

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE CONSTRUÇÃO CIVIL
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MARCELA ERAT SCREMIM
OTÁVIO AUGUSTO DE BARROS KAWACHI**

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NO MELHORAMENTO DE
UM SOLO COM CAL E FRAÇÃO VERMELHA DE RCD**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2019

MARCELA ERAT SCREMIM
OTÁVIO AUGUSTO DE BARROS KAWACHI

**INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NO MELHORAMENTO DE
UM SOLO COM CAL E FRAÇÃO VERMELHA DE RCD**

Trabalho de Conclusão de Curso de graduação, apresentado como requisito parcial para a conclusão da graduação do Curso Superior de Engenharia Civil do Departamento Acadêmico de Construção Civil – DACOC – da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para a obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Prof^a. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann.

CURITIBA

2019



Ministério da Educação
UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
Compus Curitiba – Sede Ecoville
Departamento Acadêmico de Construção Civil
Curso de Engenharia Civil

FOLHA DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DA ENERGIA DE COMPACTAÇÃO NO MELHORAMENTO DE UM SOLO COM CAL E FRAÇÃO VERMELHA DE RCD

Por

**MARCELA ERAT SCREMIM
OTÁVIO AUGUSTO DE BARROS KAWACHI**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado no segundo semestre de 2019, pela seguinte banca de avaliação presente:

Profa. Orientador – Amanda Dalla Rosa Johann, Dra.
UTFPR

Prof. Aduino José Miranda de Lima, Dr.
UTFPR

Prof. Rogério Francisco Kuster Puppi, Dr.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

À Deus, em primeiro lugar, que nos iluminou e nos deu força para lutar por nossos objetivos e nos abençoou com a conclusão de mais uma meta.

Agradecemos nossos pais, irmãos e familiares por todo apoio e compreensão nos momentos em mais precisamos. Por nos ensinarem nossos princípios e valores, cujos quais foram essenciais em nossa formação como seres humanos e futuros engenheiros.

Agradecemos nossos amigos que acompanharam de perto nossa trajetória e sempre nos ampararam, tornando-se uma segunda família. Em especial, Estela Bonagurio Julio, Yasmini Barbosa, Alison Kolossoskei, Vitor Yuske, Marcos Vinicios de Paula, Eliaber Moraes e Gabriel Andreatta.

Agradecemos grandemente a nossa orientadora, Prof^a. Dra Amanda Dalla Rosa Johann, pela disposição, paciência, atenção e orientação. Além de todos os conhecimentos transmitidos, nos incentivou em todos os momentos e ajudou a vencer todas as dificuldades e imprevistos que surgiram durante a elaboração do presente estudo. Nossa imensa gratidão e respeito.

Agradecemos aos integrantes da banca, Dr. Prof. Rogério Francisco Kuster Puppi e Dr. Prof. Adauto José Miranda de Lima pela presença e disponibilidade em participar da banca e avaliar a pesquisa elaborada.

RESUMO

Scremim, Marcela Erat; Kawachi, Otávio Augusto de Barros. **Influência da energia de compactação no melhoramento de um solo com cal e fração vermelha de RCD**. 2019. 65f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2019.

O modal viário brasileiro representa o meio de transporte, tanto de passageiros, quanto de mercadorias, mais significativo do país. Mesmo assim, conforme a Confederação Nacional de Transportes (CNT), até o ano de 2017, a malha rodoviária brasileira era composta por mais de 1,3 milhões de quilômetros de vias não pavimentadas e, apenas, cerca de 200 mil quilômetros de vias pavimentadas (CNT, 2018). É possível afirmar que, um dos principais motivos de tal situação ser uma realidade em nosso país seria o alto investimento para viabilizar a pavimentação, incluindo a estabilização do solo para a sub-base da rodovia. O objetivo do presente trabalho é baratear esse processo de estabilização do solo com baixa capacidade de suporte e dar continuidade aos estudos iniciados por COSTA *et al* (2018), modificando apenas a energia de compactação aplicada. A estabilização do solo pode ocorrer de maneira física, química ou mecânica, sendo a segunda e a terceira objetos principais do presente estudo. Foram realizados ensaios de Proctor, resistência à compressão simples (RCS), Índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR) e expansão, utilizando um solo da formação Guabirotuba com diferentes concentrações de fração vermelha e cal, aplicando uma energia de compactação intermediária. A partir dos ensaios de resistência à compressão simples, a resistência máxima atingida foi de 1,73 Mpa. Tal resultado atende ao valor pré-definido pelo Departamento de Estradas e Rodagem do Paraná (DER). Para o ensaio CBR foi possível notar uma maior expansão, quando comparada com amostras compactadas com energia normal, além de apresentar maior suporte para o solo.

Palavras chave: Solo-cal. Fração vermelha. Ensaio de compressão Simples. Índice de Suporte Califórnia. Expansão.

ABSTRACT

Scremim, Marcela Erat; Kawachi, Otávio Augusto de Barros. **Influence of compaction energy on soil improvement with lime and RCD red fraction.** 2019. 65f. Term paper. Graduate in Civil Engineering, Federal University of Technology – Paraná. Curitiba, 2019.

The Brazilian road mode represents the most significant means of transportation for both passengers and goods in the country. Even so, according to the National Transport Confederation (CNT), until 2017, the Brazilian road network was composed of over 1.3 million kilometers of unpaved roads and only about 200 thousand kilometers of paved roads. (CNT, 2018). It can be said that one of the main reasons for such a situation to be a reality in our country would be the high investment to make paving possible, including the stabilization of the soil for the highway sub-base. The objective of the present work is to cheapen this soil stabilization process with low support capacity and to continue the studies initiated by COSTA et al (2018), modifying only the applied compaction energy. Soil stabilization can occur physically, chemically or mechanically, being the second object of the present study. Proctor, unconfined compressive strength (RCS), California Bearing Ratio (ISC-CBR) and expansion tests were performed using a Guabirotuba formation soil with different concentrations of red fraction and lime, applying an intermediate compaction energy. From the unconfined compressive strength tests, the maximum strength achieved was 1,73 Mpa. This result does meet the pre-defined value by the Paraná Department of Roads and Highways (DER). For the CBR assay it was possible to notice a larger expansion, when compared to samples compressed with normal energy, besides presenting full support for the soil.

Key-words: Soil-lime. Red fraction. Unconfined compressive strength. California Bearing Ratio. Ground loading capacity.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais classificações granulométricas dos solos	18
Tabela 2 – Composição granulométrica do solo natural	32
Tabela 3 – Limites físicos de consistência para o solo-rcd-cal	32
Tabela 4 – Teores de óxidos presente no solo	33
Tabela 5 – Teores de óxidos presente na fração vermelha de rcd	34
Tabela 6 – Energias de compactação.....	38
Tabela 7 – Composições definidas para ensaios de comportamento mecânico.....	40
Tabela 8 – Dados obtidos no ensaio de compactação com 100% de solo, 0% de fração vermelha e 0% de cal, com energia intermediária.....	43
Tabela 9 – Resultados obtidos via ensaio de proctor	47
Tabela 10 - Resultados do ensaio rcs para solo natural.....	48
Tabela 11 - Resultados ensaio rcs para 100% solo natural e 3% cal.....	48
Tabela 12 - Resultados ensaio rcs para 75% solo natural, 25% fração vermelha e 0% cal	48
Tabela 13 - Resultados ensaio rcs para 75% solo natural, 25% fração vermelha e 3% cal	49
Tabela 14 - Resultados ensaio rcs para 75% solo natural, 25% fração vermelha e 6% cal	49
Tabela 15 - Resultados ensaio rcs para 75% solo natural, 25% fração vermelha e 9% cal	49
Tabela 16 - Resultados ensaio rcs para 87,5% solo natural, 12,5% fração vermelha e 0% cal	50
Tabela 17 - Resultados ensaio rcs para 87,5% solo natural, 12,5% fração vermelha e 3% cal	50
Tabela 18 - Resultados ensaio rcs para 87,5% solo natural, 12,5% fração vermelha e 6% cal	50
Tabela 19 - Resultados ensaio rcs para 87,5% solo natural, 12,5% fração vermelha e 9% cal	51
Tabela 20 - Resumo das tensões médias obtidas, em diferentes concentrações, com o ensaio rcs.....	51
Tabela 21 - Resultados obtidos via ensaio CBR.....	53

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Formação guabirota na região metropolitana de Curitiba.....	19
Figura 2– Composição dos pavimentos flexíveis.....	21
Figura 3– Corte esquemático de um pavimento rígido	21
Figura 4 – Curva de compactação para diferentes energias de compressão	24
Figura 5 – Concentração de usinas por estado.....	29
Figura 6 – Coleta de solo na região de Curitiba-pr	31
Figura 7 – Curva granulométrica do solo natural.....	31
Figura 8 – Resultado do ensaio de difratometria de raios x.....	33
Figura 9 - Curva de compactação	38
Figura 10 - Prensa para realização do ensaio cbr	42
Figura 11 - Corpos de prova imersos em água para o ensaio de expansão	43
Figura 12 - Parâmetros de expansão e índice de suporte califórnia estabelecidos pelo DNIT	56
Figura 13 - Parâmetros de resistência a compressão simples estabelecido pelo DER/PR	57

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Resultados dos ensaios de proctor obtidos por COSTA et al (2018).....	35
Gráfico 2 - Curva de compactação para solo sem adições, com energia intermediária.....	44
Gráfico 3 - Influência da adição de fração vermelha ao solo	45
Gráfico 4 - Influência da adição de cal nas composições estabelecidas ..	46
Gráfico 5 - Comparação de valores de rcs.....	53
Gráfico 6 - Expansão dos corpos de prova.....	54
Gráfico 7 - Expansão dos corpos de prova.....	55

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	OBJETIVOS.....	13
1.1.2	Objetivo Geral.....	13
1.1.3	Objetivos Específicos.....	13
1.2	JUSTIFICATIVA.....	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	GEOLOGIA.....	16
2.2	SOLOS	16
2.2.1	Caracterização Dos Solos	17
2.2.2	Tipos De Solos	17
2.2.3	Classificação De Solos	18
2.3	FORMAÇÃO GUABIROTUBA	19
2.4	PAVIMENTAÇÃO	20
2.5	ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	20
2.5.1	Estabilização Mecânica	23
2.5.2	Estabilização Granulométrica	24
2.5.3	Estabilização Química	24
2.6	CAL.....	25
2.6.1	Cal Virgem	25
2.6.2	Cal Hidratada.....	25
2.6.3	Estabilização de Solo com Adição de Cal.....	26
2.7	RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)	26
2.7.1	Classificação do RCD.....	27
2.7.2	Destinação correta para o RCD.....	28
2.7.3	Mercado para reciclagem do RCD.....	29
2.7.4	Uso do RCD na pavimentação	29
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
3.1	MATERIAIS	36
3.1.1	Fração Vermelha	36
3.1.2	Cal.....	36
3.1.3	Solo.....	37

3.2	MÉTODOS.....	37
3.2.1	Ensaio de Compactação.....	37
3.2.2	Moldagem e Cura dos Corpos de Prova.....	39
3.2.3	Ensaio de Resistência à Compressão Simples	40
3.2.4	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC – CBR) e Expansão	41
4	RESULTADOS E ANÁLISE	43
4.1	ENSAIO DE PROCTOR	43
4.2	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO	47
4.3	ENSAIO DE ÍNDICE SUPORTE CALIFORNIA E EXPANSÃO	53
4.4	PARÂMETROS DE PROJETO DO DER/PR E DO DNIT	55
5	CONCLUSÃO.....	58
	REFERÊNCIAS.....	60

1 INTRODUÇÃO

Atualmente, observa-se que o Brasil executa o transporte de mercadorias e passageiros em sua grande maioria por meio do modal rodoviário. Segundo a Confederação Nacional de Transportes (CNT), até o ano de 2017 a malha rodoviária brasileira era composta por cerca de 200 mil quilômetros de vias pavimentadas e mais de 1,3 milhões de quilômetros de vias não pavimentadas (CNT, 2018).

Além disso, foi estudada a possibilidade da construção de aproximadamente mais 160 mil quilômetros de malha rodoviária, classificando o Brasil entre os países com as maiores extensões rodoviárias do mundo (CNT, 2018).

Entretanto, é evidente que a quantidade de vias pavimentadas é muito inferior, isto se deve ao alto custo e complexidade dos processos de preparo do solo para receber pavimentação. A solução mais comum para construção de estradas é a utilização de um material granular, geralmente brita, para melhorar a base do pavimento, e isso, além de aumentar os custos, prejudica significativamente o meio ambiente. A exploração mineral gera transformações na paisagem local, com as escavações, retirada de vegetação, movimentação de terra, uso de explosivos que causam vibrações ao terreno, geração de fragmentos, gases, poeira e ruídos, além dos efeitos causados pelo transporte e beneficiamento do minério. Tais fatores afetam a qualidade da água, do ar, do solo e de vida da população (Bacci, 2006).

Em vista destas dificuldades, uma medida geralmente adotada em determinados solos é a estabilização química com adição de cal, ou seja, a reação entre os componentes do solo (argilas e quartzo), componentes do meio (água e ar) e a cal, recebe o nome de estabilização solo-cal. Com a finalidade de reduzir os custos desse processo e melhorar suas características podem ser adicionados outros componentes, como a fração vermelha de Resíduos da Construção e Demolição (RCD), que auxiliam nas reações entre a cal e o solo, melhorando as características de interesse.

A fração vermelha citada anteriormente é oriunda da moagem de resíduos da construção e demolição (RCD) que também é conhecido é denominado como Resíduo da Construção Civil (RCC) tendo como ramificação o Resíduo Sólido da Construção Civil (RSCC).

De forma mais específica os resíduos em questão são de blocos, tijolos e telhas cerâmicas. O RCD, como será chamado o resíduo proveniente da construção, constitui uma pequena parcela do material reciclado pela indústria, segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON), de todo resíduo gerado em 2014, isto é, 84 milhões de metros cúbicos, apenas 21% foram reciclados (ABRECON, 2014).

Assim, objetiva-se nesta pesquisa analisar as características de um solo e verificar a sua estabilidade com as adições de cal e RCD.

1.1 OBJETIVOS

O objetivos geral e os específicos do presente trabalho serão apresentados a seguir:

1.1.2 Objetivo Geral

Atingir os valores solicitados por norma, para sub-base de pavimentos, através da estabilização de um solo com baixa capacidade de suporte com cal, fração vermelha de RCD e uma energia de compactação pré-definida.

1.1.3 Objetivos Específicos

- Analisar resistência, expansão e capacidade de suporte do solo com a adição de cal;
- Analisar resistência, expansão e capacidade de suporte do solo com a adição da fração vermelha de RCD;
- Analisar resistência, expansão e capacidade de suporte do solo com a adição da fração vermelha de RCD junto à cal;

- Analisar os requisitos do DER/PR e do DNIT em relação às propriedades do solo estabilizado com cal e RCD para uso na pavimentação do solo;
- Comparar os resultados com a pesquisa de Costa *et al.* (2018).

1.2 JUSTIFICATIVA

O crescimento dos centros urbanos trouxe contíguo uma grande geração de resíduos, e uma grande parcela destes vem da construção civil, segundo Pinto (1999), em cidades brasileiras de médio e grande porte, os resíduos advindos de construções e demolições representam de 40 a 70% de todos os sólidos nas cidades brasileiras.

É claro que um descarte correto é necessário para esse material, pois, se o contrário for feito, problemas como proliferação de doenças e de animais peçonhentos, obstrução de córregos e vias tornam-se cada vez mais comuns. Tal fato gera complicações financeiras, sanitárias e físicas para população. Todavia, mesmo com o descarte correto, a implantação de aterros para esses materiais ainda ocasiona danos ambientais.

Assim, reciclagem dos resíduos se torna a melhor alternativa para realocação desses materiais. Resíduos, como a fração vermelha da construção e demolição, que juntamente com a cal, apresentaram bons resultados na estabilização do solo, como podemos observar nos trabalhos de COSTA *et al.* (2018) e JULIO (2018), possibilitam o barateamento de processos, como, por exemplo, o uso de material granular na pavimentação de vias poderá ser substituído por um processo financeiramente mais viável e que apresenta resultados tão bons quanto materiais não reciclados.

Além dos processos de adição de cal e resíduos no solo o processo de compactação é um grande auxiliador no aumento de resistência. Compactar um solo é um processo mecânico, que consiste na aplicação rápida e repetida de cargas no mesmo, causa expulsão do ar contido em seus vazios e diminuição de seu volume, sem alterar de maneira significativa seu teor de água e volume de suas partículas sólidas. Por meio de tal processo, o contato entre as partículas

sólidas aumenta o que torna o solo mais resistente e menos propenso a deformação (SANTOS, 2008).

Com a energia de compactação adequada e as proporções pré definidas de cal e fração vermelha, as resistências desejadas podem ser alcançadas, o que gera mudanças não só na questão geotécnica, mas também impactos positivos em relação ao reuso adequado do Resíduo da Construção e Demolição (RCD), e por fim, tornam as possibilidades de aumento da malha viária brasileira pavimentada uma realidade menos distante, através de um processo benéfico em vários quesitos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão explorados os conceitos fundamentais para o entendimento do presente trabalho.

2.1 GEOLOGIA

Define-se geologia por, ciência que estuda a estrutura terrestre. Conhecimentos oferecidos pelos conceitos da geologia são de suma importância para o desenvolvimento de técnicas inovadoras e benéficas para a sociedade, principalmente quando nos referimos ao ramo da engenharia civil, pois nos fornece informações a respeito das características físicas, geológicas, composição e comportamento dos diferentes tipos de solo. Um exemplo é na construção de estradas, quando não existe um conhecimento prévio do solo por onde seguirá o traçado, surpresas desagradáveis podem surgir, como a presença de um terreno argiloso mole, que impede a conclusão da obra sem que antes seja feito o melhoramento desse solo.

2.2 SOLOS

Um emaranhado de sólidos, líquidos e gases, que apresentam comportamento dinâmico, e são classificados como materiais minerais ou orgânicos compõem os solos. Tal composição, acompanhada de matéria viva e transformações causadas pelo homem, forma a grande maioria das camadas superficiais do nosso planeta (EMBRAPA, 2006).

A formação dos solos está diretamente ligada com o intemperismo, seja ele químico ou físico, esse é causado por ações do meio ambiente, como alterações causadas pela movimentação de água, variações de temperatura e ações do vento. Aquele está relacionado com transformações químicas de solubilização e deposição de minerais das rochas. Na engenharia civil, solos são tidos como um aglomerado dos produtos gerados pela decomposição das rochas, que apresentam facilidade de escavação, e que são utilizados em conjunto com outros insumos para construir e suportar estruturas (ORTIGÃO, 2007).

2.2.1 Caracterização Dos Solos

Três características apresentadas pelos solos são de suma importância para sua classificação, são elas: granulometria, que consiste na análise da distribuição de dimensões dos grãos que compõem o solo, índices físicos, que é a determinação das concentrações de água, ar e sólidos presentes em um elemento do solo, é analisado através de relações entre os índices físicos e fornece informações referentes a grau de saturação, peso específico, densidade dos grãos, entre outros, e limites de Atterberg, que denomina o índice de plasticidade do solo, a partir da divisão e classificação do solo em relação a sua umidade em detrimento ao limite de estado físico apresentado pelo mesmo, os limites definidos são de contração, plasticidade e liquidez (ORTIGÃO, 2007).

2.2.2 Tipos De Solos

A superfície terrestre possui tipos diversos de solos, que podem variar em sua composição e apresentar características próprias e diferenciadas, como: cor, consistência, densidade, formação química, origem, comportamento, entre outras. Essa diferença de comportamento apresentada pelos diferentes tipos de solo tornou necessário o agrupamento dos mesmos, levando em consideração suas características de interesse. A importância desse agrupamento, principalmente para o ramo da engenharia, está relacionado com a possibilidade de poder ter um conhecimento prévio do comportamento do solo ou, pelo menos, direcionar o estudo a ser feito antes de iniciar qualquer atividade envolvendo o mesmo (PINTO; PREUSSLER, 2002).

Segundo Vaz (1996), os solos podem ser divididos, de uma maneira geral, em dois principais grupos, os solos residuais e os solos transportados. O primeiro são aqueles em que os resíduos gerados pelo intemperismo sofrido pela rocha primária permanecem no local de origem, formando o manto do intemperismo. A profundidade desses solos depende, principalmente, do tempo de exposição e das condições climáticas (TERZAGUI, PECK, 1962).

De acordo com Oliveira e Brito (1998), os solos transportados são aqueles que sofreram deslocamento de seu local de origem para outro um lugar não

específico, através de algum agente transportante, e lá foram depositados. Possuem profundidade variada e apresentam, geralmente, depósitos menos consolidados e aspecto mais fofo que outros solos. O modo que esses solos são transportados foi utilizado para caracterizá-los, são eles: aluviais (transportados pela água), eólicos (transportados pelo vento), coluviais (transportados pela gravidade) e glaciais.

2.2.3 Classificação De Solos

A classificação de solos tem por objetivo, principalmente no viés da engenharia, ter uma noção do provável comportamento do solo ou, no mínimo, direcionar as análises a serem feitas para o devido conhecimento do material existente no local (BORDIGNON, 2015).

Na engenharia, a classificação é feita, basicamente, através da consideração das dimensões das partículas que compõem o solo. Ou seja, através de uma análise granulométrica são realizadas análises para determinar a porcentagem de cada partícula, dentre elas: grãos de argila, silte, pedregulhos, pedra e areias (DAS, 2007).

Em resumo, pode-se citar como as principais classificações granulométricas de solo mundialmente conhecidas: ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), AASHTO (American Association for State Highway and Transportation Officials), ASTM (American Society for Testing Materials) e CEN (Comité Européen de Normalisation). O Brasil toma como base os preceitos da NBR 6502 (BORDIGNON, 2015). A Tabela 1 expõe um compilado de informações relevantes presente nas classificações citadas.

Tabela 1 - Principais Classificações Granulométricas dos Solos

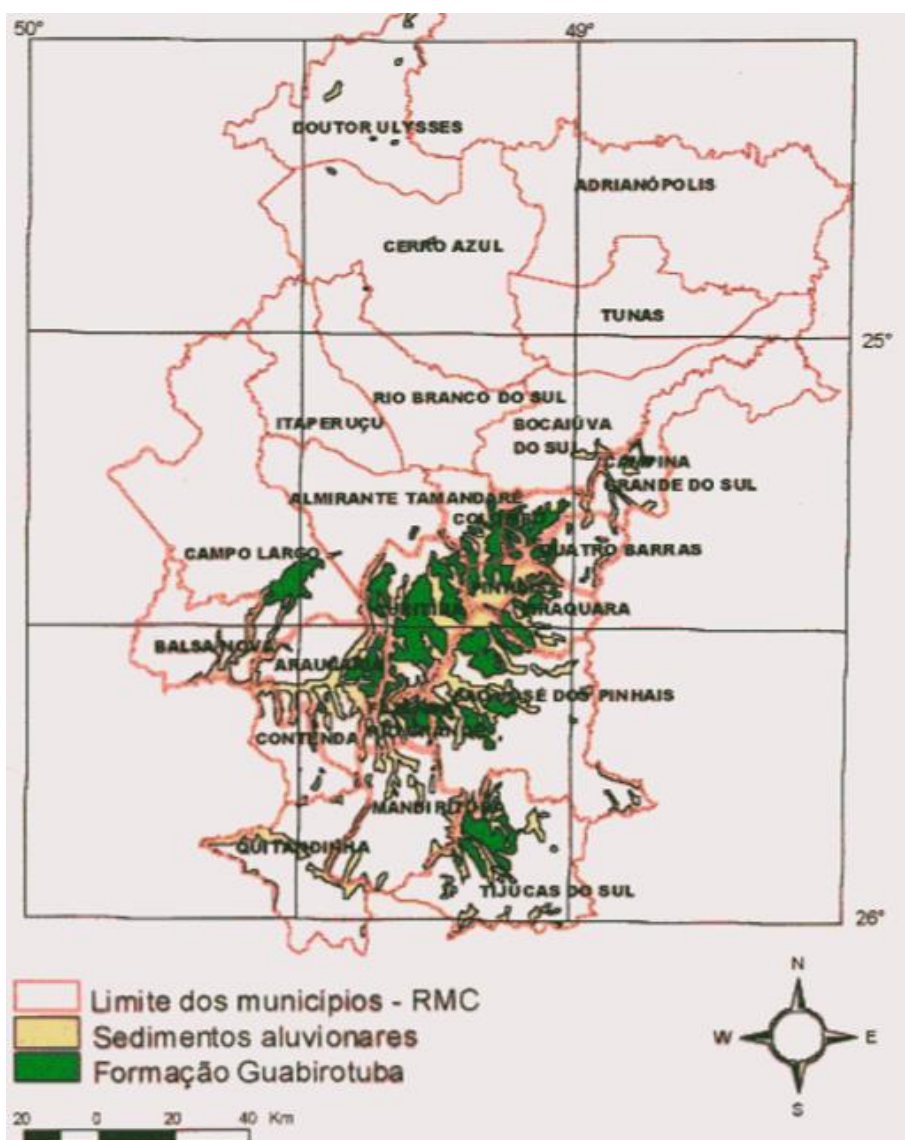
Partícula	ABNT(mm)	AASHTO (mm)	ASTM (mm)	CEN (mm)
Pedregulho	2 - 6	2 - 60	4,75 - 60	2 - 20
Areia	0,06 - 2	0,075 - 2	0,075 - 4,75	0,02 - 2
Silte	0,002 - 0,06	0,005 - 0,075	0,005 - 0,075	0,002 - 0,02
Argila	<0,002	0,001 - 0,005	0,001 - 0,005	<0,002

Fonte: Bordignon (2015).

2.3 FORMAÇÃO GUABIROTUBA

Grande parte da região da capital paranaense se localiza sobre a formação geológica denominada de formação Guabirotuba, como pode ser observado na Figura 1. Suas características de maior realce são elevada rigidez e dureza em seus primeiros metros de solo, é comum encontrar valores entre 15 e 30 golpes em sondagens SPT, composta principalmente por argilas siltosas e siltes argilosos e ao manusear o solo, as feições constituem um plano de fraqueza que dividem o material em fragmentos simétricos a decímetros (KORMANN, 2002).

Figura 1 - Formação Guabirotuba na região metropolitana de Curitiba



Fonte: Adaptado de FELIPE (2011).

A elevada consistência do solo se dá pelo seu elevado valor de pré-adensamento. Alguns indícios admitem que a bacia que envolve a região de Curitiba teria alcançado altitudes de até 960 metros.

Todavia, a argila, que é presente neste tipo de formação, ao ser umedecida apresenta-se lisa e escorregadia, fato esse que se somado a ações antrópicas tornam frequentes os acidentes envolvendo escavações.

Além disso, levando em consideração que o solo dessa região, durante a maior parte do ano, apresenta uma umidade superior a 30%, ao ressecar em contato com a atmosfera tem uma grande redução volumétrica, atribuindo ao material um aspecto laminado. Esse solo ao ser reumidificado apresenta uma rápida desagregação favorecendo processos de erosão (Kormann 2012).

2.4 PAVIMENTAÇÃO

Segundo Balbo (2007),

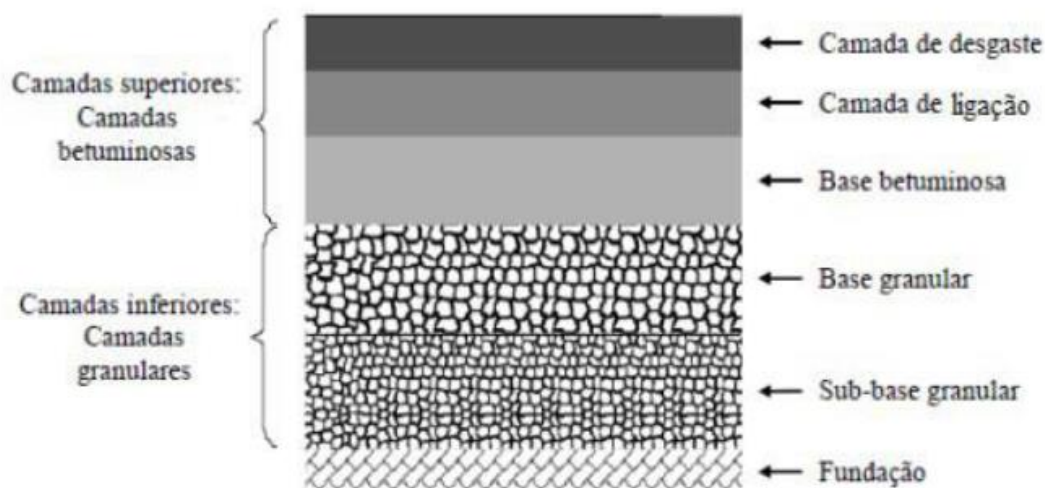
“O pavimento é uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir de um subleito de um corpo estradal, adequada para atender estruturalmente e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerados diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação, obrigatórios”.

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006), ao se fazer uma análise pouco aprofundada, os pavimentos são classificados em flexíveis e rígidos.

Em conformidade com o Manual de Pavimentação do DNIT, os pavimentos flexíveis sofrem deformações elásticas em todas as suas camadas quando submetidos à solicitações, sendo assim, a carga se divide

proporcionalmente em todas as camadas. Tal composição em camadas dos solos flexíveis pode ser notada na Figura 2.

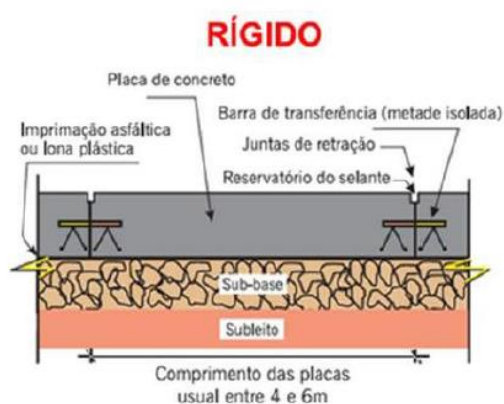
Figura 2– Composição dos pavimentos flexíveis



Fonte: SARTORI (2015).

Pavimento rígido apresenta elevada rigidez em seu revestimento, por consequência transfere uma fração pequena do carregamento para as camadas inferiores, ou seja, praticamente toda solicitação é absorvida pelo revestimento (Manual de Pavimentação do DNIT, 2006). Na Figura 3 é apresentado um corte esquemático de um pavimento rígido.

Figura 3 – Corte esquemático de um pavimento Rígido



Fonte: MIRANDOLA *et al.* (2016).

A estrutura do pavimento em geral tem por característica as camadas superiores com uma maior resistência, de modo que as tensões atuantes sejam transmitidas com menor intensidade para as camadas inferiores até a fundação

As camadas do pavimento podem se dividir em revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. Em alguns casos as camadas de sub-base e subleito não são necessárias.

O revestimento não deve sofrer grandes deformações elásticas, plásticas, desagregação e descompactação, e para isto deve ser composto de materiais aglutinados que evitem essas movimentações.

Já a base e sub-base tem por objetivo, assim como as camadas superiores, reduzir os esforços que chegam na fundação, podendo então se constituir por solos estabilizados naturalmente ou por misturas de solos e agregados, brita granulada, brita granulada tratada com cimento, solo estabilizado quimicamente, dentre outros métodos.

E por último o subleito, é o material natural encontrado, normalmente após a retirada de uma camada de solo orgânico superficial. Para que atua como subleito é necessário que o material seja consolidado e compactado. Entretanto, em situações em que o solo é de pequena ou medíocre resistência é necessário que seja feito um subleito, para compensar estruturalmente a pavimentação, e para isso é adicionado uma camada de solo melhorado e compactado, que sirva como reforço para a estrutura (baldo 2007).

2.5 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Estabilização do solo é um método utilizado para aumentar a resistência e a durabilidade do material, a fim de torná-lo resistente aos esforços causados pelo tráfego e as intempéries (VOGT, 1971).

De modo geral, pode ser definida como a modificação de características do solo através da adição de agentes estabilizadores, que podem ser provenientes de fibras vegetais, aditivos químicos, cimento, cal, estabilização

granulométrica e, até mesmo, compactação, para que o solo apresente capacidade de atingir as necessidades definidas em projeto (FIORATTI, 2008).

Melhorar ou modificar as características que um solo apresenta pode ser visto como um método de viabilizar construções e desbravar novos territórios. Porém, não se deve deixar de lado a necessidade de alcançar tais objetivos aliados à economia financeira, que é viabilizada não só pelo fato de não precisar transportar solo, quando esse é estabilizado, mas também pela utilização de agentes de baixo custo, como é o caso de estudo do presente trabalho.

Evitar a construção em cima de um solo ruim pode ser considerado o cerne do conceito de estabilização do solo, pois é a partir desse ideia que os estudos e desenvolvimentos de métodos de melhoramento ganharam força. Evitar construir em um solo ruim, evita, conseqüentemente, retrabalhos.

A estabilização de um solo leva em consideração as propriedades e necessidades apresentadas pelo mesmo, em termos físicos, químicos e mecânicos. A escolha do método leva em consideração o custo-benefício (CORDEIRO, 2007).

Existem três principais métodos utilizados para estabilização dos solos, são eles: estabilização mecânica, granulométrica e química.

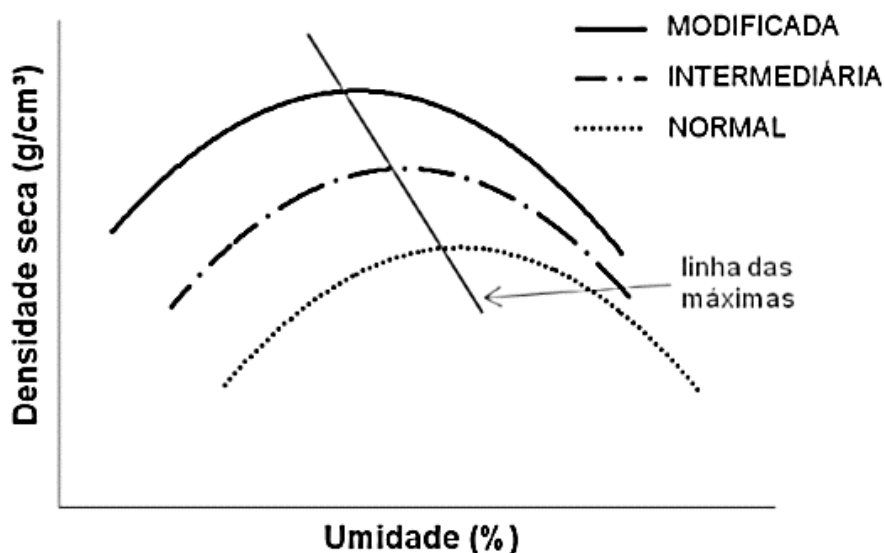
2.5.1 Estabilização Mecânica

A estabilização mecânica tem como objetivo atribuir ao solo uma densificação máxima, tomando como base uma energia de compactação e umidade ótima, usando as propriedades de correção granulométrica do solo. (SARTORI, 2015).

Compactar um solo, seja através de métodos manuais ou mecânicos, tem como finalidade de reduzir sua porcentagem de vazios e aumentar sua resistência e estabilidade. Tal ação também melhora os aspectos de permeabilidade, compressibilidade e absorção da água apresentados pelo solo (CAPUTO, 1988).

Segundo Pinto (2006), maior será o peso específico máximo e menor será o teor de umidade ótimo, quando a energia de compactação for a maior possível. Conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4 – Curva de compactação para diferentes energias de compressão



Fonte: Adaptado de PINTO (2006).

2.5.2 Estabilização Granulométrica

É tida como o ato de adicionar ou retirar partículas do solo, para que as propriedades desejadas possam ser alcançadas.

Utiliza-se um material que possua a faixa granulométrica de interesse e torne possível a adequação do solo às características especificadas. Em alguns casos, não se tem disponibilidade de apenas um material que supra a necessidade de correção, nessas situações é realizada o emprego de dois ou mais materiais para alcançar a faixa granulométrica de interesse e atender as especificações normativas (CAPUTO, 1988).

2.5.3 Estabilização Química

Pode ser definida como a adição de substâncias químicas ao solo, as quais farão com que o mesmo apresente significativa melhora em seu

desempenho, os principais insumos utilizados para tal fim são cal ou cimento. Essa técnica apresenta bons resultados em relação ao aumento da resistência a compressão simples, ao cisalhamento e a impermeabilização (OLIVEIRA, 2000).

Para Patrício (2015), materiais cimentantes ou não, quando adicionados ao solo e atribuem melhorias a ele, do ponto de vista da engenharia é considerado estabilização química.

2.6 CAL

A cal possui a capacidade de atribuir melhor funcionalidade e melhorar as características do solo, por tais motivos é deveras utilizada na construção de estradas, pois contribui, significativamente, para estabilidade, impermeabilidade e capacidade de suporte (BORDIGNON, 2015).

A característica de importância oferecida pela cal, quando se busca algum melhoramento para o solo é o seu ganho de resistência após o endurecimento quando na presença de água (FREITAS JUNIOR, 2013).

2.6.1 Cal Virgem

A NBR 6453 (ABNT 2003) define como cal virgem o produto gerado através da calcinação das rochas carbonatadas cálcicas e cálcio-magnesianas. De acordo com a ABNT (2003), em sua composição estão presentes os óxidos de cálcio ou óxidos de cálcio mais óxidos de magnésio, produzidos pela calcinação quando exposto à temperaturas 900 a 1200°C, de calcários, calcários magnesianos e dolomíticos.

2.6.2 Cal Hidratada

De acordo com a NBR 7175 (ABNT, 2003), a cal virgem, após sofrer hidratação, gera um pó, denominado cal hidratada, constituído essencialmente de uma mistura de hidróxido de cálcio e hidróxido de magnésio. A mesma norma ainda especifica que a cal hidratada deve ser classificada de acordo com teores

de óxidos não hidratados e carbonatos, de exigências químicas e físicas mínimas.

Na construção civil a cal hidratada é utilizada como aglomerante em argamassas, principalmente por fornecer características de trabalhabilidade, durabilidade, aderência e plasticidade às argamassas. Por ser extremamente fina, apresenta bastante rentabilidade na produção de argamassas, diminuindo os custos (MINASCAL, 2019).

2.6.3 Estabilização de Solo com Adição de Cal

O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) define solo-cal como uma mistura composta por solo, cal e água, que pode apresentar material pozolânico. O teor de cal mais frequente é de 5% a 6% e o processo de estabilização ocorre através da modificação do solo por carbonatação e pozolanização. Tal processo gera uma pavimentação considerada semirrígida.

Assim como as misturas feitas com cimento, o objetivo é o mesmo quando se investe no sistema solo-cal, ou seja, gerar um aumento da rigidez e da trabalhabilidade, e reduzir a expansão (BERNUCCI et al. 2008).

SILVA (2010) afirma que,

“A estabilização de solos com cal tem-se revelado um método eficaz, mas também ecológico e econômico, na medida em que permite o aproveitamento dos solos existentes no local onde a obra será implementada, ao invés de substituí-los por outros, evitando despesas adicionais e impactos ambientais”.

2.7 RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

Segundo a resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA do dia 05 de julho de 2002, os resíduos da construção e demolição (RCD) são: “os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de

obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.”

2.7.1 Classificação do RCD

O RCD se classificam em quatro classes, A, B, C, e D.

Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como:

- a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
- b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
- c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;

Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros;

Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso;

Classe D: são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde.

2.7.2 Destinação correta para o RCD

Os resíduos da construção devem ser enviados ao destino certo, pois podem gerar transtornos considerados de baixo impacto com obstrução de parte da via de pedestre, como transtornos de grande relevância, como por exemplo, entupimento de vias fluviais, de drenagem urbana ou até provocar foco de vetores de doenças.

Além de evitar problemas para o meio ambiente, o responsável técnico da obra evita grandes transtornos profissionais e legais ao enviar o RCD para o local correto, pois o CONAMA atribui a responsabilidade do descarte desses materiais ao responsável técnico da obra através da Resolução CONAMA 307 e com atualização na Resolução 348 do ano de 2004.

Atualmente segundo o Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA) os resíduos da construção civil são responsáveis por cerca de 50% a 70% dos resíduos sólidos gerados em centros urbanos e são responsáveis por grande parte da ocupação dos aterros no Brasil.

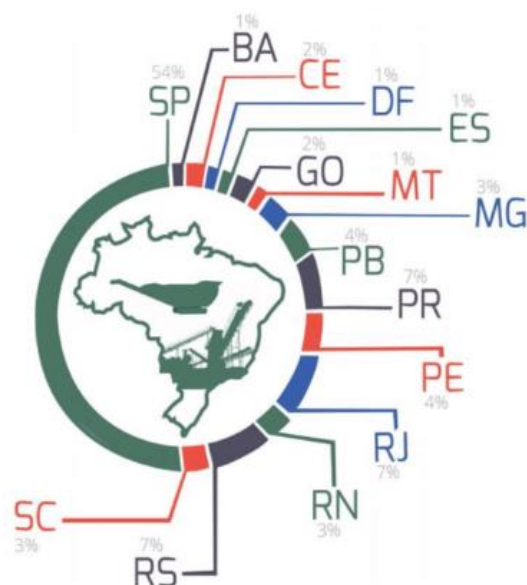
Entretanto, mesmo com descartes corretos, o viés da reciclagem se apresenta muito mais viável, levando em consideração que 50% do material aterrado pode ser reciclado ao em vez de ser simplesmente descartado. Haja vista que mesmo um aterro sanitário pode apresentar vazamentos contaminando assim um lençol freático próximo, além de ocupar áreas grandes mesmo com a otimização do espaço através da compactação dos descartes, além da poluição gerada pelos gases.

Reduzir a quantidade de descartes que são encaminhados para esses locais, significa reduzir o tamanho dos aterros sanitários, podendo ainda reduzir a quantidade de aterros nos municípios, possibilitando redução das chances de danos ao meio ambiente.

2.7.3 Mercado para reciclagem do RCD

Segundo o último levantamento do ABRECON existem cerca de 300 usinas que realizam a reciclagem do RCD e as mesmas estão distribuídas de maneira desigual no país, como é possível observar na figura 5 a seguir.

Figura 5 – Concentração de usinas por estado



Fonte: Relatório de pesquisa setorial ABRECON 2014/2015.

Segundo o relatório de pesquisa setorial do ABRECON do ano de 2014/2015, essas usinas têm uma capacidade de produção instalada de 5.000 a 10.000 m³/mês, entretanto por falta de demanda a produção de 52% das usinas opera em 3.000 m³/mês, e ainda 30% das usinas afirma ter capacidade para produzir 10.000 m³/mês mas apenas 11% delas opera nessa quantidade.

Nota-se que é extremamente importante que incentivos para a reciclagem do RCD sejam ofertados, pois a capacidade de produção existe.

2.7.4 Uso do RCD na pavimentação

Segundo Carneiro et al. (2001), o uso de agregados reciclados de RCD na execução de bases e sub-bases de pavimentos, apresenta inúmeras vantagens tanto econômicas, sociais e ambientais.

Segundo a ABRECON a economia de energia no processo de moagem do entulho (em relação à sua utilização em argamassas), uma vez que, usando-o no concreto, parte do material permanece em granulometrias graúdas.

Assim como, é possível utilizar uma maior parcela do entulho produzido, como o proveniente de demolições e de pequenas obras que não suportam o investimento em equipamentos de moagem/ trituração;

E, maior eficiência do resíduo quando adicionado aos solos saprolíticos em relação a mesma adição feita com brita. Enquanto a adição de 20% de entulho reciclado ao solo saprolítico gera um aumento de 100% do CBR, nas adições de brita natural o aumento do CBR só é perceptível com dosagens a partir de 40%.

Os estudos realizados por COSTA et al. (2018), embora o solo estabilizado com cal e fração vermelha do RCD não tenha atingido os resultados de resistência mínimos exigidos pelo DER/PR e pelo DNIT em relação as propriedades do solo estabilizado com cal e RCD para uso na pavimentação do solo, indicam que houve incrementos significativos na resistência usando a cal e fração vermelha de RCD. Logo, torna-se de significativo interesse continuar o estudo iniciado, porém aplicando, ao invés da energia de compactação normal, a energia de compactação intermediária.

Os ensaios de caracterização realizados por COSTA et al. (2018) podem ser considerados aliados para novos estudos. Os autores obtiveram a superfície de resposta dos resultados, que possibilita estimar os parâmetros desejados da mistura em composições intermediárias aos limites de adições estudados, a fração vermelha substituiu parte do solo em níveis de 12,5% e 25% e a cal foi adicionada em teores de 3%, 6% e 9%.

2.7.5 Solo da formação Guabirota

O solo estudado neste trabalho, é proveniente da formação guabirota, formação esta muito característica da região de Curitiba.

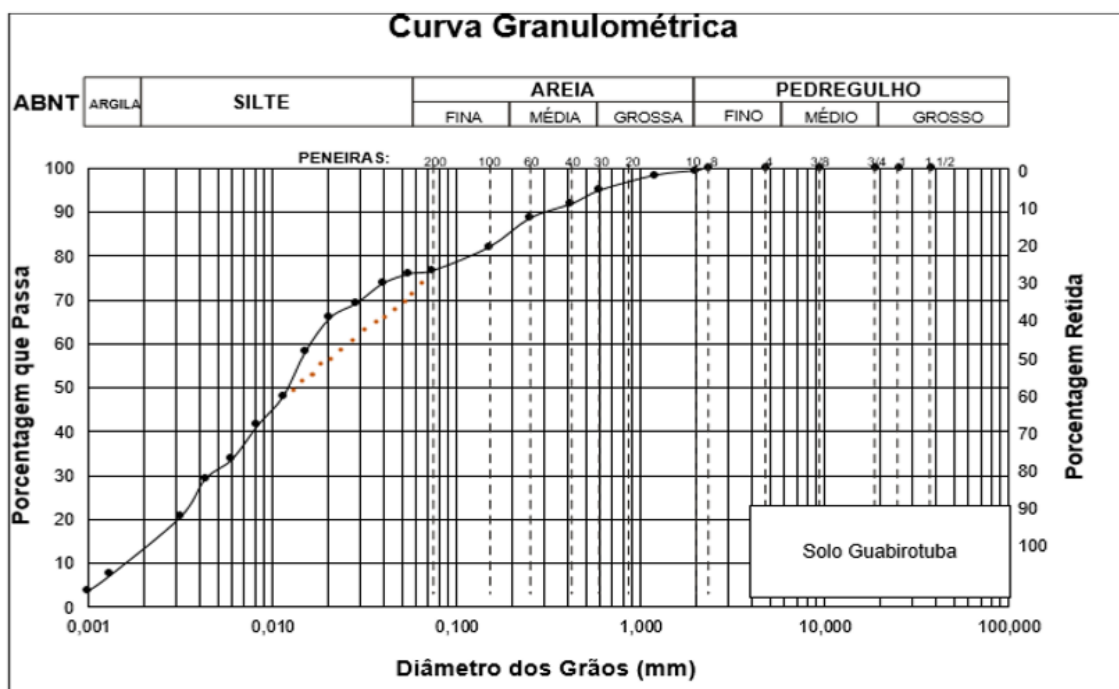
Figura 6 – Coleta de solo na região de Curitiba-PR



Fonte: SALES et al (2017).

SALES *et al.* (2017) obtiveram para o solo natural uma massa específica real dos grãos de $2,75 \text{ g/cm}^3$ e, a partir de ensaios de peneiramento e granulometria, a curva granulométrica representada na Figura 7.

Figura 7 – Curva granulométrica do solo natural



Fonte: SALES et al. (2017).

Os estudos de SALES *et al.* (2017) também apontaram a composição granulométrica do solo natural, em conformidade com a NBR 6508, tal resultado pode ser observado na Tabela 2.

Tabela 2 – Composição granulométrica do solo natural

Argila	Silte	Areia			Pedregulho
		Fina	Média	Grossa	
15%	61%	10%	9%	4%	1%

Fonte: SALES *et al* (2017).

Os valores de limites físicos de consistência da amostra de solo utilizada no presente trabalho, obtidos via ensaios de limite de liquidez (LL), limite de plasticidade (LP) e determinação do índice de plasticidade (IP), foram realizados por COSTA *et al.* (2018) e estão representados na Tabela 3.

Tabela 3 – Limites físicos de consistência para o solo-RCD-cal

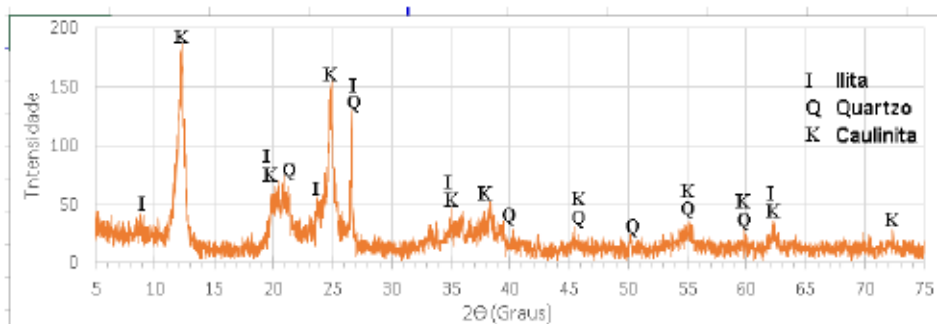
Composição	LL	LP	IP
100% SN	45	37	8
87,5% SN 12,5% FV 0% CAL	44	35	9
87,5% SN 12,5% FV 3% CAL	45	34	11
87,5% SN 12,5% FV 6% CAL	47	40	7
87,5% SN 12,5% FV 9% CAL	45	40	5
75% SN 25% FV 0% CAL	43	36	7
75% SN 25% FV 3% CAL	45	41	4
75% SN 25% FV 6% CAL	45	37	8
75% SN 25% FV 9% CAL	46	39	7

Fonte: COSTA *et al* (2018).

COSTA *et al.* (2018) também realizaram ensaio de Difractometria de raios X, que caracteriza o solo em relação aos minerais que o compõem. A partir do ensaio, verificaram a “presença de illitaargilomineral pertencente ao grupo das micas corroborando a característica micácea dos solos tipo A-5 na classificação TRB. Notou-se também a presença do mineral quartzo e argilomineral caulinita. O baixo valor do índice de plasticidade pode ser atribuído ao pequeno caráter expansivo desses argilominerais, devido à inexistência da expansão

intracristalina atribuída a uma estrutura cristalina bem organizada com ligações relativamente fortes por causa da presença do íon potássio, sendo esses também precursores para uma certa lentidão nas reações com a cal se comparado com outro argilomineral, a montmorilonita”, os resultados descritos podem ser observados na Figura 8.

Figura 8 – Resultado do ensaio de Difratomia de raios X



Fonte: COSTA *et al* (2018).

Para definir a composição química do solo, COSTA *et al.* (2018) também realizaram o ensaio de Espectrometria de Fluorescência de raios X, que detalha a composição química do material experimentado. O mesmo ensaio foi realizado para o resíduo de RCD, os resultados obtidos podem ser observados nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 – Teores de óxidos presente no solo

Óxidos	Teor (%)
SiO ₂	49,14
Al ₂ O ₃	43,26
SO ₃	5,34
K ₂ O	1,04
TiO ₂	0,62
Fe ₂ O ₃	0,57
V ₂ O ₅	0,03

Fonte: COSTA *et al* (2018).

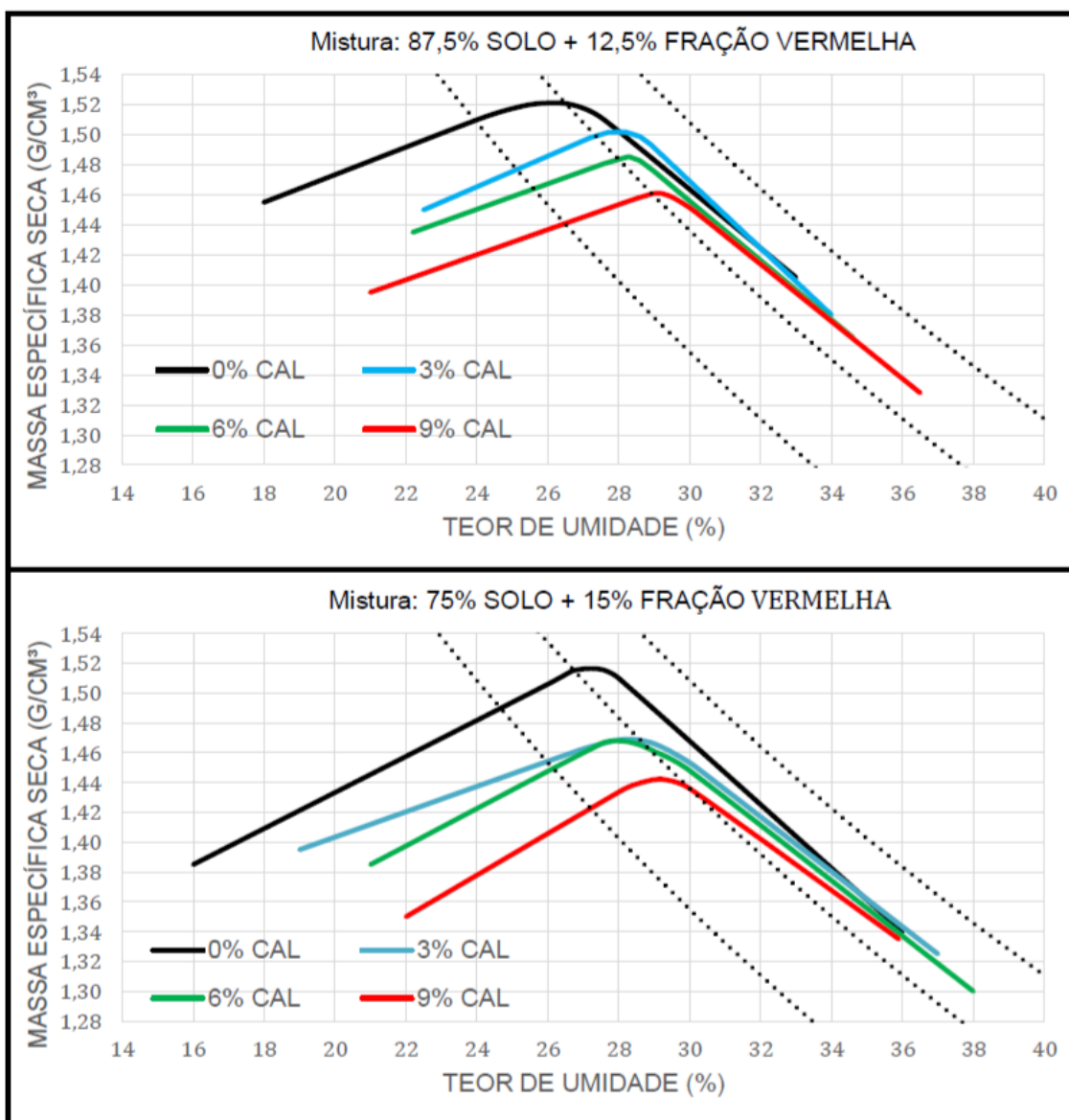
Tabela 5 – Teores de óxidos presente na fração vermelha de RCD

Óxidos	Teor (%)
SiO ₂	48,99
Al ₂ O ₃	42,42
SO ₃	5,71
K ₂ O	1,36
TiO ₂	0,76
Fe ₂ O ₃	0,72
V ₂ O ₅	0,04

Fonte: COSTA *et al* (2018).

2.8 MASSA ESPECÍFICA SECA E TEOR DE UMIDADE SOLO-RCD-CAL

Segundo os resultados encontrados por COSTA *et al* (2018), é possível definir que a massa específica seca aparente e o teor de umidade seguem o comportamento apresentado no Gráfico 4. Tal gráfico contém os resultados obtidos por Costa *et al* (2018), houveram poucas mudanças na umidade ótima e na massa específica aparente seca em relação a diferentes concentrações de cal (3%, 6% e 9%), de modo que, nos ensaios de Proctor do presente trabalho, foram realizados ensaios em amostras com apenas 3% de Cal.

Gráfico 1 – Resultados dos ensaios de Proctor obtidos por COSTA *et al* (2018)

Fonte: Costa *et al* 2018.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Neste capítulo os materiais utilizados na pesquisa serão caracterizados por sua origem, procedência e particularidades.

3.1.1 Fração Vermelha

A fração vermelha de interesse do presente estudo tem origem em uma olaria localizada na região da capital paranaense, Curitiba. Segundo dados fornecidos pela própria olaria, o material é proveniente de telhas cerâmicas produzidas em forno que atinge temperatura máxima de 900°C em sua parte superior e 800°C em sua parte inferior (SALES *et al.* 2017).

Com base no trabalho de COSTA *et al.* 2018 o efeito aglomerante da união entre fração vermelha e a cal será analisado utilizando adições com diâmetro menores que 0,15 mm. No trabalho citado acima a granulometria foi obtida por meio da moagem do material com auxílio do moinho de bolas e posterior peneiramento com peneira padronizada pela ABNT de malha n°100, portanto se caracteriza como material fino, ainda segundo Costa *et al.* 2018, a densidade real encontrada foi de 2,668 g/cm³ e o teor de hidróxido de cálcio fixado é de 641,95 mg/g.

3.1.2 Cal

Para o presente estudo optou-se pela utilização da cal hidratada, classificada como CH-III e regulamentada pela NBR 6473 (ABNT,2003). De acordo com MAZER (2017), tal material é constituído de hidróxidos de cálcio e magnésio, e por uma pequena parte de hidróxidos não hidratados, além de estarem presentes carbonatos de cálcio e magnésio.

Reações de álcali-ativação devem ser consideradas, já que os níveis de pureza e magnésio são relevantes, pois a cal durante o endurecimento reage com o CO₂ presente na atmosfera e se fixa ao carbonato de cálcio ou de carbonato de magnésio.

3.1.3 Solo

O solo utilizado foi coletado em um loteamento de um condomínio, localizado na Fazenda Rio Grande, no bairro Gralha Azul, na Rua Francisco da Conceição Machado. A região foi escolhida por apresentar formação Guabirota não contaminada. A coleta foi realizada em uma profundidade de 1,5 metros abaixo da superfície do terreno com auxílio de uma escavadeira, tal situação pode ser observada na Figura 6 (SALES *et al.* 2017).

O solo em questão já esteve presente em trabalhos anteriores, entre eles pode-se citar SALES *et al.* (2017), JULIO (2018) e COSTA *et al.* (2018).

3.2 MÉTODOS

Neste capítulo os métodos utilizados na pesquisa serão descritos e detalhados, assim como os equipamentos utilizados e a importância de seus resultados para validação do estudo.

3.2.1 Ensaio de Compactação

Para embasar os ensaios de compactação será utilizada a norma NBR 7182 (ABNT, 2016), que fornece a máxima massa específica aparente seca e o teor de umidade ótimo do solo, os resultados obtidos orientam a moldagem dos corpos de prova. A energia de compactação utilizada na realização do ensaio será a proctor intermediária, em amostras de solo com duas proporções diferentes da fração vermelha de RCD e em misturas de solo-cal-fração vermelha de RCD, que serão detalhadas nos próximos capítulos.

Na Tabela 6 estão caracterizadas as energias de compactação normal, intermediária e modificada estabelecidas pela NBR 7182 (ABNT, 2016).

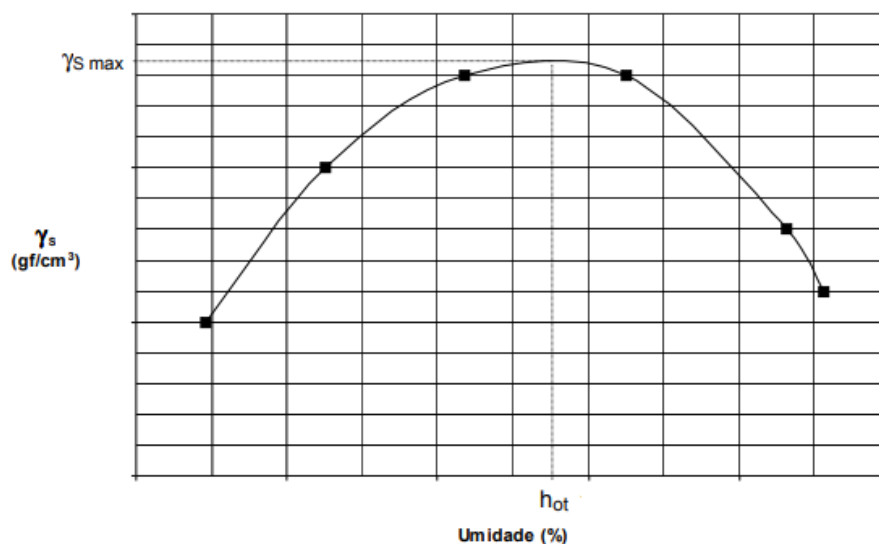
Tabela 6 – Energias de compactação

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 7182/1986 (modificada).

Para elaborar o traçado da curva de compactação é necessário criar um gráfico que apresente um formato, aproximadamente, parabólico. O ponto máximo da curva deve conter o peso específico aparente seco máximo do solo (γ_{smax}), a este ponto é associado o teor de “umidade ótima” (h_{ot}) (KORMANN, 1997). Tal curva é representada na Figura 9.

Figura 9 - Curva de compactação



Fonte: Kormann modificada (1997).

O procedimento do experimento consiste em destorroar o solo passante na peneira n° 4 ou 4,8 mm e em seguida determinar a umidade higroscópica do solo. É necessário prever a separação de materiais suficientes para preparação de cinco pontos que formarão a curva de compactação. Após a fase de organização, se inicia a fase de moldagem preenchendo a primeira camada de um terço do cilindro com material, em seguida são aplicados 21 golpes com o soquete, após a execução de cada camada é necessário escarificar a superfície com auxílio de espátula.

Em seguida, o conjunto cilindro mais material úmido compactado é pesado. O corpo de prova é removido do cilindro com o auxílio do extrator, partido ao meio e são coletadas 3 amostras em diferentes pontos, do início, do meio e do fim do volume. Tal procedimento será realizado com 5 teores de umidades diferentes. Depois da coleta dos dados de interesse, valores de umidade e peso específico aparente seco, os resultados serão plotados para formar a curva de compactação e extrair os dados oferecidos pelo peso específico aparente seco máximo e umidade ótima.

3.2.2 Moldagem e Cura dos Corpos de Prova

Os corpos de prova (CPs) serão executados em molde cilíndrico modificado com 50 mm de diâmetro e 100 mm de altura, tais dimensões atendem à relação 2:1 exigida. A escolha pode ser justificada pela economia gerada no ensaio de compressão simples, pela facilidade de movimentação dos compostos, propicia maior agilidade e velocidade na execução dos CPs, menor esforço físico do operador e melhor precisão nos corpos de prova em relação à sua massa.

A dosagem para modelagem dos corpos de prova será feita levando em consideração a pesquisa de solo-cal e fração vermelha realizada por Costa et al. (2018) que foi detalhada na tabela 3. O peso próprio aparente seco e a umidade de modelagem foram obtidos no ensaio de Proctor energia intermediária.

Também dos trabalhos de Costa et al. (2018) foram definidas as 9 dosagens através de um planejamento experimental fatorial completo 3 elevado a 3, a serem estudadas nessa pesquisa, exemplificadas na Tabela 7.

Tabela 7 – Composições definidas para ensaios de comportamento mecânico

COMPOSIÇÃO	SOLO	FRAÇÃO VERMELHA	CAL
1	100	0	3
2	75	25	3
3	87,5	12,5	6
4	100	0	9
5	75	25	9
6	75	25	0
7	87,5	12,5	0
8	87,5	12,5	9
9	100	0	0

Fonte: Adaptado de COSTA et al (2018).

A cal em pó será adicionada ao solo com a porcentagem definida de fração vermelha e uma nova homogeneização será feita, após esse processo se iniciará a moldagem dos CPs.

Os CPs contendo composições de solo, cal e fração vermelha de RCD serão identificados com números de 1 a 5. Para cada ponto serão moldadas 5 amostras, totalizando 45 corpos de prova. Após a moldagem, os CPs serão embalados em papel filme, identificados e submetidos ao processo de cura em câmara úmida. Tal processo tem duração de 28 dias e os processos de armazenamento seguirão as indicações da NBR 12024 (ABNT, 1992).

3.2.3 Ensaio de Resistência à Compressão Simples

Os ensaios de resistência à compressão simples seguirão as orientações descritas pela NBR 12025 (ABNT, 2012). No qual os corpos de prova serão

submetidos ao rompimento em prensa universal e seus respectivos dados de ruptura serão arquivados.

O ensaio em questão objetiva verificar a efetividade da estabilização do solo e consiste em aplicar cargas por meio da utilização da máquina da marca EMIC, modelo DL 30000 N, com célula de carga modelo TRD-29 calibrada, velocidade de deformação de 0,20 mm/s e capacidade de carga de 30000 N, até alcançar o rompimento.

3.2.4 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC – CBR) e Expansão

A metodologia do ensaio consiste em confeccionar corpos de prova com 5 camadas em cilindro padrão e compactadas com 26 golpes, utilizando soquete padrão da energia intermediária, as camadas devem ser escarificadas após a compactação antes de receber a camada seguinte. Tanto a altura do soquete, quanto a massa, devem seguir os valores estabelecidos por norma. A energia de compactação utilizada para a moldagem do CBR será a Proctor intermediária.

A dosagem para a moldagem dos corpos de prova também será feita levando em consideração a pesquisa de solo-cal e fração vermelha de RCD realizada por COSTA *et al.* (2018) que está detalhada na Tabela 3. A quantidade de água que será adicionada será calculada a partir do teor de umidade ótimo, com o objetivo de alcançar o respectivo peso específico máximo proveniente do ensaio de compactação.

Na sequência do ensaio, os corpos do ISC moldados serão imersos em água para posterior avaliação da expansão do material, o período de ensaio será de 96 horas, conforme realizado por SALES *et al.* (2017) apud COSTA *et al.* (2018). As leituras do ensaio serão realizadas nos instantes (0, 2, 4, 8, 24, 48, 72 e 96) horas após a imersão, a partir de um extensômetro graduado em 0,01 mm.

Assim que o período de imersão for cumprido, serão realizados ensaios de penetração com auxílio de máquina universal, os resultados de penetração e deformação fornecidos pelo equipamento serão armazenados e posteriormente

analisados. A norma de referência para esse ensaio é a NBR 9895 (ABNT, 1997).

O ensaio realizado neste trabalho foi realizado para 3 amostras com diferentes concentrações de solo, fração vermelha de RCD e cal, primeira amostra com 75% de solo, 25% fração vermelha de RCD e 0% cal, segunda amostra com 75% solo, 25% fração vermelha de RCD e 9% de cal e terceira amostra com 100% solo, 0% fração vermelha de RCD e 9% de cal. Tais amostras foram escolhidas com intuito de analisar as concentrações máximas de interesse do presente estudo. Os corpos de provas foram levados para prensa, conforme Figura 10, para obter os resultados do ensaio CBR.

Figura 10 - Prensa para realização do ensaio CBR



Fonte: Autores.

Os corpos de prova foram moldados e colocados imersos em água, conforme Figura 11.

Figura 11 - Corpos de prova imersos em água para o ensaio de expansão



Fonte: Autores.

4 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos através dos ensaios supracitados e suas respectivas análises.

4.1 ENSAIO DE PROCTOR

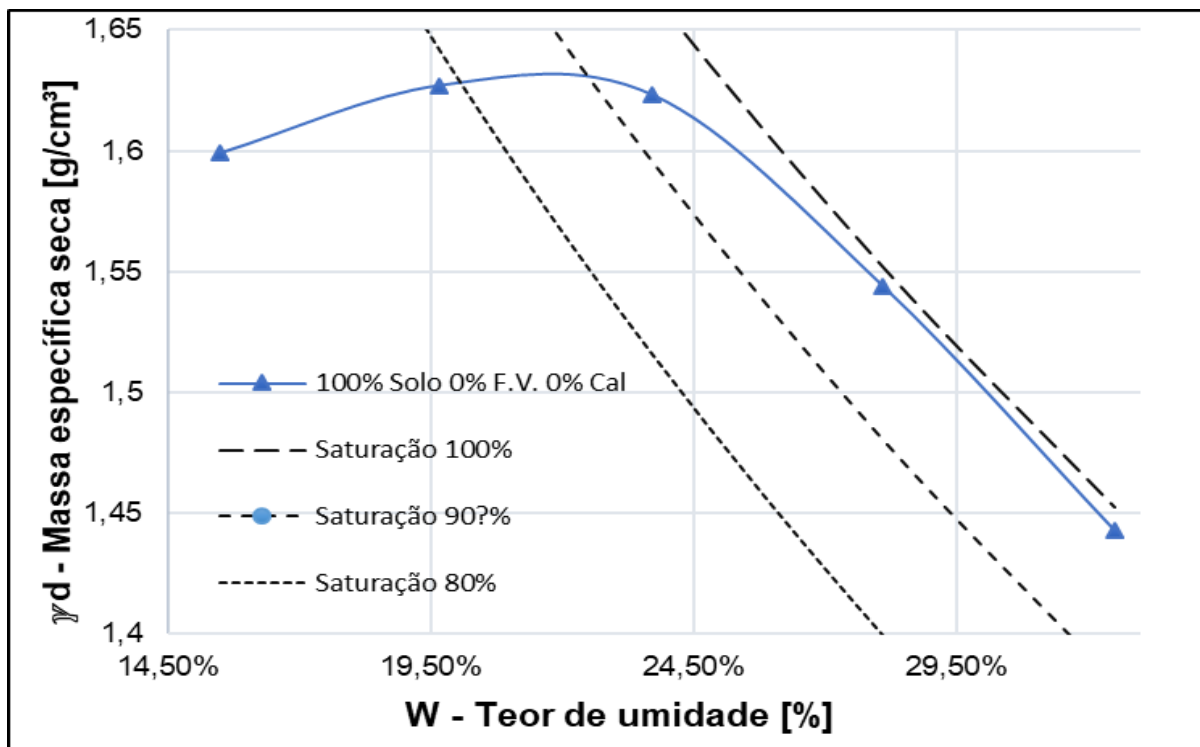
Com base no ensaio de compactação com concentração de 100% de solo e 0% dos outros componentes de interesse, aplicando energia de compactação intermediária, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 8, em que W é a umidade e γ_d é a massa específica seca. Os valores foram obtidos a partir da curva de compactação obtida, traçada na Gráfico 8.

Tabela 8 – Dados obtidos no ensaio de compactação com 100% de solo, 0% de fração vermelha e 0% de CAL, com energia intermediária

PONTO	W (%)	γ_d (g/cm³)
1	15,47	1,599
2	19,66	1,627
3	23,71	1,623
4	28,09	1,544
5	32,50	1,443

Fonte: Autores.

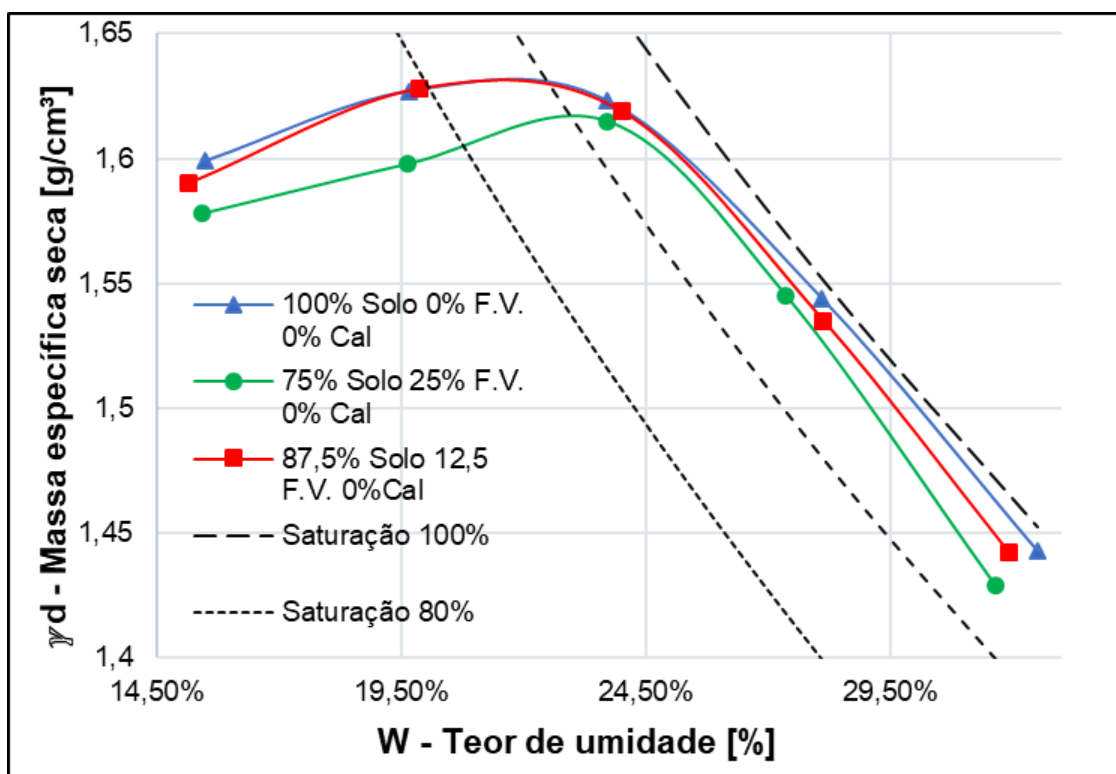
Gráfico 2 - Curva de compactação para solo sem adições, com energia intermediária



Fonte: Autores.

O peso específico aparente seco máximo foi definido como $1,64 \text{ g/cm}^3$ e o teor de umidade ótimo foi definido como $22,50\%$. A literatura aponta que para solos argilosos o teor de umidade ótimo varia entre 18% e 25% . Na Gráfico 2 é possível notar a influência da adição de fração vermelha, em diferentes concentrações, no comportamento do solo.

Gráfico 3 - Influência da adição de fração vermelha ao solo

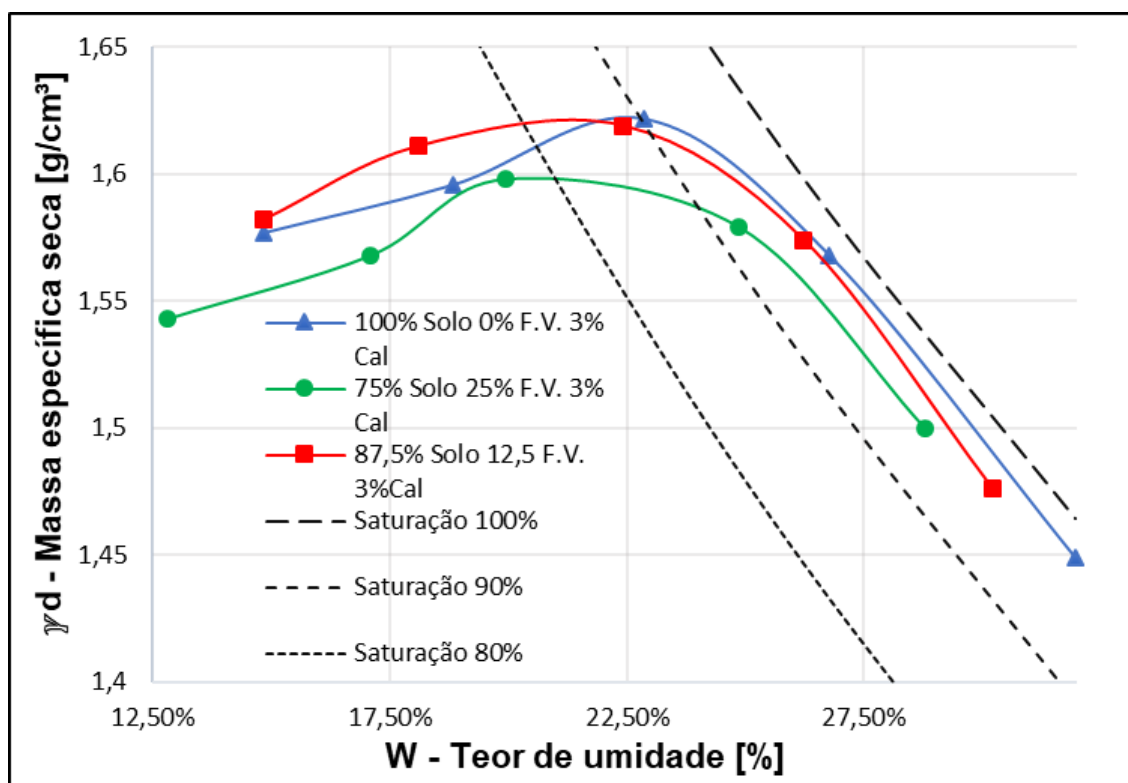


Fonte: Autores.

A partir da Gráfico 2 é possível notar uma leve alteração nas curvas, isto é quanto maior a adição de fração vermelha ao solo maior é a mudança no teor de umidade ótima e na peso específico aparente seco máximo. O teor de umidade ótima é deslocado para direita devido ao aumento na quantidade de finos na mistura e por um aumento da absorção de água das partículas. No peso específico aparente seco máximo é possível observar uma mudança apenas para a adição 25% de fração vermelha.

Na sequência, adicionou-se cal à mistura e novos ensaios de compactação, com energia intermediária, foram realizados. Os resultados obtidos podem ser observados na Gráfico 3.

Gráfico 4 - Influência da adição de Cal nas composições estabelecidas



Fonte: Autores.

Assim como na situação de adição da fração vermelha, quando adiciona-se cal a ambas as combinações de interesse, ocorre um deslocamento das curvas de compactação para a esquerda no eixo das abscissas (teor de umidade) e a diminuição dos picos correspondentes à máxima massa específica aparente seca. É importante frisar que, a máxima diminuição da massa específica seca foi observada na porção de fração vermelha correspondente a 25% da mistura. Para Rocha (2018), tal fato se dá por conta das reações ocorridas entre o solo e a cal, em que as trocas catiônicas promovem aglomeração e floculação das partículas dos colóides de argila, a qual constitui a fração predominante da granulometria do solo de interesse, e também, o material principal da fração vermelha do RCD.

Os resultados obtidos com os ensaios de Proctor para solo natural, assim como para as combinações consideradas, estão compilados na Tabela 9, a

seguir. Os resultados de COSTA et al (2018) também estão reunidos, para as mesmas combinações, no Gráfico 4.

Tabela 9 – Resultados obtidos via ensaio de Proctor

ENSAIO	SOLO [%]	F.V. [%]	CAL [%]	γ_d [G/CM ³]	W [%]
1	100,00	0,00	0,00	1,64	22,50
2	75,00	25,00	0,00	1,61	23,78
3	87,50	12,50	0,00	1,65	22,53
4	100,00	0,00	3,00	1,62	21,50
5	87,50	12,50	3,00	1,64	22,10
6	75,00	25,00	3,00	1,59	20,83

Fonte: Autores.

A partir da comparação dos resultados apresentados na Tabela 9 e no Gráfico 4, nota-se que com o aumento da energia de compactação, energia normal para intermediária, houve uma diminuição do peso específico aparente seco e um aumento da umidade ótima.

4.2 ENSAIOS DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Para os ensaios de resistência à compressão simples (RCS), foram moldados 45 corpos de prova com diferentes composições de solo, fração vermelha e cal, conforme citado na Tabela 7.

Os resultados do ensaio de resistência à compressão simples, para energia intermediária, com suas respectivas umidades ótima e massa específica seca (γ_d), estão expostos nas Tabelas 10 a 19.

Tabela 10 - Resultados do ensaio RCS para solo natural

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,63	22,5	0,54
CP2	1,64	22,5	0,70
CP3	1,64	22,5	0,73
CP4	1,64	22,5	0,77
CP5	1,64	22,5	0,70

Fonte: Autores.

Tabela 11 - Resultados ensaio RCS para 100% Solo Natural e 3% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,64	21,5	0,67
CP2	1,62	21,5	1,04
CP3	1,62	21,5	0,71
CP4	1,62	21,5	0,95
CP5	1,62	21,5	0,69

Fonte: Autores.

Tabela 12 - Resultados ensaio RCS para 75% Solo Natural, 25% Fração Vermelha e 0% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,6	23,78	0,51
CP2	1,6	23,78	0,44
CP3	1,6	23,78	0,41
CP4	1,6	23,78	0,35
CP5	1,6	23,78	0,35

Fonte: Autores.

Tabela 13 - Resultados ensaio RCS para 75% Solo Natural, 25% Fração Vermelha e 3% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,59	20,83	0,74
CP2	1,52	20,83	0,96
CP3	1,52	20,83	0,69
CP4	1,51	20,83	0,56
CP5	1,51	20,83	0,55

Fonte: Autores.

Tabela 14 - Resultados ensaio RCS para 75% Solo Natural, 25% Fração Vermelha e 6% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,59	20,83	1,08
CP2	1,59	20,83	0,84
CP3	1,59	20,83	0,89
CP4	1,59	20,83	1,26
CP5	1,59	20,83	Erro no ensaio

Fonte: Autores.

Tabela 15 - Resultados ensaio RCS para 75% Solo Natural, 25% Fração Vermelha e 9% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,60	20,83	1,12
CP2	1,59	20,83	1,59
CP3	1,61	20,83	1,73
CP4	1,59	20,83	1,81
CP5	1,59	20,83	1,77

Fonte: Autores.

Tabela 16 - Resultados ensaio RCS para 87,5% Solo Natural, 12,5% Fração Vermelha e 0% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,64	22,53	0,49
CP2	1,63	22,53	0,50
CP3	1,64	22,53	0,70
CP4	1,64	22,53	0,64
CP5	1,64	22,53	0,61

Fonte: Autores.

Tabela 17 - Resultados ensaio RCS para 87,5% Solo Natural, 12,5% Fração Vermelha e 3% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,65	22,1	0,71
CP2	1,65	22,1	0,82
CP3	1,64	22,1	0,81
CP4	1,65	22,1	0,84
CP5	1,64	22,1	1,05

Fonte: Autores.

Tabela 18 - Resultados ensaio RCS para 87,5% Solo Natural, 12,5% Fração Vermelha e 6% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,64	22,10	1,09
CP2	1,64	22,10	0,97
CP3	1,64	22,10	1,30
CP4	1,64	22,10	1,43
CP5	1,63	22,10	1,25

Fonte: Autores.

Tabela 19 - Resultados ensaio RCS para 87,5% Solo Natural, 12,5% Fração Vermelha e 9% Cal

	γ_d (g/cm ³)	Teor de umidade (%)	Tensão (Mpa)
CP1	1,64	22,10	1,53
CP2	1,64	22,10	1,75
CP3	1,64	22,10	1,61
CP4	1,64	22,10	1,76
CP5	1,63	22,10	1,56

Fonte: Autores.

Os valores médios de resistência à compressão simples foram definidos da seguinte maneira, foi calculada a média (Md) entre os 5 corpos de prova (CP's), de cada dosagem e em seguida calculado o desvio padrão (Dp). O intervalo de comparação estabelecido tem limite superior Md + Dp e limite inferior Md – Dp. Qualquer valor fora do intervalo foi descartado Os valores obtidos estão expostos na Tabela 20.

Tabela 20 - Resumo das tensões médias obtidas, em diferentes concentrações, com o ensaio RCS

Solo (%)	Fração Vermelha (%)	Cal (%)	Tensão (Mpa)
100	0	0	0,73
100	0	3	0,76
75	25	0	0,39
75	25	3	0,64
75	25	6	0,99
75	25	9	1,73
87,5	12,5	0	0,63
87,5	12,5	3	0,82
87,5	12,5	6	1,24
87,5	12,5	9	1,67

Fonte: Autores.

Com o auxílio da Tabela 20 nota-se que, para concentrações de 25% de fração vermelha é possível alcançar maior resistência com a adição de 9% de Cal.

Os valores de resistência à compressão simples do solo natural são maiores que os valores das composições de solo com fração vermelha, sem acréscimo de cal, demonstrando que o RCD em questão não contribuiu mecanicamente com a melhora da resistência, mas ao adicionar uma pequena quantidade de cal os resultados prontamente se inverteram.

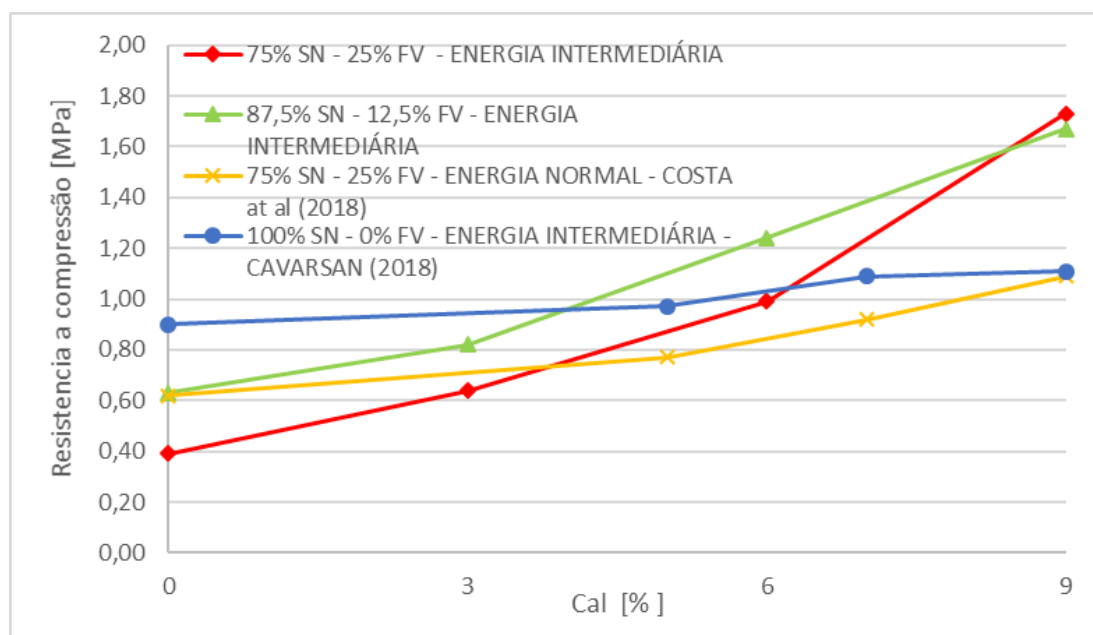
Ademais, ao relacionar as amostras com 12,5% e 25% de fração vermelha de RCD, observou-se que a concentração de 12,5% apresenta resistência maior com as quantidades de cal, isto é, 0%, 3% e 6%. Já ao comparar os valores de resistência com a quantidade de 9 % de cal, notou-se que a resistência da amostra com 25% de fração vermelha é maior que a de 12,5%.

A fração ao reagir com a cal, fornece ao solo estabilidade química, entretanto a fração sem adição de cal não só deixa de fornecer estabilidade como também piora as capacidades de resistência do solo em relação a resistência à compressão, como demonstrado na Tabela 20.

Segundo COSTA *et al* (2018), quando se trata de pequenas quantidades de cal, compensa aumentar a energia de compactação para alcançar maior resistência por estabilização mecânica.

Ainda por COSTA *et al* (2018), quando se trata se teores maiores de cal, compensa aumentar a concentração de fração vermelha de RCD do que aumentar a energia de compactação aplicada, no caso da Proctor normal para intermediária, pois disponibiliza-se maiores quantidades de cal para reagir quimicamente a favor da estabilização.

Realizando a comparação entre a análise matemática, elaborada por COSTA *et al* (2018), o estudo da influência da cal e do aumento da energia de compactação na resistência do solo, elaborada por CAVARSAN (2018), e os resultados obtidos no presente estudo, é possível observar, no Gráfico 5, as diferentes resistências a compressão simples.

Gráfico 5 - Comparação de valores de RCS

Fonte: Autores.

4.3 ENSAIO DE ÍNDICE SUPORTE CALIFORNIA E EXPANSÃO

Após análise do relatório fornecido pela prensa da Figura 10, os dados foram compilados e estão presentes na Tabela 21, a seguir.

Tabela 21 - Resultados obtidos via ensaio CBR

Penetração para o maior valor de tensão	75% SN, 25% FV e 0% cal	75% SN, 25% FV e 9% cal	100% SN, 0% FV e 9% cal
2,54	5,90%	44,55%	22,86%
5,08	8,02%	54,75%	30,06%
CBR	8,02%	54,75%	30,06%

Fonte: Autores.

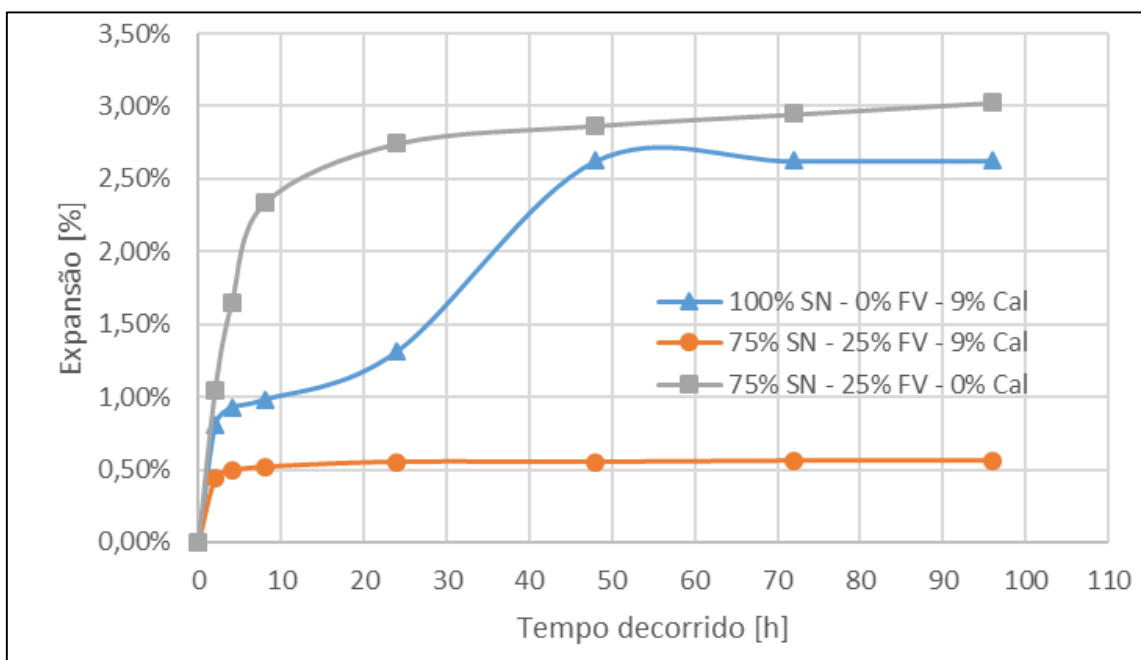
A partir dos resultados obtidos com o ensaio CBR, representados na Tabela 21 pode-se observar os diferentes comportamentos do solo com as variadas concentrações de fração vermelha de RCD e cal.

A cal, como esperado, contribuiu para a estabilidade solo. Entretanto, o ensaio CBR reafirma que a fração vermelha de RCD não fornece estabilidade mecânica ao solo. Em contrapartida, a união dos dois componentes ao solo natural, na determinada proporção, reagem quimicamente e fornecem maior estabilidade ao solo o que foi observado por Costa et al (2018).

Para o ensaio de expansão utilizou-se as mesmas concentrações do ensaio CBR, supracitadas.

Os resultados obtidos dos ensaios de expansão podem ser observados no Gráfico 6, a seguir.

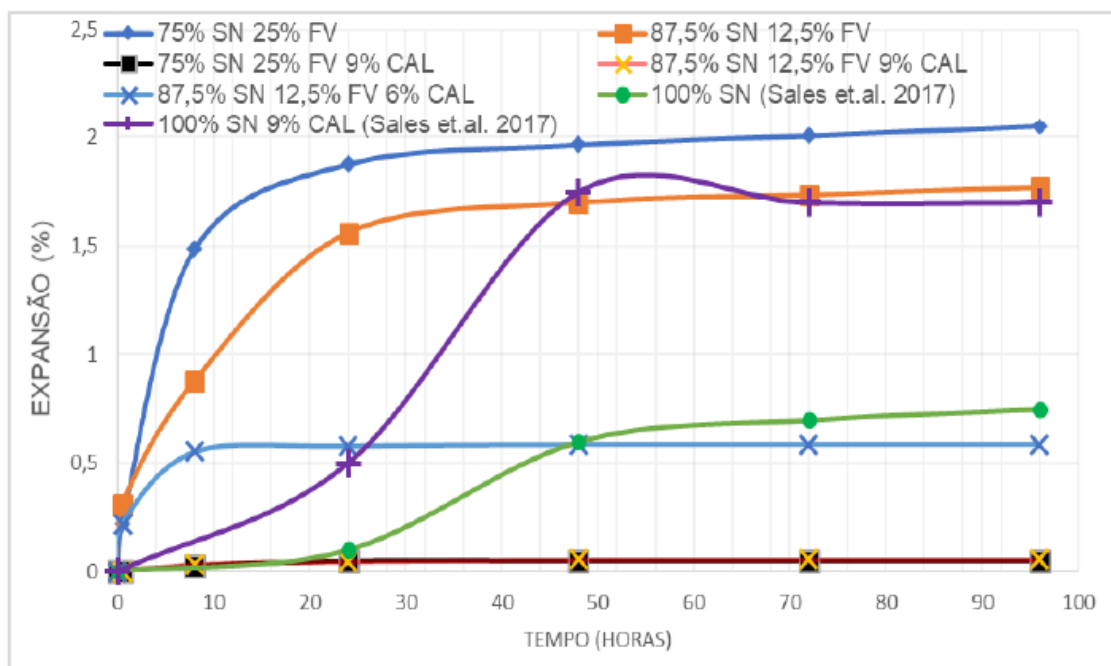
Gráfico 6 - Expansão dos corpos de prova



Fonte: Autores.

Ao comparar os resultados encontrados no Gráfico 6 com os valores obtidos por COSTA *et al* (2018), expostos no Gráfico 7, notou-se um aumento da expansão dos corpos de prova em relação às mesmas proporções de solo, fração vermelha e cal.

Gráfico 7 - Expansão dos corpos de prova



Fonte: Costa et al (2018).

A análise de ambos os resultados demonstra a clara importância da cal na redução da porcentagem de expansão do solo com o passar do tempo. Visto que, relacionando as mesmas concentrações de solo e fração vermelha de RCD, modificando apenas a quantidade de cal, a diferença é expressiva, tanto para a energia de compactação normal, quanto para a intermediária.

4.4 PARÂMETROS DE PROJETO DO DER/PR E DO DNIT

Os dados fornecidos pelos ensaios de resistência à compressão simples, CBR e expansão, foram relacionados aos requisitos mínimos de projeto exigidos pelo Departamento de Estradas e Rodagem do Paraná (DER/PR) e Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT).

Na Figura 12, são apresentados os valores de expansão e CBR estabelecidos pelo DNIT.

Figura 12 - Parâmetros de expansão e Índice de Suporte Califórnia estabelecidos pelo DNIT

Camada	ISC (%)	Expansão (%)
Subleito	≥ 2	≤ 2
Reforço de Subleito	\geq CBR subleito	≤ 1
Sub-base	≥ 20	≤ 1
Base	≥ 80	$\leq 0,5$

Fonte: DNIT (2006), adaptado.

A partir dos resultados obtidos, conforme Tabela 21, constatou-se que, na concentração 75% SN, 25% FV e 0% cal, não foi possível alcançar os valores mínimos de CBR estabelecidos para sub-base e base pelo DNIT. E também, a mesma mistura, ultrapassa o valor máximo aceitável para expansão.

Na concentração 100% SN, 0% FV e 9% cal, foi alcançado valor de CBR superior ao mínimo definido pela especificação técnica do DNIT para sub-base, que é de valores maiores ou iguais a 20%. Entretanto não alçou-se o valor mínimo necessário para base, que é de 80%. A expansão ultrapassou os valores máximos estabelecidos pelo DNIT.

Para concentração de 75% SN, 25% FV e 9% foram obtidos resultados semelhantes à composição de 100% SN, 0% FV e 9% cal, em relação ao CBR. Porém, com porcentagens mais expressivas e que também atendem ao mínimo especificado pelo DNIT para sub-base e não atendem ao mínimo exigido para base. Já na expansão, diferente da concentração de comparação, o valor está adequado ao estabelecido pelo DNIT, ou seja, inferior a 1%. Portanto, pode-se concluir que a adição de fração vermelha em conjunto com a cal melhora a capacidade de suporte do solo e diminui a expansão do mesmo.

Para o ensaio de resistência à compressão simples, os resultados foram comparados com os valores pré-estabelecidos pelo DER, conforme Figura 13.

Figura 13 - Parâmetros de resistência a compressão simples estabelecido pelo DER/PR

Camada	RCS (MPa)	Estabilização
Sub-Base	1,2 a 2,1	Solo tratado com cimento
Base	1,5 a 2,1	Solo tratado com cimento
Sub-Base	≥ 2,1	Solo cimento

Fonte: DER/PR (2005), adaptado.

O maior valor obtido experimentalmente via ensaio de RCS, 1,73 MPa, quando comparado com a Figura 13, observa-se que é possível alcançar a resistência mínima de 1,2 Mpa para sub-base e também a resistência de 1,5 MPa para base, exigida pelo DER/PR, na concentração de 75% solo, 25% fração vermelha e 9% cal. Além disso, foi possível alcançar as resistências de 1,67 MPa para a concentração de 87,5% de solo, 12,5% de fração vermelha e 9% de cal, resistência, esta, que atende à mínima para sub-base e base exigida pelo DER/PR. E, para a concentração de 87,5% de solo 12,5% de fração vermelha e 6% de cal alcançou o valor de 1,24 MPa, valor que atende a resistência mínima para sub-base.

Ao contrário do resultado de COSTA *et al* (2018), em que o maior valor obtido a partir do ensaio RCS foi de 1,09 Mpa e não atende as especificações técnicas do DER/PR, no presente trabalho foi possível alcançar a tensão mínima estabelecida em mais de uma dosagem. Tal fato pode ser explicado pela energia de compactação utilizada, pois o presente estudo lança mão sobre uma energia de compactação maior, a intermediária, do que a praticada por COSTA *et al* (2018), energia de compactação normal.

5 CONCLUSÃO

Sobre as características expansivas, pode-se afirmar que, conforme Gráfico 6, a integração entre solo e cal demonstrou-se expressiva para tal característica. Com isso podemos concluir que, geotecnicaamente, a mistura apresenta pouca estabilização. Para a interação solo e fração vermelha, os resultados apresentaram-se similares, conforme Gráfico 6, com os apresentados pela mistura de solo e cal em relação à expansão. Entretanto, quando adiciona-se fração vermelha de RCD em conjunto com a cal ao solo o comportamento expansivo apresenta relevante diminuição, o que indica maior estabilidade da amostra. Tomando como base os resultados dos ensaios e o valor máximo pré-definido pelo DNIT para expansão, pode-se afirmar que a mistura solo, fração vermelha de RCD e cal nas proporções 75%, 25% e 9%, respectivamente, resultam em um conjunto que pode ser utilizado para execução de reforço da sub-base.

Para o ensaio Índice de Suporte de Califórnia, a amostra com apenas solo e fração vermelha de RCD, apresentou valores muito baixos em relação ao CBR, o que exclui a possibilidade de utilizá-la para os objetivos do presente estudo, haja visto que, seus valores não atendem ao mínimo exigido pelo DNIT para execução da sub-base, valores maiores ou iguais a 20%. Em contrapartida, as composições de solo-cal e solo-cal-fração vermelha alcançaram o valor mínimo de CBR exigido pelo DNIT para sub-base, no entanto a composição que possui fração vermelha obteve maiores resultados. Então, pode-se afirmar a aptidão do conjunto solo-cal-fração vermelha de RCD para execução de reforço da sub-base.

O ensaio de resistência à compressão simples retratou que, para o aumento da resistência, em um solo acrescido de fração vermelha, é necessário que a fração tenha, em sua maioria, reagido quimicamente com a cal, para que apresente bons resultados de capacidade suporte. De maneira análoga, quanto menor a quantidade de fração vermelha, menor a necessidade de cal para reagir quimicamente com o resíduo. Analisando as amostra que continham resíduo e não continham cal, as resistências foram menores que a amostra com apenas solo, demonstrando que a fração não tem nenhuma característica de suporte

mecânico. Conforme pressuposto no início da pesquisa, foi comprovado ao decorrer dos ensaios que a concentração de 75% Solo, 25% fração vermelha de RCD e 9% de cal atingiu as resistências esperadas para aceitação do DER/PR para utilização no reforço de sub base, isto é resistência de ruptura superior a 1,2 MPa, e para base entre 1,5MPa e 2,1 MPa. E, as resistências das amostras com 87,5% de solo, 12,5% de fração vermelha e 9% de cal também atingiram valores que superam o mínimo para sub-base e base. Já a amostra com 87,5% de solo, 12,5% de fração vermelha e 6% de cal apresentou valores que superam apenas o mínimo para sub-base.

Comparando de maneira global os resultados obtidos por COSTA *et al* (2018), com os resultados deste trabalho, nota-se a clara influência da energia de compactação na resistência, na capacidade suporte e na expansão do solo. Portanto, conclui-se que com a energia de compactação intermediária e a composição de 75% de solo natural, 25% de fração vermelha de RCD e 9% de cal hidratada, torna-se viável a utilização desta mistura para a execução de reforço de sub-base apenas, pois os valores de ISC para base não foram alcançados. Já para a composição de 87,5% de solo 12,5% de F.V e 9% de Cal, e 87,5% de solo 12,5% de F.V e 6% de Cal não foi possível realizar o ensaio de CRB, mas em relação a RCS ambas tem resistência para sub-base e a primeira atingiu também a resistência para base.

REFERÊNCIAS

AASHTO - AMERICAN ASSOCIATION OF STATE HIGHWAY AND TRANSPORTATION OFFICIALS - AASHTO- M-145. 1973.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6453: Cal Virgem para Construção Civil - Requisitos**. Rio de Janeiro, RJ. 2003. 3p.

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 da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6459**. Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6473**. Cal virgem e cal hidratada - análise química, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 31 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6508**. Grãos de Solos que Passam na Peneira de 4,8mm - Determinação da massa específica: Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7180**. Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182**. Solo: Ensaio de compactação. Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**. Solo: Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015**. Disponível em: <https://www.dropbox.com/s/v2tqioztnud2asg/relatorio-pesq2015_abrecon-read.pdf?dl=0>. Acessado em: 25/05/2019.

BACCI, Denise La Corte; LANDIM, Paulo Milton Barbosa; ESTON, Sérgio Médici. **Aspectos e Impactos Ambientais de Pedreira em Área Urbana**. Rev. Esc. Minas vol.59 no.1 Ouro Preto Jan./Mar. 2006.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação Asfáltica Materiais, Projetos e Restauração**. São Paulo oficina de textos, 2007.

BERNUCCI, L. B.; DA MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B. **Pavimentação asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.

BORDIGNON, V. R. **Efeitos da Adição da Cal Hidratada na Estabilização de um Solo Sedimentar para Pavimentação Urbana na Região de Curitiba**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, PR, 2015.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos solos e suas aplicações**. Fundamentos, volume 1. 6ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 1988.

CARNEIRO, Alex P. et al. **Reciclagem de Entulho para a produção de materiais de construção: Projeto Entulho Bom**. Salvador: Editora UFBA, 142-186, 2001.

Confederação Nacional de Transportes (CNT). **Dados do Anuário CNT do transporte mostram baixa oferta de infraestrutura para o transporte rodoviário e crescimento acelerado da frota.** Por Agência CNT de notícias, 14/08/2018. Disponível em: <<https://www.cnt.org.br/agencia-cnt/somente-12-da-malha-rodoviaria-brasileira-pavimentada> > Acesso em 22/06/2019.

CORDEIRO, J. F. S. **Estabilização Química e Solidificação do Resíduo Oleoso Gerado nas Atividades de E & P de Petróleo, com Solo para o Uso em Camadas de Bases e/ou Sub-bases de Pavimentos Rodoviários.**

COSTA, Evay V. L.; SILVA, Evelyn C. G. S.; RÊGO, Miguel C. Q.; **Influência da Fração Vermelha do Resíduo de Construção Civil com Cal na Estabilização de um Solo da Formação Guabirotuba para Pavimentação.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica.** Tradução da 6ª ed. Norteamericana, Ed. Thomson Learning, São Paulo, SP. Brasil. 2007. 562p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação.** 3 Ed. Publ. IPR-719. Rio de Janeiro, RJ. 2006. 274 p.

Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental, UFCG - Universidade Federal de Campina Grande, PB. 2007. 136 p.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos.** Definição e Notação de Horizontes e Camadas do Solo, por Humberto Gonçalves dos Santos e outros. 19ed. Rio de Janeiro, RJ. 1983. 34 p.

FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba.** MINEROPAR, 2011. 1ª Edição. 48p. Curitiba. 2011.

FIORATTI, N. A. **Análise da influência de um reforço de solo cimento compactado na extremidade superior estacas escavadas, sob carregamentos horizontais.** Dissertação (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, SP, 2008.

FREITAS JUNIOR, J. A. **Materiais de Construção Civil - Aglomerantes.**

Universidade Federal do Paraná. Curitiba, PR, 2013. Disponível em: <http://www.dcc.ufpr.br/mediawiki/images/6/6b/TC030_Aglomerantes_x.pdf> Acesso em 09/06/2019.

JULIO, Estela B. **Análise do Efeito da Compactação - Energia Modificada - Em um Solo com Adição de Cal e Cimento.** Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2018.

KORMANN, A. C. M. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba: Estudos de Campo e Laboratório.** Tese (Doutorado em Engenharia de Solos) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, SP, 2002.

KORMANN, A. C. M. **Ensaio de compactação e caracterização.** Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1997.

MAZER, W. **Materiais de construção: cal.** Notas de aula. UTFPR – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2017.

MIRANDOLA, Marco Aurélio. **Gestão de Manutenção e Conservação de Pavimento Asfáltico em Vias Urbanas.** Artigo para revista UNILINS N° 7 (2016). Disponível em: < <file:///C:/Users/lisbo/Desktop/232-535-1-SM.pdf>> Acesso em 09/06/2019.

MINASCAL. **Cal Hidratada**. 2019. Disponível em: <www.minascal.com.br>
Acesso em 09/06/19.

OLIVEIRA, J. C. **Caracterização geotécnica de materiais inconsolidados arenosos do Distrito Federal utilizados como material de construção**. Dissertação de Mestrado. Unb - Universidade de Brasília, DF, 2000.

OLIVEIRA, A. M. S; BRITO, S. N. A. **Geologia de Engenharia**. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia, São Paulo, SP, 1998. 587 p.

ORTIGÃO, J. A. R., **Mecânica dos Solos dos Estados Críticos**. 3ª Edição. Editora LTC. Rio de Janeiro. 2007.

PATRICIO, Jonny Dantas. **Estudo de Solos Modificados por Adição de Polímeros para Uso em Pavimentos Rodoviários**. Dissertação de mestrado em Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Campina Grande, 2015.

PINTO, C. S. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. Em 16 aulas/3ª edição. Oficina de Textos. São Paulo. 2006.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos Fundamentais Sobre Pavimentos Flexíveis**. 2 ed. Rio de Janeiro: Ed. Copiarte. 2002. 269 p.

ROCHA, Giselle Souza. **Efeito da Cal na Resposta Mecânica de um Solo Residual Maduro: Análise da Resistência à Compressão não Confinada, Permeabilidade, Compressibilidade e Efeito da Cura Acelerada na Resistência Mecânica**. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Viçosa, 2018.

SALES, A. W.; RIBEIRO, D. D.; NERY, K. D. **Efeitos da adição de cimento e de cal em um solo da região de Curitiba para fins de pavimentação**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curso de Engenharia Civil, Curitiba, 2017.

SANTOS, Jaime A. **Compactação – Elementos Teóricos**. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, 2008. Disponível em: <http://www.civil.ist.utl.pt/~jaime/Compacta_T.pdf >. Acesso em 22/06/2019.

SARTORI, G. **Estudo De Estabilização de Solos Para Fins De Pavimentação na Região de Campo Mourão**. Trabalho de conclusão de curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

TERZAGHI, K; PECK, R. B. **Mecânica dos Solos na Prática da Engenharia**. Traduzido por Antônio José da Costa Nunes e Maria de Lurdes Campo Campelo. Rio de Janeiro: SEDEGRA, 1962. 659p.

VAZ, L. F. **Classificação Genética dos Solos e dos Horizontes de Alteração de Rocha em Regiões Tropicais**. Solos e Rochas. São Paulo. 1996.

VOGT, J. C., **Estabilização betuminosa**. In: 7º Simpósio sobre pesquisas rodoviárias, Rio de Janeiro, RJ. 1971.