

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GISELE MARIA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL
DE SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM ADIÇÃO DE CERÂMICA
VERMELHA E CAL**

CURITIBA

2024

GISELE MARIA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL
DE SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM ADIÇÃO DE CERÂMICA
VERMELHA E CAL**

**Analysis of the tensile behavior by diametral compression of soil from the
Guabirota Formation with the addition of red ceramic residue and lime**

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).
Orientadora: Amanda Dalla Rosa Johann.

CURITIBA

2024



[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.

GISELE MARIA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL
DE SOLO DA FORMAÇÃO GUABIROTUBA COM ADIÇÃO 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: 24/ junho/ 2024

Amanda Dalla Rosa Johann
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Deise Amaral de Deus
Doutorado
Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro

Fernando Luiz Martinechen Beghetto
Doutorado
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2024

Dedico este trabalho aos meus pais e irmão, por
sempre acreditarem em mim.

AGRADECIMENTOS

Quero expressar meu profundo agradecimento a Deus, que sempre me amparou nos momentos de dificuldade, fortalecendo minha fé e minhas forças nos dias mais desafiadores.

Com todo meu amor e gratidão, agradeço à minha família, especialmente aos meus pais Terezinha e Valdir, e ao meu irmão Alex. Sem o apoio, o amor e a força de vocês, eu não teria chegado até aqui.

À minha orientadora, Profa. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann, sou imensamente grata pela sabedoria e orientação que me guiaram ao longo desta jornada.

À Profa. Dra. Janine Nicolosi Correa que compôs a banca da primeira defesa deste trabalho, obrigada por compartilhar seus conhecimentos.

Ao Prof. Dr. Fernando Luiz Martinechen Beghetto, que enriqueceu este trabalho com seus conhecimentos participando da banca, meu sincero agradecimento.

À Profa. Dra. Deise Amaral de Deus, que me acompanha tanto na jornada acadêmica quanto na vida, agradeço por compor a banca, por compartilhar seus conhecimentos, pelos direcionamentos, conselhos e por sempre estar ao meu lado.

Ao Prof. Dr. Arthur Medeiros, ao CDTEC, à Engenheira Lidia I. Krefer e toda sua equipe, meu muito obrigado por permitirem que este trabalho se realizasse, auxiliando com os ensaios.

Aos meus queridos amigos e amigas, vocês tornaram este caminho muito mais feliz e leve.

Sei que estes parágrafos não conseguirão mencionar todas as pessoas que foram parte crucial desta importante fase da minha vida. Peço desculpas àqueles que não foram citados aqui, mas saibam que estão presentes em meu coração e minha gratidão é profunda.

Enfim, a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização desta pesquisa, meu mais sincero muito obrigada.

As oportunidades normalmente estão disfarçadas de trabalho pesado; portanto, a maioria das pessoas não as reconhece.
(LANDERS; ANN).

RESUMO

Diante das emergências climáticas, com temperaturas recordes e eventos extremos afetando muitas pessoas, é essencial desenvolver infraestruturas resilientes para salvar vidas e minimizar perdas econômicas. A reutilização de resíduos é crucial nesse contexto, mitigando impactos ambientais e economizando recursos, alinhando-se com a Agenda 2030 e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Na construção civil, destacam-se os ODS 9 (infraestruturas resilientes), 11 (cidades sustentáveis) e 12 (produção e consumo sustentáveis). A indústria de cerâmica vermelha gera resíduos significativos, representando 7% da produção global, resultando em milhões de toneladas descartadas anualmente. Este trabalho avalia a resistência à tração por compressão diametral do solo da Formação Guabirota com adição de resíduos de cerâmica vermelha (RCV) e cal. Foram analisadas amostras com diferentes teores de resíduos e cal, estudando a influência dessas misturas e comparando os resultados com testes anteriores. A pesquisa demonstrou melhorias significativas na resistência das misturas após 28 dias de cura. Os resultados foram compatíveis com os testes de resistência à compressão simples realizados em pesquisas anteriores, permitindo otimização de recursos. A utilização do solo "in situ" da Formação Guabirota estabilizado com cal e RCV reduz impactos ambientais, melhorando as propriedades mecânicas do solo e proporcionando uma destinação adequada dos resíduos de cerâmica.

Palavras-chave: resistência à tração por compressão diametral; resíduo de cerâmica vermelha; Formação Guabirota; reutilização de resíduos.

ABSTRACT

In the face of climate emergencies, with record temperatures and extreme events affecting many people, it is essential to develop resilient infrastructures to save lives and minimize economic losses. Waste reuse is crucial in this context, mitigating environmental impacts and saving resources, aligning with the 2030 Agenda and the Sustainable Development Goals (SDGs). In the construction industry, SDG 9 (resilient infrastructures), SDG 11 (sustainable cities), and SDG 12 (sustainable production and consumption) are particularly relevant. The red ceramics industry generates significant waste, representing 7% of global production, resulting in millions of tons discarded annually. This work evaluates the tensile strength by diametral compression of soil from the Guabiro tuba Formation with the addition of red ceramic waste (RCW) and lime. Samples with different waste and lime contents were analyzed, studying the influence of these mixtures and comparing the results with previous tests. The research demonstrated significant improvements in the strength of the mixtures after 28 days of curing. The results were consistent with simple compression strength tests conducted in previous research, allowing resource optimization. The use of "in situ" soil from the Guabiro tuba Formation stabilized with lime and RCW reduces environmental impacts, improving the mechanical properties of the soil and providing an adequate destination for ceramic waste.

Keywords: tensile strength by diametral compression; red ceramic waste; Guabiro tuba Formation; waste reuse.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Posição geográfica da Formação Guabirota no Paraná.....	16
Figura 2 - Extensão da Formação Guabirota.....	17
Figura 3 - Perfil da Formação Guabirota.....	18
Figura 4 - Curva granulométrica do solo natural.....	24
Figura 5 - Curva granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha.....	26
Fotografia 1 - Solo antes e após o processo de secagem e peneiramento	27
Fotografia 2 - Corpos de prova embalados e identificados, na câmara úmida .	30
Fotografia 3 - Testes de resistência à tração e corpos de prova após ruptura .	31
Gráfico 1 - Resistência à tração por compressão diametral (kPa).....	33
Gráfico 2 - Relação q_t/q_u	36
Quadro 1 – Energia normal de compactação.....	29

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultado dos índices de plasticidade obtidos	25
Tabela 2 - Peso específico do solo natural	25
Tabela 3 - Composição das porcentagens de RCV e cal	28
Tabela 4 - Determinação da umidade higroscópica do solo natural	32
Tabela 5 - Resistência à tração por compressão diametral (kPa).....	33
Tabela 6 - Resistência à compressão simples dos corpos de prova	35
Tabela 7 - Relação q_t/q_u	35

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	16
2.2	Formação Guabirota	16
2.3	Resíduos de Construção e Demolição	19
2.4	Resíduos de Cerâmica Vermelha	20
2.5	Estabilização do Solo	20
2.5.1	Estabilização Mecânica	20
2.5.2	Estabilização Química	21
2.6	Pavimentação	21
3	MATERIAIS E MÉTODOS	23
3.1	Materiais	23
3.1.1	Solo	23
<u>3.1.1.1</u>	<u>Análise Granulométrica</u>	<u>24</u>
<u>3.1.1.2</u>	<u>Limites de Atterberg</u>	<u>24</u>
<u>3.1.1.3</u>	<u>Peso Específico Real (γ_s)</u>	<u>25</u>
<u>3.1.1.4</u>	<u>Compactação</u>	<u>25</u>
3.1.2	Resíduo de cerâmica vermelha	25
<u>3.1.2.1</u>	<u>Ensaio de Granulometria</u>	<u>26</u>
<u>3.1.2.2</u>	<u>Determinação da densidade real dos grãos</u>	<u>26</u>
<u>3.1.2.3</u>	<u>Índices de plasticidade</u>	<u>27</u>
3.1.3	Cal	27
3.1.4	Água	27
3.2	Métodos	27
3.2.1	Preparação das amostras	27
3.2.2	Ensaio de caracterização	28
3.2.3	Ensaio de compactação	28

3.2.4	Moldagem dos corpos de prova	29
3.2.5	Ensaio de resistência à tração simples	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	32
4.1	Umidade Higroscópica.....	32
4.2	Resistência à Tração por Compressão Diametral (qt)	32
4.3	Relação qt/qu	34
5	CONCLUSÃO	37
	REFERÊNCIAS.....	39

1 INTRODUÇÃO

No cenário atual de emergências climáticas, com temperaturas atingindo níveis sem precedentes na história do planeta e as consequências de eventos climáticos extremos impactando um número crescente de pessoas, o estudo de mecanismos e estratégias que promovam o desenvolvimento de infraestruturas resilientes é essencial para salvar vidas e minimizar perdas econômicas.

A reutilização de resíduos, além de mitigar impactos ambientais adversos, promove a economia de recursos naturais, água e energia. Esta prática alinha-se com a Agenda 2030, conforme o documento "Transformando o nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável", que enfatiza os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) visando a proteção do planeta, a erradicação da pobreza e a garantia de prosperidade para todos no presente e no futuro. Nesse contexto, destaca-se a importância da economia circular, um modelo econômico que promove a reutilização de recursos, tornando seu uso mais racional e eficiente (Marques *et al*, 2020).

Na Indústria da Construção Civil, destacam-se os objetivos número 9, "Construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação"; o ODS número 11, "Tornar as cidades e os assentamentos humanos inclusivos, seguros, resilientes e sustentáveis"; e o objetivo número 12, "Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis".

Para Araujo *et al*, 2019, os resíduos provenientes da indústria de cerâmica vermelha atualmente equivalem a cerca de 7% da produção total de materiais cerâmicos em todo o mundo. Segundo Brekailo *et al*, 2019, isso se traduz em milhões de toneladas descartadas a cada ano, sendo a maior parte desses resíduos originada a partir de peças defeituosas rejeitadas durante o processo de fabricação ou provenientes da aplicação final na construção, o que é conhecido como resíduo de construção e demolição (RCD).

Diante da situação descrita, torna-se muito importante desenvolver tecnologias inovadoras para a estabilização de solos que sejam economicamente eficazes e estejam alinhadas com princípios sustentáveis. Uma solução viável é a reutilização dos resíduos de cerâmica vermelha (RCV) provenientes de demolição, o que contribui para evitar o descarte inadequado desse material.

Embora a técnica de estabilização de solos com cal e resíduos de cerâmica vermelha não seja uma novidade, o composto se revela como uma solução prática para reutilizar o RCV que, de outra forma, seria descartado. Além disso, a pesquisa desempenha um papel crucial ao avaliar o desempenho dessas combinações e aprimorar sua composição.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral deste trabalho é avaliar experimentalmente a resistência à tração por compressão diametral do solo proveniente da Formação Guabirotuba com adição de cerâmica vermelha e cal.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Analisar amostras de solo com diversos teores de resíduo de cerâmica vermelha e cal;
- Analisar a influência da mistura ao solo estudado;
- Analisar a resistência à tração simples por compressão diametral do material composto;
- Ampliar a percepção sobre a necessidade de redução de uso de recursos naturais e fornecer aporte técnico para possível utilização de resíduos de cerâmica vermelha como percentual de matéria prima na estabilização de solo;
- Comparar os resultados de resistência à tração por compressão diametral (q_t) com os resultados de compressão simples (q_u) das mesmas misturas estudadas em trabalhos anteriores.

1.2 Justificativa

A produção anual da indústria cerâmica no Brasil é da ordem de 65 bilhões de peças, predominantemente constituídas por blocos de vedação, seguidos por lajotas e telhas, o que corresponde a aproximadamente 130 milhões de toneladas de cerâmica queimada. Estima-se que as perdas em produtos acabados variam de 3% a 5%, o que resulta em um descarte de cacos cerâmicos estimado entre 3,9 e 6,5 milhões de toneladas por ano (Garcia *et al.*, 2014).

Esse trabalho propõe avaliar o desempenho das combinações de solo, RCV e cal, buscando aprimorar a composição desses materiais para maximizar sua eficiência. Neste processo, avalia-se a capacidade do solo modificado, contendo essas adições, de suportar tensões de tração sob carga compressiva diametral.

O ensaio de resistência à tração por compressão diametral, consiste no carregamento de amostras cilíndricas ao longo do seu diâmetro. Esse ensaio, combinado com o ensaio de resistência à compressão simples, permite estabelecer uma relação entre as duas resistências. Conhecendo-se essa relação, torna-se viável realizar apenas um dos testes de resistência e estimar o valor da outra resistência, evitando assim o desperdício de material, tempo e dinheiro. Além de sua facilidade de execução, o ensaio é amplamente empregado na comunidade científica (JOHANN et al., 2013, citado por Rissardi, 2016).

Segundo Barbieri (2020), até 2050, é projetado que cerca de dois terços da população mundial residirão em áreas urbanas. Esse contínuo crescimento implica em desafios significativos para o planejamento urbano, infraestrutura, serviços públicos e qualidade de vida das populações urbanas.

Os resultados dessa análise são cruciais para diversas aplicações, como na construção de estradas e outras estruturas geotécnicas. Esses resultados fornecem informações valiosas para engenheiros e projetistas na seleção dos materiais adequados e no dimensionamento de estruturas, garantindo a segurança e a eficiência dos empreendimentos. Além disso, a utilização de resíduos de cerâmica vermelha e cal pode representar uma abordagem sustentável, contribuindo para a redução do impacto ambiental e o reaproveitamento de materiais descartados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Solos

Para Santos *et al.*, 2018, o solo é uma entidade complexa, tridimensional e dinâmica, composta por partes sólidas, líquidas e gasosas. Estende-se pelo manto superficial das extensões continentais, sendo formado por materiais minerais e orgânicos. Ainda segundo o autor, esses solos, predominantemente encontrados nas áreas continentais, contêm matéria viva e podem ser naturalmente vegetados.

A engenharia define solo como um agregado não cimentado constituído por partículas sólidas, grãos minerais e matéria orgânica, onde os espaços vazios são preenchidos por gases ou líquidos. No contexto da Engenharia Civil, o solo é extensivamente empregado, destacando-se a vital importância do estudo de suas propriedades (Das, 2011).

Conforme Pinto (2009), a classificação dos solos segundo sua origem é fundamental para a compreensão das suas características e a transmissão de conhecimento acumulado. Os solos podem ser divididos em dois grupos principais: solos residuais e solos transportados.

2.1.1 Solos Residuais

Solo residual é aquele que se forma *in loco*, diretamente sobre a rocha subjacente, através do processo de intemperismo (Pinto, 2009).

Praticamente todos os tipos de rochas estão suscetíveis à formação de solos residuais devido à influência significativa do intemperismo químico em regiões caracterizadas por climas quentes e úmidos. Esse processo induz a desintegração química das rochas, resultando na geração de solos residuais (Chiossi, 2013).

Segundo Pinto (2009), solos residuais são produtos de intemperismo que permanecem no local onde foram gerados, sem sofrer transporte significativo. De acordo com Terzaghi, Peck e Mesri (1996), esses solos exibem uma transição gradativa de material rochoso não alterado até a camada superficial do solo, refletindo o processo de decomposição das rochas subjacentes.

2.1.2 Solos Transportados

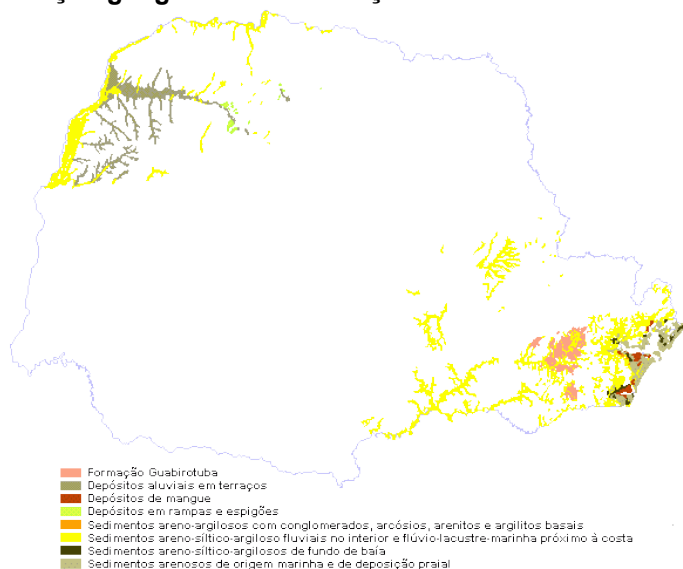
Segundo Caputo (1988), solos transportados referem-se a solos que foram deslocados de seus locais de origem, seja por influência da gravidade ou de agentes intempéricos, distinguindo-se assim do solo ou rocha original.

Os solos transportados frequentemente originam depósitos menos consolidados e porosos, apresentando profundidade variável (Chiossi, 2013). Além disso, as características do solo são função do agente transportador (Pinto, 2009)

2.2 Formação Guabirota

A Formação Guabirota está inserida na Bacia Sedimentar de Curitiba, abrangendo uma área de aproximadamente 900 km², que inclui 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. Essa região é predominantemente constituída por solos finos de alta consistência, conforme destacado por KORMANN (2002).

Figura 1 - Posição geográfica da Formação Guabirota no Paraná



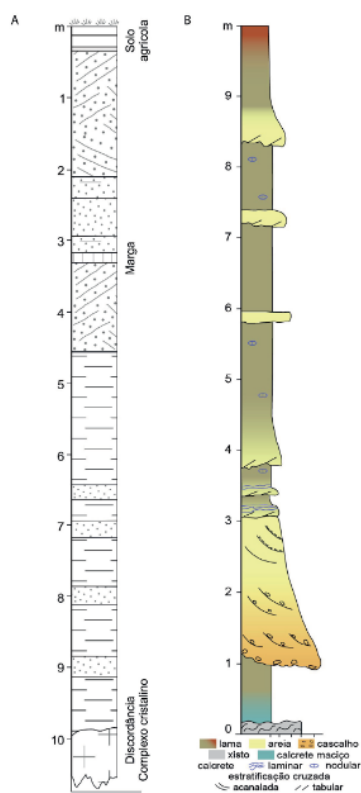
Fonte: Instituto Água e Terra (2023)

Conforme ilustrado na Figura 1, a Formação Guabirota está localizada na região leste do estado do Paraná, abrangendo principalmente a cidade de Curitiba e seus arredores.

compressibilidade reduzida, possuem características associadas a incidentes frequentes em obras, conforme observado por KORMANN (2002).

Conforme indicado por Felipe (2011), os sedimentos da Formação Guabirota alcançam espessuras que variam entre 60 e 80 metros, sendo predominantemente compostos por argilas e areias arcósicas contendo 20-40% de feldspato. A parte inferior dessa formação é constituída por cascalhos e arcósios de granulometria grosseira. É importante destacar que essa camada sedimentar repousa sobre rochas do Complexo Atuba, caracterizado por uma concentração típica de carbonato de cálcio.

Figura 3 - Perfil da Formação Guabirota



Fonte: Vieira e Fernandes (2020)

Na Figura 3, é possível visualizar a composição predominante do perfil da Formação Guabirota, que inclui principalmente solos transportados, arcósios e argilas.

2.3 Resíduos de Construção e Demolição

Segundo o CONAMA, resíduos da construção civil referem-se aos materiais provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, assim como aqueles resultantes da preparação e escavação de terrenos. Incluem diversos elementos como tijolos, blocos cerâmicos, concreto, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras, compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica, entre outros. Esses resíduos são comumente denominados entulhos de obras, caliça ou metralha, conforme estabelecido pela Resolução 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA, 2003.

Os resíduos são categorizados com base nas 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 lixas, massa corrida e massa de vidro;

- Classe D: materiais perigosos provenientes do processo construtivo, como tintas, solventes, óleos ou outros materiais danosos à saúde.

O panorama da Abrelpe (2022), relatou que no ano de 2021, os municípios coletaram mais de 48 milhões de toneladas de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), representando um crescimento de 2,9% em comparação ao período anterior. A quantidade coletada por habitante foi aproximadamente 227 kg por ano, sendo grande parte composta por resíduos de construção e demolição abandonados em vias e áreas públicas.

Almeida, Soares, Matos e Almeida (2021) destacam que, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010), a prevenção e redução na geração de resíduos é promovida por meio da adoção de práticas sustentáveis, como a minimização da produção de resíduos, o estímulo à reciclagem, a promoção da reutilização e a destinação ambientalmente adequada dos rejeitos. Entende-se

como rejeitos todo material que não pode ser reciclado ou reaproveitado (BRASIL, 2010).

2.4 Resíduos de Cerâmica Vermelha

Conforme Isaia (2007), a produção de cerâmicas vermelhas tem sua origem na argila, comumente encontrada em sedimentos de rios e barragens. Essa argila passa por um processo de secagem e, posteriormente, é submetida à queima em temperaturas elevadas. Após esse procedimento, as cerâmicas exibem uma coloração avermelhada devido ao teor de ferro presente na argila. Esses materiais têm ampla aplicação na construção civil, sendo utilizados na fabricação de elementos como tijolos maciços, blocos cerâmicos, telhas, entre outros.

Para Nagalli (2014), o setor de cerâmica vermelha se evidencia como um notável produtor de resíduos, ocasionando impactos ambientais ou gerando rejeitos em todas as fases de sua cadeia produtiva, desde a extração da matéria-prima até a expedição dos produtos.

2.5 Estabilização do Solo

De acordo com Cordeiro (2007), a estabilização de um solo engloba as características de resistência mecânica do solo, juntamente com a complementação necessária dessa resistência para um uso específico, considerando aspectos físicos, químicos e mecânicos. A seleção de um método geralmente está associada a considerações econômicas, levando em conta os custos associados a cada material.

Para Vizcara (2010), modificar as propriedades de um solo com o objetivo de aprimorar seu desempenho para aplicações em engenharia constitui o processo de estabilização do solo. O resultado almejado é a obtenção de um material estável capaz de resistir eficazmente a cargas externas e variações climáticas. Na engenharia geotécnica, as formas predominantes de estabilização são a estabilização mecânica e a estabilização química, conforme destacado pelo autor.

2.5.1 Estabilização Mecânica

A compactação é o processo de densificação do solo mediante a remoção do ar. No ambiente de campo, é comum utilizar rolos compactadores lisos, pé-de-carneiro, de pneus de borracha e vibratórios para realizar esse procedimento,

conforme indicado por Das (2007). Além do teor de umidade, dois fatores que impactam a compactação do solo, de acordo com o autor, são o tipo de solo e o esforço de compactação. O primeiro influencia o peso específico seco máximo e o teor de umidade, relacionando-se com a distribuição granulométrica, a forma dos grãos, o peso específico dos sólidos e as características da argila presentes. Por sua vez, o segundo é resultado do esforço de compactação por unidade de volume de solo; à medida que esse esforço aumenta, o peso específico seco máximo também aumenta, enquanto o teor de umidade ótima diminui.

Soliz (2007) descreve que a estabilização mecânica de um solo consiste na aplicação de processos que vão desde uma compactação simples até o rearranjo das partículas do material, buscando estabilizá-lo granulometricamente em camadas. O objetivo da estabilização mecânica é conferir ao solo características adequadas de atrito interno, de modo a evitar deformações excessivas ou rupturas por cisalhamento no material compactado.

2.5.2 Estabilização Química

Conforme Marques (2009), na estabilização química de solos, os ligantes mais frequentemente empregados incluem cimento Portland, cal, pozolanas, materiais betuminosos, resinas, cinzas volantes, entre outros. O autor destaca que, em solos argilosos (coesivos), são encontradas estruturas floculadas e dispersas, as quais são mais suscetíveis à presença de água, influenciando na resistência ao cisalhamento. Adicionalmente, ele menciona que é comum a incorporação de agentes químicos destinados a promover a dispersão ou floclação das partículas, ou a realização de uma substituição prévia de cátions inorgânicos por cátions orgânicos hidrorrepelentes, seguida pela adição de cimento.

2.6 Pavimentação

Segundo Balbo (2015), o pavimento é uma estrutura constituída por múltiplas camadas de diferentes materiais compactados, visando satisfazer tanto as demandas estruturais quanto operacionais do tráfego. Contudo, devido às técnicas utilizadas e ao emprego de materiais convencionais, combinados ao constante aumento do volume de tráfego, o pavimento, em diversas situações, não tem alcançado os requisitos necessários de resistência e durabilidade. Isso resulta em problemas

precoces, como trincamento por fadiga, envelhecimento, desagregação do revestimento asfáltico, afundamento de trilha de roda, entre outros (MELO, 2014).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Para este estudo, foram utilizados os resultados de pesquisas anteriores conduzidas com os mesmos materiais por Dranka (2016), Hondo (2018) e Hondo (2022).

3.1 Materiais

3.1.1 Solo

O solo empregado na investigação é idêntico ao utilizado por Hondo, 2018, citado por Hondo, 2022: trata-se de solo fino proveniente da Formação Guabirotuba. As amostras foram coletadas no município de Curitiba/PR, nas proximidades da UTFPR, campus Ecoville.

Os ensaios realizados para a caracterização física do solo foram:

- NBR 12770 (ABNT, 1992) – Solo Coesivo – Determinação da Resistência à Compressão não Confinada
- 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 7182/(ABNT, 2016) – Solo – Ensaio de Compactação;
- NBR 6458 (ABNT, 2016) - Grãos de pedregulho retidos na peneira de abertura 4,8 mm - determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água.

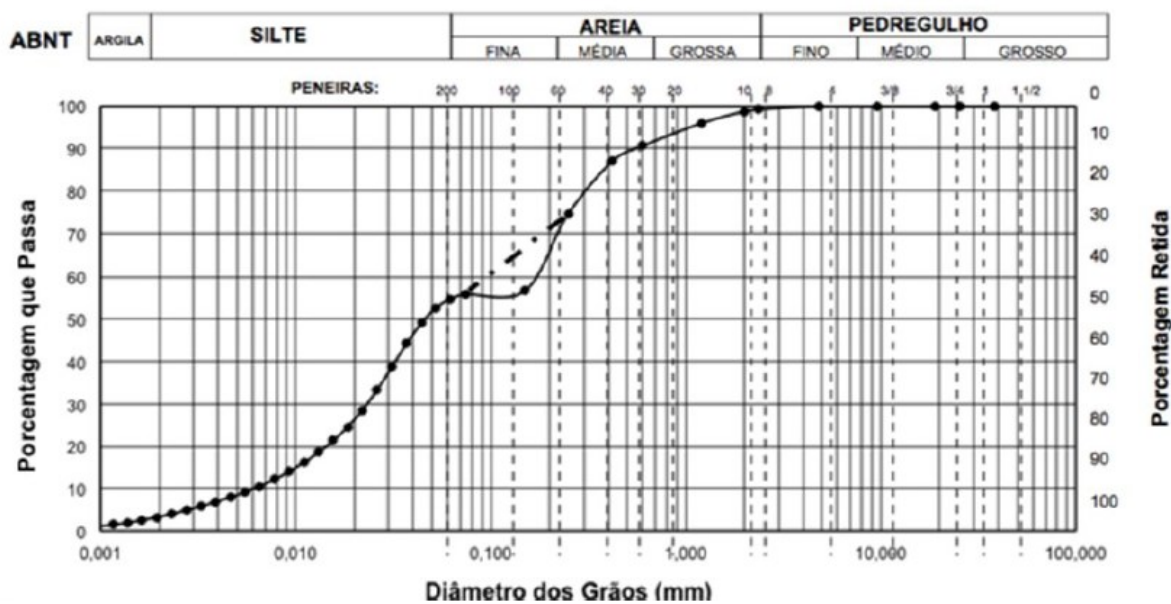
Segundo Hondo (2022), a caracterização mecânica do solo envolveu a realização do ensaio de compactação, conforme orientado pela NBR 7182/2016. Já o ensaio de resistência à compressão simples adotou como referência a NBR 12770 (ABNT, 1992).

No estudo de Hondo (2018), foram conduzidas análises granulométricas, determinações dos índices de plasticidade e do peso específico aparente seco. Além disso, foram realizados ensaios de compactação e de resistência à compressão simples no solo natural.

3.1.1.1 Análise Granulométrica

A Figura 4 apresenta a curva granulométrica derivada do teste de granulometria realizado por Hondo (2018) no solo natural.

Figura 4 - Curva granulométrica do solo natural
Curva Granulométrica



Fonte: Hondo (2018)

Durante a investigação, foi identificada 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.

3.1.1.2 Limites de Atterberg

A Tabela 1 apresenta uma síntese dos resultados obtidos por Hondo (2018) para o solo natural nos aspectos do 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)

3.1.1.3 Peso Específico Real (γ_s)

Na Tabela 2, estão registrados os valores do peso específico do solo natural obtidos por Hondo (2018).

Tabela 2 - Peso específico do solo natural

Material	γ_s (g/cm ³)
Solo	2,72

Fonte: Adaptado de Hondo (2018)

3.1.1.4 Compactação

Durante o ensaio de compactação, os valores alcançados por Hondo (2018) para o peso específico aparente seco (γ_d) e a umidade ótima ($W_{ótima}$) foram os seguintes:

- $\gamma_d = 14,7$ kN/m³
- $W_{ótima} = 27,8\%$

3.1.2 Resíduo de cerâmica vermelha

A telha cerâmica utilizada é a mesma descrita por Dranka, 2016, citado por Hondo, 2022 e foi adquirida de uma residência durante o processo de demolição, sendo do tipo francesa. O material passou por um processo de preparação utilizando um moinho de resíduos de construção para garantir a uniformidade dos grãos.

Os ensaios conduzidos para a caracterização física das telhas incluíram:

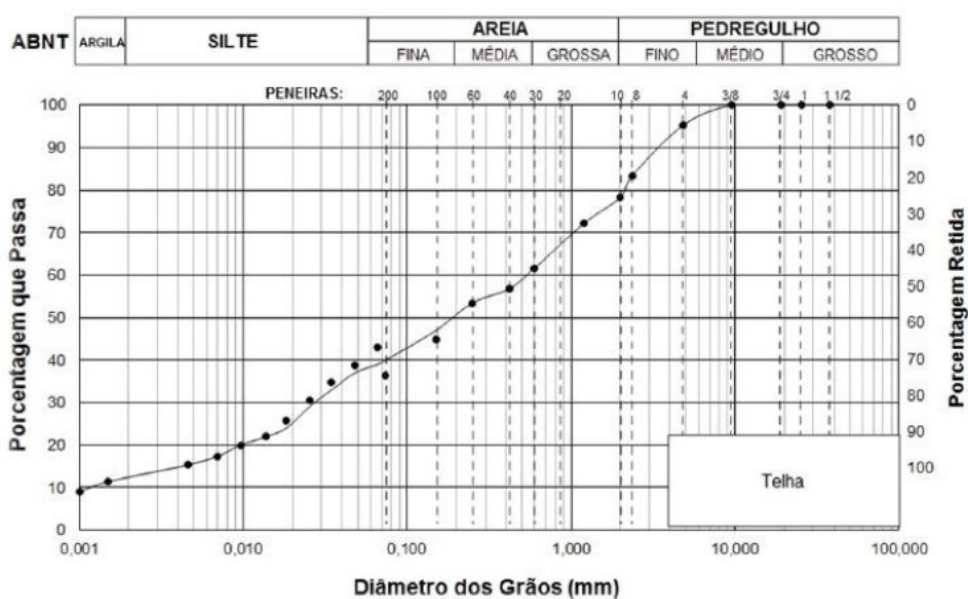
- DNER – ME 051/94 – Solos – Análise Granulométrica;
- DNER – ME 093/94 – Solos – Determinação da densidade real;
- NBR 6459 (ABNT, 2016) – Solos – Determinação do Limite de Liquidez;

- NBR 7180 (ABNT, 2016) – Solos – Determinação do Limite de Plasticidade;

3.1.2.1 Ensaio de Granulometria

A curva granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha, obtida por Dranka (2016), é representada na Figura 5.

Figura 5 - Curva granulométrica do resíduo de cerâmica vermelha
Curva Granulométrica



Durante a investigação, foi identificada a seguinte composição:

- 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.

3.1.2.2 Determinação da densidade real dos grãos

A densidade real dos grãos (γ_s) obtida por Dranka (2016) para a telha pura foi de 2,57 g/cm³, revelando um valor inferior ao observado no solo.

3.1.2.3 Índices de plasticidade

De acordo com Dranka (2016), não foi viável realizar o ensaio do limite de liquidez na telha pura devido a desafios práticos. No entanto, para o limite de plasticidade, o valor obtido foi de 36%. No entanto, devido à dificuldade enfrentada no primeiro ensaio, o material foi classificado como não plástico.

3.1.3 Cal

O tipo de cal empregado neste estudo é a cal hidratada do tipo CH III.

3.1.4 Água

Nos testes de caracterização, empregou-se água destilada, conforme prescrito nas normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016). Já para a confecção dos corpos de prova, foi utilizada água potável fornecida pela SANEPAR.

3.2 Métodos

3.2.1 Preparação das amostras

As amostras foram preparadas conforme a NBR 6457/2016. Após secagem em forno por 24 horas, foram desagregadas e peneiradas utilizando uma peneira conforme especificado pela NBR 6458/2016, com abertura de malha de 4,8 mm para os grãos que passaram pela peneira. Posteriormente, as amostras foram armazenadas em recipientes plásticos com tampa para preservar a sua condição seca.

Fotografia 1 - Solo antes e após o processo de secagem e peneiramento



Fonte: Autoria própria (2024)

A Fotografia 1, mostra o solo antes da secagem e depois de seco e peneirado, respectivamente.

Neste estudo, durante a condução dos ensaios, foi modificado o teor de resíduo de cerâmica vermelha e cal, seguindo a mesma composição utilizada por Hondo (2022). As diferentes composições desses materiais estão detalhadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição das porcentagens de RCV e cal

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

Fonte: Adaptado de Hondo (2022)

3.2.2 Ensaio de caracterização

Com o objetivo de caracterizar as combinações estudadas, foram conduzidos os testes de limite de liquidez e de plasticidade (limites de Atterberg), idêntico a Hondo (2022) e conforme estabelecido pelas normas NBR 6459 (ABNT, 2016) e NBR 7180 (ABNT, 2016), respectivamente. Todas as análises foram executadas no laboratório de solos da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

3.2.3 Ensaio de compactação

Conforme Hondo (2022), a norma NBR 7182/2016 fornece as diretrizes para a execução do ensaio de compactação, baseado na relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo após compactação. Esse procedimento

determina o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima do solo, os quais foram reproduzidos tanto para a amostra do solo natural quanto para a fração dos resíduos.

Para este estudo, foi empregada a energia normal de compactação, com reutilização da mistura e pré-secagem. As características específicas dessa energia estão detalhadas no Quadro 1.

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 da NBR 7182 (ABNT, 2016)

Após a elaboração das curvas de compactação Proctor sob a aplicação da energia normal, os corpos de prova foram moldados.

3.2.4 Moldagem dos corpos de prova

Hondo (2022) a partir dos estudos de DAL MOLIN *et al* (2005), definiu a quantidade mínima de corpos de prova a serem utilizados neste trabalho. Foram moldados 4 corpos de prova para cada mistura, totalizando 36 corpos de provas.

Na confecção dos corpos de prova, a mistura inicial dos materiais foi submetida previamente à secagem em estufa a aproximadamente 100°C, por um período mínimo de 24 horas. Após atingir a homogeneidade do material, procedeu-se com a adição de água destilada, reiniciando-se o processo de mistura até obter uma massa homogênea. Após a compactação, um extrator foi utilizado para remover o corpo de prova do molde, seguindo-se a aferição de seu peso, altura e diâmetro. Com o objetivo de preservar a umidade inicial, todos os corpos de prova foram envolvidos em plástico filme e devidamente identificados. A conservação dos corpos de prova ocorreu em câmara úmida, dando início ao período de cura de 28 dias.

Fotografia 2 - Corpos de prova embalados e identificados, na câmara úmida



Fonte: Autoria própria (2024)

3.2.5 Ensaio de resistência à tração simples

Johann (2013) expõe que, em ensaios de determinação direta da resistência à tração dos solos, frequentemente surgem desafios relacionados à fixação adequada das amostras nas extremidades, a fim de possibilitar a aplicação de tração, devido à concentração de tensões no corpo de prova. Diante dessas questões, a resistência à tração dos solos foi avaliada por meio de métodos que empregam outros tipos de esforços, permitindo a interpretação dos resultados e a obtenção indireta do valor desejado.

O método a ser adotado nesta pesquisa foi o ensaio de resistência à tração por compressão diametral com base na norma NBR 7222, que envolve a aplicação de carga em amostras cilíndricas no sentido do seu diâmetro (ABNT, 2011). Conforme Johann (2013), esse ensaio é de execução simplificada e amplamente empregado na comunidade científica.

A Fotografia 4 exibe um exemplo de teste de resistência à tração juntamente com os corpos de prova após a ruptura.

Fotografia 3 - Testes de resistência à tração e corpos de prova após ruptura



Fonte: Autoria própria (2024)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este tópico apresenta os resultados e as discussões dos ensaios realizados neste trabalho.

4.1 Umidade Higroscópica

Para este estudo, foi determinada a umidade higroscópica das amostras, que quantifica a quantidade de água que o solo pode absorver e reter da atmosfera. De acordo com a NBR 6457/1996. As amostras de solo foram colocadas em cápsulas metálicas designadas, as quais foram pesadas antes, e após permanecerem na estufa por 24 horas, para determinar o teor de umidade higroscópica do solo.

Na Tabela 1 estão apresentados os resultados referentes à umidade higroscópica:

Tabela 4 - Determinação da umidade higroscópica do solo natural

Cápsulas	Peso cápsula (g)	Solo úmido (g)	Solo seco (g)	Wh (%)
a042	6,56	21,04	20,49	3,95
a073	7,51	21,63	21,11	3,82
a095	6,27	17,49	17,08	3,79

Fonte: Autoria própria (2024)

A análise dos dados apresentados na Tabela 1 revela que nenhuma cápsula exibiu resultados discrepantes em relação às demais, tornando desnecessário o descarte de qualquer resultado. A média aritmética simples de umidade higroscópica (Wh) obtida neste ensaio foi de 3,85%, com um desvio padrão de 0,08%. Isso indica que a amostra de solo da Formação Guabirota, após o processo de secagem ao ar, manteve uma umidade residual de aproximadamente 3,85%.

4.2 Resistência à Tração por Compressão Diametral (qt)

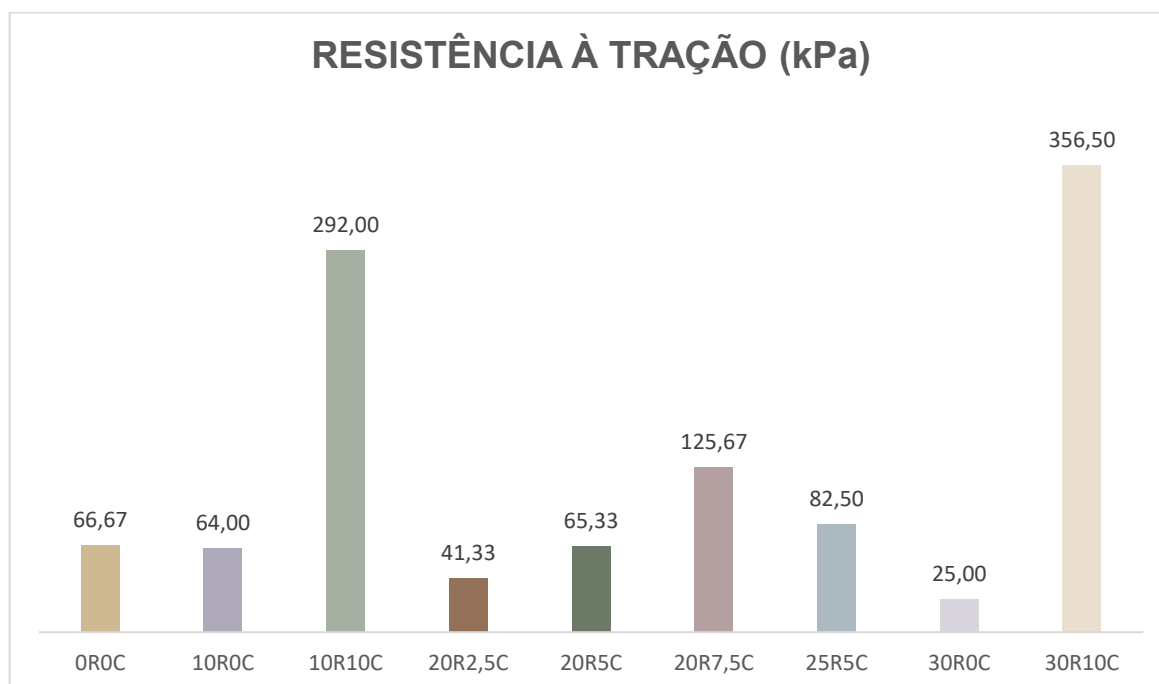
Os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (qt) dos corpos de prova estão detalhados na Tabela 5. Para a padronização dos resultados, os valores discrepantes foram descartados.

Tabela 5 - Resistência à tração por compressão diametral (kPa)

Mistura	CP1 (kPa)	CP2 (kPa)	CP3 (kPa)	CP4 (kPa)	Média
0R0C	67	67	66	-	66,67
10R0C	69	57	58	72	64,00
10R10C	286	255	335	-	292,00
20R2,5C	46	42	36	-	41,33
20R5C	66	73	-	57	65,33
20R7,5C	114	-	128	135	125,67
25R5C	80	76	85	89	82,50
30R0C	24	28	-	23	25,00
30R10C	-	380	-	333	356,00

Fonte: Autoria própria (2024)

Como é possível ver na Tabela 5, os resultados dos ensaios de resistência à tração por compressão diametral (qt) das misturas mostraram, em geral, um aumento na resistência à medida que a porcentagem de cal e resíduo combinados foi aumentada.

Gráfico 1 - Resistência à tração por compressão diametral (kPa)

Fonte: Autoria própria (2024)

Hondo (2022) também observou uma tendência semelhante nos resultados de resistência à compressão simples. Ao comparar com os valores apresentados no Gráfico 1, é evidente que os resultados foram satisfatórios para porcentagens de cal iguais a 10%.

As misturas 20R2,5C e 30R0C mostraram-se mecanicamente menos resistentes. No entanto, observa-se um aumento satisfatório para os maiores índices de cal.

Para a mistura 10R10C, houve uma melhoria de 4,38 vezes na resistência. A mistura 20R7,5C apresentou um aumento de 1,24 vezes em relação à qt do solo natural e 3,04 vezes em relação à 20R2,5C. Para a mistura 30R0C, a resistência aumentou 7,56 vezes ao adicionar 10% de cal, resultando na mistura 30R10C.

A mistura 10R10C, com o mesmo teor de cal da mistura 30R10C, mostrou uma melhoria de 64,5 kPa (22%) na resistência à tração por compressão diametral ao aumentar o teor de resíduo. A mistura 10R0C apresentou uma resistência de 64 kPa, o que equivale a 96% da resistência do solo natural.

Embora os valores obtidos tenham sido satisfatórios apenas a partir da adição de 5% de cal, o estudo demonstra que a destinação do resíduo de cerâmica vermelha é eficaz para a estabilização do solo quando utilizado em combinação com cal.

Conforme é possível verificar no Gráfico 1, a mistura 10R0C quase atinge a resistência do solo natural (mistura 0R0C), mas quando a quantidade de resíduo é significativamente aumentada, como na mistura 30R0C, a resistência do solo diminui. Isto sugere a existência de um limite máximo de resíduo que pode ser adicionado ao solo sem comprometer sua resistência. Além desse limite, a adição de mais resíduo resulta na redução da resistência do solo.

4.3 Relação qt/qu

Hondo (2022) apresentou os seguintes resultados de resistência à compressão simples, conforme detalhado na Tabela 6.

Tabela 6 - Resistência à compressão simples dos corpos de prova

Mistura	CP1 (kPa)	CP2 (kPa)	CP3 (kPa)	CP4 (kPa)	Média
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: Adaptado de Hondo (2022)

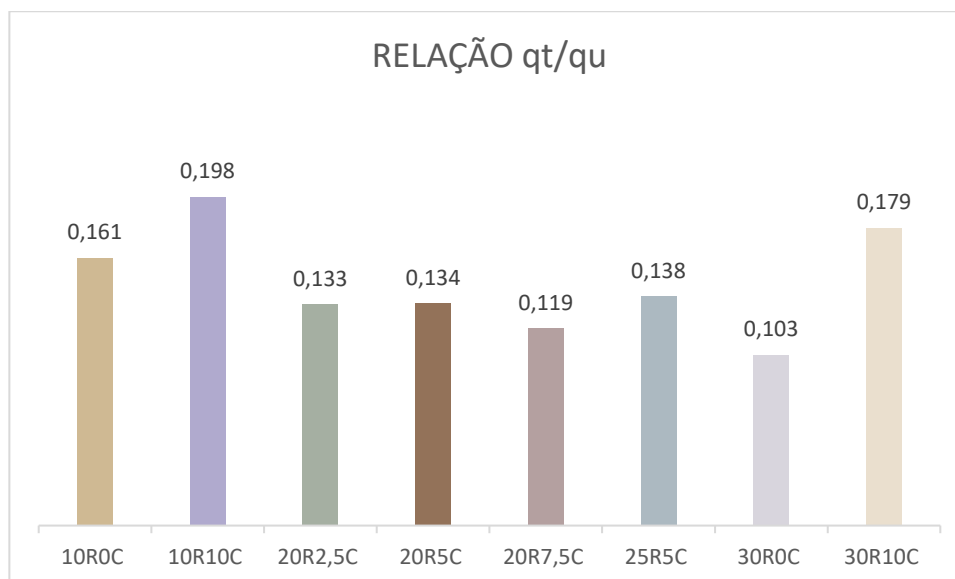
Com base nos resultados de resistência à tração (q_t) obtidos neste trabalho e nos resultados de resistência à compressão simples (q_u) obtidos por Hondo (2022), na Tabela 6, determinou-se a relação (q_t/q_u), conforme apresentado na Tabela 7 e no Gráfico 2.

Tabela 7 - Relação q_t/q_u

Mistura	CP1 (kPa)	CP2 (kPa)	CP3 (kPa)	CP4 (kPa)	Média
10R0C	0,214	0,125	0,118	0,188	0,161
10R10C	0,179	0,149	0,213	0,249	0,198
20R2,5C	0,155	0,171	0,147	0,059	0,133
20R5C	0,123	0,174	0,143	0,095	0,134
20R7,5C	0,133	0,093	0,121	0,127	0,119
25R5C	0,149	0,138	0,129	0,137	0,138
30R0C	0,109	0,107	0,113	0,082	0,103
30R10C	0,234	0,176	0,161	0,145	0,179

Fonte: Autoria própria (2024)

A relação q_t/q_u para as misturas analisadas neste estudo foi de 0,146, calculada pela média aritmética simples das relações apresentadas na Tabela 7. Este valor é consistente com outras pesquisas, como a de Rissardi (2016), que investigou o comportamento mecânico do mesmo solo estabilizado apenas com cal.

Gráfico 2 - Relação qt/qu

Fonte: Autoria própria (2024)

Analisando as relações demonstradas no Gráfico 2, é possível afirmar que a relação qt/qu tendeu a aumentar com o aumento do teor de cal da mistura.

5 CONCLUSÃO

Esta pesquisa atingiu o de objetivo analisar a influência da adição de cal e resíduos de cerâmica vermelha (RCV), provenientes da construção civil, na resistência à tração por compressão diametral de um solo natural da Formação Guabirota.

Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral, realizados aos 28 dias de cura, demonstraram melhorias significativas em todas as misturas com diferentes percentuais de RCV. Para a mistura contendo 10% de RCV e 10% de cal, houve um aumento de 225,33 kPa na resistência em relação ao solo natural. Na mistura com 20% de RCV e variação de cal em 5%, a resistência aumentou em 59 kPa. A maior melhoria foi observada na mistura com 30% de RCV e 10% de cal, com um incremento de 289,83 kPa na resistência.

Os valores observados neste estudo são compatíveis com os resultados de resistência à compressão simples (q_u) apresentados por Hondo (2022) para as mesmas misturas.

Com base nos resultados de resistência à tração (q_t) obtidos neste trabalho e nos resultados de resistência à compressão simples (q_u) obtidos por Hondo (2022), conclui-se que a relação geral q_t/q_u das misturas solo-cal estudadas foi de 0,146 com um erro de 0,008. Esta relação permite a realização de apenas um dos ensaios (q_t ou q_u) para estimar o valor do outro, otimizando o uso de material, tempo e recursos financeiros.

A utilização do solo "in situ" da Formação Guabirota, estabilizado com cal e resíduo de cerâmica vermelha, evita o transporte de material, resultando em uma significativa redução de impactos ambientais.

Portanto, a adição de cal e RCV ao solo é uma técnica eficiente para estabilização, proporcionando melhorias nas propriedades mecânicas do solo. O uso de resíduos de cerâmica vermelha em conjunto com cal não só melhora significativamente a resistência do solo, mas também contribui para uma destinação ambientalmente adequada desses resíduos, além da utilização de menor quantidade de solo.

Como sugestão para estudos futuros, recomenda-se investigar o limite máximo de resíduo que pode ser adicionado ao solo natural mantendo uma resistência

aceitável. Seria pertinente realizar ensaios com diferentes proporções de solo, cal e resíduo de cerâmica vermelha para explorar esta questão com maior profundidade.

REFERÊNCIAS

Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**. São Paulo: ABRELPE, 2022.

Associação Brasileira de Cerâmica. **Números do Setor**. Disponível em: <https://abceram.org.br/numeros-do-setor/>. Acesso em: 22 de maio de 2024.

ALMEIDA, K. S. de; SOARES, L. A. R.; MATOS, J. M. E. de; ALMEIRA, C. de S. M. **Diagnóstico ambiental do setor de cerâmica vermelha na região de Oeiras (PI)**. Revista em Agronegócio e Meio Ambiente, v. 14, n. 2, p. 429–440, 26 mar. 2021.

ARAÚJO, R. A.; MENEZES, A. L. R.; CABRAL, K. C.; NÓBREGA, A. K. C.; MARTINELLI, A. E.; DANTAS, K. G. M. **Evaluation of the pozzolanic activity of red ceramic waste using mechanical and physicochemical methods**. Cerâmica, v. 65, n. 375, p. 461-469, 2019.

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.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **Concreto e argamassa - determinação da resistência à tração por compressão diametral e corpos de prova cilíndricos: método de ensaio**. Rio de Janeiro, RJ: ABNT, 2011. 5 p.

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.

BARBIERI, J. C. **Desenvolvimento sustentável: das origens à Agenda 2030**. Petrópolis, RJ: Vozes, 2020.

BRASIL. **Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 3 ago. 2010. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm. Acesso em: 20 de janeiro de 2024.

BREKAILO, F.; PEREIRA, E.; PEREIRA, E.; HOPPE FILHO, J.; MEDEIROS, M. H. F. **Avaliação do potencial reativo de adições de resíduos de blocos de cerâmica vermelha e de concreto cominuído de RCD em matriz cimentícia**. Cerâmica, v. 65, n. 375, p. 351-358, 2019.

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.

CHIOSSI, Nivaldo. **Geologia de engenharia**. 3. ed. São Paulo: Oficina de textos, 2013.

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.

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, Marta; VEROLET, Quentin; COLOM, Adai; LETRUN, Romain; DERIVERY, Emmanuel; GONZALEZ-GAITAN, Marcos; VAUTHEY, Eric; ROUX, Aurélien; SAKAI, Naomi; MATILE, Stefan. **Fluorescent Flippers for Mechanosensitive Membrane Probes**. Journal of the American Chemical Society, v. 137, n. 2, p. 568-571, 2015.

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

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

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGENS DO ESTADO DO PARANÁ – 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. 63

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.

FELIPE, R. d. **Características Geológico-Geotécnicas na Formação Guabirotuba**. Mineropar, Curitiba, 2011.

GARCIA, E.; CABRAL JUNIOR M.; QUARCIONI, V. A.; CHOTOLI, F. F. **Resíduo de cerâmica vermelha (RCV): uma alternativa como material pozolânico**. Cerâmica Industrial, v. 19, n. 4, p. 31-38, 2014.

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.

HONDO, Kalebe de Almeida; MANDIRA, Tiago. **Melhoramento de Solos para Pavimentação através da Técnica de Estabilização por Aditivos Químicos: Resíduo de Cerâmica Vermelha e Cal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2022.

IBAMA. Legislação Ambiental: **Resolução 307 de 05/07/2002**. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=108894>. Acesso em: 22 de outubro de 2023.

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: 20/10/2023.

ISAIA, G. C. **MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO CIVIL e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. 1. ed. São Paulo: Ipsis Gráfica e Editora, 2010. Volume 1.

INSTITUTO ÁGUA E TERRA. **Geologia do Paraná - História Evolutiva**. Disponível em: <https://www.iat.pr.gov.br/Pagina/Geologia-do-Parana-Historia-Evolutiva>. Acesso em: 22 de novembro de 2023

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 Guabirotuba: 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.

MARQUES, D. V.; PEDROSO, I. D.; PEREIRA, N. R. L.; DUTRA, A. R. A.; CUBAS, A. L. V.; MAGNAGO, R. F. **Resíduos sólidos de cerâmica vermelha na indústria da construção civil – estudo de caso**. Debates Interdisciplinares XIII, p. 95-118, 2020.

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

NAGALLI, André. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil**. São Paulo, SP: Oficina de Textos, 2014.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**: Em 16 aulas/3ª edição. Oficina de textos. São Paulo, SP. 2009. 363 p.

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

RISSARDI, J. L. **Análise da Resistência à tração de um solo da Formação Guabirotuba estabilizado com cal**. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

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

SANTOS, H. G. dos; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C. dos; OLIVEIRA, V. A. de; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A. de; ARAUJO FILHO, J. C. de; OLIVEIRA, J. B. de; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**: 5. ed., rev. e ampl. – Brasília, DF : Embrapa, 2018.

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.

SILVA, Patricia Barboza da. **Estabilização de misturas de resíduos sólidos de demolição e da indústria cerâmica para uso em camadas de pavimentos de vias**. Tese (Doutorado Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.

SOLIZ, Valeria Vaca Pereira. **Estudo de Três Solos Estabilizados com Emulsão Asfáltica**. XVI, 166 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE, Rio de Janeiro, 2007.

TERZAGHI, Karl; PECK, Ralph B.; MESRI, Gholamreza. **Soil mechanics in engineering practice**. 3rd ed. New York, US: J. Wiley & Sons, c 1996. xxx, 549 p. ISBN 0471-08658-4.

Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável Preâmbulo. Disponível em: <https://brasil.un.org/sites/default/files/2020-09/agenda2030-pt-br.pdf>. Acesso em: 17 de abril de 2024.

VIEIRA, T. P.; LUIZ ALBERTO FERNANDES. **Análise faciológica e contexto deposicional do geossítio Bacia Sedimentar de Curitiba, nova seção-tipo para a Formação Guabirotuba**. Geologia USP. Série Científica, v. 20, n. 2, p. 87–104, 12 ago. 2020.

VIZCARRA, G. O. C. **Aplicabilidade de Cinzas de Resíduo Sólido Urbano para Base de Pavimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2010.

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.