construção civil e a degradação ambiental**. São Paulo: Desenvolvimento em questão, 2007. *E-book*.

SANTOS, Cláudio Batista. **Utilização de Resíduos Oleosos Provenientes das Atividades de Exploração e Produção de Petróleo para Aplicação em Camadas Estabilizadas de Bases e Sub-Bases de Pavimentos Rodoviários**. Dissertação (Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2010.

SANTOS, Monique Nascimento dos. **Análise do efeito da estabilização mecânica em matrizes de terra**. Relatório final de iniciação científica - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2012. Disponível em: http://www.puc-rio.br/pibic/relatorio_resumo2012/relatorios_pdf/ctc/CIV/CIV-Monique%20Nascimento%20dos%20Santos.pdf. Acesso em: 11 jan. 2020.

SANTOS, M. *et al.* **Estabilização dos Solos com Cal e Betume**. In: 6º Reunião de pavimentação urbana, Santos, 1995.

SANTOS, Patrícia Ferreira. **Reaproveitamento do Resíduo Proveniente do Polimento do Porcelanato na Produção de Novos Produtos Cerâmicos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

SANTOS, P.F. *et al.* Reuse of Waste from Polish in the Production of Porcelain. **Materials Science Forum**, v. 799, p 317-322, 2014.

SARTORI, Guilherme. **Estudo de estabilização de solos para fins de pavimentação na região de Campo Mourão**. Campo Mourão: Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015. Disponível em:
http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/6672/1/CM_COECI_2015_2_13.pdf.
 Acesso em: 11 jan. 2020.

SENÇO, W. de. **Manual de Técnicas de Pavimentação**. 2. ed. São Paulo: Pini, 2008.

SOUZA, Alan Nunes de Siqueira. **Estudo de Mistura Solo-Cal para Base de Pavimento Rodoviário**. Brasília: Trabalho de Conclusão de Curso – Faculdade de Tecnologia e Ciências Sociais Aplicadas, 2014.

SILVA, Filipe Bruno dos Santo. **Avaliação de misturas de solo e resíduo de polimento de porcelanato para emprego em obras rodoviárias**. Pós Graduação em Engenharia Civil – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SILVA, M. F. **Estudo da estabilização com cal de um solo laterítico e um solo não laterítico**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2016.

SILVA, Mariana Fernandes da. **Estudo comparativo de dois solos argilosos estabilizados com cal**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Geológica) – Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 2010.

SILVA, M. R. *et al.* Estudo da estabilização granulométrica e química de material fresado para emprego em camadas de pavimentos. **Revista de Engenharia Civil IMED**, Passo Fundo, v.5, núm.1, p. 20-31, 2018. Disponível em: <https://seer.imed.edu.br/index.php/revistaec/article/view/2079/1882>. Acesso em: 13 jan. 2020.

SIMONDS, Richard A *et al.* Elaboração de projetos de irrigação. **Manual de Irrigação**, Brasília: Secretaria de Recursos Hídricos, v. 7, n. 527, 2002.

SOLIZ, V. V. P. **Estudo dos Três solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. Dissertação de Mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.

VASCONCELOS, J. L. *et al.* Estudo do comportamento mecânico e físico de um solo argiloso estabilizado com resíduos do processo de retificação e polimento de placas cerâmicas de porcelanato e cimento Portland. **Revista Técnico-Científica de Engenharia Civil UNESC**, Florianópolis, 2018.

VASCONCELOS, R. F. B. *et al.* Limites de consistência e propriedades químicas de um latossolo amarelo distorções sob aplicação de diferentes resíduos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, núm. 3, p. 639-648, mai./jun. 2010.

VIEIRA, B. A.; NOGUEIRA, L. Construção civil: crescimento versus custos de produção civil, **Sistemas & Gestão**, Niterói, v. 13, núm. 3, p. 366-377, 2018. Disponível em: <http://www.revistasg.uff.br/index.php/sg/article/view/1419>. Acesso em: 26 set. 2019.

YU, J. *et al.* Experimental study of the feasibility of using anhydrous sodium metasilicate as a geopolymer activator for soil stabilization. **Engineering Geology**, v. 264, 2020. Disponível em: <https://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S001379521930153X?token=A479F49DCC7EB342D200B89F33F61BB8F80EA161D38D1F7342FD4047D7BB9326A1E51EE4740BAD40929BEBCBC6E20C7B>. Acesso em: 13 jan. 2020.