

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

KALEBE DE ALMEIDA HONDO

TIAGO MANDIRA

**MELHORAMENTO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA TÉCNICA
DE ESTABILIZAÇÃO POR ADITIVOS QUÍMICOS: RESÍDUO DE CERÂMICA
VERMELHA E CAL**

CURITIBA

2022

KALEBE DE ALMEIDA HONDO

TIAGO MANDIRA

**MELHORAMENTO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA TÉCNICA
DE ESTABILIZAÇÃO POR ADITIVOS QUÍMICOS: RESÍDUO DE CERÂMICA
VERMELHA E CAL**

**SOIL IMPROVEMENT FOR PAVING USING STABILIZATION TECHNIQUE
THOUGH CHEMICAL ADDITIVES: RED CERAMIC WASTE AND LIME**

Trabalho de Conclusão de Curso do Curso de Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Curitiba, Sede Ecoville, apresentado como requisito parcial à obtenção do título de bacharel em Engenharia Civil.

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

CURITIBA

2022



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/)

Esta licença permite download e compartilhamento do trabalho desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es), sem a possibilidade de alterá-lo ou utilizá-lo para fins comerciais. Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

KALEBE DE ALMEIDA HONDO

TIAGO MANDIRA

**MELHORAMENTO DE SOLOS PARA PAVIMENTAÇÃO ATRAVÉS DA TÉCNICA
DE ESTABILIZAÇÃO POR ADITIVOS QUÍMICOS: RESÍDUO DE CERÂMICA
VERMELHA E CAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito para obtenção do título de
Bacharel em Engenharia Civil da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 13/junho/2022

Amanda Dalla Rosa Johann
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Adauto José Miranda de Lima
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Carlos Emmanuel Ribeiro Lautenschläger
Doutorado
Universidade Estadual de Ponta Grossa

Luciene Ferreira Schiavoni Wiczick
Mestrado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2022

RESUMO

Apesar de ser o principal modal rodoviário no Brasil, apenas 12,4% da matriz rodoviária se trata de rodovias pavimentadas e 9,1% de rodovias planejadas, uma das razões por trás desse problema o alto custo logístico envolvido no processo de pavimentação. Em busca de um desenvolvimento econômico e sustentável – destacando-se o dano ambiental causado pela extração e transporte dos recursos minerais naturais para pavimentação – necessita-se de novas tecnologias economicamente viáveis para a estabilização de solos. A presente pesquisa tem como objetivo analisar os efeitos da mistura de cal hidratada e resíduo de cerâmica vermelha ao solo seco a fim de se obter um melhoramento de características mecânicas do solo. O material de estudo é um solo sedimentar da Formação Guabirota, proveniente da região de Curitiba, com adição de resíduo de cerâmica vermelha nos teores de 10%, 15%, 20%, 25% e 30% e cal hidratada nos teores de 0%, 2,5%, 5%, 7,5% e 10%. Nos ensaios de resistência à compressão simples foi alcançada a resistência de 1991,75 kPa aos 28 dias que se mostrou satisfatória para o uso da mistura na estabilização de bases e sub-bases para pavimentação.

Palavras-chave: solo-cal; estabilização do solo; pavimentação; resíduo de cerâmica vermelha; resistência à compressão simples.

ABSTRACT

Although being the main mean of transportation in Brazil, only 12.4% of the highway network is made of paved roads and 9.1% of planned roads, one of the reasons behind of this problem is the high logistical cost on the paving process. In search of a sustainable economic development – highlighting the environmental damage caused by the extraction and transportation of natural resources – there is a need for new economical viable technologies for the soil stabilization. The following research has as objective analyze the effects of the mix of hydrated lime and red ceramic waste to dry soil to improve the mechanical properties of the soil. The material studied is a sedimental soil from the Guabirota Formation, native from the Curitiba region, containing 20% and 25% of red ceramic waste and 0%, 2,5%, 5%, 7,5% and 10% of hydrated lime. The simple compression resistance achieved was of 1991,75 kPa at 28 days, which showed satisfactory to use on the stabilization of the bases and sub-bases for paving.

Keywords: soil-lime; soil stabilization; paving; red ceramic waste; simple compression resistance.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Localização da Formação Guabirota.	17
Figura 2 – Perfil da Formação Guabirota	18
Figura 3 - Esquema das principais reações físico-químicas que ocorrem num solo tratado com cal.	24
Figura 4 – Estrutura do pavimento flexível	26
Figura 5 – Estrutura de um pavimento rígido	27
Figura 6 – Camadas genéricas do pavimento	28
Figura 7 – Curva Granulométrica do Solo Natural.....	30
Figura 8 – Resistência à compressão simples do solo natural.....	32
Figura 9 – Curva Granulométrica do Resíduo de Telha Cerâmica.....	33

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Energia Normal de Compactação.....	36
Quadro 2 – Classificação dos solos em função do IP	49
Quadro 3 – Valores de resistência à compressão aceitos para a mistura solo-cimento pelo DER/PR.....	53
Quadro 4 – Estatísticas Básicas.....	54
Quadro 5 – Análise de variância – Anova	54
Quadro 6 – Comparação de médias	55
Quadro 7 – Correlação do modelo	56

LISTA DE FOTOGRAFIAS

Fotografia 1 – Cal hidratada CH-III ENGECAL.....	34
Fotografia 2 – Molde cilíndrico desenvolvido para a confecção dos corpos de prova	38
Fotografia 3 – Soquetes adaptados	39
Fotografia 4 – Corpos de prova moldados e embalados.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resultado dos Índices de Plasticidade Obtidos.....	31
Tabela 2 – Peso específico do solo.....	31
Tabela 3 – Tabela de Composição das Porcentagens de RCV e Cal, em relação ao solo seco.....	35
Tabela 4 – Dosagem dos materiais necessários para a moldagem dos corpos de prova.....	38
Tabela 5 – Tabela de Pierce – Valores de R.....	41
Tabela 6 – Análise de Variância.....	43
Tabela 7 – Resumo dos dados obtidos do ensaio de LL.....	44
Tabela 8 – Resumo dos valores obtidos para o ensaio de LP.....	49
Tabela 9 - Resumo dos ensaios de LL e LP e a determinação do IP.....	49
Tabela 10 – Dados obtidos no ensaio de compactação para a mistura 20R0C.....	50
Tabela 11 – Resultado da resistência à compressão simples dos corpos de prova.....	52
Tabela 12 – Análise de Outliers.....	54
Tabela 13 – Resumo dos valores obtidos para a análise estatística.....	55
Tabela 14 – Análise de variância corrigida.....	56
Tabela 15 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 10R0C.....	66
Tabela 16 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 10R10C.....	66
Tabela 17 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 20R2,5C.....	66
Tabela 18 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 20R5C.....	66
Tabela 19 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 20R7,5C.....	67
Tabela 20 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 25R5C.....	67
Tabela 21 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 30R0C.....	67
Tabela 22 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 30R10C.....	67
Tabela 23 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 10R0C.....	69
Tabela 24 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 10R10C.....	69
Tabela 25 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 20R2,5C.....	69
Tabela 26 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 20R5C.....	69
Tabela 27 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 20R7,5C.....	70
Tabela 28 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 25R5C.....	70
Tabela 29 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 30R0C.....	70
Tabela 30 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 30R10C.....	70

SUMÁRIO

1	Introdução	12
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo geral	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
1.2	Justificativa.....	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1	Solos.....	15
2.1.1	Solos residuais	15
2.1.2	Solos transportados.....	15
2.1.3	Solos orgânicos	16
2.1.4	Solos pedogênicos	16
2.2	Formação Guabirota	16
2.3	Resíduos de construção civil.....	18
2.3.1	Resíduo de cerâmica vermelha	19
2.4	Estabilização do solo	20
2.4.1	Estabilização mecânica	21
2.4.2	Estabilização granulométrica.....	22
2.4.3	Estabilização química.....	22
2.5	Pavimentação	25
2.5.1	Classificação dos pavimentos	25
2.5.2	Camadas do pavimento.....	27
3	MATERIAIS.....	29
3.1	Solo.....	29
3.1.1	Análise de granulometria	29
3.1.2	Limites de Atterberg	30
3.1.3	Peso específico real (Y_s).....	31
3.1.4	Compactação	31
3.1.5	Compressão simples	31
3.2	Resíduo de cerâmica vermelha	32
3.2.1	Ensaio de granulometria.....	32
3.2.2	Determinação da densidade real dos grãos	33
3.2.3	Índices de plasticidade	33
3.3	Cal.....	34

3.4	Água	34
4	MÉTODOS	35
4.1	Ensaio de caracterização.....	35
4.2	Ensaio de Compactação	35
4.3	Determinação da Amostra Mínima.....	36
4.4	Moldagem dos corpos de prova.....	37
4.5	Ensaio de resistência à compressão simples.....	40
4.6	Análise Estatística dos Dados.....	40
4.6.1	Análise de Dados Espúrios (<i>Outliers</i>).....	40
4.6.2	Teste de Hipóteses.....	42
4.6.3	Análise de Variância – Anova.....	42
4.6.4	Valor-p.....	43
5	RESULTADOS E ANÁLISE.....	44
5.1	Limites de Atterberg.....	44
5.2	Compactação	50
5.3	Resistência à compressão simples	51
5.4	Análise Estatística.....	53
5.4.1	Tratamentos de dados – Análise Outliers (dados espúrios).....	53
5.4.2	Análise de variância – Anova	54
5.4.3	Comparação de médias – teste de Tukey-Kramer	55
5.4.4	Análise multivariada	56
5.4.5	Superfície de resposta.....	57
6	CONCLUSÃO	58
	SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	60
	REFERÊNCIAS.....	61
	APÊNDICE A – TABELAS DOS DADOS OBTIDOS NO ENSAIO PARA O LIMITE DE LIQUIDEZ.....	65
	APÊNDICE B – TABELAS DOS DADOS OBTIDOS NO ENSAIO PARA O LIMITE DE PLASTICIDADE	68

1 INTRODUÇÃO

Apesar da importância do modal rodoviário na matriz de transporte do país, atualmente o Brasil possui 1.720.700 km de malha rodoviária, sendo que apenas 12,4% se tratam de rodovias pavimentadas e 9,1% de rodovias planejadas, ou seja, o Brasil possui quase 1,35 milhão de km de malha rodoviária não pavimentadas (CNT, 2019).

A construção de pavimentos atual é constituída usualmente de bases granulares, porém o alto custo de logístico associado ao seu emprego é um dos fatores que dificulta o processo de estabilização do solo para a base e sub-base e, conseqüentemente, a pavimentação da via, portanto é necessário o estudo e análise do solo para garantir sua estabilidade em conjunto com a disponibilidade dos recursos (JOHANN, 2013).

Para Cristelo (2001), a estabilização do solo com base nas reações químicas entre as partículas de solo, origina um novo material, com características compatíveis daquelas que se pretendem para a obra. Ainda segundo o autor, o tratamento de solo com cal proporciona melhorias significativas na textura e estrutura do solo, reduz a plasticidade e aumenta a resistência mecânica a longo prazo do mesmo.

Buscando um desenvolvimento econômico e sustentável, é importante destacar o dano ambiental causado pela extração e o transporte da brita. O primeiro, mesmo que não muito grave, gera um impacto visual, prejudicando a paisagem, principalmente quando situadas próximas a centros urbanos, além de não ser um recurso renovável. Já com relação ao transporte do material, seu custo encarece o preço final, portanto o ideal seria extraí-lo próximo dos centros de consumo, o que muitas vezes não é possível (MME, 2009).

Dado o cenário apresentado, necessita-se de novas tecnologias para a estabilização de solos que sejam economicamente viáveis, e que se alinhem com processos sustentáveis. Uma alternativa encontrada é o reaproveitamento de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) oriundos de demolição, evitando o descarte incorreto do material.

Na pesquisa realizada por Dranka (2016), a vantagem ao adicionar resíduo de cerâmica vermelha ao solo, foi a redução do índice de plasticidade e expansão, além de aumentar os valores do índice de suporte Califórnia.

Já na pesquisa realizada por Hondo (2017), ao adicionar cal à mistura solo-RCV, obteve-se um acréscimo na resistência à compressão simples, em relação ao solo natural, além de reduzir o peso específico real (γ_s) e a plasticidade do solo.

Ainda que o método de estabilização de solos com cal não seja uma inovação, a incorporação do RCV à mistura demonstra ser uma alternativa viável para a destinação de um material que seria descartado. Além disso, seu estudo para estabilização dos solos é de suma importância para determinar o comportamento dessas misturas e a otimização da sua composição.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal do trabalho é analisar o comportamento mecânico do solo da formação Guabirotuba, estabilizado com cal e resíduo de cerâmica vermelha.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Caracterização da mistura solo-cal-RCV;
- Ensaio de compactação do solo em laboratório, com a adição de resíduo de cerâmica vermelha e cal em diversas composições;
- Analisar a influência da mistura de cal hidratada e resíduo de cerâmica vermelha ao solo seco;
- Analisar a resistência à compressão simples das misturas estudadas.

1.2 Justificativa

Toda atividade exercida pelo homem acarreta um impacto ambiental, neste sentido vale ressaltar que a construção civil é um dos fatores responsáveis pelo agravamento de problemas ambientais, principalmente pela geração de resíduos. Segundo o Presidente da Associação Paranaense dos Engenheiros Ambientais, Luiz Guilherme Grein Vieira, o Brasil reaproveita apenas 21% dos resíduos da construção civil, enquanto a Alemanha tem um índice de 90% de aproveitamento (CREA-PR/2020, acesso em 23 de outubro de 2021).

A cerâmica vermelha possui um alto índice de descarte, desde a fabricação até o seu destino final. Segundo Garcia (2014), as perdas de produtos acabados

possuem índices entre 3% a 5%, representando cerca de 50 e 85 mil toneladas de descarte de cerâmicas por ano.

A realização desta pesquisa surge a partir do atual contexto de desenvolvimento sustentável, em conjunto com a crescente preocupação com a destinação dos resíduos da construção civil. Além de buscar uma solução para a estabilização do solo da formação do Guabirota, que abrange a região metropolitana de Curitiba/PR, e possuem uma plasticidade elevada e rija, devido a sua formação argilosa, sendo necessário empregar métodos de estabilização antes de seu uso na construção civil (KORMANN, 2002).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos

Solos são o material resultante do processo de intemperismo das rochas, seja ele físico – por ação da água, variação da temperatura, vegetação ou vento – formado majoritariamente por pedregulhos e areias, ou químico – por oxidação, hidratação, carbonatação e efeitos químicos da vegetação – tendo esses processos como último produto a argila (CAPUTO, 1988).

Conforme Das (2011), a definição de solo para a engenharia é um agregado não cimentado composto de partículas sólidas, grãos minerais e matéria orgânica, tendo seus vazios preenchidos por gases ou líquidos. No âmbito da engenharia civil o solo é amplamente utilizado, tendo fundamental importância o estudo de suas propriedades.

Há diversas maneiras de dividir os tipos existentes de solos, sendo a classificação pela origem de grande utilidade, podendo ser mais útil que a classificação do ponto de vista de sua constituição física, sendo eles divididos em quatro grupos – residuais, transportados, orgânicos e pedogênicos (PINTO, 2006).

2.1.1 Solos residuais

Segundo Pinto (2006), solos residuais, são encontrados no próprio lugar onde se formam, mais facilmente encontrados em regiões tropicais, dependente de vários fatores tais como a temperatura, regime de chuvas e a vegetação.

Os solos residuais apresentam normalmente uma grande variabilidade de forma das partículas, dimensão, estrutura e índice de vazios (DUARTE, 2000).

A rocha-mãe tem grande influência na composição do solo, auxiliando na determinação de sua composição. Como exemplo, solos residuais de basalto tem predominância argilosa e solos de gnaisse de silte (DUARTE, 2000).

2.1.2 Solos transportados

Os solos transportados são solos os quais foram removidos dos seus locais de origem seja por meio da atividade gravitacional ou por algum agente intempérico, sendo diferente do solo ou rocha no qual reside. De uma forma geral, possuem perfil estratificado (CAPUTO, 1983).

Transportados por algum agente, tem suas características dependentes pelo meio de transporte. São classificados conforme o seu meio de disposição: solos coluvionares são formados pela ação da gravidade, solos aluvionares, pelo carregamento da água, depósitos eólicos, pela ação do vento e solos originários de geleiras, drifts (PINTO, 2006).

2.1.3 Solos orgânicos

São classificados como solos orgânicos aqueles que possuem uma grande quantidade de material orgânico de origem animal e vegetal, conhecido como húmus, esse material possui odor característico e cor escura, também possui camadas de argila, silte e areia fina (PINTO, 2006).

Por conta de sua composição orgânica, apresentam elevados índices de vazios, e devido a sedimentação recente, são de baixa resistência, alta compressibilidade e alta permeabilidade (PINTO, 2006).

2.1.4 Solos pedogênicos

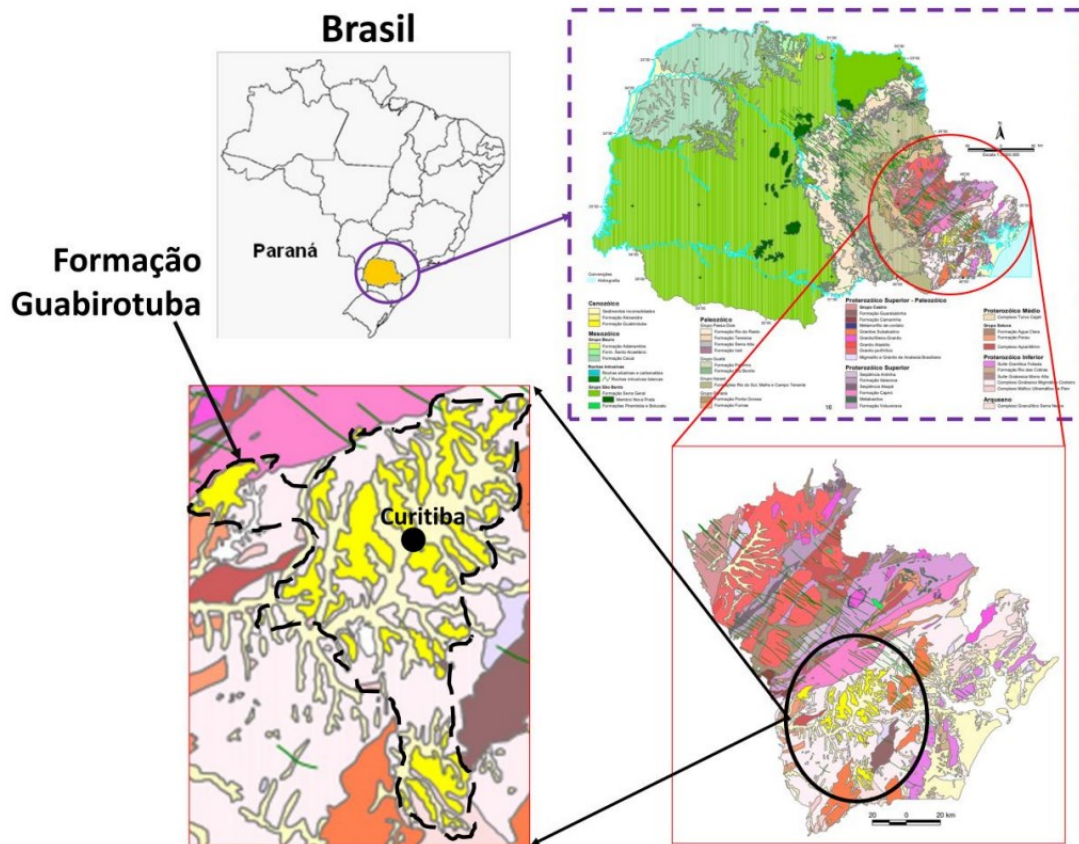
Segundo Pinto (2006), os solos pedogênicos são superficiais, importantes para a agricultura. Abrange grande parte da superfície do plantando Centro-Sul brasileiro, são solos lateríticos, possuindo elevados índices de vazios, possuem pouco uso na engenharia devido ao baixo teor de resistência mecânica.

2.2 Formação Guabirota

A Formação Guabirota está inserida na Bacia Sedimentar de Curitiba, com uma área de aproximadamente 900 km² abrangendo os municípios de Curitiba, Campo Largo, Colombo, Almirante Tamandaré, Pinhais, Piraquara, Campina Grande do Sul, Quatro Barras, Araucária, Fazenda Rio Grande, São José dos Pinhais e Tijucas do Sul, primariamente constituídos por solos finos e de alta consistência (KORMANN, 2002).

De acordo com Felipe (2011), os sedimentos depositados na Formação Guabirota datam do intervalo de 23 a 1,8 milhões de anos - dos períodos do Paleogeno ao Quaternário, descritos inicialmente no bairro Guabirota, por Bigarella *et al.* (1961). A Figura 1 representa a localização geográfica da Formação Guabirota destacada em amarelo.

Figura 1 - Localização da Formação Guabirotuba.

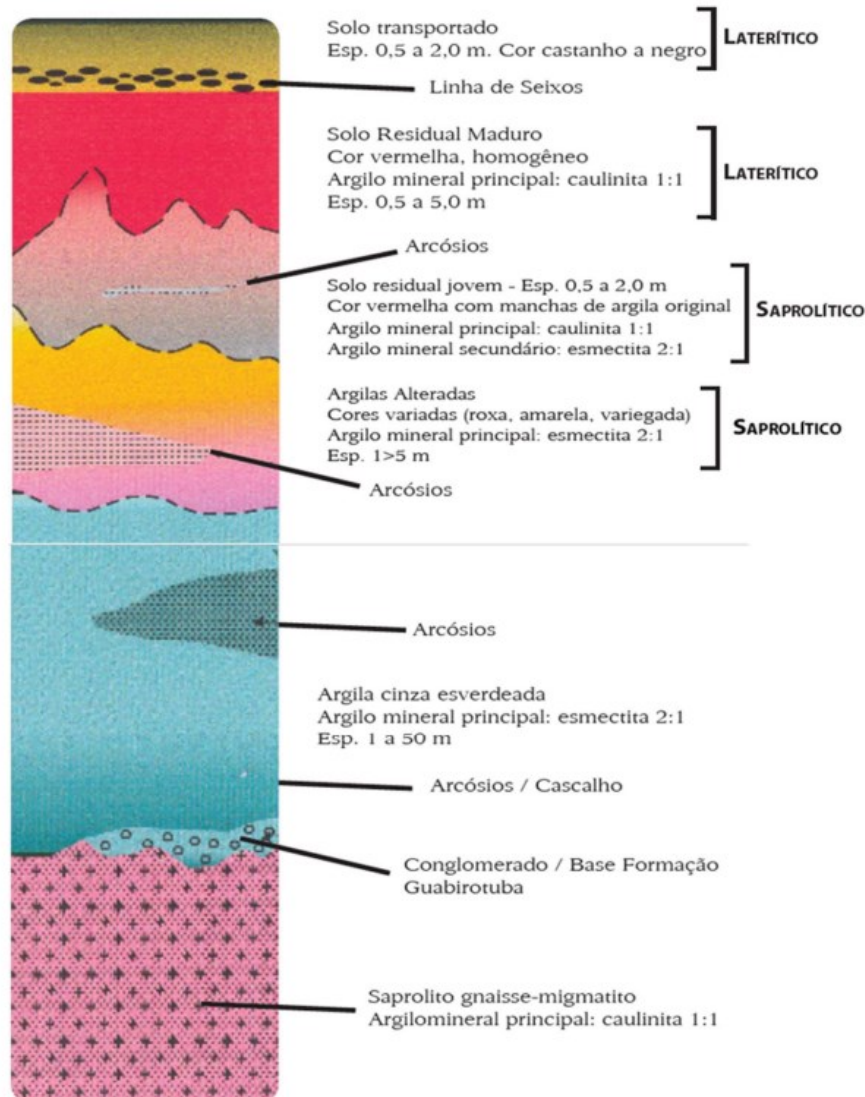


Fonte: BALDOVINO *et al.*, *apud* MINEROPAR (2020).

Segundo Felipe (2011), os sedimentos da Formação Guabirotuba atingem espessuras na ordem de 60-80 metros com predominância de argilas e areias arcósias com 20-40% de feldspato, tendo sua parte basal composta de cascalhos e arcósios de granulometria grosseira. Ressalta-se que tal camada sedimentar está depositada sobre rochas do Complexo Atuba - o qual normalmente tem uma concentração de carbonato de cálcio.

Na Figura 2, é observado o perfil da Formação Guabirotuba, o qual é composto primariamente por solos transportados, arcósios e argilas.

Figura 2 – Perfil da Formação Guabirotuba



Fonte: Felipe (2011)

2.3 Resíduos de construção civil

A construção civil de uma forma geral – devido as práticas utilizadas – produz uma grande quantidade de resíduos, desde antes do início da própria construção, com a produção de insumos. Em novas construções, os resíduos são provenientes de quatro fases: fundação; estrutura e alvenaria; revestimento e acabamento, sendo os resíduos diferenciados de acordo com o tempo, atividade e quantidade gerada (MARIANO, 2008).

A resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA define:

Resíduos da construção civil: são os provenientes de construções, reformas, reparos demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha; (Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2002)

Os resíduos são classificados de acordo com as seguintes classes:

- Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados. Provenientes das etapas de fundação, estrutura, vedação e acabamento.
- Classe B: resíduos que podem ser segregados in loco, dependendo de seu tamanho, como gesso, papel, papelão, plástico, vidro ou metal.
- Classe C: são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação, como serragem e isopor.
- Classe D: materiais perigosos provenientes do processo construtivo, como tintas, solventes, óleos ou outros materiais danosos à saúde.

Pinto (1986 *apud* Wada, 2010) afirma que, em canteiros de obra na cidade de São Carlos, há em média de resíduos de construção, 64% de argamassa, 30% de componentes cerâmicos (tijolos maciços e furados, telhas e blocos) e 6% de outros materiais como concreto, pedra, areia, materiais metálicos e plásticos.

Materiais cerâmicos e teores baixos de gesso fracionados ao solo, podem ser reciclados como base e sub-base para pavimentação, porém outros materiais como madeira e embalagens ainda não possuem reciclagem apropriada (John, Agopyan, 2000; *apud* Wada, 2010).

2.3.1 Resíduo de cerâmica vermelha

Chama-se cerâmica a pedra sintética obtida pela moldagem, secagem e cozimento de argilas ou de misturas contendo argilas (BAUER, 2001).

De acordo com Isaia (2007) o processo de fabricação de componentes de cerâmica vermelha se inicia pela preparação da massa, que tem como objetivo adequar a dimensão dos grãos da argila, para o processo de moldagem, que é realizada por através do processo de prensagem, depois é realizada a secagem, que pode ser realizada naturalmente ou com o auxílio de estufas ou câmaras de alvenaria. Em seguida é realizada a queima, que pode acontecer em vários tipos de fornos. Por

fim, é realizado o resfriamento, que deve ser lento, tendo no máximo 3 dias de duração.

Conforme a Associação Brasileira de Cerâmica, compreende-se como cerâmica vermelha materiais empregados na construção civil e de uso doméstico como: argila expandida, tijolos, blocos, elementos vazados, lajes, telhas e tubos cerâmicos, sendo eles usualmente tratados termicamente, estando na classe A da classificação CONAMA.

De acordo com o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE (2017), existem no Brasil aproximadamente 5600 indústrias de cerâmicas e olarias, produzindo mensalmente em torno de 2.5 bilhões de telhas cerâmicas, 5.7 bilhões de blocos cerâmicos e 1.5 toneladas de tubos cerâmicos. O índice de perda após a queima da cerâmica é variável, entre 5% em cerâmicas bem estruturadas e com tecnologia moderna e 20% em mais desorganizadas defasadas tecnologicamente (MME, 2009).

O resíduo cerâmico pode ser reciclado em forma de agregado em quase sua totalidade, tendo diferentes aplicações de acordo com a sua composição, porém a presença de fases mais porosas e de menor resistência mecânica de produtos de cerâmica vermelha, acarretam em uma redução da resistência dos agregados e uma maior absorção de água (John, Agopyan, 2000; apud Wada, 2010).

2.4 Estabilização do solo

A estabilização do solo para pavimentação rodoviária é uma prática milenar, desde as civilizações da antiga Mesopotâmia e Romana. Porém as técnicas contemporâneas se iniciaram nos Estados Unidos no ano de 1906, com misturas de areia, argila, cimento, betume e alguns químicos (CRISTELO, 2001).

Villibor (1982) define a estabilização do solo como a alteração da sua propriedade, para melhorar seu comportamento, apresentando uma ou mais das seguintes finalidades:

- Aumento da resistência;
- Redução da compressibilidade;
- Redução da sensibilidade às ações externas;
- Aumentar ou reduzir a permeabilidade;
- Garantir que suas propriedades permaneçam no decorrer do seu uso.

Para Senço (2001) a estabilização do solo deve aprimorá-lo para que resista a deformações e rupturas no decorrer de seu uso, apresentando resistência ao cisalhamento e à deformação.

Geralmente na pavimentação não é possível evitar terrenos com solos com características indesejáveis, sendo a construção de estradas a área da engenharia que apresenta o maior número de tipos de solo dentro de uma mesma obra. Segundo Ingles e Metcalf (1972, *apud* CRISTELO, 2001), as principais propriedades de um solo para a engenharia são: o volume de vazios, a resistência, a durabilidade e a permeabilidade. Para viabilizar o seu uso, é necessário tratar o solo para adequá-lo à sua devida função.

Pinto e Preussler (2002), dividem as técnicas de estabilização em três categorias:

- Estabilização mecânica;
- Estabilização granulométrica;
- Estabilização química.

2.4.1 Estabilização mecânica

A estabilização mecânica consiste em um processo de melhoria por meio de mudanças no sistema trifásico, ou seja, alterações na proporção das partes sólidas, líquidas e gasosas. Pode ser realizada pela compactação do solo ou por adequação da granulometria (MEDINA, 2005).

Caputo (1988) define a compactação do solo como uma operação simples e de grande importância. O seu processo pode ser manual ou mecânico e visa melhorar as características do solo, reduzindo seu volume de vazios e conseqüentemente, aumentando sua resistência, tornando mais estável.

Para Spence *et al.* (1983 *apud* SANTOS 2012), em solos com grãos de tamanhos variados a compactação é mais eficiente, e tem como finalidade aumentar a densidade do solo e conseqüentemente a sua resistência.

A compactação pode ser definida como a densificação do solo por meio da remoção do ar. Em campo, normalmente ela é realizada por rolos compactadores lisos, pé-de-carneiro, de pneus de borracha e vibratórios (DAS, 2007). Ainda para o autor, dois fatores que afetam a compactação do solo, além do teor de umidade, são: tipo do solo e o esforço da compactação. O primeiro tem influência sobre o peso específico seco máximo e o teor de umidade, e é referente a distribuição

granulométrica, a forma dos grãos, o peso específico dos sólidos e as características da argila presentes. Já o segundo, é consequência do esforço de compactação por unidade de volume de solo, à medida que ele aumenta, o peso específico seco máximo também aumenta, enquanto o teor de umidade ótima reduz.

2.4.2 Estabilização granulométrica

Senço (2001) define esta correção como a distribuição do diâmetro dos grãos, combinando as qualidades de diferentes tipos de solo. A reordenação das porções de tamanhos diferentes proporciona um conjunto de massa específica superior aos solos iniciais, pois os vazios dos grãos maiores foram preenchidos pelos grãos médios, e os vazios desses, pelos miúdos. Conseqüentemente, o solo irá apresentar uma maior resistência e menor impermeabilidade, além de exigir um menor consumo de aglomerantes.

Para Villibor (1982) a estabilização granulométrica é a combinação e mistura de diferentes tipos de solo, obtendo um material estável com baixas porcentagens de finos, para que eleve a resistência mecânica do solo.

Para que seja possível avaliar as características obtidas pelo ensaio de cisalhamento: a coesão unitária e o ângulo de atrito interno, Senço (2001) define:

- fração de agregado do solo retida na peneira n° 200 corresponde à areia e pedregulho;
- fração fina ao passante na peneira n° 200, que corresponde ao silte e à argila, e;
- fração ligante ao passante na peneira n° 40, que corresponde ao material utilizado nos ensaios de Limite de Liquidez e Limite de Plasticidade.

A correção granulométrica geralmente é realizada misturando solos pouco plásticos ao solo da região, e tem como finalidade a redução do índice de plasticidade e do limite de liquidez do material (NASCIMENTO, 1970 *apud* COSTA *et al.*, 2018).

2.4.3 Estabilização química

A estabilização química, engloba o processo de mutação permanente da estrutura do solo da região com aditivos, para garantir a capacidade de, por exemplo, melhorar sua trabalhabilidade, reduzir a expansão e obter uma menor

compressibilidade. O resultado desse processo depende da combinação química entre o aditivo e o solo (BRITO, 2017 *apud* MEDINA, 1987).

A estabilização química do solo com a cal para a construção de estradas é largamente difundida, sendo utilizada como base ou sub-base de pavimentos, quando não se obtém as características desejadas de resistência, deformabilidade e permeabilidade para o projeto (CRISTELO, 2001) (INGLES & METCALF, 1972 *apud* JOHANN, 2013).

2.4.3.1 Solo-cal

Na mistura solo-cal acontece duas fases de estabilização. A primeira, ocorre imediatamente após a mistura, com as reações de trocas iônicas e aglomeração-floculação em todos os solos de granulometria fina. Devido à mudança na textura causada na primeira fase, a resistência e a umidade são melhoradas, o que reflete em uma melhor trabalhabilidade e redução da expansão. Essa reação é mais eficiente em solos argilosos, pois a cal reage com a argila produzindo uma camada cimentícia na superfície dos grãos, impedindo a capacidade da argila de reter água e conseqüentemente, aumenta significativamente a resistência da mistura (LITTLE *et al.*, 1995).

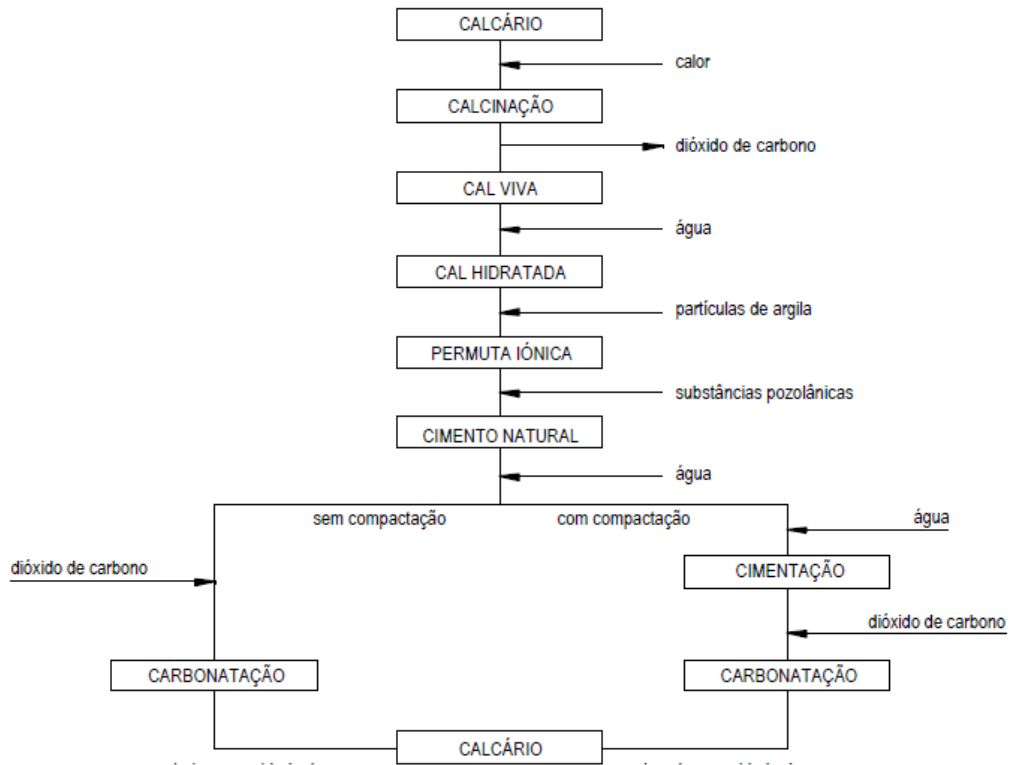
Castro (1995, *apud* JOHANN, 2013) também caracteriza a estabilização química com cal em duas etapas: etapa inicial rápida e outra mais lenta analisando o mesmo efeito em ambas as teorias. Na primeira etapa a cal interage com solos mais finos e ocorrem os fenômenos de troca catiônica, floculação-aglomeração, compressão da dupla camada elétrica, adsorção de cal. Enquanto na segunda etapa ocorre a cimentação (reação pozolânica), aumentando a resistência do solo.

Já Cristelo (2001) diferencia as reações físico-químicas entre o solo e a cal em duas categorias: permuta iônica e reações pozolânicas. A primeira se baseia na troca dos íons que envolvem as partículas da argila por íons de valência superior resultando na floculação, que é responsável pelas propriedades do solo: granulometria, compactação, plasticidade, trabalhabilidade e resistência mecânica imediata. Já a segunda categoria é a de cimentação, os minerais da argila têm capacidade de reagir com a cal, produzindo materiais cimentantes.

Como já citado anteriormente, as reações pozolânicas aumentam a resistência do solo, pois as fontes de sílica, alumina e ferro presentes no solo reagem com a cal e a água (JOHANN, 2013).

A Figura 3 foi retirada da tese de Cristelo (2001) e representa as principais reações físico-químicas ao estabilizar o solo com a cal.

Figura 3 - Esquema das principais reações físico-químicas que ocorrem num solo tratado com cal.



Fonte: Adaptado de Neves (1993 apud CRISTELO, 2001)

2.4.3.2 Solo – resíduo – cal

Em um estudo realizado em Curitiba no estado do Paraná, Dranka (2016) analisou a viabilidade do resíduo de cerâmica vermelha oriundos de demolição, como agregado em sub-bases para pavimentação. Para o autor, a partir dos 10% de resíduo, uma das vantagens foi a diminuição do índice de plasticidade, apresentando um material não plástico, tornando a mistura mais resistente.

Já na compactação, em comparação ao solo puro, obteve-se uma menor expansão para misturas a partir de 15% de telha cerâmica, obtendo um aumento de 40,06% do índice CBR, porém abaixo do padrão necessário normatizado pela NBR 15116 (ABNT, 2004).

No estudo de Hondo (2018) foi analisada a viabilidade do mesmo resíduo utilizado por Dranka (2016), com a adição da cal. Em sua pesquisa, foi notório o

aumento na resistência à compressão simples após 28 dias de cura, em relação ao solo natural, a partir da adição da cal, chegando a 1176,26 kPa na mistura: solo, 15% de telha e 9% de cal.

2.5 Pavimentação

O pavimento tem como função a melhoria operacional do tráfego, a partir de uma superfície mais regular, mais aderente e menos ruidosa. A regularidade da via proporciona uma melhor qualidade de rolamento. Já a aderência reflete uma menor taxa de acidentes na rodovia e, conseqüentemente, um menor custo de manutenção da mesma. A diminuição dos níveis de ruído garante melhor conforto ambiental. Porém, além de garantir um tráfego confortável e seguro, a pavimentação deve garantir o suporte aos esforços de compressão, oriundos do tráfego, além da resistência a deterioração prematura (BALBO, 2007).

Segundo o DNIT (2006) o pavimento constitui um sistema de camadas de espessuras finitas, que integra materiais de diferentes deformabilidades e resistências que estão sujeitas as ações impostas pelo tráfego.

Para Bernucci *et al.* (2008), do ponto de vista estrutural, o pavimento constitui a superfície final de terraplanagem, destinado a resistir aos esforços do tráfego e do clima. No ponto de vista funcional, deve proporcionar boas condições de rolamento, conforto, economia e segurança.

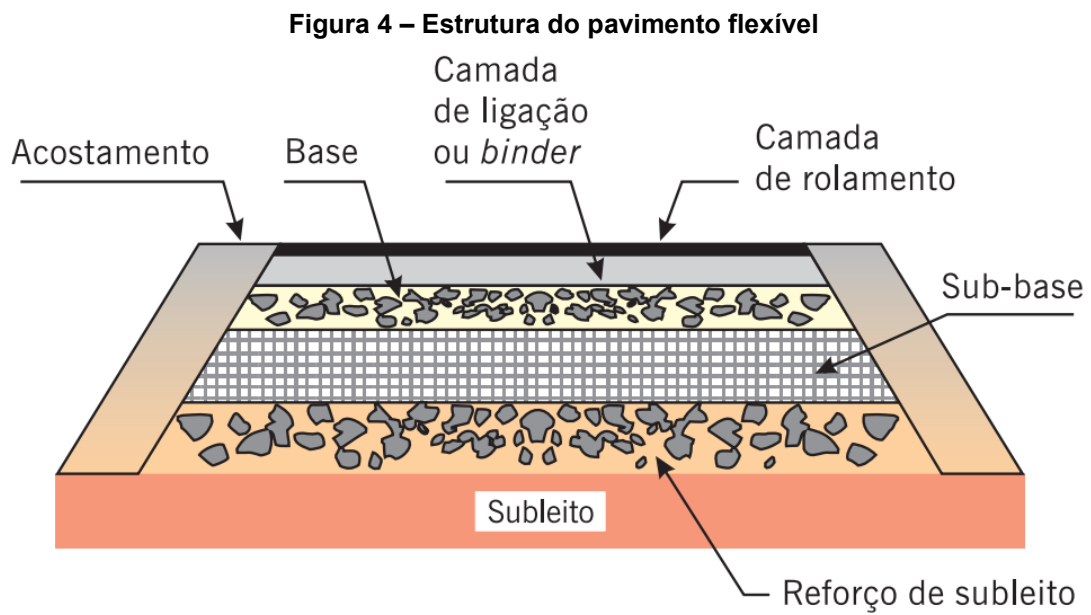
2.5.1 Classificação dos pavimentos

Os pavimentos podem ser classificados como rígidos ou flexíveis. O primeiro é definido por ser pouco deformável, rompem por tração na flexão quando deformado, são compostos de bases rígidas: concreto de cimento; macadame de cimento; e solo cimento. O segundo é dimensionado à compressão e à tração na flexão, e é passível a deformações, até certo limite, são compostos de bases flexíveis: base de solo estabilizado; base de macadame hidráulico; base de brita graduada; base de macadame betuminoso (SENÇO, 1997).

Conforme DNIT (2006) o pavimento flexível é aquele que o carregamento se distribui uniformemente entre as camadas, comumente constituído por uma base de brita. Enquanto no pavimento rígido o carregamento aplicado é absorvido pelo revestimento, devido a sua elevada rigidez em comparação às camadas inferiores.

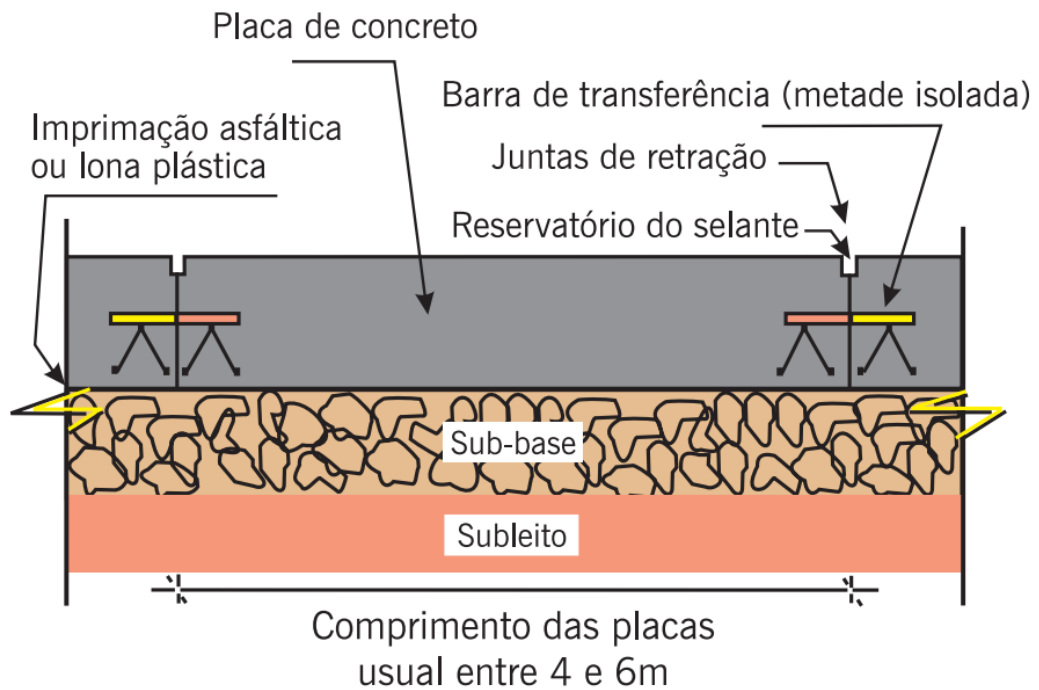
Bernucci *et al.* (2008) classifica os pavimentos pelo tipo de revestimento. O concreto-cimento possui uma placa de cimento Portland como revestimento, podendo ou não possuir armadura. E o pavimento asfáltico é constituído por agregados e ligantes asfálticos.

A Figura 4 exemplifica a estrutura de um pavimento flexível, enquanto a Figura 5 a estrutura do rígido.



Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

Figura 5 – Estrutura de um pavimento rígido

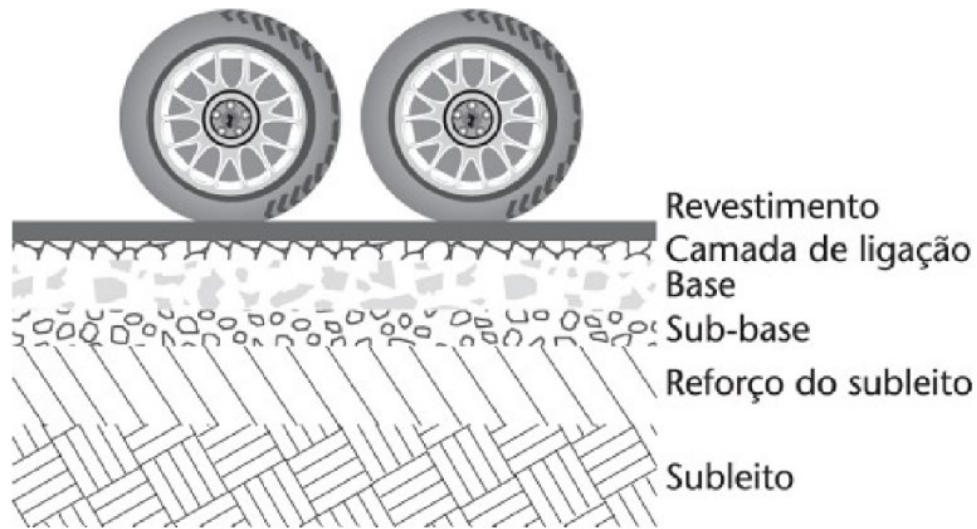


Fonte: Bernucci *et al.* (2008)

2.5.2 Camadas do pavimento

O pavimento é uma estrutura que consiste em camadas compactadas a partir do subleito, sobrepostas umas às outras de diferentes tipos de materiais, concebida para receber e transmitir esforços (BALBO, 2007). Na Figura 6 o autor ilustra a seção transversal do pavimento.

Figura 6 – Camadas genéricas do pavimento



Fonte: Balbo (2007).

- Subleito: Composto pelo terreno de fundação do pavimento, devidamente consolidado e compactado. Nesta camada as cargas impostas na superfície são dispersadas no primeiro metro de profundidade. (BALBO, 2007; DNIT, 2006).
- Reforço do subleito: Tem funções de complemento da sub-base, possui espessura constante, com características geotécnicas inferiores na camada imediatamente acima e superiores à camada abaixo. Comumente empregado para aliviar as tensões sobre um subleito com baixa resistência (BALBO, 2007; DNIT, 2006; SENÇO, 1997).
- Sub-base: O Manual de Pavimentação do DNIT (2006) recomenda que, em circunstâncias técnicas e econômicas, deverá ser executada como camada complementar a base.
- Base: Pode ser constituída por solos estabilizados naturalmente ou quimicamente. É a camada responsável por distribuir os esforços verticais do tráfego. (BALBO, 2007; DNIT, 2006).
- Revestimento: É a camada mais nobre do pavimento, responsável por receber as cargas oriundas do tráfego.

3 MATERIAIS

3.1 Solo

O solo utilizado na pesquisa é o mesmo utilizado por Hondo (2018) – solo fino da formação Guabirota. Coletados do município de Curitiba/PR, em uma obra ao lado da UTFPR, câmpus Ecoville.

Os ensaios necessários para a caracterização física do solo são:

- NBR 6457 (ABNT, 2016) - Amostras de Solo - Preparação para Ensaios de Compactação e Ensaios de Caracterização;
- NBR 6459 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180 (ABNT, 2016) – Solo – Determinação do Limite de Plasticidade;
- NBR 7181 (ABNT, 2016) – Solo – Análise Granulométrica;
- NBR 6458 (ABNT, 2016) - Solo - Grãos de Solo que Passam na Peneira de 4,8 mm - Determinação da Massa Específica;

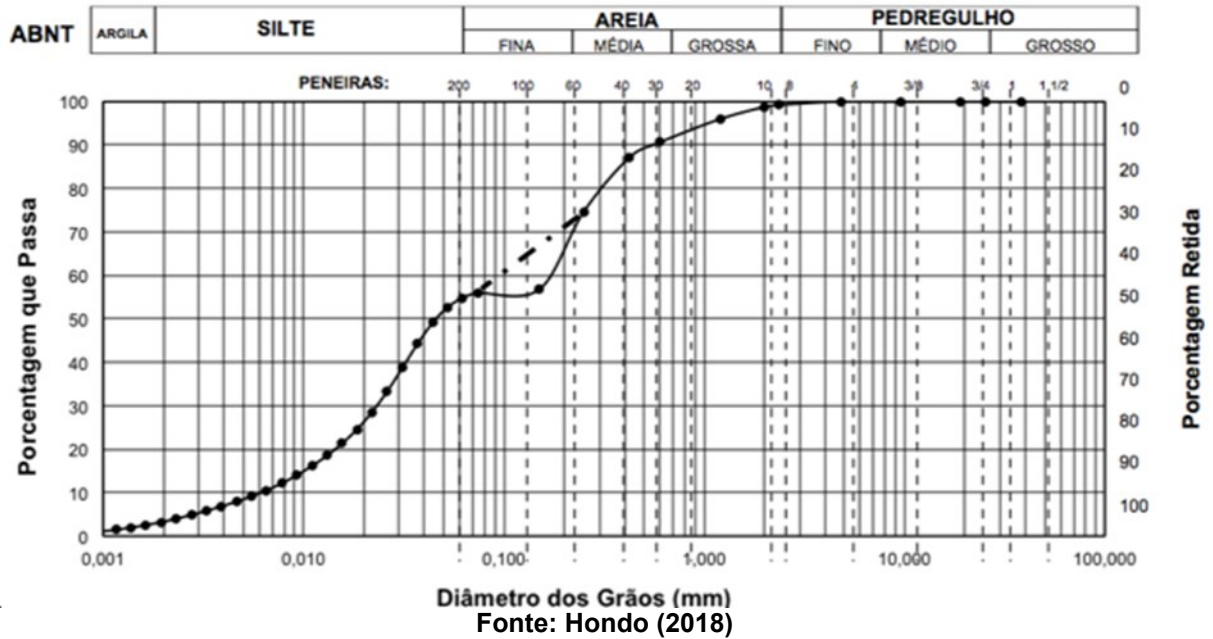
Para a caracterização mecânica foi realizado ensaio de compactação do solo, conforme preconizado na NBR 7182/2016. Para o ensaio de resistência à compressão simples foi utilizada como parâmetro a NBR 12770 (ABNT, 1992).

Hondo (2018) realizou as caracterizações pela análise granulométrica, índices de plasticidade e de determinação do peso específico aparente seco. Também desenvolveu os ensaios de compactação e resistência à compressão simples do solo natural.

3.1.1 Análise de granulometria

Na Figura 7 está representada a curva granulométrica a partir do ensaio de granulometria do solo natural, realizado por Hondo (2018).

Figura 7 – Curva Granulométrica do Solo Natural
Curva Granulométrica



Em sua pesquisa, foi encontrada a seguinte composição:

- 0% de pedregulho;
- 8% de areia grossa;
- 20% de areia média;
- 17% de areia fina;
- 51% de silte, e;
- 4% de argila.

3.1.2 Limites de Atterberg

A Tabela 1 resume os índices obtidos por Hondo (2018) do solo natural para o limite de liquidez, limite de plasticidade e índice de plasticidade.

Tabela 1 – Resultado dos Índices de Plasticidade Obtidos

Mistura	LL (%)	LP (%)	IP (%)
0R0C	51	40	11

Fonte: adaptado de Hondo (2018)

3.1.3 Peso específico real (γ_s)

Abaixo, na Tabela 2, encontram-se os valores obtidos por Hondo (2018) para o peso específico do solo natural.

Tabela 2 – Peso específico do solo natural

Material	γ_s (g/cm ³)
Solo	2,72

Fonte: Adaptado de Hondo (2018)

3.1.4 Compactação

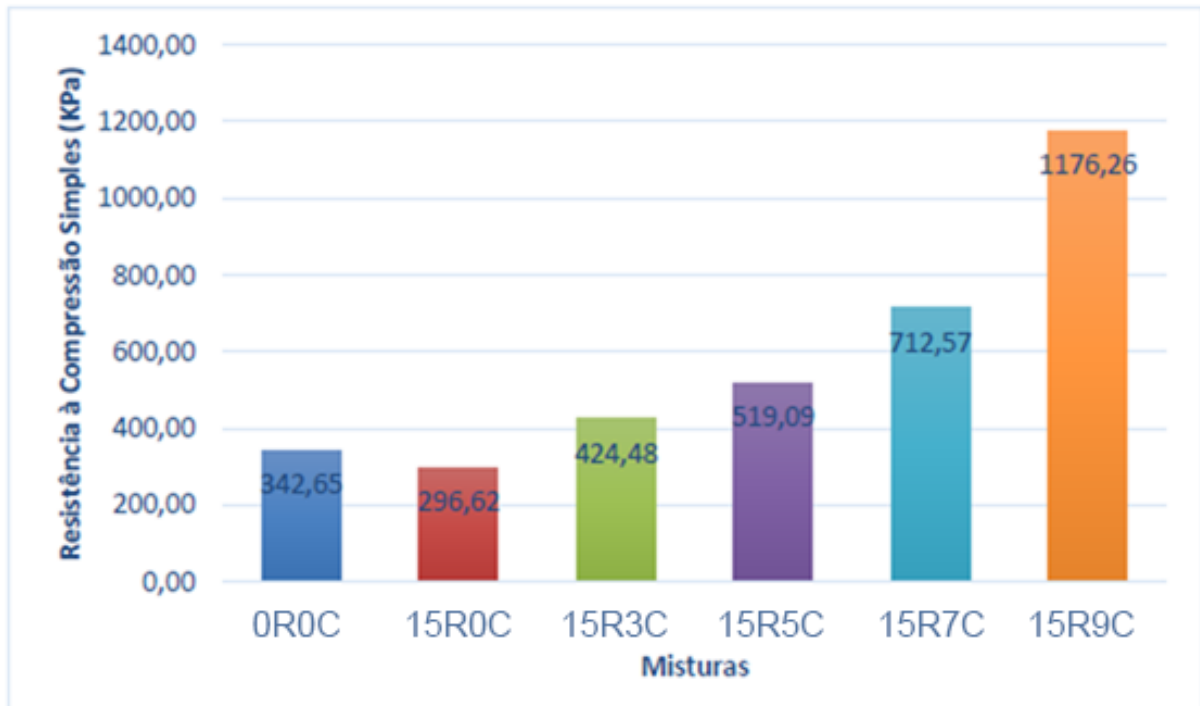
No ensaio de compactação, peso específico aparente seco (γ_d) e a umidade ótima ($W_{ótima}$) obtidos por Hondo (2018) foram:

- $\gamma_d = 14,70 \text{ kN/m}^3$;
- $W_{ótima} = 27,8\%$.

3.1.5 Compressão simples

O valor médio de resistência à compressão simples do solo natural obtido por Hondo (2018) foi de 342,65 kPa e está indicado na Figura 8 como 0R0C. Para análise posterior, também será utilizada como parâmetro o valor para 15% de cerâmica e 5% de cal, indicados como 15R5C, essa mistura resultou em um valor de 519,09 kPa.

Figura 8 – Resistência à compressão simples do solo natural



Fonte: Hondo (2018)

3.2 Resíduo de cerâmica vermelha

A telha cerâmica é a mesma utilizada por Dranka (2016). Obtidas de uma residência em demolição, são telhas do modelo francesa. O material foi preparado com o auxílio de um moinho de resíduos de construção até obter-se a uniformidade dos grãos.

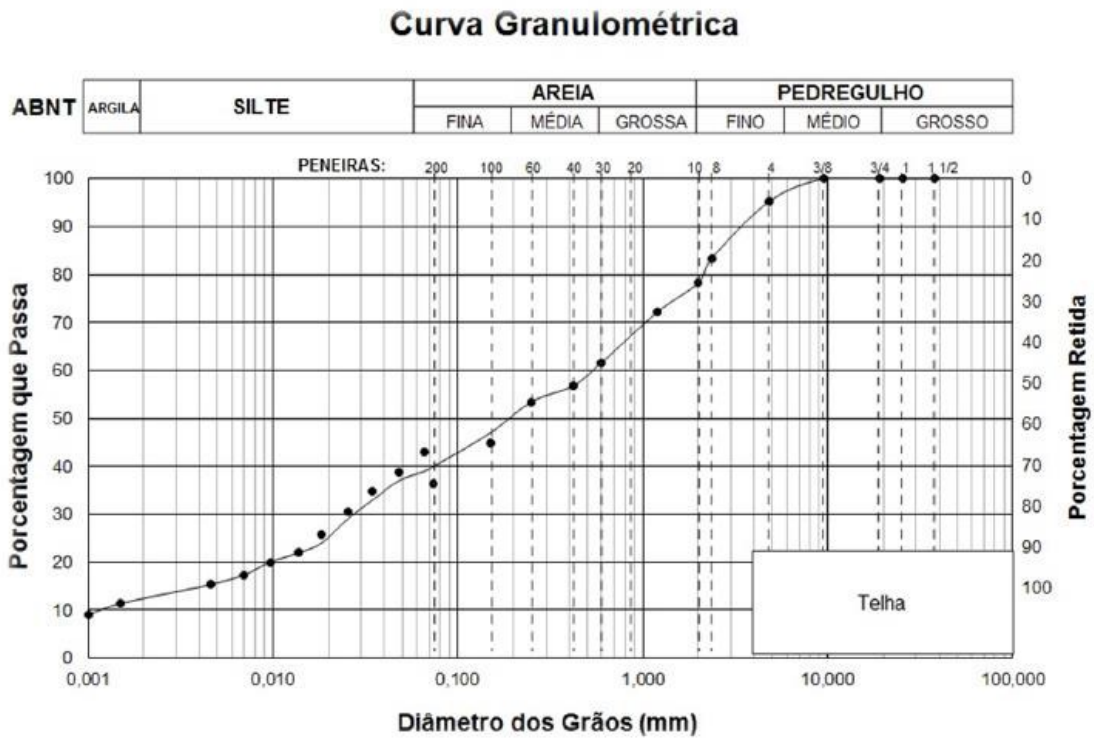
Os ensaios realizados para a caracterização física das telhas foram:

- DNER – ME 051/94 – Análise Granulométrica;
- DNER – ME 093/94 – Determinação da densidade real;
- NBR 6459 (ABNT, 2016) – Determinação do Limite de Liquidez;
- NBR 7180 (ABNT, 2016) – Determinação do Limite de Plasticidade;

3.2.1 Ensaio de granulometria

A Figura 9 apresenta a curva granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha obtida por Dranka (2016)

Figura 9 – Curva Granulométrica do Resíduo de Telha Cerâmica



A composição encontrada foi de:

- 22% correspondente a pedregulho;
- 17% correspondendo a areia grossa;
- 12% correspondente a areia média;
- 8% correspondente a areia fina;
- 29% correspondente a silte, e;
- 12% correspondente a argila.

3.2.2 Determinação da densidade real dos grãos

O G_s (densidade real dos grãos) obtido por Dranka (2016), para a telha pura foi de 2,57, apresentando um valor menor que o do solo.

3.2.3 Índices de plasticidade

Segundo Dranka (2016) não foi possível realizar o ensaio do limite de liquidez da telha pura, devido à dificuldade de realização. Já para o limite de plasticidade

obteve-se o valor de 36%, mas devido ao primeiro ensaio, o material foi considerado não plástico.

3.3 Cal

A cal utilizada no trabalho é do tipo hidratada CH III da ENGECAL, conforme Fotografia 1.

Fotografia 1 – Cal hidratada CH-III ENGECAL



Fonte: Autoria própria (2022)

A caracterização da cal fornecida pela ENGECAL (2018) está em conformidade com as exigências da NBR 7175 (ABNT, 2003), constituída de uma mistura de hidróxido de cálcio e magnésio, possui boa capacidade de aglomeração e plasticidade.

3.4 Água

Para os ensaios de caracterização foi utilizada água destilada, conforme especificada pelas normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Para as moldagens dos corpos de prova foi utilizada água potável.

4 MÉTODOS

Para este estudo, na realização dos ensaios, será variado a parcela de resíduo de cerâmica vermelha e cal, essas misturas estão contempladas na Tabela 3. Os percentuais foram escolhidos para que fosse possível atribuí-los a uma análise estatística de superfície.

Tabela 3 – Tabela de Composição das Porcentagens de RCV e Cal, em relação ao solo seco

MISTURA	COMPOSIÇÃO	
	RCV (%)	Cal (%)
10R0C	10	0
10R10C	10	10
20R2,5C	20	2,5
20R5C	20	5
20R7,5C	20	7,5
25R5C	25	5
30R0C	30	0
30R10C	30	10

Fonte: Autoria própria (2022)

4.1 Ensaio de caracterização

Com o intuito de caracterizar as misturas trabalhadas, foram realizados os ensaios de limite de liquidez e de plasticidade (limites de Atterberg) que são preconizados pela NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente.

Todos os ensaios foram realizados no laboratório de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

4.2 Ensaio de Compactação

A NBR 7182/2016 descreve os procedimentos para a realização do ensaio de compactação, a partir da relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo, quando compactado.

Este procedimento determina o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima do solo, que será reproduzido para a amostra do solo natural e fração dos resíduos.

Para esse estudo será utilizado a energia normal de compactação com reuso da mistura e com secagem prévia. No Quadro 1 estão especificadas as características inerentes dessa energia.

Quadro 1 – Energia Normal de Compactação

Cilindro	Características inerentes a cada energia de compactação	Energia Normal
Pequeno	Soquete	Pequeno
	Número de camadas	3
	Número de golpes por camada	26
Grande	Soquete	Grande
	Número de camadas	5
	Número de golpes por camada	12
	Altura do disco espaçador	63,5

Fonte: adaptado de NBR 7182 (ABNT, 2016)

Após a plotagem das curvas de compactação Proctor a energia normal, foi realizada a moldagem dos corpos de prova.

4.3 Determinação da Amostra Mínima

A amostra mínima a ser ensaiada, a fim de garantir estatisticamente a distribuição e confiabilidade dos resultados, dentro de um nível de confiança de 95% (DAL MOLIN *et al.*, 2005), foi determinada pela Equação 1.

$$n = z_{\alpha/2}^2 \cdot \frac{CV^2}{E_r^2} \quad (1)$$

Onde:

n = número de repetições;

Er = erro relativo admitido da estimativa, fixado em 10%;

CV = coeficiente de variação da amostra;

za/2 = valor tabelado que, para $\alpha = 5\%$ de significância possui o valor de 1,96.

Assumindo como viável um CV de 10%, tem-se $n = 1,962 = 3,84$ ou seja, com no mínimo 4 exemplares é possível obter respostas a um nível estatístico de confiança de 95%.

4.4 Moldagem dos corpos de prova.

Foram moldados 4 corpos de prova para cada mistura, totalizando 32 corpos de prova.

A partir dos dados do peso específico aparente seco e teor de umidade do solo natural obtidos por Hondo (2018), foi possível obter o teor de umidade natural através da Equação 2.

$$\rho_n = \rho_{dm\acute{a}x} \times (1 + W_{\acute{o}tima}) \quad (2)$$

Sendo:

ρ_n = peso específico natural, em gf/cm³;

$\rho_{dm\acute{a}x}$ = peso específico aparente seco, em g/cm³;

$W_{\acute{o}tima}$ = umidade ótima, em porcentagem.

Para a realização do cálculo da massa úmida, pela Equação 3, foi aferido as dimensões dos corpos de prova, obtendo uma altura de 10 cm e diâmetro de 5 cm, na Fotografia 2 apresenta-se o molde utilizado.

$$P = \rho_n \times V_{cp} \quad (3)$$

Sendo V_{cp} o volume do molde cilíndrico, em cm³.

Fotografia 2 – Molde cilíndrico desenvolvido para a confecção dos corpos de prova



Fonte: Autoria Própria (2022)

A quantidade de material necessária para cada mistura está resumida na Tabela 4, a quantidade de cal foi calculada em relação ao peso da mistura solo-resíduo, já o resíduo foi substituído na sua porcentagem equivalente à massa do solo seco, enquanto a água foi calculada pelo peso total obtido.

Tabela 4 – Dosagem dos materiais necessários para a moldagem dos corpos de prova

Mistura	10R0C	10R10C	20R2,5C	20R5C	20R7,5C	25R5C	30R0C	30R10C
RCV (g)	36,89	36,89	73,77	73,77	73,77	92,22	110,66	110,66
Solo (g)	331,99	331,99	295,10	295,10	295,10	276,66	258,21	258,21
Cal (g)	-	36,89	9,22	18,44	27,67	18,44	-	36,89
água (g)	102,55	112,80	105,11	107,67	110,24	107,67	102,55	112,80

Fonte: Autoria Própria (2022)

Para a confecção dos corpos de prova, inicialmente foi realizada a mistura dos materiais, que foram previamente secos em estufa a, aproximadamente, 100° por pelo menos 24h, após atingir a homogeneidade do material foi adicionada água destilada e iniciou-se novamente a mistura até obter uma massa homogênea.

Preparada a mistura, foram separadas e pesadas três partes iguais para compor as camadas dos corpos de prova, com aproximadamente 122,96g. Também foram retiradas três porções da mistura excedente para se obter o teor de umidade.

Com auxílio da prensa hidráulica e soquetes adaptados (Fotografia 3) cada camada foi compactada, para melhor aderência entre elas em cada etapa de compactação foi escarificado o topo da camada.

Fotografia 3 – Soquetes adaptados



Fonte: Aatoria própria (2022)

Após a compactação, utilizou-se um extrator para remover o corpo de prova do molde e em seguida aferiu-se seu peso, altura e diâmetro. Para garantir que o corpo de prova mantivesse sua umidade inicial, todos foram embalados em plástico filme e identificados, conforme Fotografia 4.

Fotografia 4 – Corpos de prova moldados e embalados.



Fonte: Aatoria própria (2022)

Os corpos de prova foram conservados em câmara úmida para iniciar o tempo de cura de 28 dias.

4.5 Ensaio de resistência à compressão simples

Os ensaios de resistência à compressão simples foram realizados a partir dos procedimentos descritos na NBR 12770/1992.

Após 28 dias na câmara úmida, os corpos de prova foram colocados na prensa para a aplicação do carregamento para obtenção dos valores das cargas de ruptura.

4.6 Análise Estatística dos Dados

4.6.1 Análise de Dados Espúrios (*Outliers*)

Para detectar *outliers* em uma amostra de comportamento normal e eliminar dados espúrios (*outliers*) de maneira racional adota-se o critério de Pierce. O critério segue o princípio de que as observações devem ser rejeitadas no momento em que os desvios reais da média, obtidos por mantê-los, é menor do que os desvios obtidos por sua rejeição, multiplicando pela probabilidade de fazer tantas e não mais, observações normais. O objetivo dessa técnica é gerar probabilidades de erro que ocorrem no sistema onde todas as n observações são mantidas *versus* as k amostras rejeitadas. Ele então rejeita k observações e verifica se a amostra é mais próxima da normal que a anterior. O critério de Pierce é matematicamente complexo de aplicar, sendo assim, Gould modificou o método para tabelas derivadas das equações de Pierce, deixando-o mais fácil de empregar (ROSS, 2004).

A Tabela 5 apresenta os resultados obtidos pelo critério de Pierce (R) para 10 amostras, sendo que delas, 5 no máximo são duvidosas.

Tabela 5 – Tabela de Pierce – Valores de R
Observações Duvidosas

n	1	2	3	4	5
3	1,196				
4	1,383	1,078			
5	1,509	1,200			
6	1,610	1,299	1,099		
7	1,693	1,382	1,187	1,022	
8	1,763	1,453	1,261	1,109	
9	1,824	1,515	1,324	1,178	1,045
10	1,878	1,570	1,380	1,237	1,114

Fonte: Ross, 2004

Seguindo a Tabela 5, R representa a razão do máximo desvio permitido de um resultado em relação à média, pelo desvio padrão da amostra, como apresentado na Equação 4.

$$R = \frac{|x_i - x_n|_{max}}{\sigma} \quad (4)$$

Onde:

- x_i = valor de cada resultado individual;
- x_m = média das amostras;
- σ = desvio padrão.

Para determinar se os elementos devem ser rejeitados, é necessário seguir uma metodologia, onde:

- a) Calcula-se a média e o desvio padrão dos conjuntos de dados;
- b) Obter, na Tabela de Pierce, o valor de R em relação ao número de medições realizadas;
- c) Calcular o máximo desvio permitido $|x_i - x_m|_{max}$, devendo ser realizado para todos os dados suspeitos;
- d) Eliminar as medições suspeitas se: $|x_i - x_m| > |x_i - x_m|_{max}$;
- e) Se essa análise resultar na rejeição de uma medida, assumir o caso de duas observações duvidosas, mantendo os valores originais da média e desvio padrão e o número original de medições;

- f) No caso de mais de um elemento ser rejeitado, assumir o próximo maior valor das observações duvidosas, preservando os valores originais de média, desvio padrão e número original de medições;
- g) Refazer os cálculos, aumentando sequencialmente o número de possibilidades de medições duvidosas, até o ponto em que não existam mais elementos a serem eliminados;
- h) Com os dados analisados restantes, calcular o novo valor de média e desvio padrão da amostra.

4.6.2 Teste de Hipóteses

Testes de hipóteses correspondem a procedimentos estatísticos que se baseiam na análise de uma amostra a partir da teoria de probabilidades e que buscam avaliar parâmetros desconhecidos de uma população. Assim, são formuladas duas hipóteses:

- Hipótese nula (H_0): hipótese que representa a ausência do efeito que se deseja verificar;
- Hipótese alternativa (H_1): hipótese que o investigador deseja verificar (efeito do tratamento).

4.6.3 Análise de Variância – Anova

A verificação da existência de diferenças reais entre os tratamentos, composições e métodos adotados neste trabalho foi feita mediante a Análise da Variância (ANOVA), que é o processo de decomposição da variação total nas componentes explicadas e não explicadas ou residuais. Esta decomposição segue a disposição apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Análise de Variância

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrados Médios	Função F de Snedecor
Explicada	$\sum (Y_{est} - Y_{med})^2$	K	$\frac{\sum (Y_{est} - Y_{med})^2}{k}$	
Não Explicada	$\sum (Y_{est} - Y_{est})^2$	(n - k - 1)	$\frac{\sum (Y_{est} - Y_{est})^2}{n - k - 1}$	$\frac{\frac{\sum (Y_{est} - Y_{med})^2}{k}}{\frac{\sum (Y_{est} - Y_{est})^2}{n - k - 1}}$
Total	$\sum (Y - Y_{med})^2$	(n-1)		

Fonte: Adaptado de Gaudio 2001

4.6.4 Valor-p

O Valor-p é a probabilidade de se obter uma estatística do teste (por exemplo o valor da função F da Anova) que seja igual ou mais extrema que a estatística encontrada na amostra observada, sob a suposição que a hipótese nula é verdadeira.

Então:

- Se o valor-p é menor que o nível de significância α , rejeita-se a hipótese nula (H_0);
- Se o valor-p é maior que o nível de significância α , não se rejeita a hipótese nula (H_0).

Neste trabalho, para determinação da Análise de Variância foi utilizado o software Statgraphics® Centurion XVI.

Uma vez que as variâncias apresentassem diferenças significativas, é importante determinar quais grupos de médias, em particular, são importantes. Para tal análise utilizou-se, neste trabalho, o procedimento denominado Multiple Range Test, através do teste de Tukey-Kramer, mediante o uso do mesmo software.

A determinação dos modelos estatísticos foi obtida através de Análise Multivariada, tipo regressão múltipla. Para essas determinações foi utilizado o software Infer32.

A construção das superfícies de resposta foi efetuada com o software Statistica 6.0.

5 RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão analisados os resultados dos ensaios obtidos a partir da estabilização do solo com o resíduo de cerâmica vermelha e a cal hidratada em pó, associadas a porcentagens pré-definidas.

Ressalta-se que para a obtenção da curva de respostas da resistência à compressão simples foi adotado o valor obtido por Hondo, em 2018, para as porcentagens de 15% de RCV e 5% de cal.

5.1 Limites de Atterberg

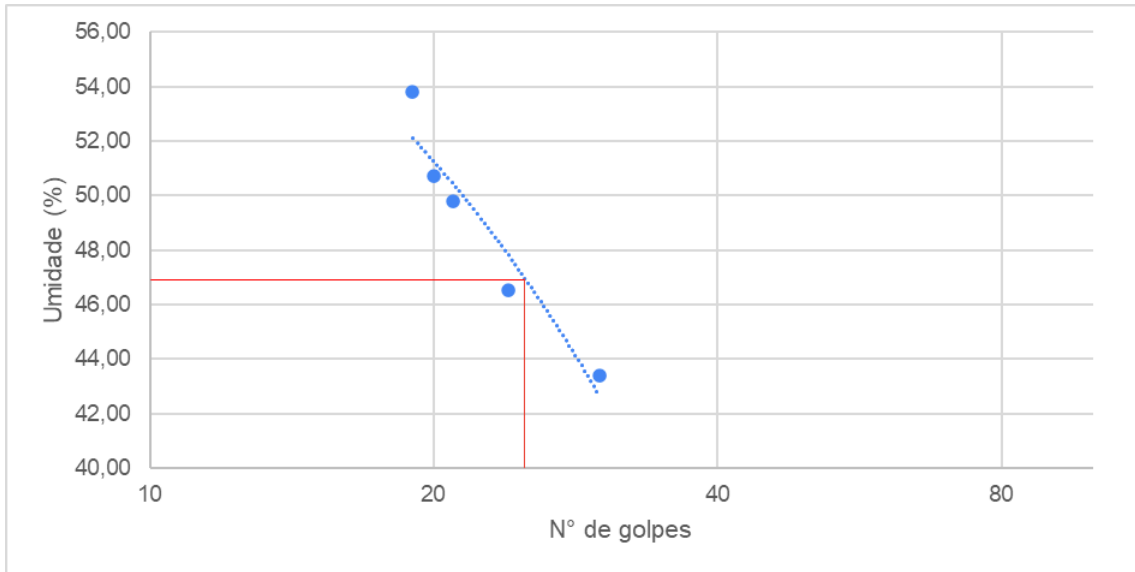
Os dados obtidos no ensaio de determinação do limite de liquidez estão resumidos na Tabela 7 para cada mistura solo-cal-RCV. No APÊNDICE A estão dispostas todas as informações coletadas durante o ensaio.

Tabela 7 – Resumo dos dados obtidos do ensaio de LL

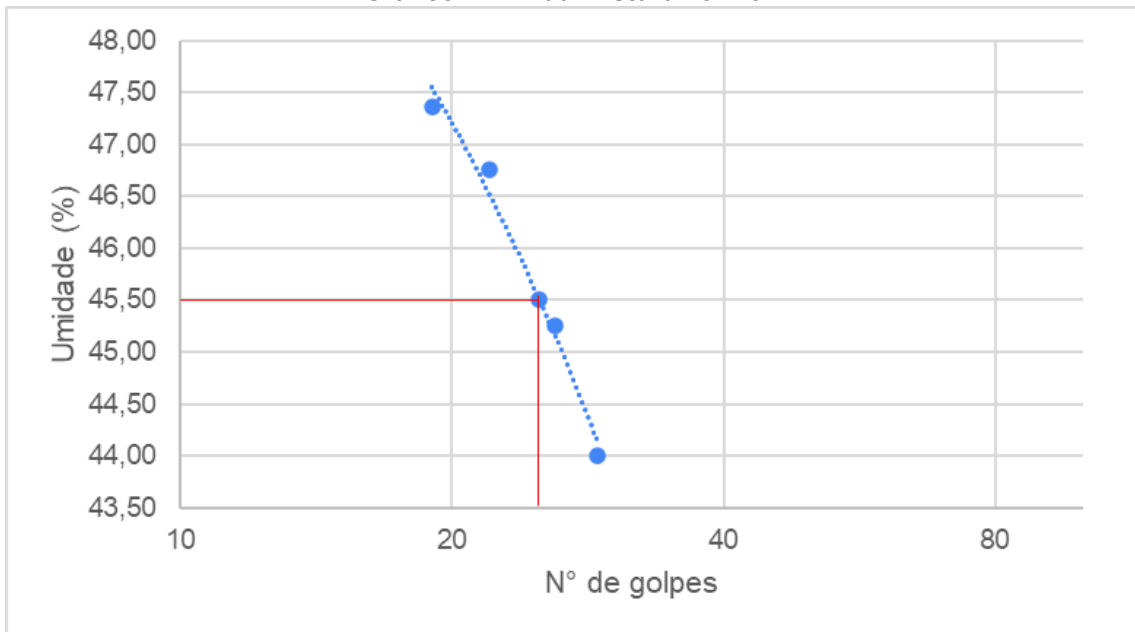
Mistura	LL _{médio} (%)	R ²	Equação da reta	LL _{25 golpes} (%)
10R0C	48,85	R ² = 0,9113	y = -0,8623x + 68,512	47
10R10C	45,78	R ² = 0,9831	y = -0,3409x + 54,027	46
20R2,5C	48,86	R ² = 0,9067	y = -0,3398x + 56,251	48
20R5C	48,63	R ² = 0,9625	y = -0,4972x + 60,762	48
20R7,5C	46,57	R ² = 0,9778	y = -0,3061x + 52,663	45
25R5C	44,52	R ² = 0,9423	y = -0,168x + 48,42	44
30R0C	44,60	R ² = 0,9327	y = -0,1519x + 47,924	44
30R10C	42,82	R ² = 0,9497	y = -0,035x + 43,94	43

Fonte: Autoria própria (2022)

Os traçados das curvas de fluidez foram obtidos a partir do teor de umidade em função do número de golpes, estão demonstradas do Gráfico 1 ao Gráfico 8, juntamente com a linha de apoio aos 25 Golpes.

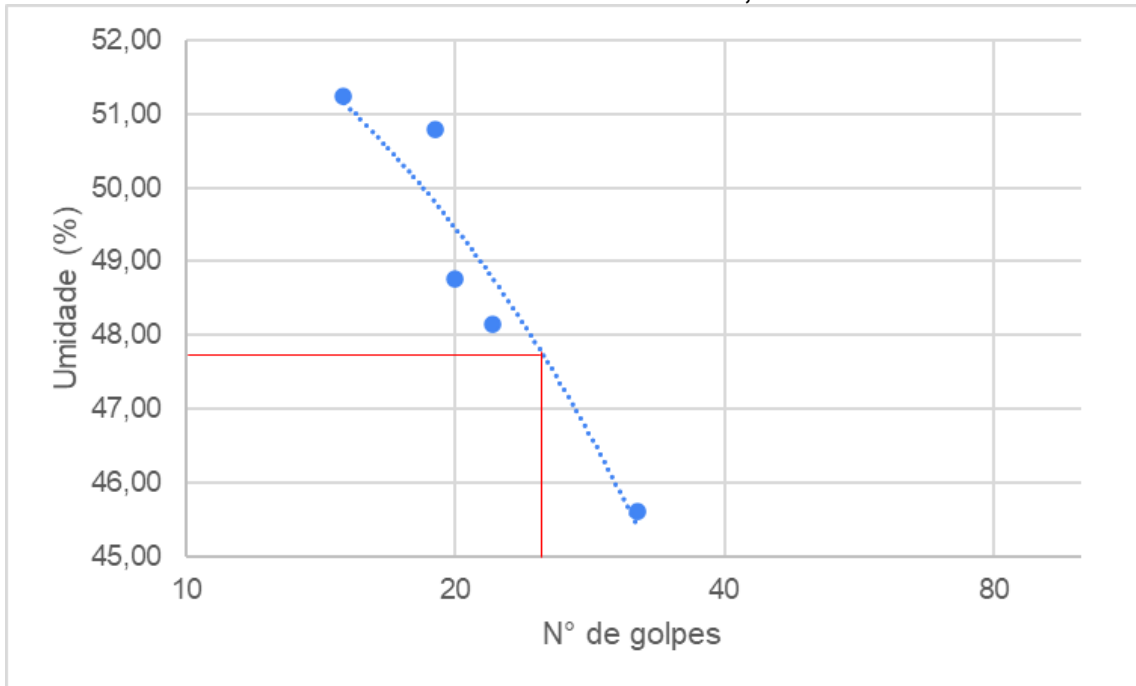
Gráfico 1 - LL da mistura 10R0C

Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 2 - LL da mistura 10R10C

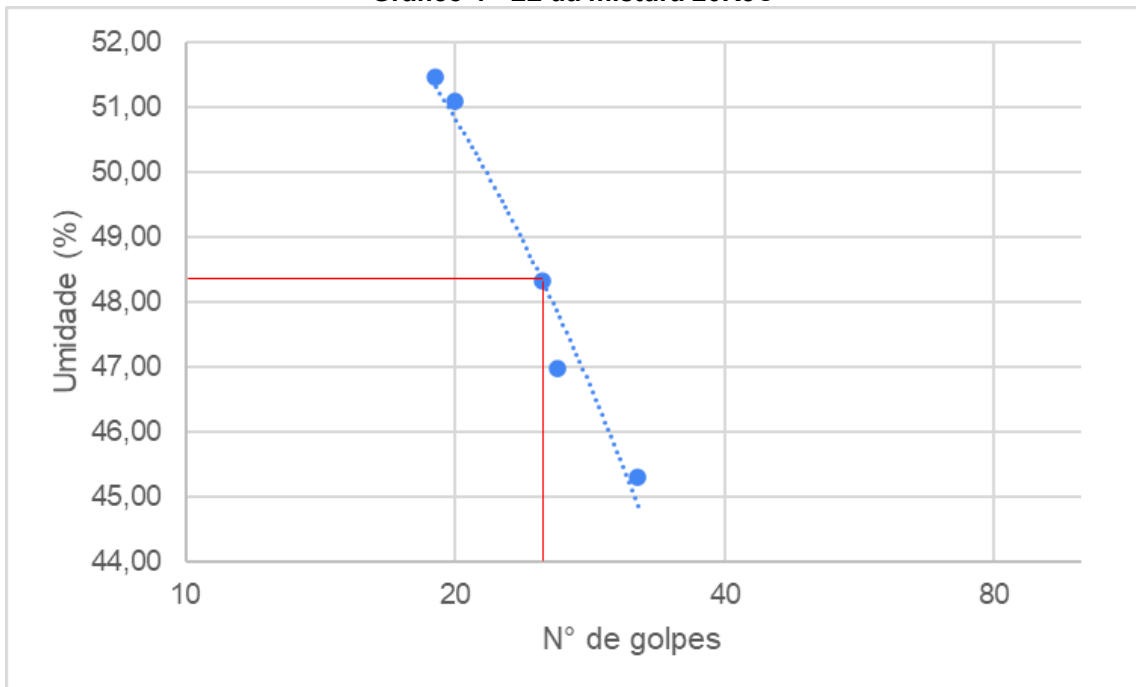
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 3 - LL da mistura 20R2,5C



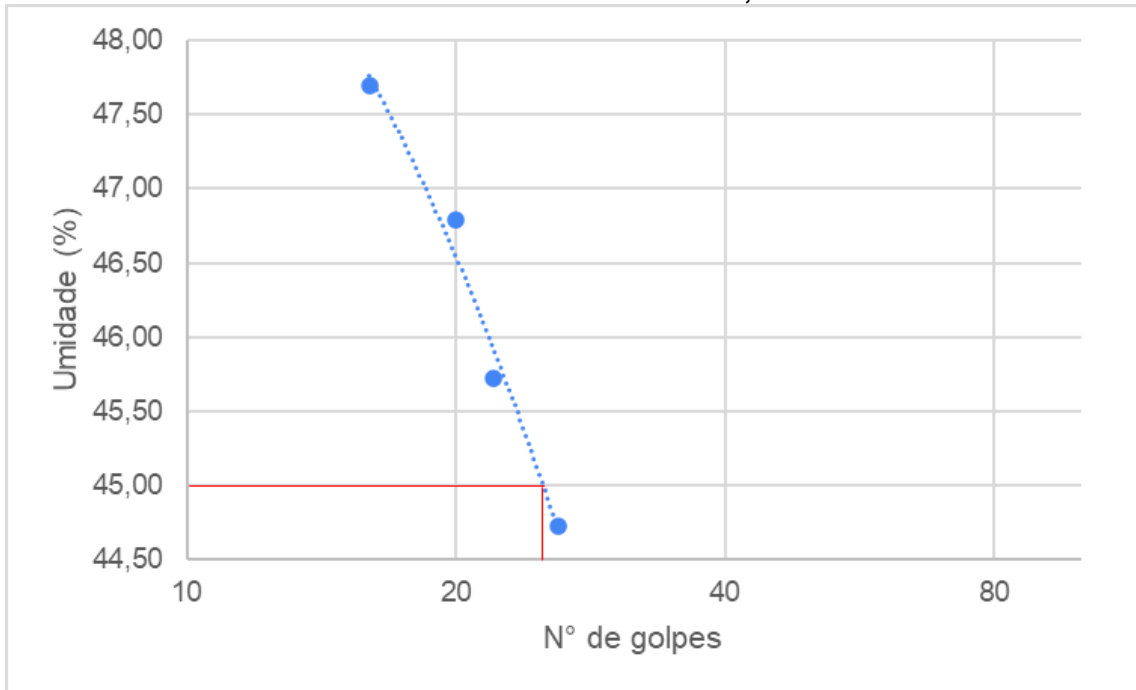
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 4 - LL da mistura 20R5C



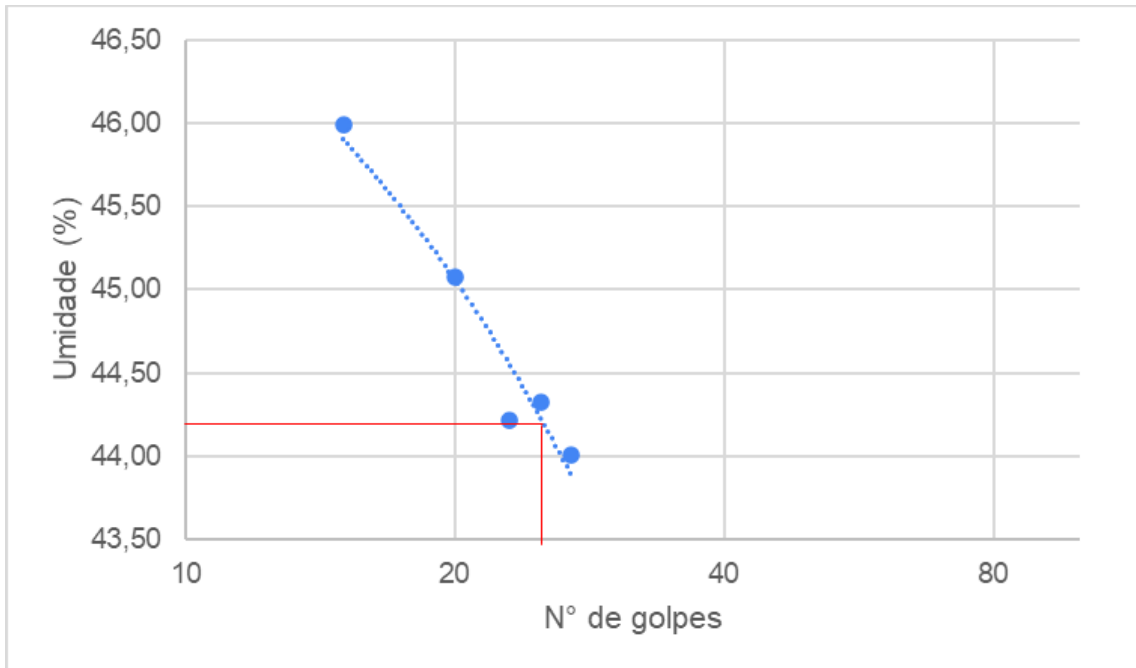
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 5 - LL da mistura 20R7,5C



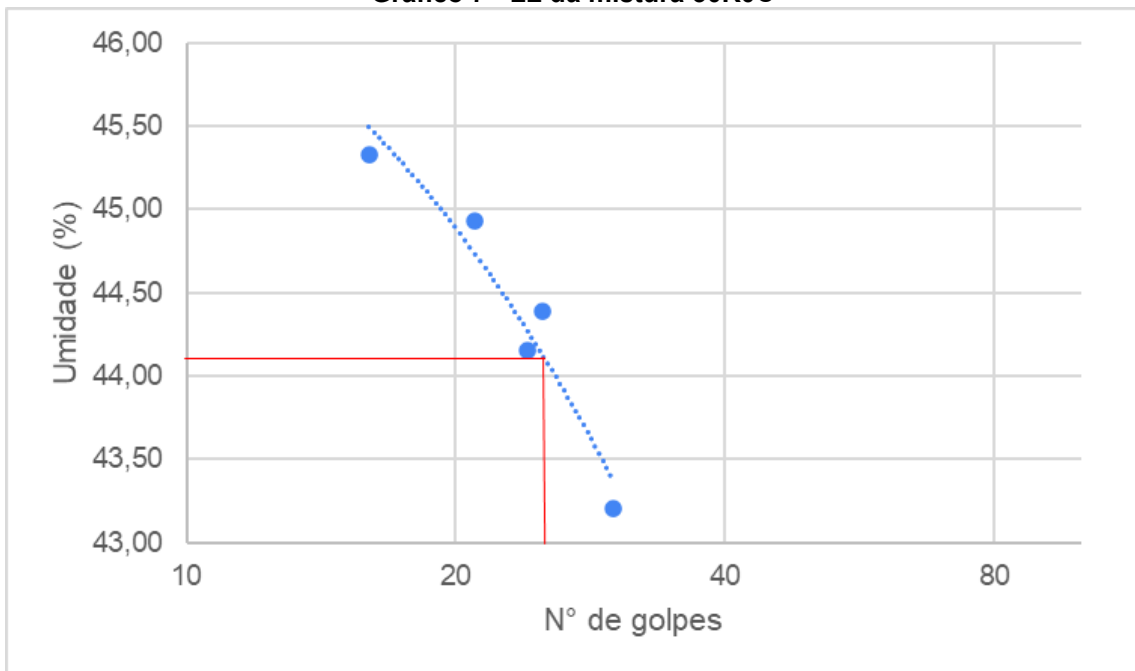
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 6- LL da mistura 25R5C



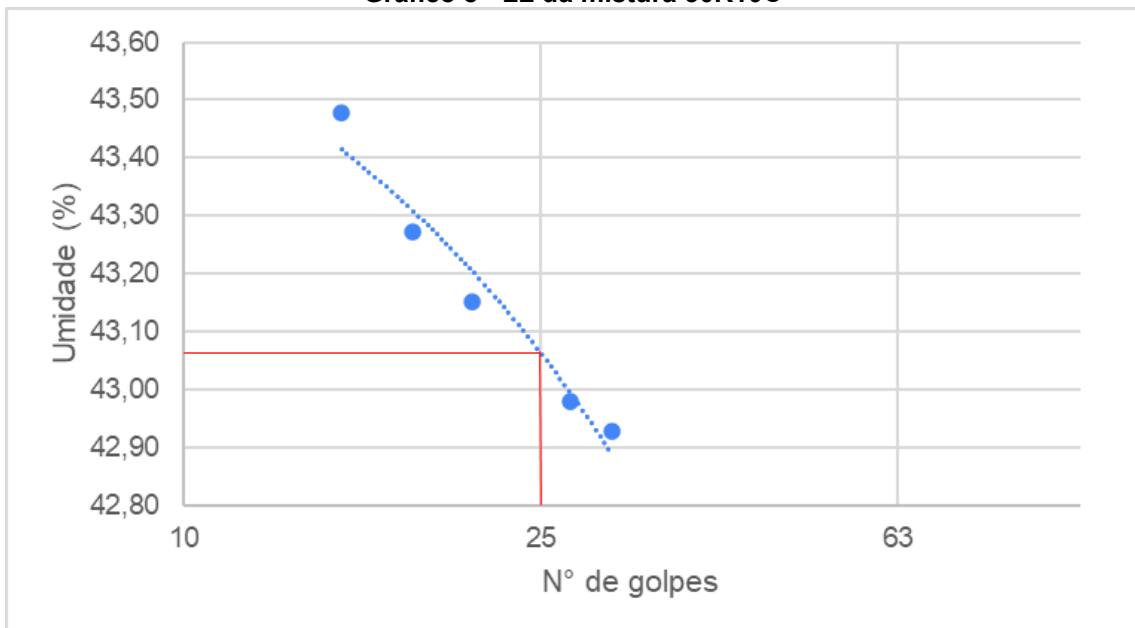
Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 7 - LL da mistura 30R0C



Fonte: Autoria própria (2022)

Gráfico 8 - LL da mistura 30R10C



Fonte: Autoria própria (2022)

Os dados obtidos no ensaio de LP estão dispostos no APÊNDICE B. Todos os valores de umidade das misturas não diferem de 5% das suas respectivas médias, conforme NBR 7180/2016. Na Tabela 8 estão resumidos os valores do limite de plasticidade encontrados para cada mistura.

Tabela 8 – Resumo dos valores obtidos para o ensaio de LP

Mistura	LP (%)
10R0C	36
10R10C	37
20R2,5C	42
20R5C	44
20R7,5C	41
25R5C	39
30R0C	32
30R10C	34

Fonte: Autoria própria (2022)

A tabela 9 apresenta um resumo dos teores de umidade obtidos para o LL e LP, o primeiro correspondente ao teor de umidade aos 25 golpes e os resultados foram aproximados para o número inteiro mais próximo. Já o segundo corresponde à média dos teores de umidade, não divergindo em 5% desse valor.

Tabela 9 - Resumo dos ensaios de LL e LP e a determinação do IP

Mistura	10R0C	10R10C	20R2,5C	20R5C	20R7,5C	25R5C	30R0C	30R10C
LL	47	46	48	48	45	44	44	43
LP	36	37	42	44	41	39	32	34
IP	11	8	5	4	4	5	12	9

Fonte: Autoria própria (2022)

Segundo Rissardi (2016) à medida que se adiciona cal ao solo sua plasticidade diminui. Pode-se verificar que nas misturas com 10%, 20% e 30% de resíduo o índice de plasticidade teve uma redução.

As misturas 10R0C, 10R10C, 30R0C e 30R10C podem ser consideradas de plasticidade média enquanto as outras são classificadas como pouco plásticas (VARGAS, 1977). A classificação dos solos tropicais estão no Quadro 2.

Quadro 2 – Classificação dos solos em função do IP

IP	Classificação
IP = 0	Não Plásticos
1 < IP ≤ 7	Pouco Plásticos
7 < IP ≤ 15	Plasticidade Média
IP ≥ 15	Muito Plástico

Fonte: Adaptado de Vargas (1977)

Em mecânicas dos solos, a plasticidade é definida como a propriedade que o solo apresenta de sofrer deformações muito grandes sem fissurar e sem que seu volume se altere (SENÇO, 1997). Sendo assim, quanto maior o IP maior o recalque que o solo sofrerá e, conseqüentemente, menor sua resistência à compressão.

5.2 Compactação

O ensaio de compactação foi executado conforme NBR 7182/2016, para proctor normal. O cilindro utilizado possui uma massa de 2,435 kg, altura de 12,73cm, diâmetro de 10,09 e volume de 1017,89 cm³.

Para este ensaio realizou-se apenas a mistura 20R0C, já que em outros trabalhos seus valores não sofreram uma alteração significativa, optou-se por realizar o ensaio com apenas uma mistura para conferência, seus dados estão dispostos na Tabela 10, sendo γ_n e γ_d o peso específico úmido e o peso específico aparente seco, respectivamente.

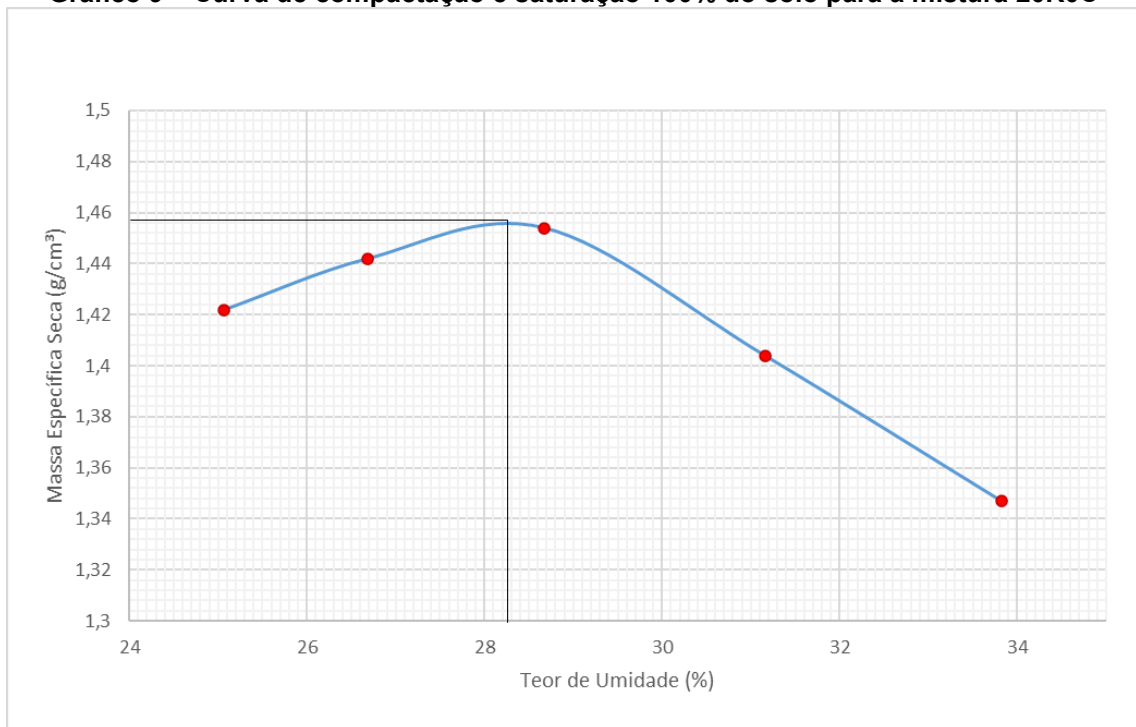
Para o cálculo da densidade real dos grãos foi realizada uma média ponderada das densidades reais do solo natural e do resíduo de cerâmica vermelha, e obteve-se $\gamma_s = 2,70\text{g/cm}^3$.

Tabela 10 – Dados obtidos no ensaio de compactação para a mistura 20R0C

ID	Umidade (%)	Peso do CP (g)	γ_n (g/cm ³)	γ_d (g/cm ³)
CP1	25,07	1810	1,778	1,422
CP2	26,69	1860	1,827	1,442
CP3	28,67	1905	1,872	1,454
CP4	31,16	1875	1,842	1,404
CP5	33,83	1835	1,803	1,347
Médias	29,08	1857	1,824	1,414

Fonte: Autoria própria (2022)

Com base nos valores da Tabela 10 foi possível traçar a curva de compactação, desta mistura, representada no Gráfico 9.

Gráfico 9 – Curva de compactação e saturação 100% do solo para a mistura 20R0C

Fonte: Autoria própria (2022)

No Gráfico 9 observa-se que o teor de umidade ótima é de 28,3% e o peso específico aparente seco máximo é de 1,45 g/cm³.

Em sua pesquisa Hondo (2018) obteve uma umidade do solo natural equivalente a 27,8% e peso específico aparente seco de 1,470 g/cm³, como a divergência entre esses dois parâmetros foi insignificante, optou-se por utilizar os parâmetros do solo natural para a moldagem dos corpos de prova – umidade ótima e peso específico aparente seco - dispensando a necessidade de dar continuidade ao ensaio de compactação para as outras misturas.

5.3 Resistência à compressão simples

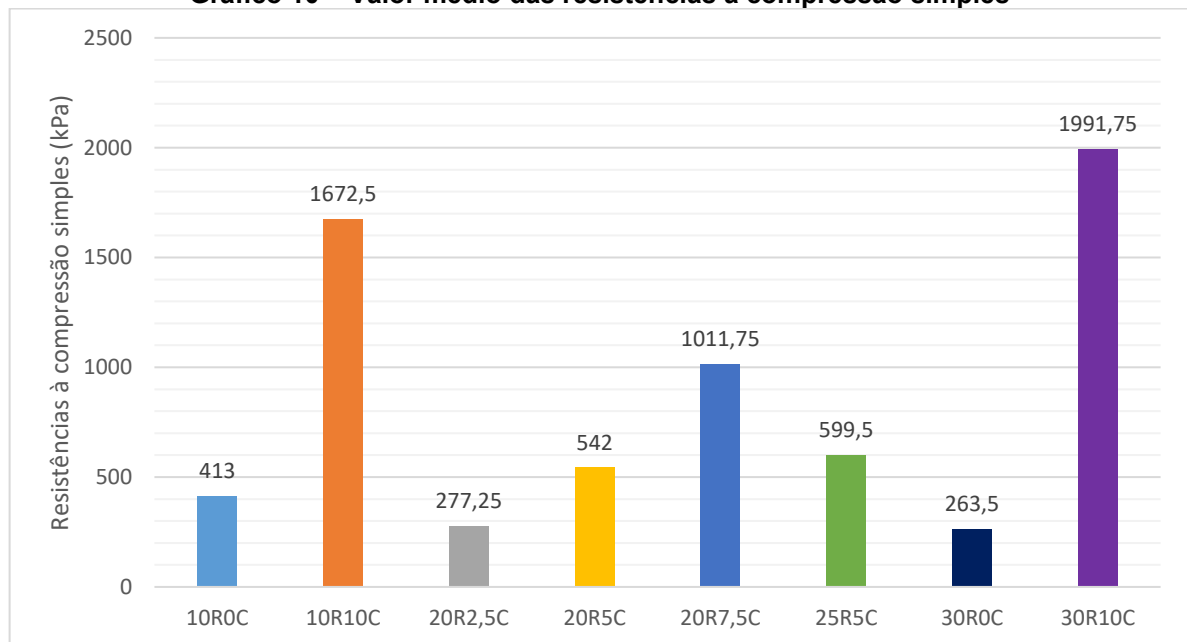
Os resultados obtidos para a resistência à compressão simples dos corpos de prova estão descritos na Tabela 11. Para o ensaio foi considerado o mesmo teor de umidade e peso específico aparente seco para todas as misturas – umidade do solo natural equivalente a 27,8% e peso específico aparente seco de 1,470 g/cm³.

Tabela 11 – Resultado da resistência à compressão simples dos corpos de prova

MISTURA	CP1 (kPa)	CP2 (kPa)	CP3 (kPa)	CP4 (kPa)	Valor médio (kPa)
10R0C	322	455	491	384	413,00
10R10C	1596	1708	1570	1816	1672,50
20R2,5C	297	245	245	322	277,25
20R5C	537	419	609	603	542,00
20R7,5C	855	1074	1059	1059	1011,75
25R5C	537	552	660	649	599,50
30R0C	220	261	292	281	263,50
30R10C	1856	2153	1667	2291	1991,75

Fonte: Autoria própria (2022)

No Gráfico 10 estão representados os valores médios das resistências obtidas.

Gráfico 10 – Valor médio das resistências à compressão simples

Fonte: Autoria Própria

Através dos resultados de resistência à compressão simples das misturas foi encontrado um aumento em função da porcentagem de cal e resíduo.

Hondo (2018) obteve a resistência à compressão simples de 342,65 kPa para o solo natural, ao comparar com os valores obtidos no Gráfico 10, é possível observar que os resultados foram satisfatórios para porcentagens de cal iguais, ou acima de

5%. Já as misturas 20R2,5C e 30R0C mostraram-se mecanicamente menos resistentes.

Porém, observa-se um aumento satisfatório para os maiores índices de cal, conforme indica-se na literatura. Para a mistura de 10R0C para 10R10, a melhoria foi de 4,05 vezes. A mistura 20R7,5C sofreu um aumento 3,65 vezes em relação à 20R2,5C. E da mistura 30R0C para a 30R10C foi de 7,56 vezes o valor da resistência.

Vale destacar que a mistura 10R10C apresenta o mesmo teor de cal da mistura 30R10C, e o aumento do resíduo da primeira pra segunda proporcionou uma melhora de 319,25 kPa, 19%, na resistência à compressão simples.

Mesmo que os valores obtidos tenham sido satisfatórios apenas a partir da adição de 5% de cal, o estudo mostra que a destinação do resíduo de cerâmica vermelha é satisfatória quando utilizado com a cal.

Os requisitos mínimos do DER/PR para se estabilizar o solo com cimento se encontra no Quadro 3.

Quadro 3 – Valores de resistência à compressão aceitos para a mistura solo-cimento pelo DER/PR

Camada	Resistência à compressão (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: Adaptado DER/PR (2005, *apud Costa et al*, 2018)

Fazendo uma correlação entre a estabilização do solo com cimento e com cal, nessas condições, apenas as misturas 10R10C e 30R10C poderiam ser consideradas para o tratamento nas camadas de base e sub-base.

5.4 Análise Estatística

5.4.1 Tratamentos de dados – Análise Outliers (dados espúrios)

Pelo critério de Pierce, os elementos CP2(20R5C) e CP1(20R7,5C) foram considerados outliers e eliminados da amostra, conforme disposto na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise de Outliers

MISTURA	CP1 (kPa)	CP2 (kPa)	CP3 (kPa)	CP4 (kPa)	Valor Médio (kPa)
10R0C	322,00	455,00	491,00	384,00	413,00
10R10C	1.596,00	1.708,00	1.570,00	1.816,00	1.672,50
15R5C	519,09	520,00	518,18		519,09
20R2,5C	297,00	245,00	245,00	322,00	277,25
20R5C	537,00		609,00	603,00	583,00
20R7,5C		1.074,00	1.059,00	1.059,00	1.064,00
25R5C	537,00	552,00	660,00	649,00	599,50
30R0C	220,00	261,00	292,00	281,00	263,50
30R10C	1.856,00	2.153,00	1.667,00	2.291,00	1.991,75

Fonte: Autoria própria (2022)

No Quadro 4 estão dispostas as informações para a análise, após a eliminação das amostras.

Quadro 4 – Estatísticas Básicas

Tratamento	Exemplares	Média (kPa)	Desvio Padrão	Coef. De Variação
10R0C	4	413,00	75,2108	18,2109%
10R10C	4	1672,50	112,858	6,74788%
15R5C	3	519,09	0,00	0%
20R2,5C	4	277,25	38,6124	13,9269%
20R5C	3	583,00	39,95	6,85248%
20R7,5C	3	1069,00	8,66025	0,810127%
25R5C	4	599,50	63,9609	10,669%
30R0C	4	263,50	31,7122	12,035%
30R10C	4	1991,75	282,514	14,1842%
Total	33	829,79	627,841	75,662%

Fonte: Autoria própria (2022)

5.4.2 Análise de variância – Anova

No Quadro 5, constam os resultados obtidos pelo processo de decomposição da variação total nas componentes explicadas e não explicadas ou residuais, conforme equações da Tabela 6.

Quadro 5 – Análise de variância – Anova

Fonte da Variação	Soma dos Quadrados	GL	Quadrados Médios	Função F (Fischer-Snedecor)	P-Valor
Explicada	1,22962E7	8	1,53702E6	116,10	0,0000
Não Explicada	317729,	24	13238,7		
Total	1,26139E7	32			

Fonte: Autoria própria (2022)

Como o P-Valor da função F resultou em um valor menor que 0,05 (5%), isto significa que existem diferenças estatísticas significativas entre os tratamentos adotados a um nível de confiança de no mínimo 95%.

5.4.3 Comparação de médias – teste de Tukey-Kramer

No Quadro 6 estão as informações do Teste de Turkey-Kramer para 95% de nível de confiança

Quadro 6 – Comparação de médias

Tratamento	Repetições	Médias	Grupos Homogêneos
30R0C	4	263,50	E
20R2,5C	4	277,25	E
10R0C	4	413,00	ED
15R5C	3	519,09	ED
20R5C	3	583,00	D
25R5C	4	599,50	D
20R7,5C	3	1069,00	C
10R10C	4	1672,50	B
30R10C	4	1991,75	A

Fonte: A autoria própria (2022)

Pelo teste de comparação de médias de Tukey-Kramer, existem diferenças estatísticas significativas entre as médias que apresentam letras diferentes a um nível de confiança de 95%. Os que apresentarem letras iguais não são estatisticamente diferentes.

Na Tabela 13 está um resumo da análise estatística das misturas, com as comparações das resistências à compressão médias (RCV-28d) e o coeficiente de variância (CV_{ar}).

Tabela 13 – Resumo dos valores obtidos para a análise estatística

Mistura	Teor de RCV (%)	Teor de cal (%)	Resistência à compressão simples (Mpa)	
			RCS-28d	C_{var} (%)
10R0C	10,0	0,0	413,00 E	18,210900
10R10C	10,0	10,0	1672,50 B	6,747880
15R5C	15,0	5,0	519,09 ED	0,000000
20R2,5C	20,0	2,5	277,25 E	13,926900
20R5C	20,0	5,0	583,00 D	6,852480
20R7,5C	20,0	7,5	1069,00 C	0,810127
25R5C	20,0	5,0	599,50 D	10,669000
30R0C	30,0	0,0	263,50 E	12,035000
30R10C	30,0	10,0	1991,75 A	14,184200

Fonte: A autoria própria (2022).

A partir do teste de Turkey-Kramer verifica-se que os valores 20R7,5, 10R10C e 30R10C são estatisticamente diferentes das outras misturas.

5.4.4 Análise multivariada

Assim, pelo modelo da regressão, foi definida a seguinte função:

$$[\text{RC28d (kPa)}]^{1/2} = 17,365 + 30301 \times \text{Exp}(-[\text{RCV (\%)}]) + 0,23652 \times [\text{Cal (\%)}]^2$$

Já para a variável dependente a função obtida foi:

$$[\text{RC28d (kPa)}] = (17,365 + 30301 \times \text{Exp}(-[\text{RCV (\%)}]) + 0,23652 \times [\text{Cal (\%)}]^2)^2$$

As informações obtidas pela correlação do modelo estão dispostas no Quadro 7.

Quadro 7 – Correlação do modelo

Coefficiente de correlação (r)	Valor t calculado	Valor t tabelado (t_{cri})	Coefficiente de determinação (r²)	Coefficiente r² ajustado	Classificação
0,9801	26,13	2,763	0,9606	0,9578	Correlação Fortíssima

Fonte: Autoria própria (2022)

Após obter as funções da análise multivariada e da variável dependente, a análise de variância foi refeita, conforme Tabela 14, obtendo uma confiabilidade do modelo maior que 99,99%.

Tabela 14 – Análise de variância corrigida

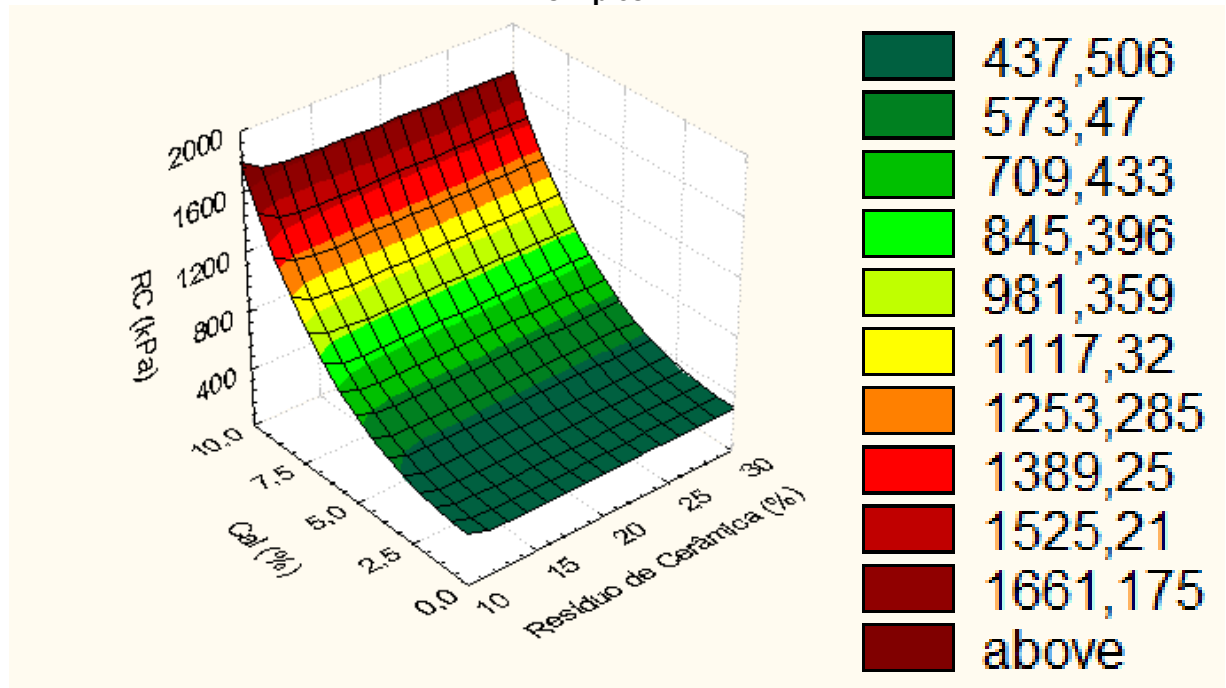
Fonte de erro	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrados médios	F calculado
Regressão	2375,994	2	1187,997	341,3
Residual	97,459	28	3,480	
Total	2473,453	30	82,448	

Fonte: Autoria própria (2022)

5.4.5 Superfície de resposta

Com o auxílio do software Statistica 6.0 plotou-se a superfície de respostas para a análise da resistência à compressão simples no Gráfico 11.

Gráfico 11 – Superfície de respostas para os resultados do ensaio de resistência à compressão simples.



Fonte: Autoria própria (2022)

A partir do Gráfico 11 é possível analisar que a resistência à compressão simples aumenta proporcionalmente a medida em que se elevam os teores de cal. Pela análise de superfície não foi possível verificar essa mesma condição para os teores de resíduo de cerâmica vermelha, porém.

Costa *et al.* (2018) verificam que a fração vermelha contribui de forma mais significativa para a resistência quando os teores de cal são mais elevados, assim como foi analisado no Gráfico 10 para as resistências médias. Os autores ainda especificam que a partir dos 26% de RCV e 10% de cal é possível alcançar os 1,2 MPa exigidos por norma para pavimentação de base e sub-base, caso que foi comprovado para a mistura 30R10C.

6 CONCLUSÃO

Esta pesquisa teve como objetivo analisar a influência da adição da cal e resíduos de cerâmica vermelha, oriundos da construção civil, na resistência à compressão simples, em um solo natural da Formação Guabirotuba, e seu uso em pavimentos. Para se obter tal análise, foram realizados ensaios de caracterização física e mecânica.

Em face ao estudo realizado para os ensaios de caracterização física, concluiu-se que o limite de liquidez diminuiu ao aumentar os percentuais de resíduo de cerâmica vermelha e cal da mistura com 10% de RCV e 0% de cal para a mistura de 30% de resíduo e 10% de cal obteve-se um crescimento de aproximadamente 1,09%. Para o índice de plasticidade foram observadas reduções no grupo das misturas com os mesmos teores de resíduo ao se adicionar cal: para os percentuais de 10% e 30% de resíduo, o IP reduziu em 3% ao se adicionar 10% de cal; a mistura com 20% de RCV apresentou uma queda de apenas 1% para os teores de 5% e 7,5% de cal.

Os resultados da compactação mostraram que com o aumento do resíduo proporcionou uma redução do peso específico aparente seco e um aumento da umidade ótima, isso ocorre já que a absorção de água pelo resíduo cerâmico é maior que a do solo, pois a porosidade do resíduo representa maior teor de umidade, além de menor valor de massa específica.

Para a análise da resistência à compressão simples, aos 28 dias de cura obteve-se em todos os grupos de mesma porcentagem de resíduo: para 10% de resíduo de cerâmica, ao se adicionar 10% de cal foi obtido um acréscimo de 1259,5 kPa; na mistura com 20% de RCV chegou-se a variar o valor de cal em 5%, obtendo um aumento de 734,5kPa; e o maior crescimento foi para 30% de resíduo, chegando a obter uma melhoria de 1728,25kPa, atingindo o necessário para a sua utilização na estabilização de solos para base e sub-base de pavimentação.

Porém, ao realizar a análise estatística, verificou-se que o resíduo não influencia tanto na resistência a compressão simples quanto a cal

Portanto, mesmo que a análise da resistência à compressão simples divergiu da análise estatística, o uso do resíduo na estabilização de solo pode ser considerado como uma destinação adequada para o material, pois sua combinação com a cal não apresentou uma diminuição da sua resistência à compressão simples do solo natural. Foi observado que a adição de cal e RCV ao solo resultou em uma eficiente técnica

de estabilização, alcançando os requisitos mínimos para a sua aplicação em bases e sub-bases de pavimentação, exigidos pelo DER/PR.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é recomendado:

- Repetir os ensaios variando os tempos de cura ou cura acelerada;
- Utilizar outros tipos de solo, granulometria diferente do estudado;
- Realizar o ensaio de CBR;
- Executar um pavimento teste para base ou sub-base;
- Estabilizar o solo com cimento e resíduo de cerâmica vermelha;

REFERÊNCIAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA. **Cerâmica No Brasil: Números Do Setor – Cerâmica Vermelha**. São Paulo, SP. 2018. disponível em: <<http://www.abceram.org.br/>> Acesso em: 22/11/2021.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12770. **Solo coesivo - Determinação da resistência à compressão não confinada Método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ. 1992. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116. **Agregados Reciclados Para Uso Em Argamassas E Concretos De Cimento Portland - Requisitos E Métodos De Ensaio**. Rio de Janeiro, RJ, 2021. 16p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6457: **Amostras De Solo — Preparação Para Ensaio De Compactação E Ensaio De Caracterização**. Rio de Janeiro, RJ. 2016. 8p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: **Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, RJ. 2016. 10p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6459: **Solo Determinação do Limite de Liquidez** Rio de Janeiro, RJ. 2016. 6p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7175. **Cal hidratada para argamassas - requisitos**. Rio de Janeiro, RJ. 2003. 4p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7180: **Solo Determinação do Limite de Plasticidade**. Rio de Janeiro, RJ. 2016. 3p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7181: **Solo Análise Granulométrica**. Rio de Janeiro, RJ. 2016. 12p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Solo Ensaio de Compactação**. Rio de Janeiro, RJ. 2016. 9p.
- BALBO, J. T. **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: MATERIAIS, PROJETO E RESTAURAÇÃO**. OFICINA DE TEXTOS, 2015.
- BALDOVINO, J. de J. A.; IZZO, R. L. dos. S. **Estabilização De Um Solo Da Camada Cinza Da Formação Guabirotuba Para Fins De Pavimentação Urbana Em Curitiba, Brasil**. In: Colloquium Exactarum. 2020.
- BAUER, L. A. F. **Materiais de construção**. 5. ed. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 2001. Volume 2.
- BERNUCCI, L. B. *Et Al.* **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica Para Engenheiros**. Rio De Janeiro, V. 504, P. 27, 2008.

BRITO, L. C.; PARANHOS, H. da S. **Estabilização de Solos**. Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento. Edição, v. 6, p. 425-438, 2017.

CAPUTO, H. P. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações: Exercícios e Problemas Resolvidos**. Rio de Janeiro; São Paulo: LTC- Livros Técnicos e Científicos, 1988. 3V.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução 307 de 05/07/2002**. Diário Oficial da União, 17/07/2002. Disponível em: <https://residuos.paginas.ufsc.br/files/2014/08/CONAMA_RES_CONS_2002_307-Constru%C3%A7%C3%A3o-Civil.pdf> Acesso em: 22 de novembro de 2021.

COSTA, A. D. D.; LEME, G. Z.; PEREIRA, L. E. **Análise Da Resistência À Tração De Solo-Cimento Submetido À Compactação De Energia Normal, Intermediária E Modificada**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

COSTA, E. V. L.; SILVA, E. C. G. da; RÊGO, M. C. Q. **Influência da fração vermelha do resíduo de construção civil com cal na estabilização de um solo da formação Guabirotuba para pavimentação**. 2018. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

CREA-PR – Conselho Regional de Engenharia e Agronomia do Paraná, 2020. Disponível em: <<https://www.crea-pr.org.br/ws/arquivos/28048>>. Acesso em: 23 de outubro de 2020.

CRISTELO, N. M. C. **Estabilização de Solos Residuais Graníticos através da adição de Cal**. Dissertação de Mestrado (Engenharia Civil) – Universidade de Minho, Braga – Portugal, 2001.

DAL MOLIN, D. C. C.; KULAKOWSKI, M. P., Ribeiro, J.L.D. **Contribuições ao planejamento de experimentos em projetos de pesquisa de engenharia civil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v.5, n.2, p. 37-49, 2005.

DAS, B. M. **Fundamentos de Engenharia Geotécnica**. Tradução da 7ª ed. norte-americana, Ed. Cengage Learning, São Paulo, SP. Brasil. 2011.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS DO ESTADO DO PARANA – DER/PR **Pavimentação: solo-cimento e solo tratado com cimento**. 19p. Curitiba, 2018.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual De Pavimentação**. 3 Ed. Publ. Ipr-719. Rio De Janeiro, Rj. 2006. 274 P.

DNER – ME 051. **Solos – Análise Granulométrica – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

DNER – ME 093. **Solos – Determinação da densidade real – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 1994.

DRANKA, R. B. **Melhoramento de Solo com uso de Telha Cerâmica Moída Oriunda de Resíduos de Construção e Demolição (RCD)**. Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Civil UTFPR, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, PR. 2016.

DUARTE, I. M. R.; LADEIRA, F. L.; GOMES, C. F. **Características geológicogeotécnicas do solo residual do granito de Marvão (Portalegre)**. Artigo, VII Congresso Nacional de Geotecnia. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Portugal. 2000.

ENGEAL INDÚSTRIA E COMÉRCIO DE CAL LTDA. **Lista de Produtos**, 2018. Disponível em: <http://www.engeal.ind.br/produtos/>. Acesso em: 05 jun. 2022
FELIPE, R. S. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirota**. 1ª Edição. Curitiba. MINEROPAR, 2011. 49p.

GARCIA, E. et al. **Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico**. *Cerâmica Industrial*, v. 19, n. 4, p. 31-38, 2014.

GAUDIO, A. C.; ZANDONADE, E. **Proposição. Validação e Análise dos Modelos que Correlacionam Estrutura Química e Atividade Biológica**. *Quim. Nova*, v. 24, n. 5, p. 658-671, 2001.

HONDO, K. de A. **Análise do Comportamento Geotécnico de um Solo Característico de Curitiba/PR Tratado com Resíduo de Cerâmica Vermelha e Cal**. *Seminário de Iniciação Científica e Tecnológica*, 23. Apucarana, 2018.

IBGE, **Coordenação de Metodologia das Estatísticas de Empresas, Cadastros e Classificações. Lista de produtos da indústria: PRODLIST-Indústria: 2016**. Rio de Janeiro. 2017. Disponível em: <<https://biblioteca.ibge.gov.br/index.php/biblioteca-catalogo?view=detalhes&id=2100355>>. Acesso em: 06/12/2021.

INGLES, O. G.; METCALF, J. B. **Soil Stabilization: Principles and Practice**. Sidney. Butterworth's. 1972.

ISAIA, G. C. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ipsilon Gráfica e Editora, 2007. Volume 1.
JOHANN, A. D. R. **Metodologia para a Previsão do Comportamento Mecânico e para a Análise da Variação da Porosidade de um Solo Siltoso Tratado com Cal em Diferentes Tempos de Cura**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS, Porto Alegre, RS, 2013.

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

LITTLE, D. N. **Stabilization of pavement subgrades and base courses with lime**. 1995.

MARIANO, L. S. **Gerenciamento de resíduos da construção civil com reaproveitamento estrutural: estudo de caso de uma obra com 4.000m²**. Curitiba. UFPR, 2008.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos. 2 ed. Rio de Janeiro: Coppe/UFRJ**, 2005. hed by Kendall/Hunt Publishing Company.

MME. Ministério de Minas e Energia. **Desenvolvimento de Estudos Para a Elaboração do Plano Duodecenal (2010 – 2030) de Geologia, Mineração e Transformação Mineral**. 2009

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. Em 16 aulas/3^a edição. Oficina de textos. São Paulo, SP. 2006. 363 p.

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

ROSS, S. M. **Peirce's criterion for the elimination of suspect experimental data**. Journal of Engineering Technology, v. 20, n.2, p.38-41, 2004.

SANTOS, M. N. **Análise do Efeito da Estabilização Mecânica em Matrizes de Terra**. PUC – Relatório de iniciação científica, Rio de Janeiro, 2012.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Volume I, 1 ed. Ed. PINI, São Paulo, SP. 1997. 746 p.

SENÇO, W. **Manual de técnicas de pavimentação**. Volume II, 2 ed. Ed. PINI, São Paulo, SP. 2001. 671 p.

SPENCE, R. J. S E; COOK, D.J., 1983. **Building Materials in Developing Countries**. John Wiley & Sons editors., 1ed., New York, 335pp.

VARGAS, M. **Introdução à mecânica dos solos**. Ed. McGraw-Hill do Brasil Ltda, São Paulo, SP, 1977. 509 p.

VILLIBOR, D. F. **Estabilização Granulométrica ou Mecânica**. GRÁFICA EESC – USP, São Carlos, SP, 1982.

WADA, P. 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.

APÊNDICE A – TABELAS DOS DADOS OBTIDOS NO ENSAIO PARA O LIMITE DE LIQUIDEZ

Tabela 15 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 10R0C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
B007	7,86	3,14	2,19	43,38	30
B020	7,16	4,88	3,33	46,55	24
B017	7,21	7,55	5,04	49,80	21
B001	7,40	6,42	4,26	50,70	20
B012	6,72	9,66	6,28	53,82	19

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 16 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 10R10C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
A003	8,05	7,33	5,09	44,01	29
B034	6,11	7,19	4,95	45,25	26
B036	7,70	8,09	5,56	45,50	25
B019	7,56	10,20	6,95	46,76	22
B046	6,55	7,53	5,11	47,36	19

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 17 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 20R2,5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
B017	7,21	1,82	1,25	45,60	32
B028	6,87	1,58	1,08	46,30	22
B012	6,71	2,85	1,89	50,79	19
B039	6,55	4,24	2,82	50,35	18
B033	6,61	1,83	1,21	51,24	15

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 18 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 20R5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
A123	7,57	2,65	1,79	45,30	32
B001	7,40	2,93	1,96	46,97	26
A142	7,57	2,23	1,47	48,32	25
A076	7,97	3,44	2,31	51,09	20
A099	7,36	1,62	1,08	51,47	19

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 19 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 20R7,5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
A103	7,59	7,41	5,12	44,73	26
B017	7,20	5,45	3,74	45,72	22
B023	6,51	5,49	3,74	46,79	20
B028	6,86	5,45	3,69	47,70	16
B031	7,74	3,55	2,40	47,92	15

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 20 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 25R5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
A044	7,92	4,45	3,09	44,01	27
A001	7,19	5,60	3,88	44,33	25
A125	7,68	2,80	1,93	45,08	20
A003	8,04	5,57	3,89	43,19	18
B014	7,75	6,00	4,11	45,99	15

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 21 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 30R0C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
A125	7,68	8,85	6,18	43,20	30
B018	6,64	8,38	5,79	44,73	25
B025	7,52	9,86	6,84	44,15	24
B010	7,23	8,91	6,12	45,59	21
B015	6,83	8,40	5,78	45,33	16

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 22 - Dados de determinação do ensaio de LL para a mistura 30R10C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)	N° de golpes
A032	6,66	8,69	6,08	42,93	30
A004	6,00	9,98	6,98	42,98	27
A036	11,14	8,36	5,84	43,15	21
A032	7,76	12,35	8,62	43,27	18
A022	5,82	6,60	4,60	43,48	15

Fonte: Autoria própria (2022)

**APÊNDICE B – TABELAS DOS DADOS OBTIDOS NO ENSAIO PARA O LIMITE
DE PLASTICIDADE**

Tabela 23 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 10R0C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
A016	4,90	0,48	0,35	37,14
A062	6,33	0,47	0,35	34,29
A047	6,55	0,29	0,21	38,10
A064	7,51	0,35	0,26	34,62
A083	7,51	0,59	0,43	37,21

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 24 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 10R10C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
B005	6,63	0,82	0,59	38,98
B049	8,00	0,58	0,42	38,10
B022	11,23	0,49	0,35	40,00
B021	6,55	0,35	0,26	34,62
B029	6,43	0,44	0,33	33,33

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 25 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 20R2,5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
B071	7,53	0,23	0,16	43,75
B008	7,20	0,22	0,16	37,50
B010	7,21	0,43	0,30	43,33
B031	7,74	0,39	0,27	44,44

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 26 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 20R5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
A121	7,82	0,69	0,48	43,75
A143	7,03	0,77	0,54	42,59
A029	10,19	0,35	0,24	45,83

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 27 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 20R7,5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
B033	6,60	0,29	0,21	38,10
B039	6,54	0,28	0,19	47,37
B010	7,20	0,32	0,23	39,13
B032	7,46	0,54	0,39	38,46

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 28 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 25R5C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
A005	6,42	0,36	0,26	38,46
A124	8,15	0,26	0,19	36,84
A011	6,04	0,64	0,45	42,22

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 29 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 30R0C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
B004	6,36	0,52	0,39	33,33
B003	7,10	0,55	0,42	30,95
B016	6,54	0,57	0,43	32,56

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 30 - Dados de determinação do ensaio de LP para a mistura 30R10C

ID	Tara (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Umidade (%)
A071	7,55	0,45	0,34	32,35
A091	11,22	0,67	0,51	31,37
A074	7,61	0,47	0,34	38,24

Fonte: Autoria própria (2022)