

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

**EVAY VILELLA LISBOA COSTA
EVELYN CASTANHO GONÇALVES DA SILVA
MIGUEL CLÁUDIO QUEIROZ RÊGO**

**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

CURITIBA

2018

EVAY VILELLA LISBOA COSTA
EVELYN CASTANHO GONÇALVES DA SILVA
MIGUEL CLÁUDIO QUEIROZ RÊGO

**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 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.
Co-Orientadora: Prof^a. PhD. Marcia Silva de Araújo.

CURITIBA

2018

FOLHA DE APROVAÇÃO

INFLUÊNCIA DA FRAÇÃO VERMELHA DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL COM CAL NA ESTABILIZAÇÃO DE UM SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA PARA PAVIMENTAÇÃO

Por

**EVAY VILELLA LISBOA COSTA
EVELYN CASTANHO GONÇALVES DA SILVA
MIGUEL CLÁUDIO QUEIROZ RÊGO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, defendido e aprovado no primeiro semestre de 2018, pela seguinte banca de avaliação presente:

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

Profa. Co-Orientador – Marcia Silva de Araújo, Dra.
UTFPR

Prof. José Alberto Cerri, Dr.
UTFPR

Prof. Rogério Francisco Kuster Puppi, Dr.
UTFPR

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar à Deus, que iluminou a gente em toda essa jornada chamada de vida e que nos abençoou com a conclusão de mais um objetivo.

Agradecemos enormemente a nossa orientadora, Prof^a. Dra Amanda Dalla Rosa Johann, pela imensa disposição, paciência, atenção e orientação. Somos gratos não somente pelos conhecimentos transmitidos, mas principalmente por todo o interesse, dedicação e incentivo em buscar soluções para os mais diversos problemas encontrados. Nosso imenso prestígio e respeito.

À nossa co-orientadora, Prof^a. PhD. Marcia Silva de Araújo, pela incansável dedicação. Seremos imensamente gratos por seu profundo conhecimento que nos permitiu unir em um único trabalho duas áreas do nosso conhecimento profissional. Obrigado por nos mostrar, de forma mais desenvolvida, os conhecimentos referentes à área de materiais para serem aplicados nesta pesquisa.

Agradecemos aos integrantes da banca, Dr. Prof. Rogério Francisco Kuster Puppi, por todos os ensinamentos passados ao longo do curso, ao Dr. Prof. José Alberto Cerri, por todos os anos de convivência ao longo do curso, pelo imenso conhecimento, não apenas intelectual, mas também moral para a nossa formação profissional e pessoal para a vida, pela substancial dedicação de tempo e paciência em nos ajudar a buscar soluções aos mais diversos impasses encontrados ao longo da pesquisa.

Ao nosso amigo de laboratório, Alexandre Cardoso, por todos os conselhos, dúvidas e ajudas prestadas, pelas muitas conversas a respeito do tema e pelo incentivo irrefutável ao longo dessa pesquisa.

A todos os nossos amigos e familiares pelo apoio e força incondicional durante o curso. Por todo o apoio ao longo de anos e, principalmente, pela confiança depositada em nós.

Aos laboratórios de pesquisas, Laboratório de Análise de Minerais e Rochas - LAMIR – UFPR e ao Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais – CMCM, por todo o apoio nos ensaios realizados neste estudo, por sua imensa dedicação ao conhecimento e desenvolvimento de pesquisas.

RESUMO

Costa, Evay Vilella Lisboa; Rêgo, Miguel Cláudio Queiroz; Silva, Evelyn Castanho Gonçalves da. **Influência da fração vermelha do resíduo de construção civil com cal na estabilização de um solo da formação Guabirotuba para pavimentação.** 2018. 95f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

Em 2014 o Brasil possuía cerca de 1,7 milhões de quilômetros de extensão de malha rodoviária, das quais apenas 12,1% era pavimentada. Um dos motivos para esse baixo número é o alto custo no processo de pavimentação, causado por diversos fatores, incluído nestes a necessidade de estabilizar o solo para a sub-base da rodovia. Esta pesquisa tem como objetivo contribuir para o aumento da pavimentação Rodoviária no Brasil, por meio da redução do custo da estabilização de solos com baixa capacidade de suporte; Diversos ensaios foram realizados para a caracterização do solo e da fração vermelha oriunda do Resíduo da Construção Civil, sendo eles Ensaio Granulométrico, Densidade Real dos Grãos, Limites de Atterberg, Teor de Hidróxido de Cálcio Fixado, Difractometria de Raios X (DRX), Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX) e Compactação. Também foi executada a moldagem e cura de corpos de prova, ensaios de resistência a compressão simples (RCS) e índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR). Demonstrando então a necessidade do solo ser substituído por outro com maior ISC ou ser submetido a um processo de estabilização. Classificou-se também o solo como de granulometria silto-argilosa grupo A-5 típico de solos siltosos moderadamente plástico e com presença de mica. Quanto ao SUCS, o solo é classificado como argila de baixa plasticidade arenosa. Nos resultados do ensaio de Compressão Simples, foi alcançada uma resistência de 1,09 MPa que é inferior ao valor estipulado pelo Departamento de Estradas e Rodagens do Paraná (DER-PR). Por fim o Software *Statistica* mostrou que, teoricamente, com adição de 10% de cal e 26% de fração vermelha, atenderia o critério de resistência à compressão simples do DER/PR.

Palavras-chaves: Solo-Cal. Estabilização de solo. Fração vermelha.

ABSTRACT

Costa, Evay Vilella Lisboa; Rêgo, Miguel Cláudio Queiroz; Silva, Evelyn Castanho Gonçalves da. **Influence of the red fraction of the civil construction residue with lime on the stabilization of a soil of the Guabirotuba formation for paving.** 2018. 95p. Term Paper (Bachelor in Civil Engineering) – Federal Technological University of Paraná. Curitiba, 2018.

In 2014 Brazil had about 1.7 million kilometers of road mesh network extension, of which only 12.1% was paved. One of the reasons for this low number is the high cost in the paving process caused by several factors, including the need to stabilize the soil for the sub-base of the highway. This research aims to contribute to the increase of road paving in Brazil, by reducing the cost of stabilizing soils with low support capacity. Several tests were carried out to characterize the soil and the red fraction from the Residue of the Civil Construction, such as Granulometric Test, Grain Actual Density, Atterberg Limits, Fixed Calcium Hydroxide Content, X-ray Diffractometry (XRD), Spectrometry of X-ray Fluorescence (FRX) and Compaction. Also, molding and curing of specimens, single compression strength tests (RCS) and California Support Index (ISC-CBR) were performed. This demonstrates the need for the soil to be replaced by another with higher ISC or to undergo a stabilization process. The soil was also classified as silica-silty granulometry group A-5 typical of silty soils moderately plastic and with presence of mica. As for SUCS, the soil is classified as clay with low sandy plasticity. In the results of the Simple Compression test, a resistance of 1.09 MPa was reached that is lower than the value stipulated by the Paraná Department of Roads and Rolling (DER-PR). Finally, Statistica Software showed that, theoretically, with the addition of 10% of lime and 26% of red fraction, the criterion of resistance to the simple crisis of the DER/PR.

Keywords: Soil-Lime. Soil stabilization. Red fraction.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Mapa de localização da formação Guabirota.....	17
Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível.....	25
Figura 3 - Estrutura de um pavimento Rígido.....	25
Figura 4 - Troca catiônica na argila	35
Figura 5 - Aglomeração e floculação nas argilas	36
Figura 6 - Formação do material cimentício em uma mistura solo cal	39
Figura 7 - Coleta do solo em local pré-definido.....	48

LISTA DE QUADROS E TABELAS

Quadro 1 - Classificação dos Solos (Transportation Research Board)	19
Quadro 2 - Classificação dos Solos SUCS	23
Quadro 3 - Métodos de estabilização de solos - diagrama esquemático	30
Quadro 4 - Composição da cal em óxidos	32
Quadro 5 - Classificação e exigências químicas para as cales.....	32
Quadro 6 - Teor de óxido não hidratado	33
Quadro 7 - Exigências físicas para cal hidrata	33
Quadro 8 - Frações nos RCC (% m/m)	41
Quadro 9 - Dados referentes ao peneiramento fino do ensaio de granulometria	45
Quadro 10 - Ensaio de sedimentação	46
Quadro 11 - Determinação da densidade real dos grãos do solo (GS) (NBR 6508/1984)	47
Quadro 12 - Ensaio índice suporte Califórnia solo e solo-cal.....	47
Quadro 13 - Parâmetros mínimos de referência do ISC e de expansão pelo pra camadas de fundação de pavimentos (DNIT)	83
Quadro 14 - Valores para aceite da mistura pelo DER/PR	84
Tabela 1 - Composições definidas para ensaios de comportamento mecânico.....	57
Tabela 2 - Determinação da densidade real dos grãos do solo (picnometria com gás Hélio)	59
Tabela 3 - Determinação da densidade real dos grãos da fração vermelha (picnometria com gás Hélio)	59
Tabela 4 - Dados do ensaio de limite de liquidez para o solo sem adições.....	60
Tabela 5 - Dados do ensaio de limite de liquidez para o solo sem adições.....	61
Tabela 6 - Ensaio de limite de plasticidade solo natural.....	63
Tabela 7 - Evolução do LP com a adição de cal e fração vermelha.....	63
Tabela 8 - Evolução do IP com a adição de cal e fração vermelha	65
Tabela 9 - Ensaio Chapelle modificado do solo.....	68
Tabela 10- Ensaio Chapelle modificado da fração vermelha	68
Tabela 11 - Dados dos minerais encontrados.....	69
Tabela 12 - Teores de óxidos ensaio FRX do solo da formação Guabirotuba.....	70

Tabela 13 - Teores de óxidos ensaio FRX da fração vermelha do resíduo de construção civil.....	70
Tabela 14 - Dados referentes às amostras ensaiadas.....	71
Tabela 15 - Efeito da fração vermelha e cal nos valores de ISC.....	74
Tabela 16 - Dados referentes às amostras ensaiadas.....	76
Tabela 17 - Comparação com ensaio de resistência simples	79
Tabela 18 - Evolução do RCS e do ISC em função do teor de FV em composição com 9% de cal.....	81
Tabela 19 - Dados das composições ensaiadas	94
Tabela 20 - Resultados do ensaio de expansão	94
Tabela 21 - Resultados Numéricos RCS.....	95

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Curva granulométrica para um solo da formação Guabirota	46
Gráfico 2 - Resultado do Limite de Liquidez	60
Gráfico 3 - Superfície de Respostas LL ($R^2=0,784$)	61
Gráfico 4 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 1	62
Gráfico 5 - Superfície de respostas LP ($R^2=0,59$)	64
Gráfico 6 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 2	65
Gráfico 7 - Superfície de resultados IP ($R^2= 0,589$)	66
Gráfico 8 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 3	67
Gráfico 9 - Difratograma de Raios X do solo	69
Gráfico 10 - Curva de compactação do solo sem adições	71
Gráfico 11 - Influência da fração vermelha ao ser adicionada no solo	72
Gráfico 12 - Influência da cal ao ser adicionada nas diferentes misturas de solo-fração vermelha	73
Gráfico 13 - Curvas Tensão versus Penetração para variadas composições de fração vermelha solo e cal	75
Gráfico 14 - Expansão do solo com a adição de fração vermelha e cal	75
Gráfico 15 - Superfície de resposta para os resultados do ensaio de RCS ($R^2=0,80$)	78
Gráfico 16 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 4	79
Gráfico 17 - Diagrama de Pareto para os parâmetros do ensaio de RCS	80

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO.....	14
1.1.1	Objetivos Específicos	14
1.2	JUSTIFICATIVA	15
1.2.1	Disponibilidade de Fração Vermelha.....	15
1.2.2	Uso da Cal e Redução de Custos em Pavimentação.....	15
1.2.3	Considerações Gerais	15
2	REVISÃO DA LITERATURA	16
2.1	SOLOS	16
2.2	FORMAÇÃO GUABIROTUBA.....	17
2.3	CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS.....	18
2.3.1	Sistema de Classificação Transportation Research Board (T.R.B)	18
2.3.2	Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)	22
2.4	PAVIMENTAÇÃO	23
2.4.1	Classificação dos Pavimentos	24
2.4.2	Camadas dos Pavimentos.....	26
2.5	ESTABILIZAÇÃO DO SOLO	27
2.5.1	Estabilização Mecânica	28
2.5.2	Estabilização Granulométrica	28
2.5.3	Estabilização Química	29
2.6	CAL	31
2.7	SOLO ESTABILIZADO COM CAL	33
2.7.1	Histórico da Técnica	34
2.7.2	Reações Químicas entre o Solo e a Cal.....	35
2.7.3	Dosagem	39
2.8	RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC).....	40
2.8.1	Fração Vermelha do RCC	42
2.9	ÁLCALI-ATIVAÇÃO DE MATERIAIS ALUMINO-SILICIOSOS.....	44
2.10	TRABALHOS ANTERIORES.....	45
3	MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1	MATERIAIS	48
3.1.1	Solo	48
3.1.2	Cal.....	49
3.1.3	Fração Vermelha.....	49
3.2	MÉTODOS	49
3.2.1	Ensaio de Caracterização.....	49
3.2.2	Moldagem e cura dos corpos de prova	54
3.2.3	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR) e Expansão.....	55
3.2.4	Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)	56
3.2.5	Delineamento Experimental do Ensaio de RCS	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
4.1	ANALISE GRANULOMÉTRICA.....	58
4.2	DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (PARTÍCULAS DE SOLOS).....	58
4.2.1	Densidade Real dos Grãos do solo	58
4.2.2	Densidade Real das partículas da fração Vermelha.....	59

4.3	LIMITES DE ATTERBERG	60
4.4	TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO FIXADO (CHAPELLE MODIFICADO) ..	67
4.5	ENSAIO DIFRATOMETRIA DE RAIOS X	68
4.6	ESPECTOMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)	69
4.7	COMPACTAÇÃO	71
4.8	ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E EXPANSÃO DO SOLO	74
4.8.1	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)	74
4.8.2	Ensaio de Expansão.....	75
4.9	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES.....	77
4.10	DISCUSSÃO GERAL	81
4.10.1	Classificação do Solo	81
4.11	ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO	82
4.12	PARÂMETROS DE PROJETOS DO DNIT E DER/PR.....	83
5	CONCLUSÕES	85
6	SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS.....	86
	REFERÊNCIAS.....	87
	APÊNDICE A	94
	APÊNDICE B	95

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a maior parte dos transportes de mercadoria e passageiros é realizado por meios terrestres, podendo ser feito por meio de ferrovias, com uso de trens ou metrô, ou rodovias, utilizando-se de ônibus, carros de passeio, caminhões, entre outros.

No caso do modal rodoviário, segundo a Confederação Nacional do Transporte (CNT), são transportadas cerca de 60% das cargas no Brasil; isso implica em uma extensa malha rodoviária, que em 2014 tinha em torno de 1,7 milhões de quilômetros de extensão.

Desse total, apenas 12,1% era pavimentado, o que representa em torno de 204 mil quilômetros de rodovias. Ainda, há outros 7,6% de vias que estão planejadas, ou seja, cerca de 129 mil quilômetros de rodovias que ainda não saíram do papel (DNIT, 2014).

Um dos motivos para que apenas 12,1% das rodovias brasileiras sejam pavimentadas pode ser o alto custo no processo de pavimentação, causado por vários fatores. Um deles é a necessidade de estabilizar o solo para a base e sub-base da rodovia, devido à grande variabilidade do comportamento mecânico dos solos.

Diante desse problema, uma das soluções geralmente adotada é a estabilização química com adição com outros materiais, como cimento e cal, de forma a elevar a capacidade do solo de suportar cargas; conforme as condições de uso e características do solo, a cal é a escolhida, em função do seu valor ser relativamente mais barato se comparado com os demais.

Por esse motivo a cal é considerada um material vantajoso para a estabilização química do solo (estabilização solo-cal), já citada anteriormente, pois suas propriedades ligantes reagem com os argilominerais presentes em solos argilosos.

Dessa forma, para se manter baixos os custos, mesmo em solos com baixos teores de argila, seriam necessários adicionar algum material com tais propriedades e, também, economicamente viável, como é o caso da fração vermelha,

obtida da moagem de materiais cerâmicos extraídos dos resíduos de construção civil (RCC).

É possível afirmar que há um baixo índice de reciclagem dos RCC, pois segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição – (ABRECON), em 2014, o Brasil gerou 84 milhões de metros cúbicos de Resíduo de Construção Civil (RCC) dos quais apenas 21% foram reciclados.

Diante do que foi exposto, o que se propõe é realizar experimentos visando a estabilização de solo com RCC, pelo aumento do teor de argilominerais de fácil reação com a cal, em solos que não apresentem essas características.

1.1 OBJETIVO

Contribuir para o aumento da pavimentação Rodoviária no Brasil, por meio da redução do custo da estabilização de solos com baixa capacidade de suporte.

1.1.1 Objetivos Específicos

- Obtenção das características de suporte do solo estudado;
- Variação da capacidade de suporte do solo com a adição da cal;
- Variação da capacidade de suporte do solo com adição de fração vermelha;
- Variação da capacidade de suporte com a adição da fração vermelha em conjunto com a cal;
- Avaliar a expansibilidade do solo com adição da cal;
- Avaliar a expansibilidade do solo com a adição da fração Vermelha do RCC;
- Avaliar a expansibilidade do solo com a adição da cal junto a fração vermelha;
- Atender requisitos mínimos do Departamento de Estrada de Rodagens do Estado do Paraná (DER/PR).
- Atender Requisitos Mínimos do Departamento Nacional de Infraestrutura e transportes (DNIT).

1.2 JUSTIFICATIVA

1.2.1 Disponibilidade de Fração Vermelha

A quantidade RCC nos centros urbanos e, principalmente disposição inadequada, vêm se tornando um problema socioambiental. Esse descarte incorreto pode obstruir ou reduzir a capacidade do sistema de drenagem de águas pluviais, o que pode ser considerado um agravante importante na ocorrência de enchentes e alagamentos. Além disso, ocorre também a obstrução parcial de ruas e calçadas e a proliferação de vetores de transmissão de doenças. Tudo isso gera um custo para os governos locais como desobstruir córregos e vias além dos gastos com saúde devido a proliferação de doenças.

Com a disponibilidade de um recurso econômico, como o RCC, é de ampla relevância avaliar a possibilidade de se obter a fração vermelha, rica em argilominerais, para suprir a deficiência desse material em solo de baixos teores de argila.

1.2.2 Uso da Cal e Redução de Custos em Pavimentação

Como já relatado, isso propicia usar a cal como ativadora química; com tal combinação, é possível a redução do custo de pavimentação devido à estabilização do solo sem a necessidade de utilização do cimento. Portanto, com o uso da cal e do RCC nesse processo, pode-se alcançar uma alternativa promissora para a destinação correta desse resíduo, além do barateamento de obras rodoviárias.

1.2.3 Considerações Gerais

Com os resultados alcançados por esse estudo, seria possível adotar essas soluções alternativas na área de engenharia geotécnica e fica evidente a multidisciplinaridade e transversalidade do trabalho, pois obtém dados que auxiliam na tomada de decisões e estratégias de pavimentação, permite o envolvimento na reciclagem (desenvolvimento social) e atende requisitos ambientais.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 SOLOS

Os solos são materiais que resultam do intemperismo ou da meteorização das rochas, por desintegração mecânica ou decomposição química. São fatores responsáveis pela desintegração mecânica do solo: a água, a temperatura, a vegetação e o vento, transformando a rocha matriz em partículas menores, como pedregulhos, areias (solos de partículas grossas) e até mesmo siltes (partículas intermediárias), e somente em condições especiais são formadas as argilas (partículas finas). No caso da decomposição química, ocorre um processo de modificação química ou mineralógica da rocha de origem, sendo o principal agente a água, e os mais importantes mecanismos de ataque são a oxidação, hidratação, carbonatação e os efeitos químicos da vegetação. As argilas representam um dos últimos produtos do processo de decomposição, tanto química, quanto mecânica, os quais normalmente acontecem simultaneamente (CAPUTO, 1989).

Para fins de engenharia, o solo é definido como agregado não cimentado de grãos minerais e matéria orgânica decomposta (partículas sólidas), com líquido e gás nos espaços vazios entre as partículas sólidas. O solo é usado como material de construção em diversos projetos de engenharia civil e suporta fundações estruturais. Assim, os engenheiros civis estudam as qualidades do solo, tais como: origem, tamanho e distribuição de partículas, capacidade de drenagem de água, compressibilidade, resistência ao cisalhamento e capacidade de carga, para alcançar o melhor aproveitamento de suas propriedades no momento da construção. (DAS, 2007).

Durante o processo da formação do solo, não existem apenas partículas sólidas do material de origem da rocha matriz, uma vez que o solo contém partes gasosas, líquidas e de materiais orgânicos. As partículas em geral encontram-se livres para deslocamento, podendo haver uma pequena cimentação entre si, mas em grau de ligação mais baixo em relação aos encontrados em uma rocha (PINTO, 2006).

No âmbito da engenharia rodoviária, considera-se solo todo tipo de material orgânico ou inorgânico, inconsolidado ou parcialmente consolidado, encontrado na superfície da terra. Em outras palavras, considera-se como solo qualquer material que

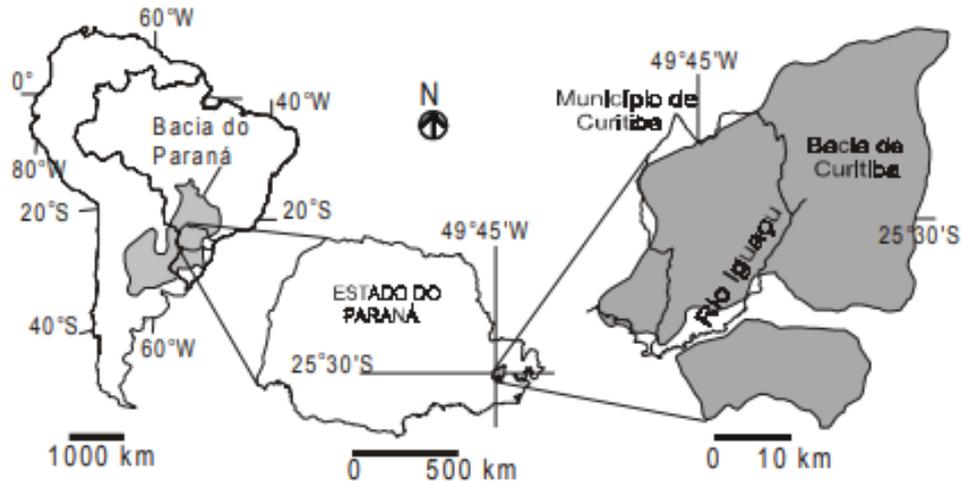
possa ser escavado com pá, picareta, escavadeiras, etc., sem necessidade de explosivos (DNIT, 2006).

2.2 FORMAÇÃO GUABIROTUBA

A Região Metropolitana de Curitiba encontra-se sobre uma bacia sedimentar que é preenchida, em sua maior parte, pela Formação Guabirota. Os sedimentos dessa unidade geológica repousam sobre rochas do Complexo Cristalino, constituído principalmente de argilas siltosas ou siltes argilosos além de materiais granulares, fato que confere uma razoável diversidade aos solos da Formação Guabirota; a deposição dos terrenos dessa formação ocorreu entre o Oligoceno-Mioceno e o Pleistoceno (SALAMUNI, 1998).

Distribuídos desde o município de Quatro Barras até o município de Campo Largo, os sedimentos da Formação Guabirota abrangem ainda seis municípios limítrofes, incluindo Curitiba (FELIPE, 2011).

Figura 1 - Mapa de localização da formação Guabirota



Fonte: SALAMUNI *et al.* (2004).

Quanto ao nome, Formação Guabirota, surgiu dos sedimentos depositados em um intervalo de 23 a 1,8 milhões de anos, compreendendo os períodos do Paleógeno ao Quaternário (Mioceno – Holoceno, respectivamente), em um abatimento de rocha gerado por falhas na forma de uma bacia, tendo início no Cretáceo (99 Ma) e descritos, primeiramente, no bairro denominado Guabirota, a leste de Curitiba, por Bigarella e Salamuni (1962).

A área de abrangência da Formação Guabirotuba é de 900 km². Segundo Felipe (2011), as espessuras máximas são da ordem de 60 a 80 m na porção central da Bacia de Curitiba e compreendem sequências litológicas nas quais predominam as argilas e areias arcossianas (20 - 40% de feldspato). Ressalta-se, também, que é comum a concentração de carbonato de cálcio impregnando os sedimentos. Junto a essas impregnações, ocorrem elementos de terras raras (lantânio, neodímio etc.).

Uma das características marcantes dos solos argilosos da Formação Guabirotuba é a elevada consistência, podendo ter argilas variando de rija a dura. Para se ter uma noção. É comum se obter valores entre 15 a 30 golpes em sondagens de ensaio Standard Penetration Test (SPT), que é um ensaio de reconhecimento do solo, logo nos primeiros metros de sondagem analisados (KORMANN, 2002).

2.3 CLASSIFICAÇÃO DE SOLOS

O objetivo da classificação dos solos, sob o ponto de vista da engenharia, é poder estimar o provável comportamento do solo ou, pelo menos, o de orientar o programa de investigação necessário para permitir a adequada análise do material existente no local (BORDIGNON, 2015).

O solo, por ser um material que se encontra na natureza nas mais diferentes formas, para que possa ser utilizado como fundação ou material de construção, necessita ser classificado de modo que se possam formular métodos de projetos baseados em algumas propriedades e características de cada grupo. Deste modo, foram desenvolvidos vários sistemas de classificação, cada um adequado a uma utilização dos solos ou a método de projeto.

2.3.1 Sistema de Classificação *Transportation Research Board* (T.R.B)

No T.R.B, os solos são reunidos em grupos e subgrupos, em função de características como granulometria, limites de consistência e índice de grupo. O tipo de solo é determinado por processo de eliminação da esquerda para a direita no quadro de classificação (Quadro 1). O primeiro grupo a partir da esquerda, com o qual os valores do solo ensaiado coincidir, será a classificação correta.

Quadro 1 - Classificação dos Solos (Transportation Research Board)

CLASSIFICAÇÃO GERAL	MATERIAIS GRANULARES 35% (ou menos) passando na peneira N.º 200							MATERIAIS SILTO- ARGILOSOS Mais de 35% passando na peneira N.º 200			
	A - 1		A - 3	A - 2				A - 4	A - 5	A - 6	A - 7 A - 7 - 5 A - 7 - 6
CLASSIFICAÇÃO EM GRUPOS	A - 1 - A	A - 1 - B	A - 2 - 4	A - 2 - 5	A - 2 - 6	A - 2 - 7					
Granulometria - % passando na peneira N.º 10..... N.º 40..... N.º 200.....	50 máx. 30 máx. 15 máx.	30 máx. 25 máx.	51 min. 10 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	35 máx.	36 min.	36 min.	36 min.	36 min.
Características da fração passando na peneira N.º 40: Limite de Liquidez..... Índice de Plasticidade.....	6 máx.	6 máx.	NP	40 máx. 10 máx.	41 min. 10 máx.	40 máx. 11 min.	41 min. 11 min.	40 máx. 10 máx.	41 min. 10 máx.	40 máx. 11 min.	41 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 pedra, pedregulho fino e areia			Pedregulho ou areias siltosos ou argilosos				Solos siltosos		Solos argilosos	
Comportamento como subleito	Excelente a bom							Sofrível a mau			

Fonte: DNIT (2006).

A seguir são listadas as características dos solos de cada um dos grupos e subgrupos deste sistema de classificação relacionadas a sua utilização em pavimentação. Solos granulares ou de granulção grossa são os que contém 35% ou menos de material passando na peneira nº 200.

Grupo A-1 - O material típico deste grupo é constituído de mistura bem graduada de fragmentos de pedra ou pedregulhos, areia grossa, areia fina e um aglutinante de solo não plástico ou fracamente plástico. No entanto, este grupo inclui também fragmentos de pedra, pedregulho, areia grossa, cinzas vulcânicas, etc., que não contêm aglutinantes de solo.

Subgrupo A-1-a - Inclui os materiais contendo, principalmente, fragmentos de pedra ou pedregulho, com ou sem material fino bem graduado, funcionando como aglutinante.

Subgrupo A-1-b - Inclui os materiais constituídos, principalmente, de areia grossa, com ou sem aglutinante de solo bem graduado.

Grupo A-2 - Este grupo inclui grande variedade de materiais que se situam entre os grupos A-1 e A-3 e também entre os materiais constituídos de mistura silte-argila dos grupos A-4, A-5, A-6 e A-7. Inclui todos os solos com 35% ou menos passante na peneira nº 200, mas que não podem ser classificados como A-1 ou A-3, devido ao teor de finos que contêm em sua composição, ou a plasticidade, ou ambos, excedendo os limites estabelecidos para os citados grupos.

Subgrupos A-2-4 e A-2-5 - Incluem solo contendo 35% ou menos, passando na peneira nº 200, com uma porção menor retida na peneira nº 40, possuindo as características dos grupos A-4 ou A-5. Estes grupos abrangem materiais como pedregulho e areia grossa, em que o teor de silte e o índice de plasticidade ultrapassam os limites estabelecidos para o Grupo A-1, e ainda areia fina com silte não plástico, excedendo os limites do Grupo A-3.

Subgrupos A-2-6 e A-2-7 - Incluem solos semelhantes aos descritos nos subgrupos A-2-4 e A-2-5, exceção feita da porção de finos que contém argila plástica com características dos grupos A-6 ou A-7. Os efeitos combinados dos índices de plasticidade maiores que 10 e porcentagem passando na peneira nº 200, maiores que 15, estão refletidos nos valores dos índices do grupo de 0 a 4.

Grupo A-3 - O material típico deste grupo é areia fina de praia ou de deserto, sem silte ou argila, ou possuindo pequena quantidade de silte não plástico. O grupo inclui também misturas de areia fina mal graduada e quantidades limitadas de areia grossa e pedregulho depositados pelas correntes.

Grupo A-4 - O solo típico deste grupo é siltoso não plástico, ou moderadamente plástico, possuindo, geralmente, 5% ou mais passando na peneira n^o 200. Inclui também misturas de solo fino siltoso com até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira n^o 200. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 8, as percentagens crescentes de material grosso, dando origem a valores decrescentes para os índices de grupo.

Grupo A-5 - O solo típico deste grupo é semelhante ao que foi descrito no A-4, exceto que ele é, geralmente, de caráter diatomáceo ou micáceo, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez. Os valores dos Índices de Grupo vão de 1 a 12; esses valores crescentes revelam o efeito combinado do aumento dos limites de liquidez e das porcentagens decrescentes de material grosso.

Grupo A-6 - O solo típico deste grupo é argiloso, plástico, tendo, geralmente, 75% ou mais de material passando na peneira n^o 200. O grupo inclui também misturas de solos finos argilosos, podendo conter até 64% de areia e pedregulho retidos na peneira n^o 200. Os solos deste grupo comumente sofrem elevada mudança de volume entre os estados seco e úmido. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 16, esse aumento nos valores representam o efeito combinado do aumento dos índices de plasticidade e diminuição dos materiais grossos.

Grupo A-7 - O solo típico deste grupo é semelhante ao descrito no grupo A-6, com a diferença que possui as características de alto limite de liquidez do grupo A-5, podendo ainda ser elástico e estar sujeito a elevada mudança de volume. Os valores dos índices do grupo vão de 1 a 20; este aumento indica o efeito combinado de crescimento dos limites de liquidez e dos índices de plasticidade, bem como a diminuição dos materiais grossos.

Subgrupo A-7-5 - Encerra materiais com índice de plasticidade moderado em relação ao limite de liquidez, podendo ser altamente elástico e sujeito a elevadas mudanças de volume.

Subgrupo A-7-6 - Inclui materiais com elevados índices de plasticidade em relação aos limites de liquidez, estando sujeitos a elevadas mudanças de volume.

2.3.2 Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS)

O SUCS baseia-se na identificação dos solos de acordo com as suas qualidades de textura e plasticidade, e classifica-os de acordo com seu comportamento quando usados em estradas, aeroportos, aterros e fundações.

Neste sistema, consideram-se as seguintes características dos solos:

- Percentagens de pedregulhos, areia e finos (fração que passa na peneira nº 200: siltes e argila)
- Forma da curva granulométrica;
- Plasticidade e Compressibilidade.

As principais divisões são: solos de granulação grossa (mais de 50% em peso retido na peneira nº 200), solos de granulação fina (mais de 50% em peso passando na peneira nº 200) e solos altamente orgânicos (facilmente identificáveis pelo seu aspecto). O critério granulométrico empregado diverge do correspondente do TRB e da American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO).

Para a aplicação do SUCS, é fornecida a Quadro 2, além de outros quadros disponíveis pelo DNER (1996), os métodos de identificação de campo e de laboratório; e as características dos grupos de solos referentes a estradas e aeroportos.

As vantagens do emprego deste sistema estão no exercício da identificação de campo, na adoção de uma simbologia que trata da natureza do solo e no valor prático das indicações que a classificação proporciona a vários ramos da engenharia de solos

Quadro 2 - Classificação dos Solos SUCS

SOLOS DE GRADUAÇÃO GROSSA: mais de 50% retido na peneira n.º 200	Pedregulhos: 50% ou mais da fração graúda retida na peneira n.º 4	Pedregulho sem finos	G W	Pedregulhos bem graduados ou misturas de areia e pedregulhosa com pouco ou nenhum fino.
			GP	Pedregulhos mau graduados ou misturas de areia e pedregulhosa com pouco ou nenhum fino.
		Pedregulhos Com finos	G M	Pedregulhos siltosos ou misturas de ped. areia e silte.
			G C	Pedregulhos argilosos, ou mistura de ped. areia e argila.
	Areias: mais de 50 % da fração graúda passando na peneira n.º 4	Areias sem finos	S W	Areias bem graduadas ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
			SP	Areias mal graduadas, ou areias pedregulhosas, com pouco ou nenhum fino.
		Areias com finos	S M	Areias siltosas - Misturas de areia e silte.
			SC	Areias argilosas - Misturas de areia e argila.
SOLO DE GRADUAÇÃO FINA: 50% ou mais passando pela peneira n.º 200	SILTES e ARGILAS com LL < 50	ML	Siltos inorgânicos - Areias muito finas - Areias finas siltosas e argilosas.	
		CL	Argilas inorgânicas de baixa e média plasticidade Argilas pedregulhosas, arenosas e siltosas.	
		OL	Siltos orgânicos - Argilas siltosas orgânicas de baixa plasticidade.	
	SILTES e ARGILAS com LL > 50	M H	Siltos - Areias finas ou siltos micáceos - Siltos elásticos.	
		CH	Argilas inorgânicas de alta plasticidade.	
		O H	Argilas orgânicas de alta e média plasticidade	
	Solos Altamente Orgânicos	PT	Turfas e outros solos altamente orgânicos	

Fonte: DNER (1996)

2.4 PAVIMENTAÇÃO

Construir uma via de circulação de veículos é obra civil que objetiva, principalmente, a melhoria operacional para o tráfego, na medida em que é criada uma superfície mais uniforme (garantia de melhor conforto no deslocamento do veículo), uma superfície mais aderente (garantia de mais segurança em condições de pista

úmida e molhada), uma superfície menos ruidosa diante da ação dinâmica dos pneumáticos (garantia de melhor conforto ambiental em vias urbanas rurais), seja qual for a medida física adotada (BALBO, 2007).

Segundo Bernucci et al. (2008), pavimento é uma estrutura de múltiplas camadas de espessuras finitas construída sobre a superfície final de terraplenagem, destinado técnica e economicamente para resistir aos esforços oriundos do tráfego de veículos e do clima e a proporcionar aos usuários melhorias nas condições de rolamento, com conforto, economia e segurança.

Para Souza (1980), pavimento é uma estrutura construída após a terraplanagem por meio de camadas de vários materiais de diferentes características de resistência e deformabilidade. Esta estrutura, assim constituída, apresenta um elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações

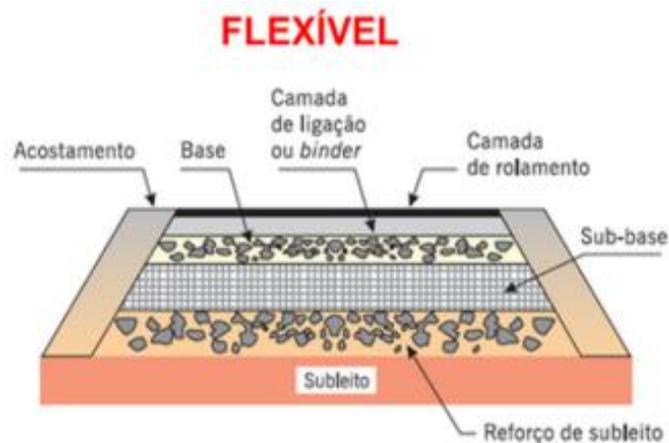
O pavimento, por injunções de ordem técnico-econômicas, é uma estrutura de camada em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são colocadas em contato - resultando um elevado grau de complexidade no que diz respeito ao cálculo de tensões e deformações (DNER, 1966).

2.4.1 Classificação dos Pavimentos

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT) (2006), de uma forma geral, os pavimentos são classificados em flexíveis e rígidos.

Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a definição de pavimento flexível é dada como aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento atuante e, sendo assim, a carga se divide em quantidades aproximadamente proporcionais entre as camadas. Na Figura 2 é apresentado a estrutura de um pavimento flexível.

Figura 2 - Estrutura de um pavimento flexível



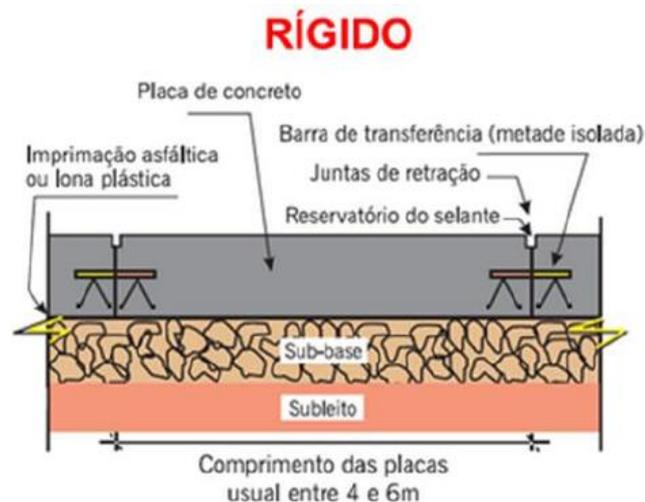
Fonte: MIRANDOLA *et al.* (2016).

Para Balbo (2007), o pavimento rígido é aquele no qual uma camada, absorvendo considerável parcela de esforços horizontais solicitantes, acaba por gerar pressões verticais aliviadas e bem distribuídas sobre as camadas mais abaixo.

Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), pavimento rígido é aquele em que o revestimento tem elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, desse modo, absorve praticamente todas as tensões oriundas do carregamento efetuado.

A seguir é apresentado, na Figura 3, o corte esquemático de um detalhamento do pavimento rígido.

Figura 3 - Estrutura de um pavimento Rígido



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

2.4.2 Camadas dos Pavimentos

Segundo o Manual de Técnicas de Pavimentação da PINI (2007), camada é uma seção transversal típica de cada pavimento, com todas as camadas possíveis, composta de uma fundação, o subleito, e de camadas com espessuras e materiais dimensionados de inúmeras formas.

Os pavimentos são divididos em camadas e sua composição é definida de acordo com o tipo deste. Em regra, são divididos em Revestimento ou Capa de rolamento, Base, Sub-base, Reforço do subleito e Subleito, conforme foi esquematizado anteriormente nas Figuras 2 e 3, as quais representam a seção transversal do pavimento flexível e pavimento rígido, respectivamente.

Revestimento: o revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego e transmiti-las de forma atenuada às camadas inferiores, impermeabilizar o pavimento, além de melhorar as condições de rolamento (conforto e segurança) (BERNUCCI et al., 2008).

Base: é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento (Manual de Pavimentação do DNIT, 2006).

Sub-Base: de acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), é a camada complementar à base, quando, em razão de circunstâncias técnico-econômicas, não for aconselhável construir a base diretamente sobre regularização.

Reforço do Subleito: conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da de regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito.

Regularização do Pavimento: é a faixa de espessura irregular, construída sobre o subleito e destinada a conformar a superfície, transversalmente e longitudinalmente, com o projeto (SENÇO, 1997).

Subleito: é o terreno de fundação do pavimento (DNIT, 2006). Para Marques (2006), é o terreno de fundação no qual será apoiado o pavimento.

2.5 ESTABILIZAÇÃO DO SOLO

Segundo Goularte (2009), estabilizar um solo significa conferir-lhe a capacidade de resistir e suportar as cargas e os esforços induzidos pelo tráfego normalmente aplicados sobre o pavimento e também às ações erosivas de agentes naturais sob as condições mais adversas de solicitação consideradas no projeto.

A estabilização pode ser entendida como a melhoria das propriedades mecânicas do solo e sua classificação está diretamente ligada ao processo utilizado para o melhoramento de tal material. O benefício desse processo como solução para a execução de uma obra de pavimentação seria o baixo custo, tendo em vista que com a estabilização do solo local não haveria necessidade de transporte de solo.

A finalidade de estabilização do solo não se limita apenas a aumentar a capacidade de carga do solo, mas também melhorar a resistência ao cisalhamento, o filtro, sistema de drenagem, a permeabilidade ou aumentar a resistência do solo para o processo de desgaste no uso de tráfego e a natureza das cargas em atuação, satisfazendo requisitos específicos dos projetos de engenharia (ZALIHA et al., 2013).

Devido às disparidades e semelhanças nos processos e mecanismos utilizados para a estabilização de solos, adota-se a natureza da energia transmitida ao solo como um critério para a classificação dos métodos de estabilização. Desta forma, podem ser citados os seguintes tipos: mecânica, granulométrica, química, elétrica e térmica (GOULARTE, 2009).

Segundo Zaliha (2013), a estabilização do solo utilizando técnicas mecânicas ou físicas pode ser feita por meio da diminuição do índice de vazios, por meio de compactação ou modificando o tamanho de grão ajustando a composição do tamanho de partículas do solo (ASTM, 1992). Através da técnica química, a estabilização pode ser feita usando aditivos químicos e emulsões, uma vez que eles trabalham como auxiliares da compactação. A reação entre os aditivos químicos e partículas de solo podem ligar-se aos grãos do solo por meio de uma rede forte, assim resultando em um solo de melhor qualidade.

Para Goularte (2009), a Estabilização Granulométrica consiste da alteração das propriedades dos solos por meio da adição ou retirada de partículas deste. Esse

método consiste, basicamente, no emprego de um material ou na mistura de dois ou mais materiais, de modo a se enquadrarem dentro de uma determinada especificação.

2.5.1 Estabilização Mecânica

O processo de estabilização mecânica pode ser entendido, segundo Pinto (2008), como o aumento, por meios mecânicos, da densidade do solo, melhorando sua resistência e durabilidade. O aumento da densidade se dá pelo fato de a energia de compactação aplicada sobre a camada de solo reduzir os vazios da mistura. Com o aumento da compactação, tem-se o acréscimo da resistência mecânica. A redução dos poros também inibe a percolação da água e a erosão provocada pela mesma, aumentando a durabilidade.

Segundo Nascimento (1970 apud CRISTELO, 2001), a estabilização mecânica de um solo consiste num conjunto de operações “mecânicas” que lhe conferem estabilidade, quando solicitado em pavimentos de estradas. São consideradas como estabilizações mecânicas aquelas que apenas modificam o arranjo das partículas do solo, ou a sua granulometria, por meio da subtração ou adição de algumas frações. O tratamento com aditivos como o cimento, a cal, o betume, etc., que não são inertes, como os solos e os agregados, já não constitui uma estabilização mecânica.

2.5.2 Estabilização Granulométrica

Na estabilização granulométrica, procura-se obter um material densamente graduado e de fração fina plástica limitada, com a mistura íntima de dois ou mais solos e posterior compactação (SOLIZ, 2007). Para a correção granulométrica de solos argilosos com uso de material granular é necessário garantir que as partículas fiquem em contato adicionando uma quantidade suficiente de material granular. É importante ressaltar que a granulometria da fração fina sofre, ainda, importantes modificações na estabilização com cal ou cimento, não só devido ao efeito da adição da fração granulométrica de pó de cal ou cimento, mas também devido à ação química desses materiais (CRISTELO, 2001).

Caputo (1988) explica que, na prática, utilizam-se faixas granulométricas, definidas pelas correspondentes especificações adotadas, entre as quais deverá se

situar a curva granulométrica do solo que será utilizado. Quando acontece de não ser encontrado nenhum material que satisfaça as especificações, torna-se necessária uma correção granulométrica, dosando-se uma mistura de dois ou mais materiais, a fim de que esta mistura, então, se enquadre na faixa granulométrica.

Uma outra finalidade à correção granulométrica de um solo, especialmente da fração de siltes ou argilas em predominância, é a necessidade de redução do índice de plasticidade e do limite de liquidez do material. Essa correção é geralmente conseguida misturando um solo pouco plástico ao solo original de elevado potencial plástico. E a dosagem dos solos na mistura pode ser obtida pela determinação experimental do índice de plasticidade e do limite de liquidez das próprias misturas (NASCIMENTO, 1970 apud CRISTELO, 2001). Na dosagem, poderá também prever-se de forma estimativa os valores aproximados destes parâmetros, por meio da média ponderada nos solos, sendo que os pesos da referida média serão as quantidades de finos com que cada um dos solos contribui para a mistura (CRISTELO, 2001).

2.5.3 Estabilização Química

Patrício (2015) define estabilização química como qualquer procedimento no qual um material químico, seja cimentante ou não, é adicionado ao solo atribuindo-lhe melhorias em suas propriedades do ponto de vista da engenharia.

Lambe e Michaels (1954 apud ARRIVABENI et al., 2016) abordam os mecanismos químicos de estabilização essenciais para que modifiquem as propriedades físicas dos solos.

Neste tipo de estabilização, podem ser utilizados vários tipos de aditivos químicos. As partículas do solo são ligadas quimicamente por meio de reações químicas. A estabilização química utilizada em obras de pavimentação rodoviária recorre normalmente ao cimento, à cal, aos materiais betuminosos, às resinas e aos carbonatos (GOULARTE, 2009).

Solo-cimento: o cimento Portland é um dos aditivos mais conhecidos e aplicados na estabilização química de um solo. Esse tratamento pode ser utilizado em certos solos pouco plásticos ou não plásticos, com teores em água suficientemente elevados para impedir a sua adequação aos trabalhos de terraplenagens. Contudo, os principais objetivos da utilização do cimento na estabilização de solos são a

melhoria das características mecânicas e uma maior estabilidade relativamente à variação do teor em água (CRISTELO, 2001).

Goularte (2009) considera a existência de três diferentes tipos de misturas para o uso do cimento na estabilização do solo: mistura de solo-cimento, solo melhorado com cimento e solo-cimento plástico, sendo a estabilização influenciada por fatores como o tipo de solo, presença de materiais nocivos ao cimento, teor de cimento, teor de umidade da mistura, operações de mistura e compactação, tempo e condição de cura e dosagem.

Solo-cal: Dalla Rosa et al. (2009) ressalta a importância da cal como o estabilizante mais econômico e mais utilizado na estabilização de solos, com aplicação em pavimentações e aterros, sendo utilizado desde a antiguidade.

O óxido de cálcio (CaO) ou a cal, como é conhecida, é um aglomerante aéreo que, quando adicionada aos solos, principalmente argilosos, assume propriedades ligantes devido a reação com os argilominerais presentes neste tipo de solo. As reações, aglomerantes devido às propriedades ligantes da cal em solos argilosos, permitem um incremento na resistência de tal material, viabilizando seu uso em pavimentação de rodovias.

O Quadro 3 apresenta um resumo dos métodos de estabilização de solos conforme foi descrito anteriormente, bem como mostra os exemplos de cada tipo de estabilização.

Quadro 3 - Métodos de estabilização de solos - diagrama esquemático

Estabilização Mecânica	Compactação	
	Vibrofloculação	
	Compactação Dinâmica	
	Compactação por explosivos	
	Aceleração de consolidação	Pré-carga
		Drenos verticais
	Correções granulométricas	
Estabilização Física	Electro-osmose	
	Tratamento térmico	Aquecimento
		Congelamento
Estabilização Química	Cimento	
	Cal	
	Betume	
	Lipidur	
	Silment	

Fonte: GORSKI (2010), adaptado pelos autores

2.6 CAL

A cal pode ser definida como um aglomerante utilizado na construção civil, seja para estabilização de solos ou na confecção de argamassas. O principal constituinte é o óxido de cálcio, podendo haver a presença ou não de óxido de magnésio, e tal material de construção é obtido a partir do aquecimento do calcário a temperaturas próximas a 1000 graus Celsius (CRISTELO, 2001).

Segundo Azevêdo (2010), o óxido de cálcio ou mistura de óxidos de cálcio e de magnésio, provenientes da calcinação do CaCO_3 , é conhecido como cal. A fórmula molecular é representada por CaO ou CaO.MgO , que significa a combinação do oxigênio com o metal cálcio e o metal magnésio. Neste estágio, ainda antes de sofrer o processo de hidratação, ambas as formas apresentadas são conhecidas como “cal virgem”.

- Calcário calcífico, Reação 1.



- Calcário dolomítico, Reação 2.



A NBR 6453 (2003) classifica em três tipos: cal virgem especial (CV-E), cal virgem comum (CV-C) e cal virgem em pedra (CV-P).

Ao adicionar água na cal virgem suficiente para satisfazer a afinidade química, ocorre um processo denominado de queima no qual é obtido a cal hidratada.

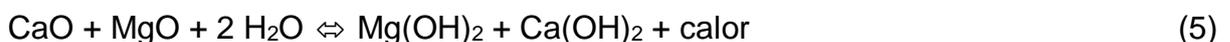
- Cal cálcica Hidratada, Reação 3.



- Cal dolomítica monohidratada, Reação 4.



- Cal dolomítica dihidratada, Reação 5.



Sobre a composição das cales, Azevêdo (2010) ressaltou que Guimarães, em 1971, pesquisou as composições extremas encontradas no mercado, apresentadas no Quadro 4.

Quadro 4 - Composição da cal em óxidos

Óxidos	Faixas de Óxidos em (%)	
	Cal Cálctica	Cal Dolomítica
CaO	90 - 98	64 - 57
MgO	0,3 - 3,0	36 - 41
SiO ₂	0,2 - 5,0	0,2 - 6,0
Fe ₂ O ₃	0,1 - 0,5	0,1 - 0,5
Al ₂ O ₃	0,1 - 0,6	0,1 - 0,6
CO ₂	0,4 - 2,5	0,4 - 2,5
SO ₃	0,01 - 0,1	0,01 - 0,1
P	0 - 0,5	0 - 0,5

Fonte: Guimarães (1983 apud AZEVÊDO, 2010), adaptado pelos autores.

A NBR 7175 (2003) classifica as cales comercializadas em 3 tipos CH-I, CH-II e CH-III e especificou as exigências químicas de acordo com o Quadro 5.

Quadro 5 - Classificação e exigências químicas para as cales

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Anidrido carbônico (CO ₂)	Na fábrica	≤ 5 %	≤ 5 %	≤ 13 %
	No depósito	≤ 7 %	≤ 7 %	≤ 15 %
Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaO+MgO) ¹⁾		≤ 10 %	≤ 15 %	≤ 15 %
Óxidos totais na base de não-voláteis (CaOt + MgOt) ²⁾		≥ 90 %	≥ 88 %	≥ 88 %

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7175, 2003).

Para calcular o teor de óxido de cálcio (CaO) ou óxido de magnésio (MgO) não hidratados representados no quadro 3, deve-se utilizar as seguintes formulações.

- CaO combinado com CaSO₄ = % SO₃ x 0,70
- CaO combinado com CaCO₃ = % CO₂ x 1,27
- água combinada = % perda ao fogo - (% CO₂ + % umidade)
- CaO hidratado = % água combinada x 3,11
- CaO não-hidratado..... = % CaO - (a + b + d)
- MgO hidratado..... = | e | x 0,72

No Quadro 6 é demonstrado o teor de óxidos não hidratados e a forma de expressá-lo:

Quadro 6 - Teor de óxido não hidratado

Hipóteses	Óxido de cálcio não hidratado calculado (CaO)	Óxidos de cálcio e magnésio não hidratado calculado (CaOt+MgOt)
$e < 0$	0 (zero)	% MgO – f
$e = 0$	0 (zero)	% MgO
$e > 0$	e	e + %MgO

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7175, 2003), Adaptado pelos autores.

No Quadro 6 o teor de óxidos totais na base de não-voláteis ($\text{CaO}_{\text{total}} + \text{MgO}_{\text{total}}$) deve ser calculado como segue:

$$\%(\text{CaO}_{\text{total}} + \text{MgO}_{\text{total}}), \text{ base de não-voláteis} = \frac{\%CaO_{\text{total}} - \%MgO_{\text{total}}}{10}$$

As especificações físicas das cales hidratada e seus respectivos tipos estão especificadas no Quadro 7 (NBR 7175/2003).

Quadro 7 - Exigências físicas para cal hidratada

Compostos		Limites		
		CH-I	CH-II	CH-III
Finura (%retida acumulada)	Peneira 0,600 mm	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %	≤ 0,5 %
	Peneira 0,075 mm	≤ 10 %	≤ 15%	≤ 15 %
Retenção de água		≥ 75 %	≥ 75%	≥ 70 %
Incorporação de areia		≥ 3,0	≥ 2,5	≥ 2,2
Estabilidade		Ausência de cavidades ou protuberâncias		
Plasticidade		≥ 110	≥ 110	≥ 110

Fonte: Associação Brasileira de Normas Técnicas (NBR 7175, 2003).

2.7 SOLO ESTABILIZADO COM CAL

Guimarães (2010) define solo-cal como uma mistura de solo, cal e água em proporções determinadas por ensaios de laboratório, sendo o produto obtido possível de ser empregado em qualquer das camadas do pavimento, não asfálticas, desde que obtenha conformidade com as normas regulamentadoras.

O DNIT (2006) define solo-cal como uma mistura de solo, cal e água podendo conter material pozolanico. Geralmente adota-se de 5% a 6% como teor de cal, e o processo de estabilização ocorre por modificação do solo, carbonatação ou pozolanização (cimentação forte) e tem como resultado para pavimentação uma mistura considerada semirrígida. De maneira análoga, o DNIT define solo melhorado com cal quando a mistura é obtida predominantemente por meio da modificação do solo resultando uma mistura flexível.

2.7.1 Histórico da Técnica

Gorski (2010) relata o uso da cal como material ligante antes mesmo de os Romanos terem desenvolvido a sua técnica de aplicação. De fato, os primeiros vestígios de produção industrial de cal surgem no Egito, cerca de 3000 anos a.C., quando as pirâmides foram construídas com blocos de calcário ligados entre si por um ligante constituído por uma mistura de cal e gesso. Contudo, foram os romanos que desenvolveram as primeiras grandes aplicações da cal em geotecnia, nomeadamente na secagem de terrenos e na fixação das lajes de algumas das suas estradas às plataformas.

As técnicas de utilização da cal introduzidas pela civilização Romana mantiveram-se praticamente inalteradas até meados da Idade Média. No entanto, foi preciso esperar até o século XVIII para que se tivesse uma abordagem científica e uma exploração industrial da cal. No século XIX, Vicat e Debray completaram o trabalho de Black identificando todas as propriedades físico-químicas do produto, bem como todos os tipos de cal e utilizações. Ao final do século XIX e no início do século XX, com considerável desenvolvimento industrial, houve a criação de vários centros de produção na Europa e nos Estados Unidos (CRISTELO, 2001).

No Brasil, o uso da cal iniciou-se em 1549, com a chegada do primeiro governador, Thomé de Souza, às costas brasileiras. À ele foi dado o Regimento no qual o rei determinava que ele fizesse uma fortaleza de pedra e cal. Thomé de Souza estabelece então a sede do governo em Salvador, na Bahia.

Para a construção das casas da nova capital, criou-se a primeira mineração no Brasil para fabricação de cal virgem a partir de calcário conchífero (calcário

constituído de peças ou fragmentos de conchas, corais e ostras), que reveste o fundo da Baía de Todos os Santos (CAMPOS et al., 2007).

2.7.2 Reações Químicas entre o Solo e a Cal

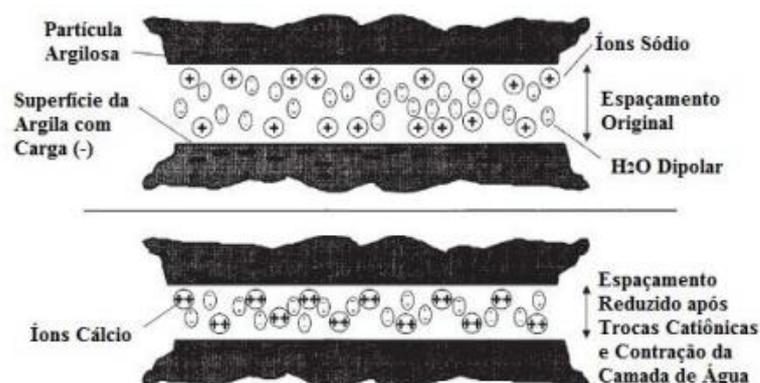
Os argilominerais presentes no solo, quando em contato com a cal na presença de água, ocorre reações químicas. Cristelo (2001) divide as reações em duas categorias principais: permuta ou troca iônica e reações pozolânicas. Azevêdo (2010), além dos grupos de reações supracitados, ressalta que pode haver outros dois tipos: a reação de carbonatação e floculação das partículas.

— Troca Catiônica

Patrício (2015) define troca catiônica como o fenômeno que ocorre devido à troca de base entre os cátions da cal (carregadas positivamente) substituindo os íons metálicos de sódio, magnésio e hidrogênio, situados nas superfícies das argilas, modificando o número de cargas elétricas nesta superfície. Brito et al. (2017) ressaltam também a importância da umidade presente no sistema solo-cal, propiciando uma elevação do potencial hidrogeniônico (pH) devido à presença do hidróxido de cálcio $\text{Ca}(\text{OH})_2$, que por sua vez fornece cátions para serem trocados por cátions presentes nos argilominerais do solo, promovendo uma modificação parcial da textura do solo.

A Figura 4 esquematiza o processo de troca catiônica entre partículas de argilas, nota-se que há uma diminuição no espaçamento entre partículas havendo um processo de floculação ou agregação.

Figura 4 - Troca catiônica na argila



Fonte: Prusiski & Bhattacharja (1999 apud SILVA, 2016).

O fenômeno de floculação e aglomeração é causado pelo aumento da concentração eletrolítica da água intersticial, pelo alto pH e pela redução da espessura da dupla camada difusa (HERZOG & MITHHEL, 1963 apud DALLA ROSA, 2009).

— Floculação

A floculação ou agregação é consequência da troca catiônica e pode ser definida como processo de aglomeração das partículas pequenas e finas do solo argilominerais em flocos maiores e mais estáveis. Para Cristelo (2001), a floculação é a principal responsável pelas alterações das características geotécnicas do solo, verificadas logo após a adição da cal.

Para Guimarães (1998), a troca iônica e floculação são ações imediatas, que após alguns instantes (minutos) de contato, já refletem em mudanças nas propriedades físicas dos solos. São alteradas:

- na granulometria é notada um deslocamento para a fração grosseira da curva granulométrica, devido a floculação ou agregação das partículas originais;
- nos limites de Atterberg é apontada uma alteração mais notável no limite de plasticidade que normalmente aumenta;
- na compactação, observa-se que para uma determinada energia de compactação há um decréscimo na densidade máxima seca e um aumento do valor da umidade ótima;
- em relação à contração a expansão o solo-cal se mostrou menos sujeito a variação volumétrica e;
- principalmente um incremento na capacidade de suporte do solo.

A Figura 5 ilustra o processo de floculação e aglomeração de partículas argilosas, assim, as mudanças na textura do solo, acontecem em uma função do tempo necessário para que ocorram as trocas iônicas e a floculação das partículas.

Figura 5 - Aglomeração e floculação nas argilas



(a) Partículas argilosas não estabilizadas.



(b) Argila após floculação/aglomeração

Fonte: Prusiski & Bhattacharja (1999 apud SILVA, 2016).

— Carbonatação

A carbonatação é uma reação entre o óxido e o hidróxido de cálcio presente no sistema cal-água com o anidrido de carbono (CO_2) presente no ar da atmosfera ou até mesmo incorporado no solo. Guimarães (1995) ressalta a importância da carbonatação para o sucesso da estabilização do solo, devido a ação aglomerante, sendo limitada em um curto intervalo de tempo essa reação tende a refazer o carbonato de cálcio, um novo corpo sólido do sistema que se entrelaça com os demais do solo e compacta o sistema. Isso ocorre pois, com o aparecimento do carbonato de cálcio, surge também grãos maiores.

Apesar do potencial cimentante, a carbonatação é considerada uma reação prejudicial à mistura solo-cal, isso porque retira cátions de cálcio da superfície das partículas de argilas floculadas. Reagindo com o CO_2 presente no ar, é formado um composto muito menos resistentes que os compostos de silicatos e aluminatos gerados pela cimentação pozolânica. Na prática, a forma para se minimizar os efeitos citados é aplicar proteção adequada, um exemplo possível seria a imprimação da camada estabilizada (AZEVEDO, 2010). Além disso, Cristelo (2010) ressalta que o carbonato de cálcio é uma substância com elevada plasticidade, o que, conseqüentemente, aumenta a plasticidade do solo e floclula as partículas de cal, dificultando assim a sua reação com as partículas argilosas.

— Reações Pozolânicas

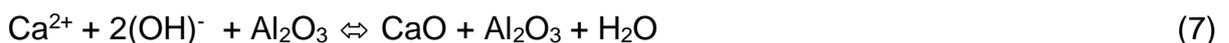
Patrício (2015) define a reação pozolânica como a capacidade de aumento de resistência devido às reações químicas entre a cal e os argilominerais, resultando basicamente em silicatos e aluminatos de cálcio hidratados, similares, em natureza, aos componentes cimentícios encontrados no cimento Portland.

Cristelo (2010) define as pozolanas como materiais naturais ou artificiais que possuem constituintes passíveis de reagir com o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ para formarem, com a presença da água, novos compostos estáveis de poder aglomerante e endurecedor. Este destaca que os argilominerais presentes no solo são classificados como

pozolanas naturais e têm a capacidade de reagir com a cal adicionada ao solo produzindo materiais aglomerantes.

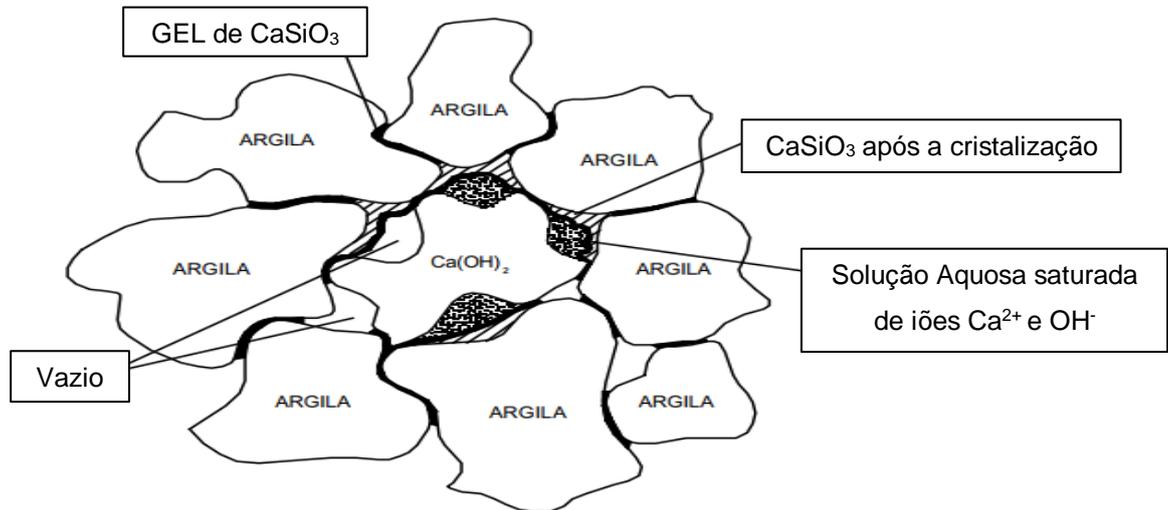
Pressupõe-se que a reação pozolânica está diretamente ligada à quantidade de sílica e alumina presente na argila. Lea (1938 apud SANTOS, 1989) destaca que as argilas, geralmente utilizadas como materiais pozolânicos, contém de 50 % a 65 % de sílica (SiO₂) e de 17 % a 38 % de alumina (Al₂O₃). Santos (1989) prossegue sugerindo que a atividade pozolânica da argila aumenta com o aumento do teor de Al₂O₃, concluindo que o composto alumínio contribui de forma importante para a atividade Pozolânica, provavelmente, formando o aluminato de cálcio.

Cristelo (2010) resume a reação pozolânica explicando-a da seguinte forma: a cal adicionada ao solo resulta em acréscimos consideráveis do pH, o que facilita a amorfização da sílica presente nos minerais argilosos e a entrada de cal na solução saturada, na qual ocorre a combinação da sílica com o cálcio, formando silicato hidratado de cálcio. Simultaneamente, o ataque das argilas pela cal e a provável decomposição e destruição conduz à formação de aluminato hidratado de cálcio. Para que tais reações aconteçam deve haver cátions de cálcio Ca²⁺ e silicatos e aluminatos disponíveis corroborando a reação de troca de cátions conforme Reações 6 e 7.



Cristelo (2010) conclui que os novos elementos se encontram inicialmente em forma de gel revestindo as partículas do solo formando um encadeamento que eventualmente resulta em novos compostos minerais: silicatos e aluminatos de cálcio hidratados insolúvel em água que, após cristalizar, leva à aglomeração das partículas entre si, constituindo uma estrutura envolvente das mesmas de acordo com a Figura 6.

Figura 6 - Formação do material cimentício em uma mistura solo cal



Fonte: CRISTELO (2016).

2.7.3 Dosagem

Dosar a cal no solo pode ser considerada como a determinação ideal do aditivo para alterar as propriedades da mistura, que resultará em acréscimos na resistência mecânica e melhorias na durabilidade. O desenvolvimento de técnicas para a determinação da quantidade ideal da cal conduziu na criação dos métodos de dosagem, que tem como objetivo indicar o teor ótimo de cal (SILVA, 2016).

O Departamento de Estradas e Rodagens de São Paulo (DER SP, 2006) estabelece o uso da cal para estabilizar solos de base e sub-base em proporções estabelecidas por dosagem experimental, apresentando grande estabilidade e durabilidade quando adequadamente compactadas. O DER SP (2006) define que o teor mínimo da cal a ser incorporado ao solo é de 3% e define-o como relação entre massa de cal e a massa do solo.

Segundo Dalla Rosa (2009), o método do pH (Eades e Grim, 1966) consiste na determinação do teor mínimo de cal para que a mistura produza um aumento no valor do pH igual ou acima de 12,4 e tem como variação o método Initial Consumption

of Lime (ICL) proposto por Rogers et al. (1997), que considera como o teor mínimo de cal o valor necessário para elevar o pH ao máximo valor constante.

Para Oliveira (2010), o método Lime Fixe Point (LFP) proposto por (Hit e Davidson, 1960) é baseado no limite de plasticidade, que determina o teor de cal máximo que proporciona melhoria na trabalhabilidade, sem ganhos significativos da resistência. Em contrapartida o método de Thompson (1966) define como reativo um solo que apresente um aumento de resistência à compressão simples de pelo menos 0,345 MPa quando estabilizado com a cal.

Cristelo (2001) destaca o cuidado na dosagem quanto a afinidade do sistema cal-solo, sendo necessário uma quantidade apropriada do aditivo para satisfazer essa afinidade. Logo a cal não estará disponível para iniciar as reações pozolânicas com as partículas do solo até compensar a referida afinidade. Esta compensação foi designada por “fixação da cal” (Hilt, 1960). A capacidade de fixação da cal é a percentagem de hidróxido de cálcio que pode ser fixado pelo solo, ressaltando que não há incremento na resistência mecânica da mistura, caso a cal adicionada seja fixada ao solo, mesmo que ocorra a correta compactação e cura do solo (CRISTELO, 2001).

2.8 RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)

De acordo com Menezes et al. (2011), parte do resíduo da construção se dá pela perda gerada na construção civil devido a falhas na execução, má qualidade e acondicionamento impróprios dos materiais e outros fatores.

Os resíduos de construção civil são definidos como tudo aquilo que é oriundo de construções, reparos, reformas e demolições de obras de construção civil, e também os resultantes do preparo e escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gessos, telhas, pavimentos asfálticos, vidros, plásticos, tubulações, fiações elétricas etc., normalmente conhecidos como entulhos de construção (Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2002).

Segundo Pinto (1986 apud Wada, 2010), o produto resultante dos canteiros de obra na cidade de São Carlos, em média, é composto por 64% de argamassa, 30%

de componentes cerâmicos (tijolos maciços e furados, telhas e blocos) e os 6% restantes de outros materiais, como concreto, pedra, areia, materiais metálicos e plásticos.

De acordo com a Resolução CONAMA nº 307, de 05/07/2002, os resíduos da construção civil são classificados dentro das seguintes classes:

Classe A: são aqueles resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc.) produzidas nos canteiros de obras.

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

Classe C: são resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que possibilitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos provenientes do gesso.

Classe D: são resíduos perigosos gerados pelos processos de construção, como exemplo tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros.

Estima-se que a quantidade de RCC produzida, no mundo, oscila entre 0,7 e 1,0 toneladas por habitante/ano (John, 1999; Martini, 2005; John, 2000 apud Menezes, 2011). No Brasil a produção gira em torno de 65 milhões de toneladas (Ângulo, 2005 apud Menezes et al., 2011). No Quadro 8 é possível observar o percentual de resíduo da construção por material.

Quadro 8 - Frações nos RCC (% m/m)

Frações	Percentual
Solos	32
Cerâmicos	63
Outros (metais e materiais orgânicos)	5

Fonte: Menezes (2011), adaptado pelos autores.

John e Agopyan (2000 apud Wada, 2010) afirmam que podem ser recicladas na forma de sub-base e base para pavimentação as frações constituídas de solo misturado a materiais cerâmicos e de gesso com baixos teores. Para as demais frações, principalmente madeira, embalagens e gesso ainda não possuem tecnologia de reciclagem. A reciclagem tem demonstrado desempenho considerável em diversas utilidades nas obras urbanas, com vantajosa redução de custos. Há também a possibilidade de se organizar seu reuso em diversos serviços, tais como em pavimentação de vias em sua execução de base, habitações e outras edificações, além de construção de muros, contenção de encostas e produção de artefatos como guias, sarjetas e tubos (Pinto, 1997 apud Wada, 2010).

2.8.1 Fração Vermelha do RCC

Pode-se conceituar cerâmica como sendo todos os materiais inorgânicos, não metálicos, obtidos geralmente após tratamento térmico em temperaturas elevadas. Observando especificamente a cerâmica vermelha, pode-se dizer que esta compreende aqueles materiais com pigmentação avermelhada utilizados na construção civil (tijolos, blocos, telhas, elementos vazados, lajes, tubos cerâmicos e argilas expandidas) e também utensílios de uso doméstico e de adorno (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA, 2006).

Uma das principais características dos produtos da cerâmica é sua cor vermelha, encontrados em tijolos, blocos, telhas, tubos, lajes para forro, lajetas, vasos ornamentais, agregados leves de argila expandida e outros.

Por meio de estudos arqueológicos, verificou-se a existência de utensílios cerâmicos no início do período Pré-neolítico (25000 a.C.) e de materiais de construção, como tijolos, telhas e blocos, por volta de 5000 a 6000 a.C. (SEBRAE, 2008).

De acordo com estudos realizados pela Faculdade de Tecnologia de Lisboa, peças cerâmicas feitas com argila datam de 4000 a.C., produzidas com formas bem definidas, porém utilizando processo que não utilizava o cozimento das mesmas. Também dessa mesma época, datam os indícios da utilização de tijolos na construção, produzidos na Mesopotâmia (SANTOS, 2003).

No Brasil, mais de 2000 anos atrás, antes mesmo do descobrimento do Brasil, havia no país a atividade de fabricação de cerâmicas, representada por potes, baixelas e outros artefatos cerâmicos.

Atualmente, a produção cerâmica é feita, em grande parte, pelas empresas de pequeno e médio porte, de capital nacional. As jazidas de argila, que fornecem matérias-primas com qualidade e regularidade, compõem-se em unidades mineradoras e fornecedoras para a indústria de cerâmica vermelha ou ainda com unidade própria de extração (SEBRAE, 2013).

De acordo com Carneiro et al. (2001) apud Redivo (2011), em seu estudo foi possível concluir que o agregado reciclado, tanto na fração miúda assim como na fração graúda, mostrou-se adequado ao uso como material para execução de base e sub-base de pavimentos, bem como em argamassa de revestimento, na área metropolitana de Salvador.

Recentemente, uma pesquisa desenvolvida por Dias (2004) analisou os resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para o uso em camadas de pavimento de baixo custo. No estudo foram utilizados, exclusivamente, cacos de telhas, coletados nas cidades de Monte Carmelo e Ituiutaba, em Minas Gerais. O material cerâmico foi triturado usando um britador de impacto e avaliado, de maneira separada e em misturas com solos lateríticos.

As misturas feitas por Dias (2004) apresentaram algumas características próprias que precisam ser melhor analisadas, como a quebra de partículas mediante os esforços de compactação, o que colocaria em risco a sua utilidade. Conforme a pesquisa, as misturas entre agregado reciclado de telha (ART) e solos lateríticos da região analisada (argilosos ou arenosos), na proporção de 63% de ART e 37% de solo, apresentaram resultados consideráveis em termos de CBR, o que pode vir a atender as exigências para camadas de sub-base. A mistura com solo argiloso apresentou um CBR superior a 50% para um teor de umidade de 19,4%, já a mistura executada com solo arenoso apresentou um CBR próximo a 70% para um teor de umidade de 14%.

Já no que se refere ao módulo de resiliência, os ensaios realizados por Dias demonstraram ganhos expressivos nos resultados, demonstrando o potencial do uso do ART em camadas mais nobres de pavimento. Em dosagens compostas por 41%

de solo, tanto as misturas com solo argiloso quanto as misturas com solo arenoso, obtiveram ganhos superiores a 200% no Módulo de Resiliência.

2.9 ÁLCALI-ATIVÇÃO DE MATERIAIS ALUMINO-SILICIOSOS

A álcali-ativação ou ativação alcalina pode ser considerado como um processo químico que permite transformar estruturas vítreas (parcialmente ou totalmente amorfo e/ou metaestável) em um compósito bem compactado e aglomerante. Ressalta-se que o ambiente fortemente alcalino é necessário para que seja possível a quebra das ligações da matéria-prima e promover sua polimerização (Jaarsveld et al., 1997 apud VARGAS *et al.*, 2006).

Em termos gerais, a álcali-ativação é uma reação entre materiais de composição sílica e alumina e metais alcalinos ou alcalino terrosos, ou seja, substâncias: R, R OH(OH)₂, R₂CO₃, R₂S, Na₂SO₄, CaSO₄ 2H₂O, R₂ (n) SiO₂, em que R representa um íon alcalinos, como sódio (Na), potássio (K), cálcio (Ca). O processo começa quando a alta concentração de hidroxila (OH) do meio alcalino favorece a quebra das ligações covalentes Si-O-Si, Al-O-Al e Al-O-Si a partir da fase vítrea da matéria-prima, transformando os íons de sílica e alumina em colóides liberando-os na solução. Ao mesmo tempo, os cátions alcalinos de Na⁺, K⁺ e Ca²⁺ agem como “blocos” de construção da estrutura, compensando o excesso de cargas negativas associadas com a modificação na coordenação de alumínio durante a fase de dissolução. A partir da quebra das ligações covalentes da sílica e alumina e da dissociação iônica dos sais metálicos, os produtos resultantes se acumulam durante um período de tempo, formando um grupo de íons de alta mobilidade. Se o cálcio estiver presente na mistura em quantidades significativas, o complexo de Al-Si dissolvido irá difundir a superfície sólida e produzir uma fase gelatinosa de C – S – H dominante. Caso contrário, ocorre um processo de policondensação no qual íons Si e Al precipitam em torno dos pontos dos núcleos, compartilhando todos os íons de oxigênio, e formam uma estrutura tridimensional de Si-O-Al e Si-O-Si (CRISTELO *et al.*, 2012).

Cristelo et al. (2012) explica que quando a fonte de sílica e alumina é submetida à um tratamento térmico os resultados de ativação alcalina são melhorados, com isso é possível reduzir a quantidade de água de cristalização e alterar a ordem estrutural entre os íons de alumínio e oxigênio. Uma estrutura amorfa

da substância é criada, com uma resposta química muito reativa. Os produtos de cerâmica vermelha são fabricados a partir de uma combinação de argilas plásticas, geralmente de margens de rios, lagos ou de várzeas, e não plásticas, oriundas de jazidas, as quais são submetidas a queima entre 600°C e 1000°C (SANTOS, 1975 apud MACIOSKI, 2017). Assim presume-se que, além de cinzas volantes e escórias de alto forno, argilas naturais ou calcinadas também apresentam atividade pozolânica, embora em menor grau

2.10 TRABALHOS ANTERIORES

Em 2017 com objetivo de fazer um comparativo da estabilização do solo com a utilização da cal com a utilização do cimento, Sales *et al* obtiveram resultados para os seguintes ensaios.

— Análise granulométrica do solo

O Quadro 9 apresenta os resultados do ensaio de peneiramento fino relativo a parte da análise granulométrica realizada por Sales *et al.* (2017).

Quadro 9 - Dados referentes ao peneiramento fino do ensaio de granulometria

Peneira	material retido		material passante (%)
	Massa (g)	percentual (%)	
4	0	0,00	100,00
10	4,25	0,66	99,34
16	6,75	1,05	98,29
30	22,24	3,45	94,85
40	20,16	3,13	91,72
60	20,93	3,25	88,47
100	42,81	6,64	81,83
200	34,74	5,39	76,45
Fundo	492,98	76,45	
Total	644,86		

Fonte: SALES *et al.* (2017) adaptado pelos autores.

Analisando o Quadro 9, nota-se que 76,45% do material passa na peneira de malha 200, ou seja, este percentual do material tem diâmetro menor que 0,075

Os dados e parâmetros utilizados no ensaio de determinação da massa específica real dos grãos do solo estão disponíveis no Quadro 11.

Quadro 11 - Determinação da densidade real dos grãos do solo (Gs) (NBR 6508/1984)

Picnômetro	A	B	C
Temperatura (°C)	21,1	17,4	17,4
Picnômetro (g)	69,13	68,3	63,48
Picnômetro + Solo Seco (g)	94	94,98	93,14
Picnômetro + Água (g)	168,59	167,79	162,99
Picnômetro + Solo + Água (g)	184,42	184,49	181,85
Solo Seco (g)	24,87	26,18	29,66
Fator de Correção (K)	0,9991	0,9991	0,9991
Gs (g/cm ³)	2,749	2,759	2,744

Fonte: SALES et al. (2017) adaptado pelos autores.

O fator de correção K é a relação entre a densidade da água na temperatura de 20 °C e a densidade da água na temperatura de realização do ensaio. Pode ser consultado na NBR 6458/1984. De acordo com os resultados do Quadro 11, verificou-se que nenhum dos valores de Gs para os picnômetros A, B e C tiveram variação superior à 0,02 g/cm³. Com isso, determinou-se o valor da densidade real dos grãos como a média desses 3 valores, ou seja, Gs= 2,751 g/cm³.

— Ensaio de Índice de suporte Califórnia.

O quadro 12 apresenta valores atingidos de ISC por Sales et al (2017), para o solo natural e com adição de 3% e 9% de cal.

Quadro 12 - Ensaio índice suporte Califórnia solo e solo-cal

Penetração (mm)	Índice de suporte Califórnia (%)		
	Solo	Solo + 3% cal	Solo +9% cal
2,54	1,47	6,33	10,88
5,08	1,75	4,01	10,39
ISC (%)	1,75	6,33	10,88

Fonte: Sales et al. (2017), adaptado pelos autores

Conforme o Quadro 12, observa-se que o ISC para o solo tem um valor de 1,75% e ao adicionar-se as quantidades de 3% e 9% de cal o ISC aumenta para 6,33% e 10,88% respectivamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATERIAIS

Nessa seção serão expostos os materiais que foram empregados para a realização da pesquisa, como origem, procedência e características particulares dos materiais utilizado para o estudo.

3.1.1 Solo

O solo coletado para estudo tem origem no loteamento de um condomínio, situado na Rua Francisco da Conceição Machado, bairro Gralha Azul, Fazenda Rio Grande - PR. As coordenadas obtidas por meio do aplicativo Google Maps é de 25°41'04.6"S 49°18'29.7"W, aproximadamente. A coleta ocorreu por volta de 1,5 metros de profundidade da superfície, conforme mostrado na Figura 7, com auxílio de uma escavadeira operada por um funcionário da obra tal como descrito por *Sales et al.* (2017). Destaca-se que o solo para a pesquisa em questão já foi estudado por *Sales et al.* (2017). Os resultados do trabalho indicam que houve incrementos significativos na resistência do solo usando a cal como aditivo para estabilização. Com base nisso, supõe-se que devido à fração fina ser predominantemente siltosa o material em questão não atingiu os valores mínimos exigidos pelo DER/PR (2005). Logo, torna-se interessante a utilização do mesmo material para análise da influência da fração vermelha do RCC para estabilização do solo supracitado, com adição de cal, pois a fração vermelha pode suprir a ausência dos argilominerais necessário para a ocorrência de reações pozolânicas.

Figura 7 - Coleta do solo em local pré-definido



Fonte: Sales et al. (2017)

A escolha de Sales *et al.* (2017) pelo local de coleta do material em questão, se deu devido ao solo ser da formação Guabirotuba, presente na região metropolitana de Curitiba e ser visivelmente sem contaminações, tendo uniformidade na textura e na cor.

3.1.2 Cal

Nesse trabalho foi utilizado a cal hidratada comercial dolomítica classificada como (CH-III) muito comercializada na região de Curitiba-PR. Deve-se então considerar a influência da pureza e da presença do magnésio na reação de álcali-ativação.

3.1.3 Fração Vermelha

A fração vermelha utilizada nos ensaios é proveniente de telhas cerâmicas coletadas em uma olaria na região da cidade de Curitiba-PR. Conforme a olaria, o forno atinge temperatura máxima de 900°C na parte superior, e 800°C na parte inferior.

Para a análise do efeito aglomerante do conjunto fração vermelha cal, decidiu-se adicionar apenas com diâmetros menores que 0,15 mm. Para chegar-se nessa granulometria, primeiro moeu-se o material coletado na olaria com o auxílio do moinho de bolas e por seguinte peneirou-se o material com uma peneira de malha nº 100 padronizada pela ABNT.

3.2 MÉTODOS

A partir deste tópico será exposto uma descrição detalhada dos métodos para a realização dos ensaios, apresentando os equipamentos que foram utilizados e a programação que foi seguida, ressaltando a fundamental importância do papel de validar os resultados alcançados.

3.2.1 Ensaios de Caracterização

Inferindo que o comportamento mecânico da mistura de solo estabilizada com cal e fração vermelha está relacionado diretamente com as propriedades físicas

e químicas de cada material, realizou-se ensaios de caracterização a fim de determinar tais propriedades.

— Ensaio Granulométrico

Sendo um dos principais ensaios de caracterização, esse visa conhecer a distribuição granulométrica do material, ou seja, estabelece em quais frações se concentram determinados diâmetros de partícula dos materiais estudados. Para os resultados de análise granulométrica aproveitou-se os resultados da caracterização já realizada por Sales *et al* (2017).

No caso de solos foram necessárias as seguintes normas para a realização desse ensaio, a NBR 6457 (ABNT, 2016) que especifica o manuseio correto para a preparação da amostra e a NBR 7181 (ABNT, 2016) normatizando o ensaio de granulometria dividindo-o em três etapas: peneiramento grosso, peneiramento fino e por fim sedimentação dos finos, nessa respectiva ordem. Na etapa de ensaio de sedimentação foi utilizado o defloculante hexametáfosfato de sódio, para poder, assim, obter uma melhor desagregação das partículas de solo.

O ensaio de distribuição granulométrica ocorre da seguinte maneira: separa-se 120g do material passado na peneira de 2,0 mm, pesa-se o material em uma balança com resolução de 0,01g, separa-se também 3 amostras de 100g para a determinação da umidade higroscópica (h), conforme a NBR 6457, o material é lavado na peneira de 0,075 mm com água potável a baixa pressão, por fim, coloca-se o material retido na peneira para secar em estufa, à temperatura de 105°C a 110°C, até alcançar uma constância de massa, após isso, utiliza-se no agitador mecânico as peneiras de 1,2, 0,6, 0,42, 0,25, 0,15 e 0,075 mm² e então anotar o valor das massas acumuladas em cada peneira.

O procedimento para o ensaio de sedimentação segue os seguintes passos: separa-se 120g do material passado na peneira de 2,0 mm, pesa-se o material em uma balança com resolução de 0,01g, separa-se também 3 amostras de 100g para a determinação da umidade higroscópica (h), conforme a NBR 6457, transfere-se o material para um bequer com volume de 250 cm³ e unir com o auxílio de proveta, como defloculante, 125 cm³ de solução de hexametáfosfato de sódio com

a concentração de 45,7 g do sal por 1.000 cm³ de solução, agita-se o bequer até que o material se mostre imerso e então deixar em repouso por 12 horas.

Foi então caracterizada a fração vermelha de forma a descrever a distribuição granulométrica deste material após a moagem, o material moído, conforme prescrito pela NBR 7181/2016, que determina o tamanho das partículas grossas por peneiramento e da fração fina por sedimentação.

— Densidade Real dos Grãos

Foram realizados dois tipos de ensaios, a partir da metodologia adotada para solos, para a determinação da densidade real das partículas de solo e seus aditivos. Como é comumente feito para estudos geotécnicos, a massa específica real das partículas para a fração passante na peneira de malha #40 (4,8 mm) é normatizada pela NBR 6508 (ABNT, 1984). O procedimento consiste na adição de uma porção de solo de massa definida, em frascos graduados de volumes conhecidos (picnômetros), posteriormente completa-se o volume desse frasco com água garantindo a percolação desta em todos os poros existentes na amostra. Como o volume do frasco é conhecido e o volume de água facilmente calculado, é possível calcular o volume de solo e conseqüentemente sua densidade. A NBR 6508/1984 determina um número mínimo de 2 amostras a serem ensaiadas, porém para garantir mais assertividade nessa pesquisa foram ensaiadas 5 amostras. Todos os procedimentos foram guiados pela norma NBR 6458 (ABNT, 2016). O ensaio de G_s já foi realizado por Sales *et al.* (2017).

Com o objetivo de estimar com uma maior assertividade o valor de densidade real das partículas do solo, foi realizado o ensaio de picnometria com gás hélio, devido ao menor tamanho das moléculas do gás hélio, o mesmo fornece uma maior facilidade de penetração nos poros do solo do que a água, assim determinando de forma mais precisa o volume do material ensaiado e sua respectiva densidade. Além disso as densidades da cal e da fração vermelha também foram determinadas pelo ensaio de picnometria com gás Hélio.

— Limites de Atterberg

Por meio dos procedimentos descritos pelas normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), foi possível executar os ensaios de limite de liquidez, plasticidade e índice de plasticidade, denominados de limites de Atterberg.

O Limite de Liquidez (LL), definido em percentagem, representa a passagem do estado plástico para o estado líquido da amostra. Para obter o seu valor foi registrada a umidade presente no solo e o número de golpes necessários para ocasionar o fechamento da ranhura atuante no solo na cuba do aparelho casa grande em aproximadamente treze milímetros.

O Limite de Plasticidade (LP), definido em percentagem, representa a quantidade de umidade para produzir trincas ou fissuras em um corpo cilíndrico. Para realizar o ensaio, foi submetido uma pequena parcela da amostra ao movimento de rolagem em cima de uma placa de superfície esmerilhada com a palma da mão, obtendo, dessa forma, um corpo cilíndrico de três milímetros de diâmetro aproximadamente.

O Índice de Plasticidade (IP), também apresentado em porcentagem, é obtido por meio da diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

— Teor de Hidróxido de Cálcio Fixado (Chapelle modificado)

Este ensaio tem por objetivo avaliar a capacidade de um material reagir com o hidróxido de cálcio. Nesse ensaio o material a ser avaliado (fração vermelha e solo) foi misturado individualmente com a cal (CaO) na proporção de 2:1, em massa, à temperatura de 90°C por 16 horas em solução com água destilada sob agitação. O ensaio foi realizado como descrito pela NBR 15895 (ABNT, 2010). O Chapelle foi realizado para verificar a reatividade dos sistemas solo-cal e fração vermelha-cal.

— Difratomia de Raios X (DRX)

Para realizar a análise dos compostos mineralógicos, e principalmente a presença de material amorfo o qual pode sinalizar o caráter pozolânico, da amostra na forma de pó foi utilizado um difratômetro de raios X (Shimatzu Co., modelo XRD-7000, operando a 30 kV, 30mA). Os parâmetros adotados no ensaio foram: ângulo de

5° a 75°, passo de 0,02° e velocidade de varredura de 2°/min. Foi utilizado o software X'Pert Highscore Plus com banco de fichas cristalográficas do ICDD (International Centre for Diffraction Data), para auxiliar na análise dos resultados obtidos.

O ensaio de difratometria de raios X, foi realizado no Centro Multiusuário de Caracterização de Materiais (CMCM) da Universidade tecnológica federal do Paraná. Na análise qualitativa houve auxílio do Laboratório de Análise de Minerais e Rochas (LAMIR) da Universidade Federal do Paraná (UFPR).

— Espectrometria de Fluorescência de Raios X (FRX)

O ensaio de espectrometria de fluorescência de raios X foi usado para analisar a composição química do solo e da fração cerâmica por meio da dispersão de comprimento de onda (WDXRF).

Para o ensaio foi utilizado o equipamento (Panalytical, modelo Axios Max) com tubo de raios X de Ródio que possui a capacidade de determinação de elementos mais pesados comparado ao flúor e em concentração superior a 0,1%.

— Compactação

Foi utilizada a norma NBR 7182 (ABNT, 2016) para embasar os ensaios de compactação. O procedimento fornece a máxima massa específica aparente seca e o teor de umidade ótima do solo, os dados obtidos orientaram a moldagem dos corpos de prova deste trabalho. A energia de compactação utilizada para realizar o ensaio foi a proctor normal, na composição do solo com a fração vermelha em duas proporções diferentes e por fim nas misturas solo-cal-fração vermelha nas composições detalhadas a seguir no planejamento experimental.

O procedimento consistiu em determinada a umidade higroscópica do solo, inicialmente destorroado e passante na peneira n° 40 (4,8 mm), prevendo e separando as porções dos materiais utilizados para a preparação dos cinco pontos que compuseram a curva de compactação, o ensaio ocorreu sem reuso do material. Terminada a fase de organização, teve início a moldagem preenchendo a primeira camada de um terço do cilindro com o material, em seguida foram aplicados 26 golpes de soquete padrão, após a aplicação dos golpes foi feita a escarificação do material

com o auxílio de uma espátula e o procedimento se repete para a segunda e a terceira camada.

Na sequência foi feita a medida da massa do conjunto cilindro mais material úmido compactado. Removeu-se o corpo do molde com a utilização do extrator, partiu-o ao meio, coletou-se três amostras do início, meio e final do volume e, por meio desta, este procedimento foi realizado para os 5 teores de umidade. Após a coleta dos dados, os valores de umidade e peso específico aparente seco foram plotados formando a curva de compactação, da qual é retirada a máxima massa específica aparente seca do material e seu teor de umidade ótima de compactação.

3.2.2 Moldagem e cura dos corpos de prova

Antes da moldagem do corpo de prova foi preparada uma solução de alcali-ativação, na qual foi adicionada água na cal hidratada tipo CH-III e a solução foi deixada em descanso por um período de 16 horas, tempo necessário que ocorra a solubilização do material.

Com o intuito de priorizar as reações pozolânicas do sistema fração vermelha-cal, à cal em pó foi adicionada ao pó de fração vermelha e homogeneizada por completo e, por fim, a mistura supracitada foi adicionada ao solo, no qual foi feita novamente uma homogeneização para posteriormente ser realizada a moldagem dos corpos de prova.

Para uma maior economia de material utilizado no ensaio de resistência à compressão simples, a confecção dos CPS foi realizada com o molde cilíndrico modificado com dimensões de 50 mm de diâmetro por 100 mm de altura de forma a obedecer à relação de 2/1 exigida. Além de economia esse molde traz vantagens como: facilidade de movimentação dos compostos, propiciar maior agilidade e velocidade na execução dos CPs, menor esforço físico do operador, melhor precisão nos corpos de prova em relação a sua massa.

As composições de solo, cal e fração vermelha moldadas foram enumeradas de 1 a 5 sendo que na composição 3 foi feita uma triplicata nos ensaios para estimativa do erro experimental, ao todo foram estudados sete pontos de moldagens referente a cinco composições. Para cada ponto foram moldadas 5 amostras, sendo então ao todo, 35 corpos de prova. Após a moldagem dos corpos de

prova, esses foram embalados em papel filme, identificados e submetidos ao processo de cura em câmara úmida por 28 dias, outros processos de armazenamento foram realizados de acordo com o descrito na NBR 12024 (ABNT, 1992), exceto a indicação de submeter as amostras à imersão em tanque com água por um período de quatro horas antecedentes ao processo de ruptura, mesmo procedimento utilizado por Sales *et al.* (2017).

3.2.3 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC-CBR) e Expansão

O Índice de Suporte Califórnia (ISC) ou em inglês Califórnia Bearing Ratio (CBR) é um dos principais parâmetros para a indústria rodoviária por ser um dos principais métodos de dimensionamento. O ensaio consiste na confecção de amostras compactadas em cinco camadas em cilindro padrão, na qual cada camada recebe a aplicação de 12 golpes com soquete padrão da energia intermediária, após a camada ser golpeada, deve-se escarificá-la antes que a camada posterior possa ser submetida ao processo de compactação. A massa e a altura do soquete devem assumir valores limites de norma.

Os processos de moldagem foram realizados para todas as composições testadas na pesquisa de solo-cal e fração vermelha conforme foi mostrado na Tabela 1. Nas quais a quantidade de água adicionada foi calculada a partir do teor de umidade ótimo tentando atingir o respectivo peso específico máximo proveniente do ensaio de compactação. A energia de compactação utilizada para a moldagem do CBR foi a Proctor normal.

Após a moldagem do ISC, o corpo de prova foi imerso em água com o objetivo de avaliar a expansão do material, o período de ensaio será de noventa e seis horas conforme o realizado por Sales *et al.* (2017). As leituras do ensaio foram 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.

Com o fim do período de imersão, foi realizado o ensaio de penetração em com auxílio da máquina universal de ensaios da marca EMIC, modelo DL 30000N. A partir de dados de tensão e penetração fornecido pelo equipamento, pode-se determinar uma curva de tensão versus deformação, que auxilia no cálculo do CBR.

As normas que padronizam esse ensaio são as ME-049 (DNER, 1994) e a NBR 9895 (ABNT, 1997).

O valor do ISC em porcentagem é a relação entre tensões atuantes no material estudado e na brita padrão para as deformações de 2,54 mm e 5,08 mm.

3.2.4 Ensaio de Resistência à Compressão Simples (RCS)

O ensaio de resistência à compressão simples busca verificar a efetividade da estabilização do solo. Por ser de baixo custo de realização sendo breve e confiável, acaba sendo muito usado este ensaio nos trabalhos.

A norma NBR 12025 (ABNT, 2012) é responsável por descrever os procedimentos para a realização dos ensaios de resistência à compressão simples. O ensaio consiste em submeter os corpos de prova à aplicação de cargas, por meio da utilização de uma máquina universal de ensaio, da marca EMIC, modelo DL 30000N, com célula de carga modelo TRD-29 calibrada, velocidade de deformação de 0,20 mm por segundo, e capacidade de carga de 30.000, até alcançar o rompimento. Os valores obtidos foram anotados.

3.2.5 Delineamento Experimental do Ensaio de RCS

Para uma melhor análise da contribuição da fração vermelha do RCC e da cal no melhoramento do solo, em parâmetros de resistência à compressão simples e ISC, optou-se por fazer um planejamento fatorial completo 2^2 (NETO et al., 1995) com um ponto central e suas duas repetições. Esse procedimento foi adotado para que fosse possível obter uma superfície de resposta dos resultados, possibilitando estimar os parâmetros desejados da mistura em composições intermediárias aos limites de adições estudados, visando validar o modelo matemático.

Com o intuito de obter a superfície de resposta a partir do planejamento fatorial completo 2^2 , 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%. Assim houve a necessidade de realizar 9 ensaios, conforme apresentada na e detalhadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Composições definidas para ensaios de comportamento mecânico

Composição	Substituição do solo por fração vermelha		Adição em relação a massa da mistura
	Solo	Fração vermelha	Cal
1	100	0	3
2	75	25	3
3A	87,5	12,5	6
3B			
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: autores

Com o auxílio da Tabela 1, nota-se que a única composição que foi ensaiada mais de uma vez é a de adição de 6% da cal e 12,5% de fração vermelha, ou seja, a composição 3, nessa composição houve uma duplicata para que fosse possível estimar o erro experimental e por consequência se conseguisse avaliar a significância estatística dos efeitos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos dos ensaios citados anteriormente e feita suas devidas análises e ponderações. Vale ressaltar que foram realizados ensaios tanto no solo natural quanto nas demais composições de solo, cal e fração vermelha.

4.1 ANALISE GRANULOMÉTRICA

Conforme o Quadro 9 (página 45) do ensaio realizado por Sales et al, observa-se que a quantidade passante na peneira de nº 200 é de 76.45%. Com o auxílio da Curva granulométrica (Gráfico 1, página 46), observa-se que a maior parte do material fino do solo é composto por partículas siltosas.

A fração vermelha adicionada ao solo tem toda sua distribuição granulométrica passante na peneira nº 100, o motivo de escolher a adição de uma parcela de material fino em um solo em que já contém uma quantidade considerada de finos, foi a de verificar o poder aglomerante da fração vermelha coma a cal, ou seja, optou-se por se avaliar a influência da fração vermelha na estabilização química do solo com o uso da cal.

4.2 DENSIDADE REAL DOS GRÃOS (PARTÍCULAS DE SOLOS)

A seguir é apresentado os resultados de massa específica real dos grãos para o solo e fração vermelha obtido por meio da picnometria com gás hélio.

4.2.1 Densidade Real dos Grãos do solo

Os resultados obtidos no ensaio de picnometria com gás hélio para o solo é apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 - Determinação da densidade real dos grãos do solo (picnometria com gás Hélio)

Amostra	P1	P2	Vcell	Vref	A	B	Volume (cm ³)	Massa (g)	Densidade (g/cm ³)
1	17,11	7,19	149,43	88,34	1,38	121,94	27,488	75,842	2,759
2	17,39	7,30	149,43	88,34	1,38	121,86	27,567	75,842	2,751
3	16,84	7,07	149,43	88,34	1,38	121,91	27,521	75,842	2,756
4	17,43	7,32	149,43	88,34	1,38	121,87	27,569	75,842	2,751
5	17,05	7,16	149,43	88,34	1,38	121,91	27,526	75,842	2,755
Média									2,755
Desvio padrão									0,003

Fonte: Autores.

Com base nos resultados da Tabela 2 obtém-se o valor para a densidade real dos grãos do solo $G_s = 2,755 \text{ g/cm}^3$, próximo ao valor encontrado por Sales et al. de $G_s = 2,751 \text{ g/cm}^3$ (Quadro 11, página 47), quando foi realizado o ensaio de acordo com a NBR 6508/1984.

4.2.2 Densidade Real das partículas da fração Vermelha

O ensaio de picnometria com gás hélio para a fração vermelha do RCC está apresentado na Tabela 3, sendo ensaiados um total de 5 amostras.

Tabela 3 - Determinação da densidade real dos grãos da fração vermelha (picnometria com gás Hélio)

Amostr a	P1	P2	Vcell	Vref	A	B	Volum e (cm ³)	massa (g)	Densidad e (g/cm ³)
1	17,451	5,546	27,261	11,446	2,147	24,571	2,690	7,245	2,694
2	17,299	5,498	27,261	11,446	2,146	24,569	2,692	7,245	2,692
3	17,141	5,449	27,261	11,446	2,146	24,561	2,700	7,245	2,684
4	17,139	5,448	27,261	11,446	2,146	24,563	2,697	7,245	2,686
5	17,151	5,452	27,261	11,446	2,146	24,562	2,699	7,245	2,685
média									2,688
Desvi o padrã o									0,004

Fonte: Autores.

A densidade real dos grãos para a fração vermelha do RCC apresentou um valor de $2,668 \text{ g/cm}^3$ e desvio padrão amostral de 0,004. Para um material cerâmico moído, Gobbi (2014), Gonçalves et al. (2006) e Murta (2008) encontraram valores que variaram de $2,65$ a $2,72 \text{ g/cm}^3$ - por meio do ensaio gravimétrico com água. (MACIOSKI, 2017). Sendo os valores de densidade para o pó cerâmico moído encontrados igualmente próximos aos apontados pela literatura.

4.3 LIMITES DE ATTERBERG

Nesta seção é apresentada os resultados dos limites de consistência do solo e das composições formadas por solo, fração vermelha e cal.

— Limite de Liquidez (LL)

Para a determinação do limite de liquidez (LL), ensaiou-se 5 amostras de acordo com a NBR 7180 (ABNT, 2016), sendo os dados do resultado exibidos na Tabela 4.

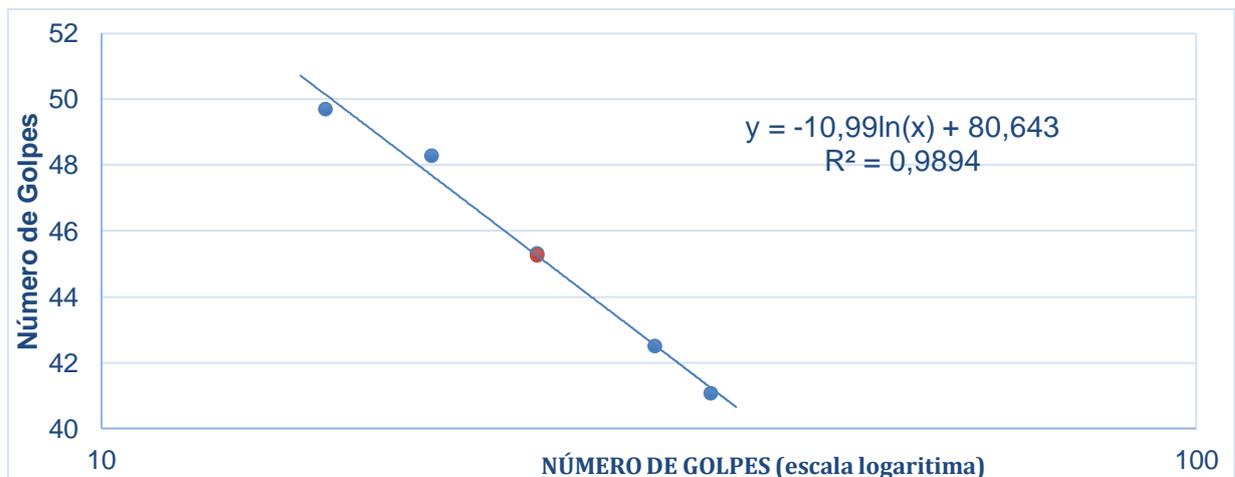
Tabela 4 - Dados do ensaio de limite de liquidez para o solo sem adições

Cód.	Tara (g)	Massa solo úmido (g)	Massa solo Seco (g)	Umidade (%)	Nº golpes
001H	7,76	14,39	12,46	41,064	36
a050	7,5	14,64	12,51	42,515	32
a093	5,9	13,98	11,46	45,324	25
r001	7,79	14,7	12,45	48,283	20
a021	7,32	15,09	12,51	49,711	16

Fonte: Autores.

Com base na Tabela 4, plotou-se um gráfico do teor de umidade em função do número de golpes necessários para fechar a ranhura e a seguir adicionou-se uma linha de tendência logarítmica conforme o Gráfico 2.

Gráfico 2 - Resultado do Limite de Liquidez



Fonte: Autores.

Do Gráfico 2 é importante salientar o valor do $R^2 = 0,9894$ indicando uma boa assertividade no ensaio, este valor implica que caso o ensaio fosse refeito existe

uma probabilidade de mais de 98% de ser representado pela função de ajuste. O valor de LL= 45,28%.

O efeito da cal e da fração vermelha no limite de liquidez está apresentado na Tabela 5.

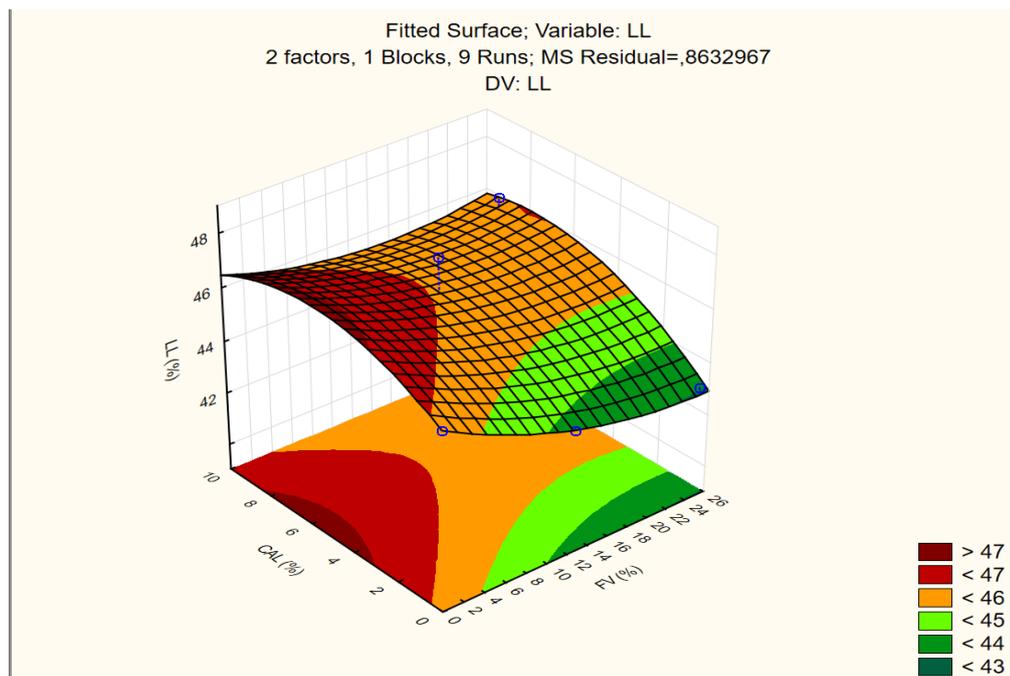
Tabela 5 - Dados do ensaio de limite de liquidez para o solo sem adições

Composição	LLmédio (%)	LLadotado (%)	R ²	Equação logarítmica
100% SN	45,28	45	0,9894	$y = -10,99x + 80,643$
87,5% SN 12,5% FV 0% CAL	43,66	44	0,9746	$y = -6,42\ln(x) + 64,46$
87,5% SN 12,5% FV 3% CAL	44,67	45	0,9923	$y = -6,841\ln(x) + 66,73$
87,5% SN 12,5% FV 6% CAL	47,14	47	0,9939	$y = -8,265\ln(x) + 73,742$
87,5% SN 12,5% FV 9% CAL	45,10	45	0,9816	$y = -8,01\ln(x) + 70,886$
75% SN 25% FV 0% CAL	43,22	43	0,9618	$y = -13,33\ln(x) + 81,131$
75% SN 25% FV 3% CAL	44,57	45	0,9807	$y = -6,654\ln(x) + 64,996$
75% SN 25% FV 6% CAL	45,41	45	0,9953	$y = -8,019\ln(x) + 71,224$
75% SN 25% FV 9% CAL	46,23	46	0,9915	$y = -5,455\ln(x) + 63,795$

Fonte: Autores.

A partir dos resultados exibidos, traçou-se uma superfície de respostas para os resultados (Gráfico 3). De forma a facilitar a análise, concluiu-se que ao aumentar o teor de fração vermelha há também um sutil incremento no limite de liquidez, o que pode ser resultado do aumento na quantidade de finos do solo. Em contrapartida, ao adicionar-se cal na mistura, ocorre um pequeno decréscimo no valor de LL.

Gráfico 3 - Superfície de Respostas LL (R²=0,784)



Fonte: Autores.

A superfície proposta para os resultados de LL pelo software *Statistica* tem função de duas variáveis apresentadas na Equação 1.

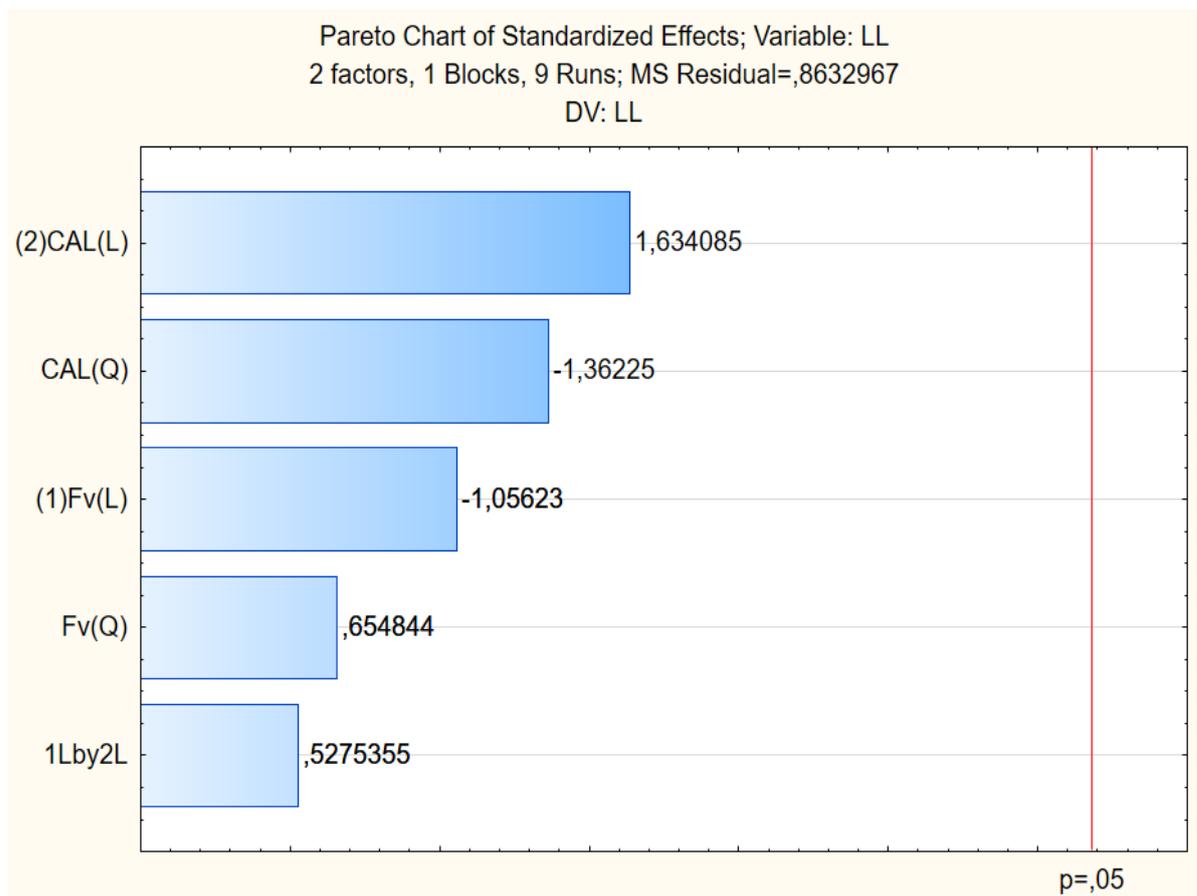
$$Z = 45,73 - 0,217 * X + 0,0042 * X^2 + 0,570 * Y - 0,497 * Y^2 + 0,0083 * X * Y \quad (1)$$

X = Quantidade de fração vermelha (%)

Y = Quantidade de Cal (%)

Ao analisar a curva de Pareto das variáveis do modelo (L = linear e Q = quadrática) apresentado no Gráfico 4, fornecido pelo software *Statistica*, pode-se avaliar a relevância de cada parâmetro a ser estudado na influência do limite de liquidez.

Gráfico 4 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 1



Fonte: Autores.

Ao observar o gráfico de Pareto nota-se que nem a parcela quadrática e nem a parcela linear do modelo matemático tem relevância estatística nos resultados obtidos, ou seja, estatisticamente a fração vermelha e a cal não tem influência significativa no comportamento do limite de liquidez.

— Limite de Plasticidade (LP)

Os dados do ensaio de determinação de LP do solo natural estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Ensaio de limite de plasticidade solo natural

Cód.	M1	M2	M3	Umidade (%)
0027h	7,57	8,34	8,14	35,1
a023	7,75	9,36	8,92	37,6
a098	7,62	9,47	8,97	37,0
a081	7,52	8,57	8,29	36,4
Média				36,5
Desvio Padrão				1,1

Fonte: Autores.

Analisando a Tabela 6, percebe-se que o solo natural (SN) tem um valor de LP = 36,52 % sendo adotado o valor de 37% orientado por norma. A evolução do limite de plasticidade com a adição de fração vermelha e cal é demonstrada na Tabela 7.

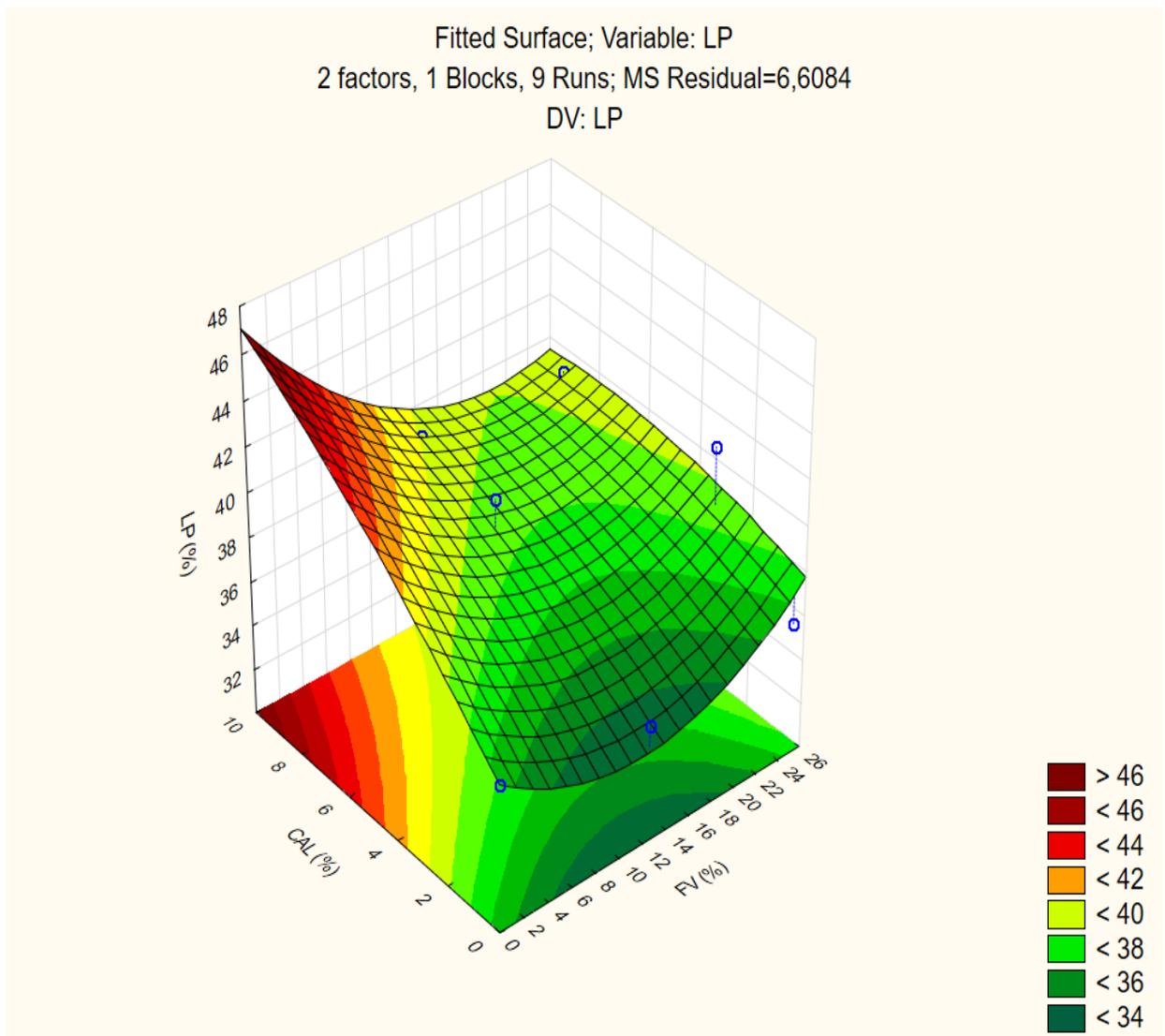
Tabela 7 - Evolução do LP com a adição de cal e fração vermelha

Composição	LP médio (%)	LP adotado (%)	Desvio padrão	Espaço amostral
100% SN	36,52	37,00	1,08	4
87,5% SN 12,5% FV 0% CAL	35,19	35,00	0,99	4
87,5% SN 12,5% FV 3% CAL	34,10	34,00	1,74	3
87,5% SN 12,5% FV 6% CAL	39,71	40,00	0,70	4
87,5% SN 12,5% FV 9% CAL	39,93	40,00	0,99	4
75% SN 25% FV 0% CAL	35,91	36,00	1,74	3
75% SN 25% FV 3% CAL	41,14	41,00	0,99	3
75% SN 25% FV 6% CAL	37,68	37,00	0,92	4
75% SN 25% FV 9% CAL	39,50	39,00	1,42	4

Fonte: Autores.

Os dados da Tabela 7 serviram de entrada para plotar o Gráfico 5, no qual é apresentada a superfície de respostas do limite de plasticidade

Gráfico 5 - Superfície de respostas LP (R²=0,59)



Fonte: Autores.

Ao analisar a superfície de respostas para o limite de plasticidade, nota-se um leve aumento do valor de LP conforme tem-se um aumento na quantidade de cal na mistura. O comportamento do LP com o aumento da fração vermelha tem caráter parabólico, sendo que os valores oscilaram entre 33 e 42% e a função da superfície de respostas para o limite de plasticidade está Descrita na Equação 2.

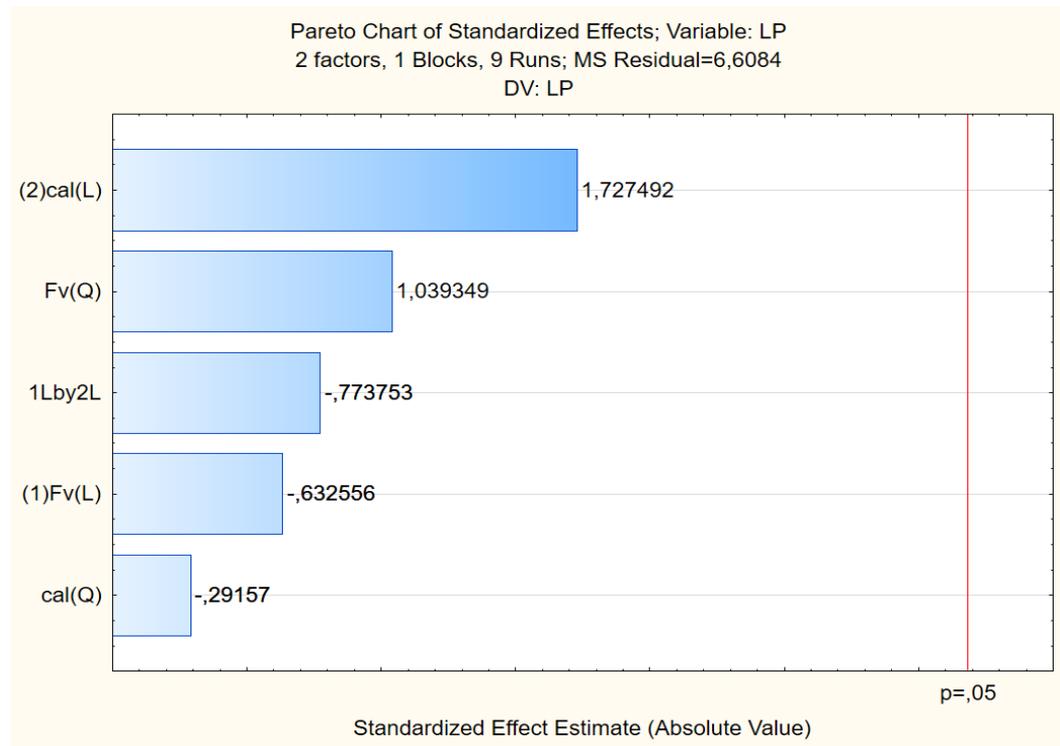
$$Z = 36,52 - 0,433 * X + 0,01839 * X^2 + 1,3463 - 0,03355 * Y^2 \quad (2)$$

X = Quantidade de fração vermelha (%)

Y = Quantidade de Cal (%)

A relevância estatística dos parâmetros avaliados é analisada com o auxílio da curva de Pareto fornecida pelo software *Statistica* (Gráfico 6).

Gráfico 6 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 2



Fonte: Autores.

Analogamente ao caso do limite de liquidez, as parcelas quadráticas e lineares não têm relevância nos resultados obtidos, logo, afirma-se que a influência da fração vermelha e da cal é insignificante do ponto de vista estatístico.

— Índice de Plasticidade (IP)

O índice de plasticidade é calculado pela diferença dos valores de LL e LP calculado conforme Tabela 8.

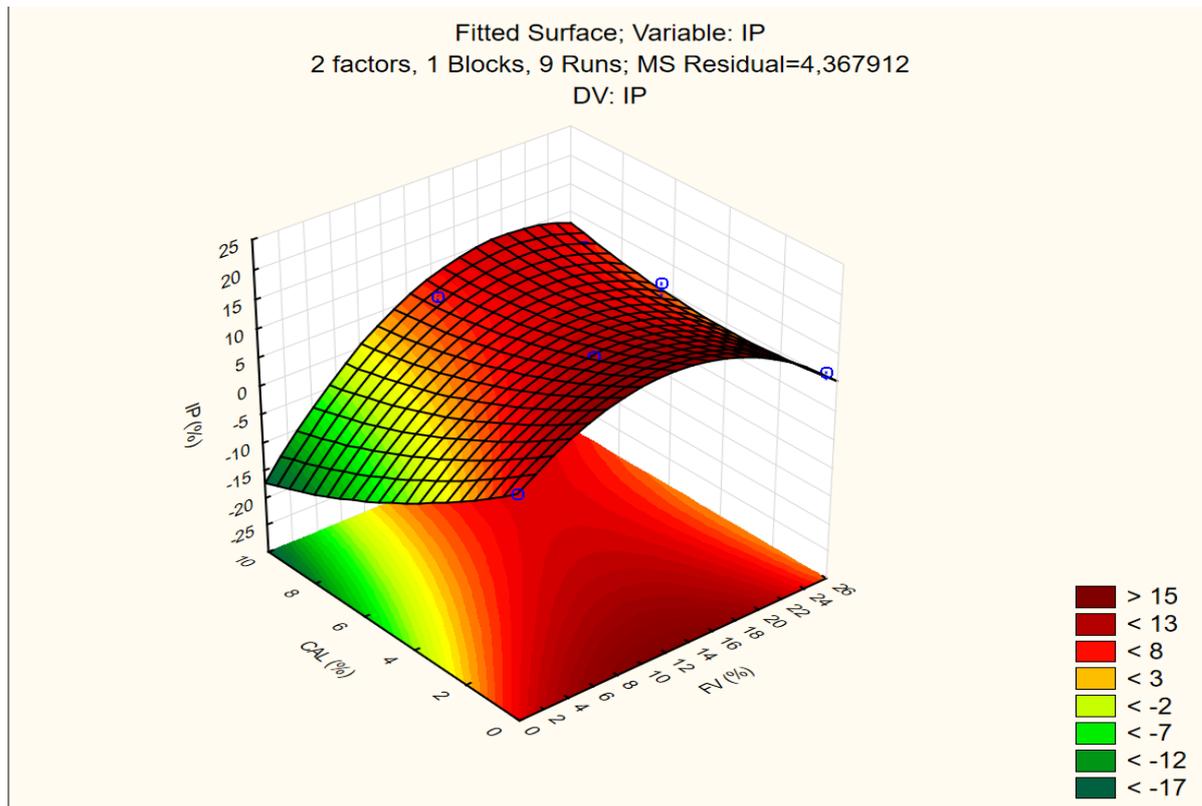
Tabela 8 - Evolução do IP com a adição de cal e fração vermelha

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: Autores.

A partir dos dados da Tabela 8, conhecendo a evolução do IP com os parâmetros estudados, plotou-se a superfície de respostas para o índice de plasticidade dos teores de fração vermelha e de cal em relação a massa seca de toda a mistura.

Gráfico 7 - Superfície de resultados IP (R²= 0,589)



Fonte: Autores.

Ao analisar o Gráfico 7, percebe-se a diminuição do IP com a adição da cal, e apesar de ser sutil o decréscimo, era esperado, devido à granulometria fina do solo em questão que, em contato com a cal, cria o ambiente propício às reações primárias de aglomeração e floculação. Em contrapartida, a fração vermelha na cal tende a elevar o valor do índice de plasticidade, tendo em vista que tem material fino e não reagente com o solo sendo adicionado na mistura.

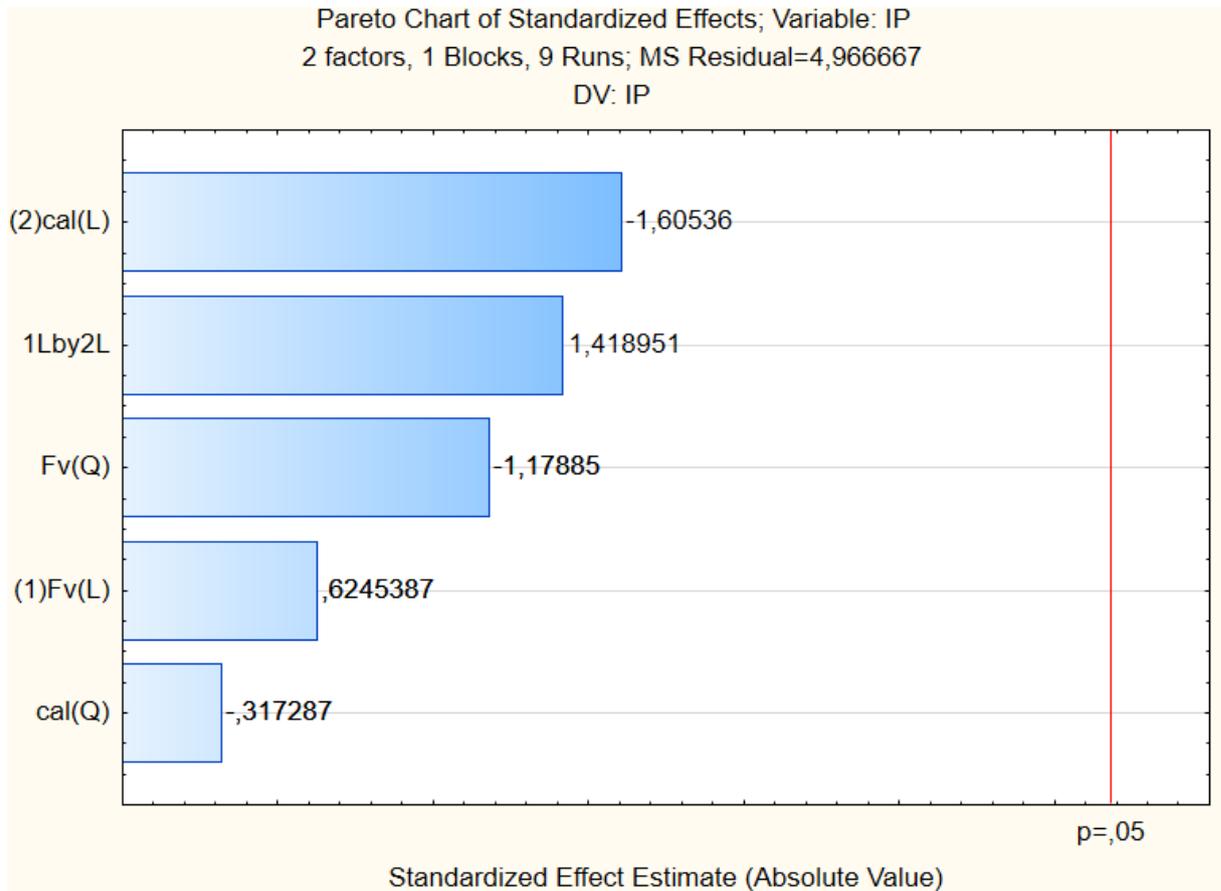
$$Z = 36,52 - 0,433 * X + 0,01839 * X^2 + 1,3463 - 0,03355 * Y^2 \quad (3)$$

X = Quantidade de fração vermelha (%)

Y = Quantidade de Cal (%)

Pode-se analisar a relevância destes parâmetros no índice de plasticidade do solo no Gráfico 8.

Gráfico 8 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 3



Fonte: Autores.

A sutil diferença no resultado do índice de plasticidade pode ser atribuída a baixa relevância dos parâmetros avaliados na mistura, tendo em vista que a curva de Pareto (Gráfico 8) não demonstra nenhuma significância estatística das parcelas quadráticas e lineares do modelo matemático nos resultados obtidos. Logo, a fração vermelha e a cal não influenciam de forma significativa na evolução do índice de plasticidade.

É importante salientar que o valor de IP para o solo natural é de 9%, sendo classificado por VARGAS (1978) com plasticidade média, atribuindo assim a baixa relevância estatística dos parâmetros avaliados, principalmente da cal, ao baixo IP já que a variação do IP com adição da cal é proporcional ao índice de plasticidade dos.

4.4 TEOR DE HIDRÓXIDO DE CÁLCIO FIXADO (CHAPELLE MODIFICADO)

O ensaio para medir o teor de hidróxido de cálcio fixado tem o objetivo de testar a reatividade de um material com a cal utilizada. Os dados do ensaio de Chappelle modificado para o solo estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Ensaio Chapelle modificado do solo

Amostra	MAmostra (g)	mCaO (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	Vmédio (ml)	ICa(OH) ₂ (mg/g)
solo	0,5006	1,0003	3,4	3,4	3,40	624,1970
Branco	-	1,0005	11,5	11,6	11,55	-

Fonte: Autores

A Tabela 9 mostra como resultado uma quantidade de 624,20 mg de Ca(OH)₂/g de solo. As adições podem ser consideradas pozolanas a serem incorporadas à composição do cimento Portland quando o consumo de CaO é superior a 330 mg CaO/g de pozolâna. Por estequiometria, este valor corresponde a 436 mg Ca(OH)₂/g de pozolana (GOBBI, 2014). Os dados do ensaio chapelle modificado da fração vermelha estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10- Ensaio Chapelle modificado da fração vermelha

Amostra	MAmostra (g)	mCaO (g)	V1 (ml)	V2 (ml)	Vmédio (ml)	ICa(OH) ₂ (mg/g)
solo	0,4778	1,0001	3,2	3,2	3,20	641,9464
Branco	-	1,0003	11,3	11,1	11,20	-

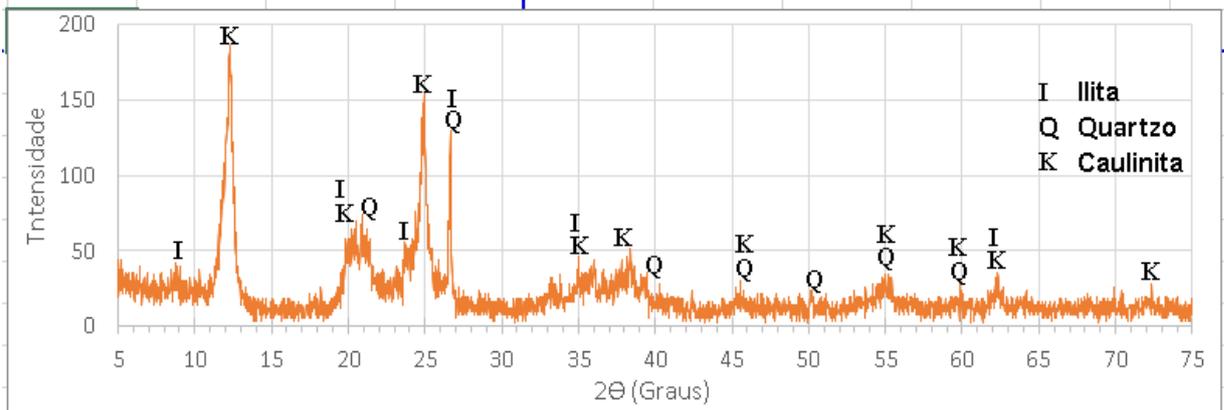
Fonte: Autores

Analisando a Tabela 10 notou-se que a quantidade de 641,95 mg de Ca(OH)₂/g de fração vermelha de RCC. Com isso, conclui-se que ambos os materiais têm fixação de Ca(OH)₂ que atende aos limites de adições pozolânicas, sendo a fração vermelha sutilmente mais reativa que o solo.

4.5 ENSAIO DIFRATOMETRIA DE RAIOS X

Realizou-se o ensaio DRX (Gráfico 9) para conseguir identificar os minerais presentes no solo em questão.

Gráfico 9 - Difratograma de Raios X do solo



Fonte: Autores.

Com base no Gráfico 9 verifica-se a presença de ilita argilomineral 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. As formulas estruturais e os códigos de identificação das fichas cristalográfica utilizadas para a análise qualitativa do ensaio DRX estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – D atos dos minerais encontrados

Mineral	fórmula estrutural	código ICDD
ILITA	$(OH)_4K_y(Al_4Fe_4Mg_4Mg_6)Si_{8-y}Al_yO_{20}$	01-087-2096
CAULINITA	$Al_2Si_2O_5(OH)_4$	00-029-1488
QUARTZO	SiO_2	00-026-0911

Fonte: Autores

4.6 ESPECTOMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X (FRX)

O solo apresentou composição química conforme valores apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 - Teores de óxidos ensaio FRX do solo da formação Guabirota

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: Autores.

Ao analisar a Tabela 12, nota-se que os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ somam 92,97%, superando o valor de 70% mínimos estipulados para pozolanas naturais e artificiais de acordo com a NBR 12653 (ABNT, 2014). Foi constatada também a presença de baixa quantidade de álcalis na forma de K₂O tendo presença de 1,04%, a qual também é inferior ao limite máximo permitido de 1,5% aceito pela norma. Entretanto, o teor de SO₃ foi de 5,34% acima do limite máximo de 4%. Desta forma, de acordo com os teores apresentados na Tabela 12, devido ao elevado teor do tri-óxido de enxofre, superando o valor limite por definido norma, o solo em questão não tem os requisitos químicos necessários para ser classificado como pozolânico.

A composição química da fração vermelha do RCC está apresentada na Tabela 13.

Tabela 13 - Teores de óxidos ensaio FRX da fração vermelha do resíduo de construção civil

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: Autores.

Analogamente ao caso do solo, observando a Tabela 13 nota-se que os óxidos SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃ soma 92,13%, superando o valor de 70% mínimos estipulados para pozolanas naturais e artificiais. Entretanto, o teor de SO₃ foi de 5,71% acima do limite máximo de 4%, assim, não atendendo os requisitos químicos mínimos para caracterizar a fração vermelha como materiais pozolânicos.

4.7 COMPACTAÇÃO

O ensaio de compactação foi realizado de acordo com a NBR 7182 (ABNT, 2016) e, os dados estão apresentados na Tabela 14, na qual $\rho_{úmida}$, W e ρ_d correspondem à massa específica úmida, umidade e massa específica aparente seco, respectivamente.

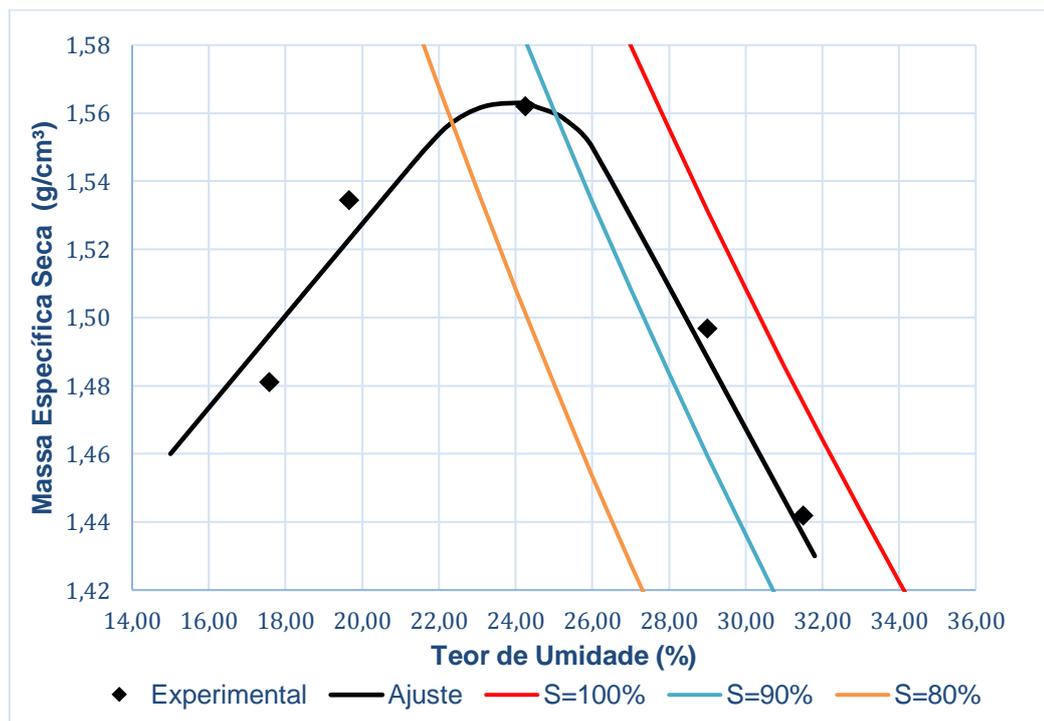
Tabela 14 - Dados referentes às amostras ensaiadas

C P	Massa de solo (g)	Volume do molde (cm ³)	$\rho_{úmida}$ (g/cm ³)	W (%)	ρ_d (g/cm ³)
1	1745	1002,17	1,741	17,57 1	1,481
2	1840	1002,17	1,836	19,65 8	1,534
3	1945	1002,17	1,941	24,24 6	1,562
4	1935	1002,17	1,931	28,99 5	1,497
5	1900	1002,17	1,896	31,49 4	1,442

Fonte: Autores

Com os dados da Tabela 14 plotou-se o Gráfico 10 no qual pode ser visualizada a curva de compactação para energia proctor normal. Neste gráfico são apresentadas também as curvas de saturação $S=80\%$, $S=90\%$ e $S=100\%$

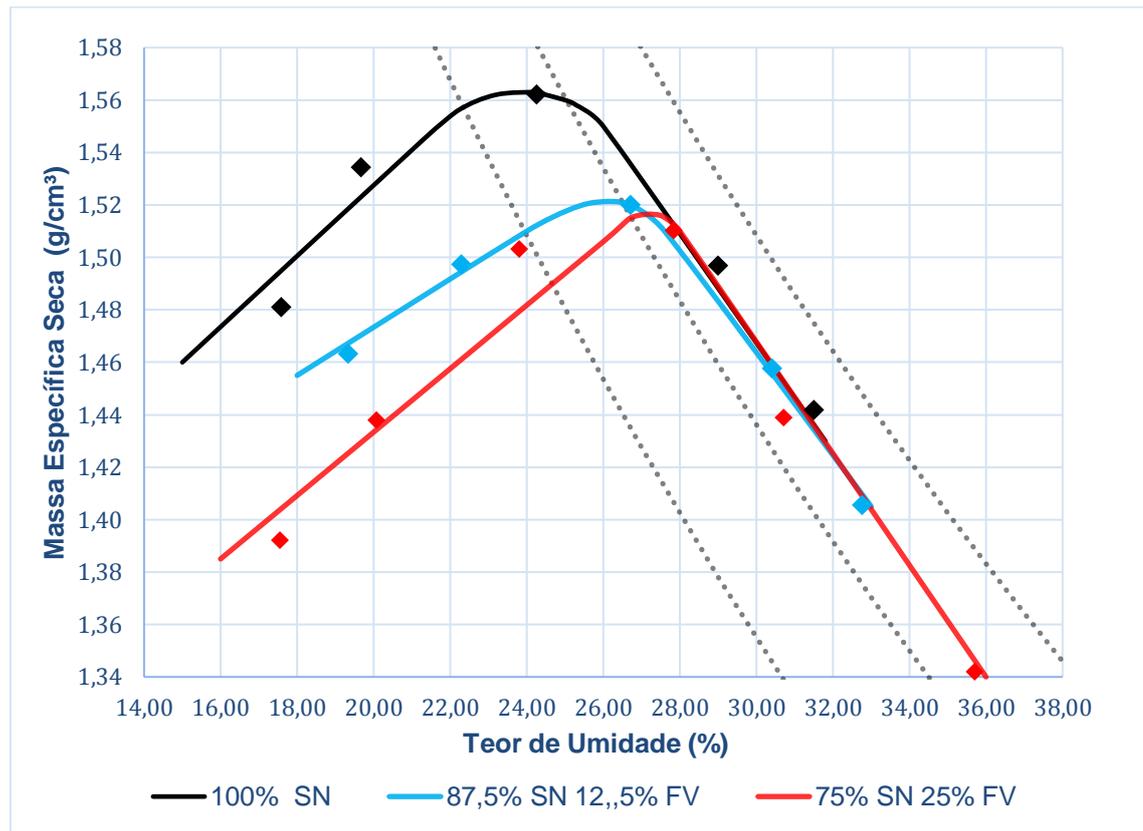
Gráfico 10 - Curva de compactação do solo sem adições



Fonte: Autores

No Gráfico 10 observa-se que o teor de umidade ótima é de 24,3% para uma massa específica seca máxima de 1,56 g/cm³. A literatura aponta que para solos argilosos o teor de umidade ótimo varia entre 18% e 25%. O efeito da fração vermelha na compactação do solo pode ser avaliado no Gráfico 11.

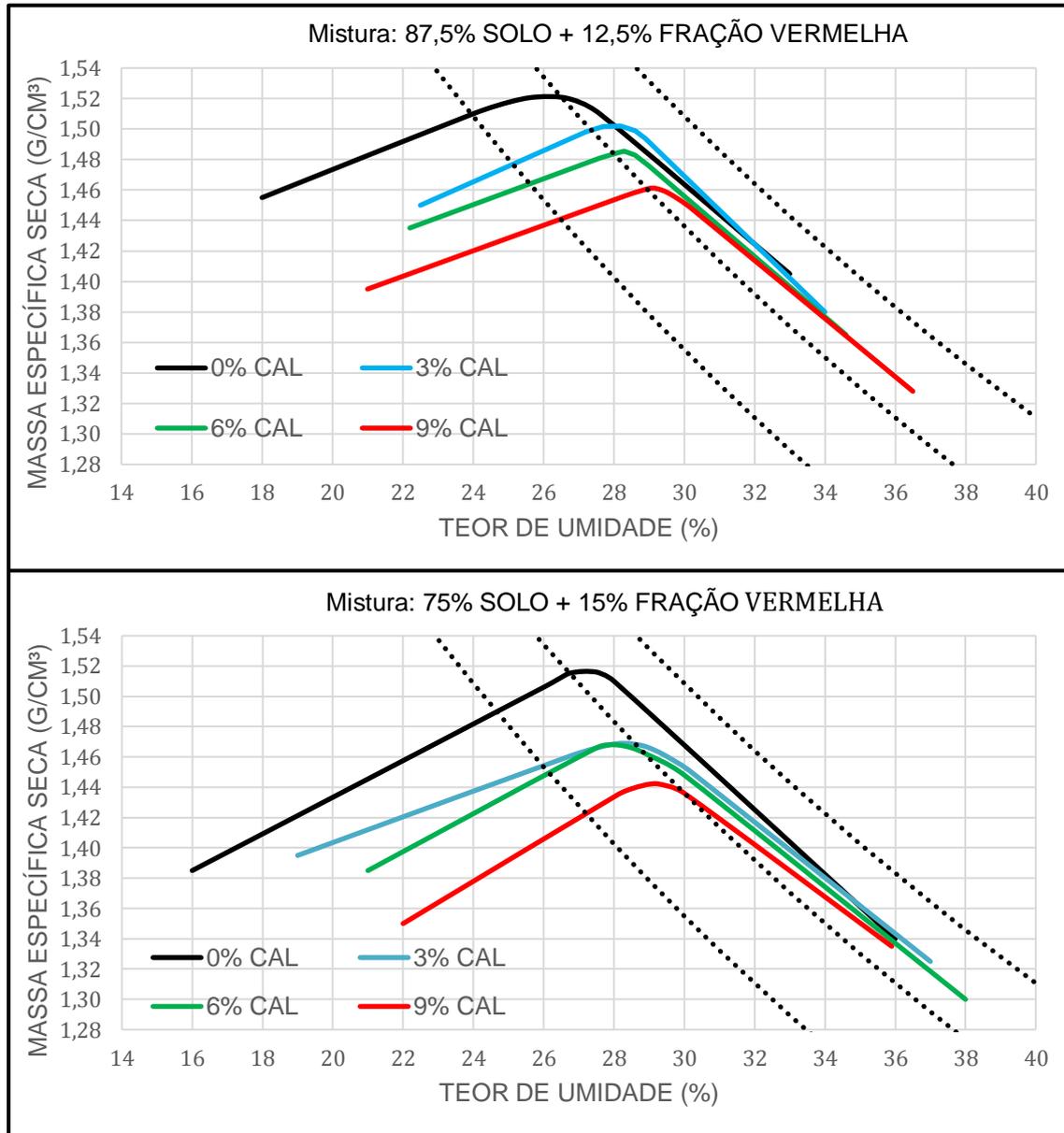
Gráfico 11 - Influencia da fração vermelha ao ser adicionada no solo



Fonte: Autores

Observando o Gráfico 11 nota-se que ao adicionar-se fração vermelha ao solo há uma alteração significativa no teor de umidade ótima e na máxima massa específica seca. O teor de umidade ótima é deslocado para direita devido ao aumento na quantidade de finos na mistura e pela elevada absorção de água das partículas. Após observado o efeito isolado da fração vermelho no solo, adicionou-se cal na mistura e realizou-se novamente o ensaio de compactação gerando o Gráfico 12.

Gráfico 12 - Influência da cal ao ser adicionada nas diferentes misturas de solo-fração vermelha



Fonte: Autores

De forma análoga a adição da fração vermelha ao solo, quando a cal é adicionada a ambas as misturas de solo com fração vermelha, causa um deslocamento das curvas de compactação para a direita no eixo das abscissas (teor de umidade) e a diminuição dos picos correspondentes à máxima massa específica aparente seca. Deve-se ressaltar que a diminuição da máxima massa específica seca é mais acentuada quando a porção de fração vermelha corresponde a 25% da mistura. Rocha (2018) atribui isso às reações ocorridas entre o solo e a cal, cujas trocas catiônicas promovem a consequente aglomeração e floculação das partículas dos coloides de argila a qual constitui a fração predominante da granulometria do solo

estudado sendo também material predominante da fração vermelha do RCC. A troca catiônica, devido à adição da cal, resulta em estabilização da camada de água intersticial e em redução considerável no tamanho desta. Quando as partículas de argila se aproximam mais uma das outras ocorre o fenômeno da floculação, com partículas ligando-se no formato borda-face. Isto ocorre devido à redução da dupla camada difusa (Figura 4, página 35) e, conseqüentemente, do potencial eletroquímico ou potencial de Stern (ROCHA, 2018).

4.8 ENSAIO DE ÍNDICE DE SUPORTE CALIFÓRNIA E EXPANSÃO DO SOLO

O ensaio de expansão e compactação do solo foram realizados em um período de 96 horas e ambos foram realizados de acordo com a NBR 9898 (ABNT, 2016)

4.8.1 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia (ISC)

De acordo com o Quadro 12, ao analisar os dados de Sales et al. (2017), observa-se que a cal contribui de forma positiva para a capacidade de suporte do solo. Os valores de ISC para as composições de fração vermelha e cal estão apresentados na Tabela 15.

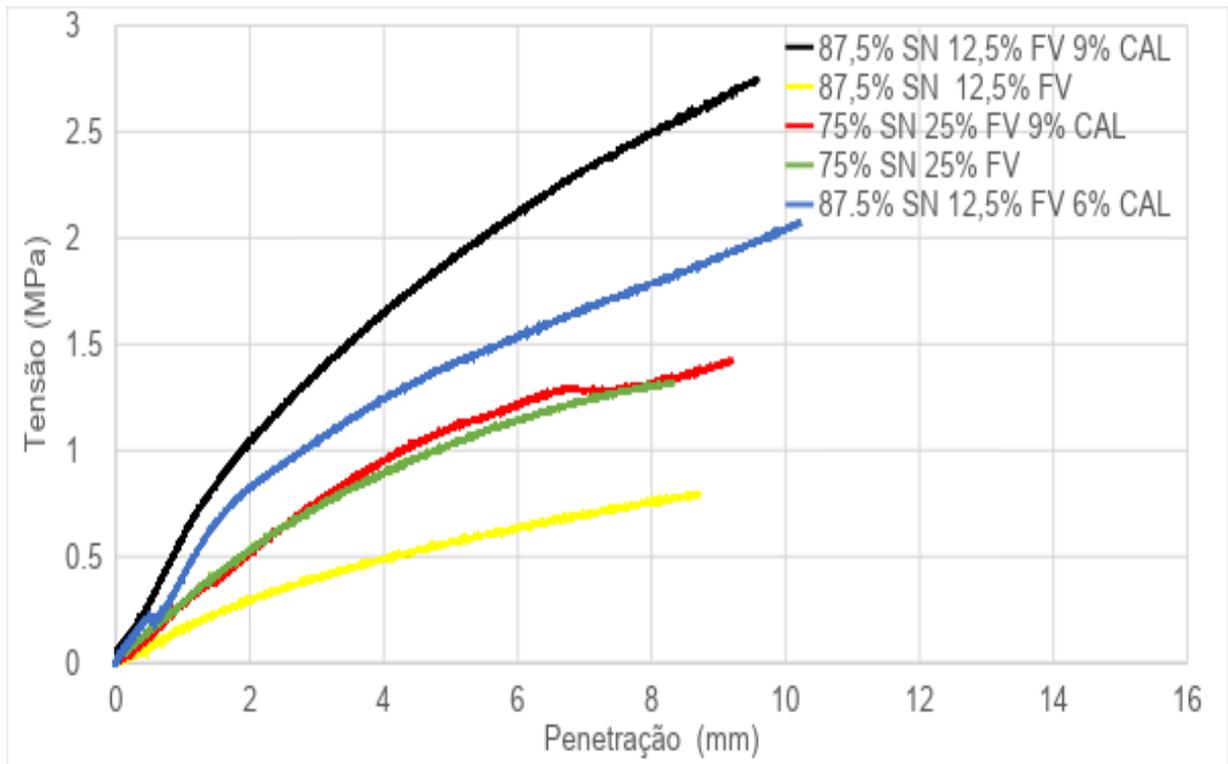
Tabela 15 - Efeito da fração vermelha e cal nos valores de ISC

Composições	W(%)	ρ_d (g/cm ³)	ISC1 (%)	ISC2 (%)	ISCadotado (%)
87,5% SN 12,5% FV	26	1,45	5,36	5,6	5,6
75% SN 25% FV	28,33	1,51	9,75	10,14	10,14
87,5% SN 12,5% FV, 6% CAL	25,62	1,52	14,49	14,41	14,49
87,5% SN 12,5%, 9% CAL	28,46	1,4	17,83	18,65	18,65
75% SN 25% FV, 9% CAL	32,93	1,41	10,29	11,11	11,11

Fonte: Autores.

Ao analisar a Tabela 15, nota-se facilmente que a composição central com a substituição de 12,5% de solo por fração vermelha de RCC e a adição de 9% de cal resulta em um ISC com valor de 18,65% havendo um incremento na capacidade de suporte do solo de mais de 70% em relação a utilização apenas da cal. As curvas de tensão x penetração do ensaio de ISC para a fração vermelha são apresentadas no Gráfico 13.

Gráfico 13 - Curvas Tensão versus Penetração para variadas composições de fração vermelha solo e cal



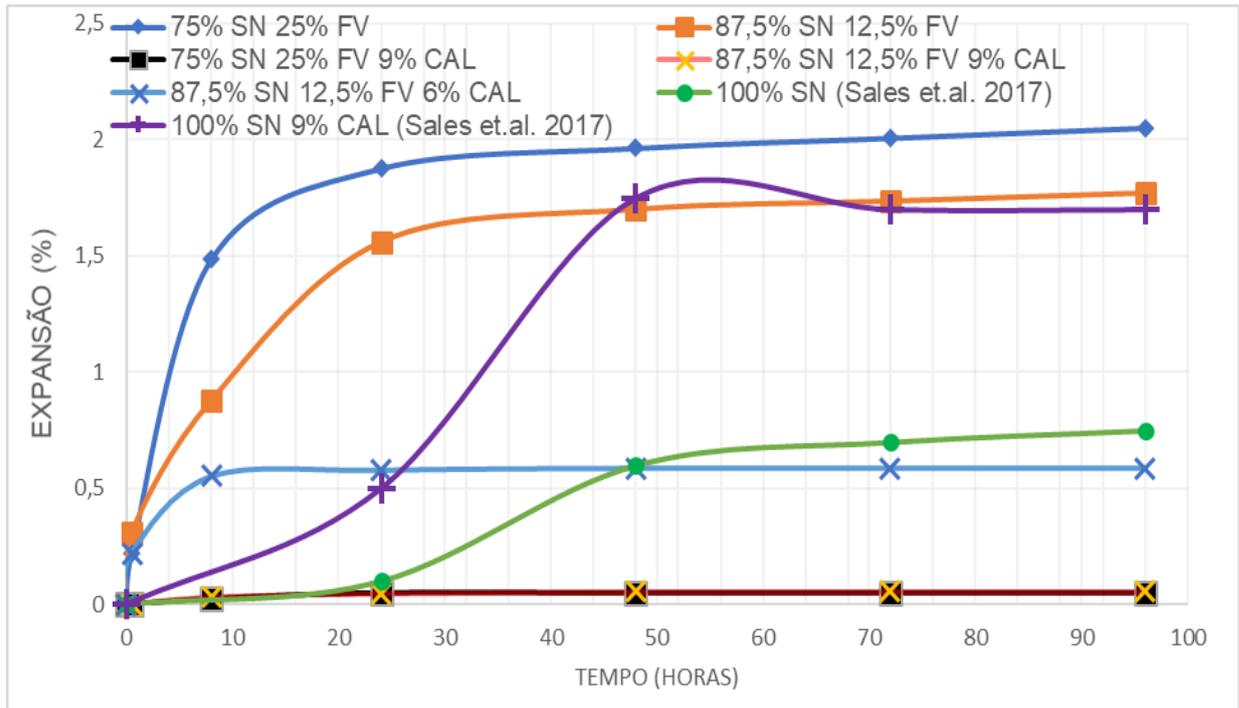
Fonte: Autores.

O Gráfico 13 evidencia o ganho de capacidade do suporte quando se substitui 12,5% do solo por fração vermelha. Entretanto, ressalta-se que não há incrementos significativos quando se substituir a parcela de 25% do solo por fração vermelha. Isso pode ser explicado pela diminuição da máxima massa específica seca quando se adiciona cal na mistura e, como o ISC é um ensaio curta duração (96 horas), pode ainda não ter ocorrido as reações necessárias para haver uma compensação da resistência devido à perda de densidade do material. É possível que ao realizar ensaios de ISC com maiores tempos de cura esses valores sejam mais acentuados. Avaliando o ISC de estabilização de solo-cal ao longo do tempo.

4.8.2 Ensaio de Expansão

O ensaio de expansão ocorreu com a imersão do corpo de prova em água durante um período de 96 horas. As composições ensaiadas estão apresentadas no Gráfico 14 e os dados pontuais que serviram de base para plotar o gráfico estão no apêndice A.

Gráfico 14 - Expansão do solo com a adição de fração vermelha e cal



Fonte: Autores.

Analisando o Gráfico 14 nota-se que a expansão do solo tem ordem de 0,75% e, a explicação para a baixa expansão do material pode ser a presença do mineral ilita, sendo considerada uma argila pouco expansiva e também, a presença de caulinita, considerada um argilomineral não expansivo. Segundo Cristelo (2010), as ilitas são menos expansivas pela ausência de expansibilidade intracristalina devido à presença do potássio que possibilita uma forte atração eletrostática capaz de impedir a entrada das moléculas de água na estrutura cristalina. Observa-se que, ao adicionar a cal ao solo ocorreu um aumento na expansão, isso era esperado devido à baixa expansibilidade dos minerais, ressaltando também que a ilita e caulinita têm reação lenta com a cal. A fração vermelha também tem um efeito negativo ao ser adicionada ao solo devido ao aumento da parcela argilosa calcinada no mesmo, chegando a ultrapassar 2% a expansão do solo. Quando se tem uma mistura de solo fração vermelha e cal simultaneamente a expansão praticamente se anula sendo reduzida a 0,05%, acredita-se que seja a natureza dos argilominerais presentes na fração vermelha que aceleram as reações de floculação e de aglomeração deslocando suavemente a granulometria do solo para em direção a fração grosseira. Os valores máximos de expansão do solo são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Dados referentes às amostras ensaiadas

Composição	Máxima expansão (%)
100% SN	0,74
100% SN 9% CAL	1,75
87,5% SN 12,5% SN	1,8
75% SN 25% FV	2,05
87,5% SN 12,5% FV 6% CAL	0,58
87,5% SN 12,5% FV 9% CAL	0,05
75% SN 25% FV 9% CAL	0,05

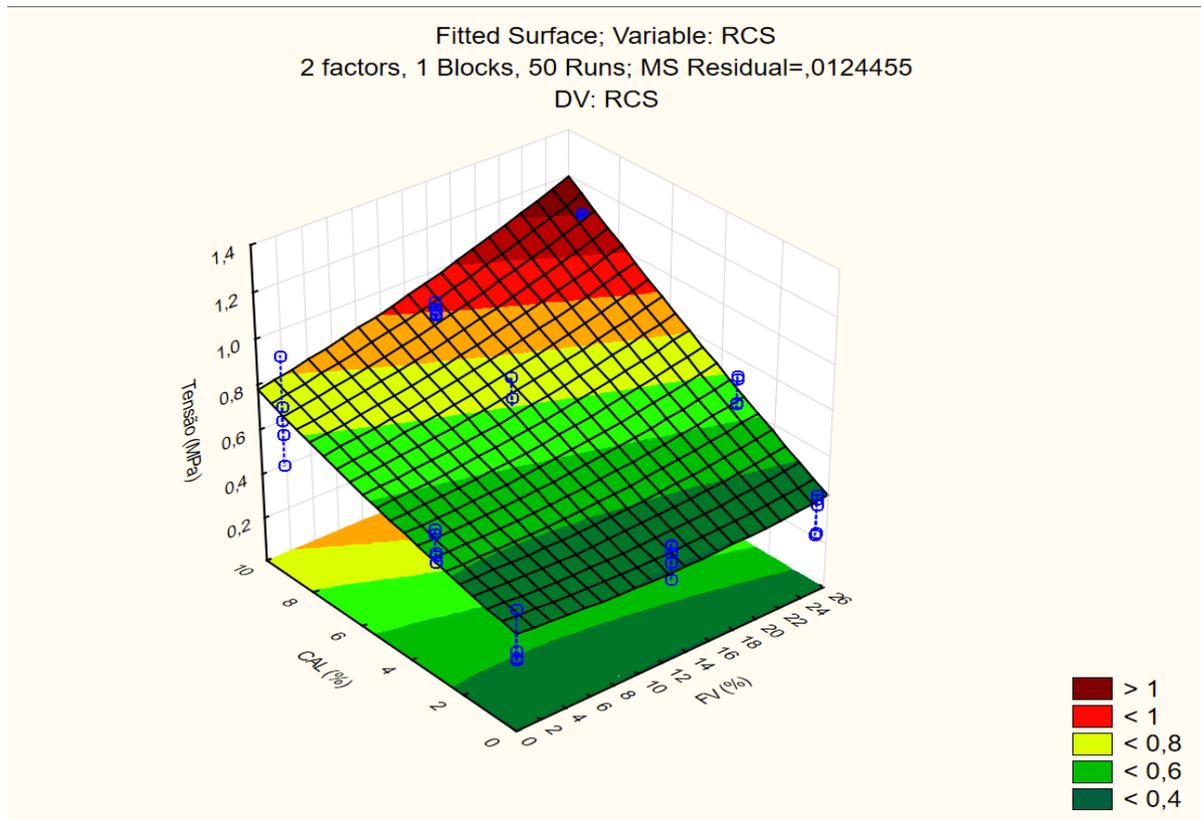
Fonte: Autores.

Segundo Cristelo (2001), quanto mais plástico e mais expansivo o solo for mais significativo são as alterações provocadas pela adição da cal. Analogamente a cal não provoca melhoria de solos com reduzidas plasticidade e expansão, isso pode explicar a melhoria acentuada na expansão quando se adiciona a cal nas misturas solo e fração vermelha. Essa diminuição da expansão pode ser utilizada como um indicador de que quando é adicionada fração vermelha no solo é fornecido mais matérias primas para as reações realizadas com a cal.

4.9 ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO SIMPLES

Foram ensaiados 50 corpos de prova de acordo com as composições citadas na Tabela 1 e, com o auxílio do software *Statistica* plotou-se a superfície de respostas com os resultados para o ensaio de resistência à compressão simples (Gráfico 15) e todos os valores utilizados estão apresentados no apêndice B.

Gráfico 15 - Superfície de resposta para os resultados do ensaio de RCS ($R^2=0,80$)



Fonte: Autores.

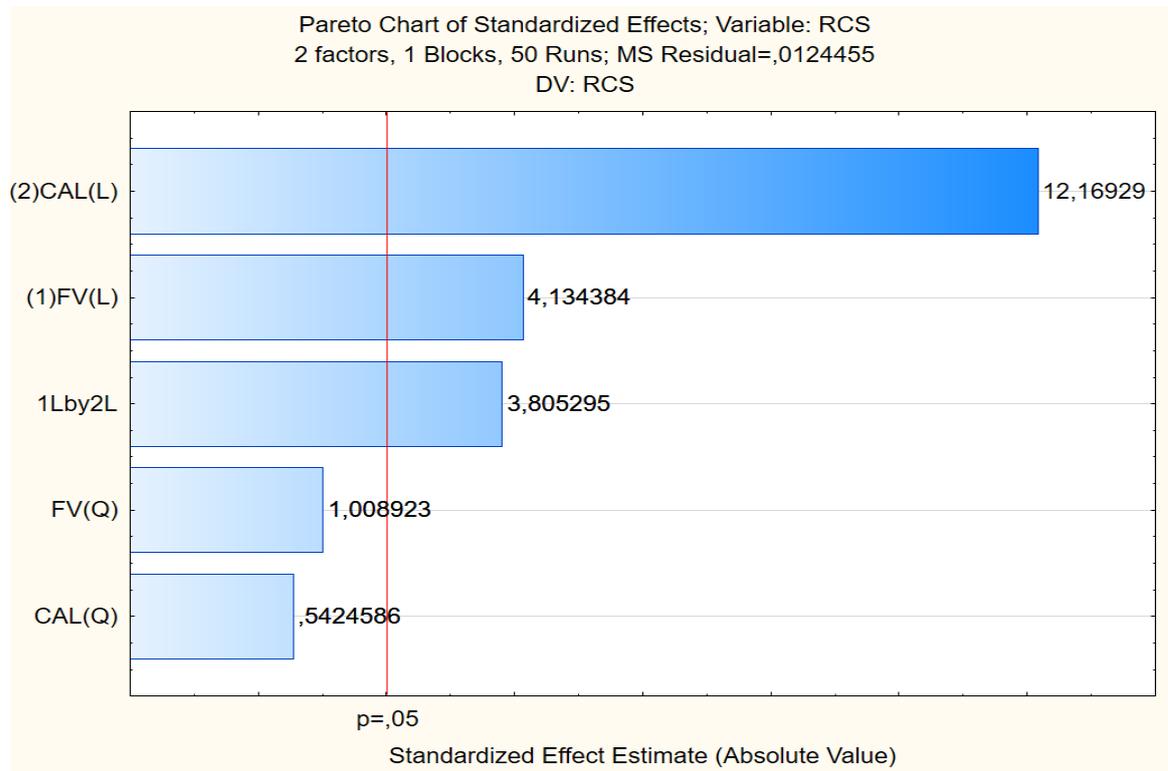
Analisando o Gráfico 15, observa-se que a resistência à compressão simples aumenta à medida que maiores quantidades de cal são adicionadas ao solo. A fração vermelha contribui de forma mais significativa para a resistência quando os teores de cal são mais elevados. O motivo desse comportamento pode ser explicado pelo aumento da resistência quando houver cal suficiente para atender a demanda necessária para as reações do solo com a fração vermelha. A equação 4 de duas variáveis representa a superfície de resposta do ensaio de resistência à compressão simples.

$$Z = 0,435 - 0,006 * x + 0,0002 * x^2 + 0,0244 * y + 0,00098 * y^2 + 0,00166 * x * y \quad (4)$$

X = Quantidade de fração vermelha (%)

Y = Quantidade de Cal (%)

A relevância dos parâmetros quadráticos e lineares para cada variável da equação da superfície de resposta pode ser analisada por meio do diagrama de Pareto (Gráfico 16).

Gráfico 16 - Curva de Pareto para análise da relevância dos coeficientes da Equação 4

Fonte: Autores.

Observando o Gráfico 16, nota-se que os coeficientes lineares da superfície, tanto para cal quanto para fração vermelha, influenciam de maneira significativa a resistência à compressão simples. Logo, a fração vermelha e a cal têm influência significativa na resistência do solo estabilizado, assim como a interação entre estes dois materiais.

A Tabela 17 apresenta os valores fornecidos pelo modelo matemático em comparação com os resultados obtidos por Sales et al. (2017).

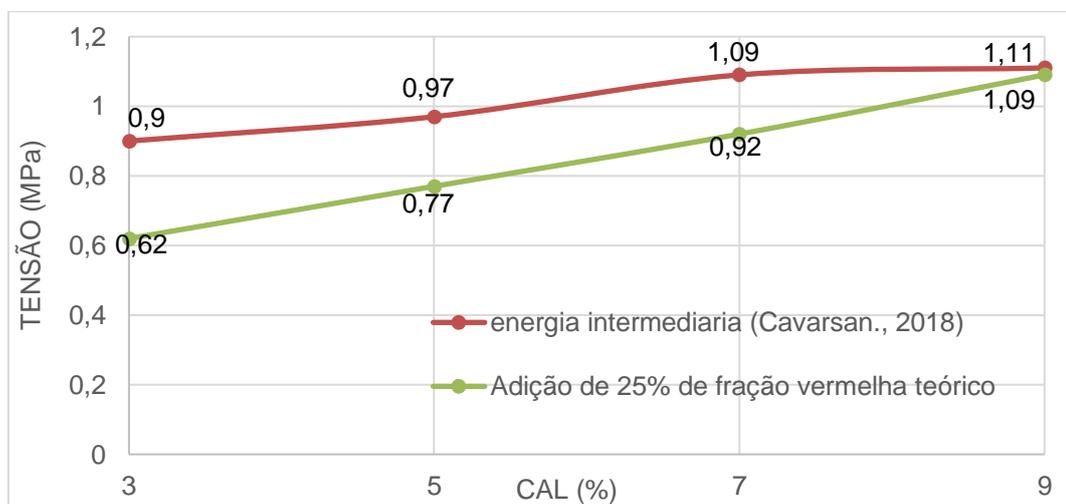
Tabela 17 - Comparação com ensaio de resistência simples

Resistência à compressão simples (MPa)			
Composição	Valor Experimental	Modelo Matemático	Sales <i>et al.</i> (2017)
100% SN 3% CAL	(0,59 ±0,07)	0,51	(0,47 ±0,10)
100% SN 5% CAL	-	0,58	(0,69 ±0,06)
100% SN 7% CAL	-	0,65	(0,71 ±0,23)
100% SN 9% CAL	(0,73 ±0,18)	0,73	(0,72 ±0,45)

Fonte: Autores

Com o auxílio da Tabela 17 é possível observar que o modelo matemático tem uma correspondência em comparação com os valores de Sales *et al.* (2017), tendo em vista que os dados só ficaram fora do erro do autor em um dos pontos. Com o modelo matemático gerado a partir da superfície de resposta também foi realizada uma simulação de como se comportaria a resistência à compressão simples com adição de 25% de fração vermelha. Esses dados foram comparados com os resultados de Cavarsan (2018), que estudou a influência da cal no mesmo solo aumentando a energia de compactação conforme apresentado no Gráfico 17.

Gráfico 17 - Diagrama de Pareto para os parâmetros do ensaio de RCS



Fonte: Autores

Para pequenas quantidades de cal é viável aumentar a energia de compactação conseguindo maior parcela de resistência devido à estabilização mecânica, ou seja, aumentando-se a densidade. Quando se adiciona maiores teores de cal é mais viável adicionar fração vermelha de RCC do que aumentar a energia de compactação da proctor normal para intermediária, fornecendo maior quantidade de cal matéria-prima para ocorrer de forma eficiente a estabilização química. Prova disso é a pequena elevação da resistência ao se adicionar 9% de cal em relação à adição de 7% ao utilizar a energia intermediária.

A Tabela 18 demonstra a evolução da resistência à compressão simples e do ISC (%) ao adicionar fração vermelha em uma mistura com o teor fixo de cal em 9%.

Tabela 18 - Evolução do RCS e do ISC em função do teor de FV em composição com 9% de cal

SN (%)	FV (%)	Tensão (MPa)	Desvio padrão	ISC (%)
100	0	0,72	0,17	10,88
87,5	12,5	0,93	0,02	18,65
75	25	1,09	0,02	11,10

Fonte: Autores.

Numa distribuição normal, somando e diminuindo 1 desvio padrão da média atinge-se um intervalo de 68,26%, 2 desvios padrão 95,44% e 3 desvios 99,74%.

Sendo assim, os pequenos desvios padrões nas amostras contendo 12,5% e 25% de fração vermelha referem-se a um grau de confiança de 99,74%. Ao variar a quantidade de fração vermelha de 12,5% para 25% ocorre um aumento estatisticamente significativo na resistência de 0,93 MPa para 1,09 MPa. A amostra de 100% de solo com adição de 9% de cal teve um desvio padrão elevado, entretanto, ainda assim, o intervalo de confiança na comparação dessa composição com as demais é superior a 68%. Logo, afirma-se com mais de 68,26% de confiança que ao adicionar a fração vermelha ao solo resultará em consequente aumento da resistência.

Observando a Tabela 18 nota-se que não necessariamente a composição com maior resistência à compressão simples não confinada coincide com o maior valor de ISC. A explicação para esse fenômeno está ligada à compensação da perda de resistência devido a diminuição do peso específico aparente seco pelo aumento da resistência devido às reações do solo, fração vermelha e cal. Sendo também uma inversão nos parâmetros de resistência quando as composições são ensaiadas em tempos maiores de cura.

4.10 DISCUSSÃO GERAL

Nesse tópico será apresentado em resumos as discussões envolvendo as interrelações dos resultados obtidos.

4.10.1 Classificação do Solo

Para fazer a classificação do solo foi necessário da análise granulométrica e dos limites de consistência tanto para os sistemas rodoviários de classificação quanto para o sistema unificado de classificação.

— Transportation Research Board (TRB)

Como a quantidade de material passante na peneira de número 200 é de pelo menos 76,45%, ou seja, valor superior à 35%, o solo é classificado como material silto-argiloso, corroborando com a classificação apontada por Salamuni (1998). Associando as características granulométricas, aos valores de LL= 46% e IP= 9% o solo é classificado no grupo A-5 do sistema rodoviário de classificação (TRB). O índice de grupo calculado para o solo é de 9, não superando o limite de 12, para o solo do tipo A-5.

O grupo A-5 é típico de solo silto não plástico ou moderadamente plástico, de caráter diatomáceo ou micáceo “contendo mica ou diatomito”, altamente elástico, conforme indica seu elevado limite de liquidez. O índice de grupo varia de 1 a 12, sendo que o valor crescente desse valor pode ser explicado pela decrescente porcentagem de material grosso retido na peneira nº 200 e o crescente valor de LL. O resultado do ensaio DRX corrobora o resultado da classificação TRB indicando a presença do mineral illita pertencente ao grupo das micas.

— Sistema unificado de Classificação de Solos (SUCS)

Com os parâmetros citados no item anterior, é possível efetuar a classificação pelo sistema unificado. A porcentagem passante na peneira nº 200 é maior que 50%, típico de solos finos, levando também em consideração que LL é menor que 50% e IP maior que 7%, caracterizando o solo em questão como tipo CL. Logo, a classificação do solo em questão pelo SUCS é de argila de baixa plasticidade arenosa.

4.11 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO

O ensaio de teor de hidróxido de cálcio fixado (Chapelle Modificado) indicou elevada afinidade do solo e da fração vermelha com a cal. A fixação de hidróxido de cálcio destes é tão elevada quanto a de materiais pozolânicos, por ser superior a 436 mg Ca(OH)₂/g pozolana, sendo a fração vermelha pouco superior ao solo.

Com a realização do ensaio de FRX, nem a fração vermelha e nem o solo tiveram os requisitos mínimos para atender as exigências químicas da NBR 12653

(ABNT, 2014), pois as amostras possuem elevado teor de enxofre superior a 5%. No entanto, O solo e a fração vermelha apresentam uma potencial utilidade quando estabilizado com a cal. Isso é possível por ambos terem elevados teores de sílica e alumina. Com o auxílio do ensaio de DRX foi possível verificar que o solo contém argilominerais que reagem lentamente com a cal quando comparados a outros mais reativos como exemplo da montmorilonita. Estes ensaios corroboram os resultados de outros autores sobre a eficácia da utilização da cal na fração vermelha para a estabilização do solo.

O efeito da fração vermelha na curva de compactação do solo ocorreu conforme apontado pela literatura. Ao adicionar esse material fino, passante na peneira de nº 100, a curva de compactação é levemente deslocada para a direita do eixo da abscissa elevando o teor de umidade ótima, causando assim uma consequente diminuição na máxima massa específica seca. A cal tem efeito semelhante ao ser adicionada nas misturas de solo e fração vermelha.

4.12 PARÂMETROS DE PROJETOS DO DNIT E DER/PR

Nessa seção são comparados os resultados obtidos na pesquisa como os requisitos mínimos de projetos do DNIT e DER/PR.

— Índice de Suporte Califórnia e Expansão

No quadro 13 estão apresentados os requisitos mínimos de ISC e expansão para a utilização do material em suas respectivas camadas.

Quadro 13 - Parâmetros mínimos de referência do ISC e de expansão pelo pra camadas de fundação de pavimentos (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 pelos autores.

Comparando com os resultados obtidos de expansão (Tabela 16) com os critérios mínimos do Quadro 13, conclui-se que a composição mais promissora é a que contém 87,5% de solo, 12,5% de fração vermelha e 9% de cal. Sendo a expansão

igual a 0,05%, a sua utilização, entretanto, o ISC de 18,65% não atinge o limite inferior de 20% para ter seu uso aprovado como sub-base, tendo sua utilização indicada para subleito e reforço de subleito, Outra composição que chamou atenção pela baixa expansibilidade foi a de 75% de solo, 25% de fração vermelha e 9% de cal, atingindo valor de ISC igual a 11,11% teria a utilização limitada a reforço de subleito. No entanto, ressalta-se que, por ter sido ensaiado em um curto intervalo de tempo, o ISC é um parâmetro de resistência que pode não ser adequado para estabilização de solo com a utilização da cal devido à lentidão das reações pozolânicas.

— Resistência à Compressão Simples

O Quadro 14 apresenta os requisitos mínimos do DER/PR para as devidas utilizações.

Quadro 14 - Valores para aceite da mistura 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 pelos autores.

Comparando comparado o maior valor experimental obtido no ensaio de RCS 1,09 MPa com o Quadro 14 nota-se que, apesar do significativo aumento na resistência à compressão simples, nenhuma das composições ensaiadas seriam capazes de atender os requisitos mínimos do DER/PR. No entanto, com o auxílio da equação da superfície de resposta para o ensaio de RCS é possível alcançar o valor de 1,2 MPa com a adição de 10% de cal e 26% de fração vermelha, podendo utilizar o material para o melhoramento de solos para utilização em sub-base de pavimentos rodoviários, No entanto, é importante ressaltar que possivelmente não atingiria o CBR necessário em apenas quatro dias de cura, inviabilizando a utilização dessa composição.

5 CONCLUSÕES

O solo demonstrou não ser expansivo o que, geotecnicamente, demonstra pouca eficiência da cal na estabilização química deste tipo de solo, visto que o efeito da cal no solo eleva a expansão. Contudo quando se adiciona fração vermelha nas misturas de solo com cal ocorre uma drástica diminuição na expansão chegando a valores próximos de zero, o que, do ponto de vista do ensaio de expansão viabiliza o uso destes materiais para a estabilização de solo.

O solo apresentou baixa capacidade de suporte, inferior a 2%. Sendo assim, a utilização não é indicada para uso em pavimentação, nem mesmo nas camadas mais inferiores que possuem baixo ISC. Estes resultados demonstram a necessidade do solo ser substituído por outro com maior ISC ou ser submetido a um processo de estabilização. Com a adição da cal no solo foi atingido um ISC de quase 11%. Com a adição da fração vermelha o ISC atingido 10,14%. Com o efeito combinado, adição da fração vermelha em conjunto com a cal o resultado de ISC obtido foi de aproximadamente 19% viabilizando assim a utilização deste para subleito e reforço de subleito em pavimentos rodoviários.

Experimentalmente, a resistência à compressão simples do solo estabilizado com fração vermelha e cal alcançou um valor de 1,09 MPa. Se comparado com o valor de RCS obtido por Sales et al. (2017) para o solo natural, houve um incremento de quase 200% na resistência à compressão, demonstrando a eficiência da composição fração vermelha e cal na estabilização de solos. No entanto, nenhuma das composições ensaiadas conseguiu alcançar os requisitos mínimos estipulados pelo DER/PR. Sendo assim, calculada a resistência de uma composição teórica, obtida por meio da equação da superfície de respostas elaborada pelo software *Statistica*, de 26% de fração vermelha e 10% de cal seria possível alcançar os 1,2 MPa exigidos pela norma, podendo indicar a utilização para sub-base de pavimentos, sendo necessário avaliar outros parâmetros como ISC e expansão para a utilização dessa composição. Um parâmetro de projeto que pode substituir o ISC é o módulo de resiliência, parâmetro importante pois leva em consideração a carga dinâmica e pode ser avaliado em períodos de cura maiores até que 28 dias.

6 SUGESTÕES DE ESTUDOS FUTUROS

Devido à heterogeneidade nos solos, sugere-se o estudo da utilização da fração vermelha em conjunto com a cal em outros tipos de solos com baixo teor de argila. É também indicado o estudo das composições utilizadas neste trabalho com maiores períodos de cura, como 90 dias.

Um estudo importante a ser realizado seria a avaliação da fração vermelha com a cal no módulo de resiliência do solo, parâmetro esse que é tendência na utilização de pavimentos rodoviários, pois este considera a natureza dinâmica da carga aplicada no pavimento rodoviário.

Outra linha de pesquisa possível, seria avaliar o efeito da estabilização mecânica do da fração vermelha, adicionando-se frações com granulometria mais grosseira.

REFERÊNCIAS

ARRIVABENI, Breno Santos; MACHADO, Carlos Cardoso; SANT'ANNA, Giovani Levi. **Uso de cal na estabilização granulométrica e química de solo de estradas florestais**. Artigo publicado na ENCICLOPÉDIA BIOSFERA, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v.13 n.24; p. 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Cerâmica no brasil: números do setor – cerâmica vermelha**. São Paulo: disponível em: <<http://www.abceram.org.br/>> Acesso em: 06/062018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**. Amostras de solo: Preparação para ensaios de compactação e ensaios de caracterização. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **NBR 6453**: cal virgem para construção civil -requisitos, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 3p.

_____. **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.

_____. **NBR 6459**. Solo: Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **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.

_____. **NBR 7175**: Cal hidratada para argamassas - Requisitos, Rio de Janeiro, RJ. 2003. 3p.

_____. **NBR 7180**. Solo: Determinação do limite de plasticidade. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **NBR 7181**. Solo: Análise granulométrica. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016. 84.

_____. **NBR 7182**. Solo: Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **NBR 9895**. Solo: Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2016.

_____. **NBR 12023**. Solo-Cimento – Ensaio de Compactação. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 1992.

_____. **NBR 12024**. Solo-cimento: Moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos — Procedimento. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.

_____. **NBR 12025**. Solo-cimento: Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ, Brasil. 2012.

_____. **NBR 12653**. Materiais Pozolânicos - Requisitos. Rio de Janeiro, 2014.

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: 28/05/2018.

AZEVÊDO, Luis Cairo. **Estabilização de Solos com Adição de Cal. Um Estudo a Respeito da Reversibilidade das Reações que Acontecem após a Adição de Cal**. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. 2010. Disponível em: <<http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2281>>. Acesso em: 28/06/2018.

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

BERNUCCI, Liedi B; MOTTA, Laura M. G. da; CERATTI, Jorge A. P.; SOARES, Jorge B. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros**. Rio de Janeiro, 2008.

BIGARELLA, João José; SALAMUNI, Riad. **Caracteres Texturais dos Sedimentos da Bacia de Curitiba**. boletim da Universidade do Paraná, 7:1-164. 1962.

BORDIGNON, Vitor Reinaldo. **Efeitos da Adição da Cal Hidratada na Estabilização de um Solo Sedimentar para Pavimentação Urbana na Região de Curitiba**. Dissertação de mestrado. Curitiba. UTFPR, 2015.

BRITO, Lais Costa; PARANHOS, Haroldo da Silva. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição 06. Ano 02, vol. 01. Pp 425-438, setembro de 2017. Disponível em:

<<https://www.nucleodoconhecimento.com.br/engenharia-civil/estabilizacao-de-solos?pdf=10813>>. Acesso em: 04/06/2018

CAMPOS, Maria Aparecida Nogueira; REIS, Alessandra Savazzini dos; TRISTÃO, Fernando Avancini; ROCHA-GOMES, Leila Verônica da. **A Utilização da Cal Conchífera em Monumentos Históricos no Espírito Santo**. Artigo publicado no 2º Congresso Nacional de Argamassas de Construção. Lisboa, Portugal. 2007. Disponível em: <www.apfac.pt/congresso2007/comunicacoes/p_aper%2043_07.pdf>. Acesso em: 03/06/2018.

CAPUTO, Homero Pinto. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Exercícios e Problemas Resolvidos**. Rio de Janeiro; São Paulo: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1989. 3V.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 348 de 05/07/2002. Diário Oficial da União, 17/07/2002**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030504.pdf> Acesso em: 05/06/2018.

CRISTELO, Nuno. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos Através da Adição de Cal**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia do Minho para obtenção do grau de mestre em engenharia civil, 2001. disponível em: <<http://repositorium.sdum.uminho.pt/handle/1822/150>> Acessado em: 02/06/2018.

CRISTELO, Nuno; GLENDINNING, Stephanie; FERNANDES, Lisete; PINTO, Amândio Teixeira. **Effect of Calcium Content on Soil Stabilisation with Alkaline Activation**. Artigo publicado na revista Construction and Building Materials 29, (2012). P 167–174.

DALLA ROSA, Amanda; MASUERO, João Ricardo; CANSOLI, Nilo Cesar. **Análise do Efeito da Cal e da Porosidade em Misturas Solo-Cinza-Cal**. Artigo publicado no GEORS 2009, repositório da associação brasileira de mecânica dos solos. Disponível em: <<http://www.abms.com.br/anais-eventos-regionais>> Acessado em 01/06/2018.

DALLA ROSA, Francisco. **Efeito do Estado de Tensões de Cura no Comportamento de uma Areia Artificialmente Cimentada**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS, Brasil. 2009.

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DIRETORIA DE DESENVOLVIMENTO TECNOLÓGICO, Divisão de Capacitação Tecnológica. **Manual de Pavimentação**. -2 Ed. – Rio de Janeiro, 1996. 320 P. (IPR.PUBL., 697).

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS DE SÃO PAULO. **Sub-Base ou Base de Solo-Cal**. Especificação de serviços e materiais para execução. São Paulo:[S.N], Abril/2006. Disponível em:< ftp://ftp.sp.gov.br/ftpder/normas/ET-DE-P00-005_A.pdf>. Acesso em: 06/06/2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES, DPP/CGPLA/ Coordenação de Planejamento. **Sistema Nacional de Viação (SNV)**. Versão 2014. Disponível em: <<http://www.dnit.gov.br/sistema-nacional-de-viacao/sistema-nacional-de-viacao>> Acessado em 28/05/2018.

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

DIAS, João Fernando. **Avaliação de Resíduos da Fabricação de Telhas Cerâmicas para o seu Emprego em Camadas de Pavimento de Baixo Custo**. São Paulo, 2004. Tese de Doutorado - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2004.

FELIPE, Rogerio da Silva. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba Curitiba**. MINEROPAR, 2011 (1ª Edição). 48 p.

GOBBI, Andressa. **Atividade Pozolânica de Adições Mineraias pelas NBR 5751/2012 e NBR 5752/2012: Uma Análise Crítica a Partir de Métodos Complementares**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. 2014.

GORSKI, Cristina Maria Fernandes Martins. **Estabilização de Solos Argilosos com Ligante Hidráulico LIPIDUR DS**. Dissertação de metrado em engenharia civil: geotecnia e meio ambiente. Universidade da Beira Interior, Covilhã Portugal, 2010. Disponível em: <<https://ubibliorum.ubi.pt/handle/10400.6/3454>>. Acesso em 03/06/2018.

GOULARTE, Cristina Lemos. **Estabilização Química de Solo com Adição de Cimento ou Cal como Alternativa de Pavimento**. Artigo publicado no GEORS 2009, repositório da associação brasileira de mecânica dos solos. Disponível em: < <http://www.abms.com.br/anais-eventos-regionais>> Acesso em 01/06/2018.

GUIMARÃES, José Epitácio P. **A Cal: Fundamentos e Aplicações na Engenharia Civil**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1998.

KORMANN, Alessander Christopher Morales. **Comportamento Geomecânico da Formação Guabirotuba: Estudos de Campo e Laboratório**. Tese doutorado. São Paulo. 2002.

MACIOSKI, Gustavo. **Estudo da Álcali-Ativação de Pó de Blocos Cerâmicos com Cal Hidratada**. Dissertação de mestrado para Universidade Tecnológica Federal do Paraná, PPGEC, 2017. Disponível em: < http://repositorio.utfpr.edu.br/jspui/bitstream/1/2389/1/CT_PPGEC_M_Macioski%2C%20Gustavo_2017.pdf>. Acesso: 10/06/2018.

MENEZES, Mayko de Sousa; PONTES, Fernanda V. M; AFONSO, Julio C. **Panorama dos Resíduos de Construção e Demolição**. Revista de química industrial N° 733 (2011). Disponível em: < <http://www.abq.org.br/rqi/2011/733/RQI-733-pagina17-Panorama-dos-Residuos-de-Construcao-e-Demolicao.pdf>> Acesso em 05/06/2018.

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 01/06/2018.

NETO, Benício de Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRANS, Roy Edward. **Planejamento e Otimização de Experimentos**. Editora da Unicamp, Campinas, 1995.

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**. Dissertação de mestrado Universidade Federal de Santa Catarina, 2010.

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, André R. A. G. **Fibras de Curauá e Sisal como Reforço em Matrizes de Solo**. Dissertação (mestrado) – Pontifícia Universidade Católica – Rio de Janeiro: PUC. Departamento de Engenharia Civil, 2008.

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

REDIVO, Israel M. **Utilização de Resíduo de Cerâmica Vermelha em Misturas com Solo para Construção de Camadas de Pavimentos com Baixo Volume de Tráfego**. Dissertação de mestrado, Florianópolis. UFSC, 2011.

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. 0018.

SALAMUNI, Eduardo.; EBERT, Hns Dirk.; HASUI, Yociteru. **Morfotectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba.** Revista brasileira de geociências. 2004. Disponível em: <<http://www.neotectonica.ufpr.br/morfotectonica/bacia-sedimentar.pdf>> Acesso em: 28/05/2018.

SALAMUNI, EDUARDO. **Tectônica da Bacia Sedimentar de Curitiba (PR).** Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - Rio Claro. Tese de doutorado em geologia regional, 1998. 214 p. Disponível em: <<http://www.neotectonica.ufpr.br/grupo-teses/tese-salamuni.pdf>> Acesso em: 18/05/2018.

SALES, Andrei W.; RIBEIRO, Daniel D.; NERY, Kaio 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 de engenharia civil. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba. 2017.

SANTOS, Cláudia de Souza. **A Indústria Cerâmica em Barra Bonita (SP) e suas Relações com a Usina Hidrelétrica de Bariri: Panorama e Perspectivas.** Dissertação de mestrado, Campinas, UNICAMP, 2003.

SANTOS, Pérsio De Souza. **Ciência e Tecnologia das Argilas.** 2ª ED. SÃO PAULO: EDITORA EDGARD BLUCHER LTDA. VOL 2, 1989.

SENÇO, Wlastermiler de. **Manual de Técnicas de Pavimentação.** Volume 1 / - 2. Ed. AMPL. — São Paulo : PINI, 2007.

SILVA, Matheus Francisco da. **Estudo da Estabilização com Cal de um Solo Laterítico e um Solo Laterítico.** Dissertação de mestrado da escola de engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2016. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses /disponiveis/18/18143/tde--102359/pt-br.php>>. Acesso em: 04/06/18.

SOLIZ, Valeria Vaca Pereira. **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica.** Dissertação de mestrado. COPPE/UFRJ, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

SOUZA, Murillo L. **Pavimentação Rodoviária.** Volume I, livros técnicos e científicos editora S.A., Rio de Janeiro-RJ, 1980. 361P

VARGAS, Alexandre S.; DAL MOLIN, D. C. C.; VILELA, Antonio C. F.; JALALI, Said; GOMES, J. C. **Cinzas Volantes Alkali-Ativadas com Solução Combinada de NaOH e Ca(OH)₂**. Artigo publicado na Revista Matéria, v. 12, n. 3, pp. 462 – 469, 2007. Disponível em: <<http://www.materia.coppe.ufrj.br/sarra/artigos/artigo10839/>> Acesso em: 08/06/2018.

VARGAS, Milton. **Introdução à Mecânica dos Solos**. Ed. Mcgraw-Hill, do Brasil Ltda, São Paulo, SP, 1977. 509 P.

WADA, Patrycia. H. **Estudo da Incorporação de Resíduos de Cerâmica Vermelha na Composição de Concreto para Uso em Estacas Moldadas *In Loco***. Dissertação de mestrado. São Paulo. UNESP, 2010.

ZALIHA, Sharifah; KAMARUDIN, Hussin; ABDULLAH, Mohd M. A. B.; BINHUSSAIN, Mohammed; SALWA, M. S. S. **Review on Soil Stabilization Techniques**. Australian Journal of Basic and Applied Sciences, 7(5): 258-265, 2013.

APÊNDICE A

Dados pontuais de expansão das composições ensaiadas para determinação da ISC e expansão.

Tabela 19 - Dados das composições ensaiadas

Ensaio	Composição	Altura do CP (mm)
CP1	75% SN 25% FV 9% CAL	1,17
CP2	87,5% SN 12,5% FV 9% CAL	127,2
CP3	75% SN 25% FV 0% CAL	114,5
CP4	87,5% SN 12,5% FV 0% CAL	114,1
CP5	87,5% SN 1,25% FV 6% CAL	114,1

Fonte: Autores.

Tabela 20 - Resultados do ensaio de expansão

Tempo (horas)	EXPANSÃO (mm)					EXPANSÃO (%)				
	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5	CP1	CP2	CP3	CP4	CP5
0	0	0	0	0	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,5	3	0	25	35	25	0,00	0,00	0,22	0,31	0,22
8	6	4	170	100	63	0,03	0,03	1,48	0,88	0,55
24	6	6	215	178	66	0,05	0,05	1,88	1,56	0,58
48	6	7	225	194	67	0,05	0,06	1,97	1,70	0,59
72	6	7	230	198	67	0,05	0,06	2,01	1,74	0,59
96	6	7	235	202	67	0,05	0,06	2,05	1,77	0,59

Fonte: Autores.

APÊNDICE B

Resultados Numéricos do Ensaio de Resistência Simples
Tabela 21 - Resultados Numéricos RCS

Adições		Tensão (MPa)	Média (MPa)	Desvio Padrão
FV (%)	CAL (%)			
0,00	3,00	0,52	0,59	0,06
0,00	3,00	0,56		
0,00	3,00	0,67		
0,00	3,00	0,55		
0,00	3,00	0,64		
0,00	9,00	0,65	0,73	0,18
0,00	9,00	0,51		
0,00	9,00	0,71		
0,00	9,00	0,77		
0,00	9,00	0,99		
12,50	6,00	0,49	0,70	0,15
12,50	6,00	0,83		
12,50	6,00	0,83		
12,50	6,00	0,74		
12,50	6,00	0,60		
25,00	3,00	0,65	0,68	0,08
25,00	3,00	0,76		
25,00	3,00	0,77		
25,00	3,00	0,58		
25,00	3,00	0,65		
25,00	9,00	1,05	1,09	0,02
25,00	9,00	1,08		
25,00	9,00	1,11		
25,00	9,00	1,09		
25,00	9,00	1,10		
12,50	6,00	0,55	0,57	0,04
12,50	6,00	0,60		
12,50	6,00	0,61		
12,50	6,00	0,52		
12,50	6,00	0,58		
0,00	0,00	0,38	0,37	0,09
0,00	0,00	0,40		
0,00	0,00	0,29		
0,00	0,00	0,51		
0,00	0,00	0,29		
12,50	9,00	0,92	0,93	0,02
12,50	9,00	0,94		
12,50	9,00	0,93		
12,50	9,00	0,97		
12,50	9,00	0,91		
12,50	0,00	0,44	0,47	0,06
12,50	0,00	0,37		
12,50	0,00	0,52		
12,50	0,00	0,48		
12,50	0,00	0,52		
25,00	0,00	0,43	0,36	0,09
25,00	0,00	0,28		
25,00	0,00	0,45		
25,00	0,00	0,40		
25,00	0,00	0,27		

Fonte: Autores.