

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**FRANCISCO PATRICK BORGES DE LIMA**

**MELHORAMENTO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE PÓ DE MÁRMORE PARA  
APLICAÇÃO EM SUBLEITO DE RODOVIAS**

**CURITIBA**

**2025**

**FRANCISCO PATRICK BORGES DE LIMA**

**MELHORAMENTO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE PÓ DE MÁRMORE PARA  
APLICAÇÃO EM SUBLEITO DE RODOVIAS**

**Soil Improvement with addition of marble dust for use as a road sidewalk  
subgrade**

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)  
Orientador(a): Profa. Dra. Amanda Dalla Rosa Johann.

**CURITIBA**

**2025**



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

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

FRANCISCO PATRICK BORGES DE LIMA

**MELHORAMENTO DE SOLOS COM ADIÇÃO DE PÓ DE MÁRMORE PARA  
APLICAÇÃO EM SUBLEITO DE RODOVIAS**

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: 20 de dezembro de 2024.

---

Amanda Dalla Rosa Johann  
Professora Doutora  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

José Luiz Gonçalves Brandi  
Professor Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Silvana Leonita Weber  
Professora Mestre  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**CURITIBA**

**2025**

Dedico este trabalho a todos que  
continuaram comigo nos momentos mais  
difíceis, amo todos vocês.

## RESUMO

Questões ambientais envolvendo o descarte inadequado de pó de mármore tem se transformado em um desafio para as marmorarias brasileiras, sendo estimados em 240 mil toneladas anuais de material poluente que impactam corpos d'água e degradam solos. Diante desse cenário, e considerando a busca pelos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Organização das Nações Unidas (ONU) surge a necessidade de se encontrar soluções sustentáveis com o objetivo de reduzir, ou controlar, o descarte desses resíduos. Uma alternativa, que será explorada nesse trabalho, é a possibilidade de utilizar a mistura de pó de mármore e cal para melhorar as propriedades dos solos para aplicação em obras de engenharia, como a pavimentação. Esse estudo se dedicou em especial a avaliar o solo da Formação Guabirotuba, caracterizado por alta plasticidade e, de forma especial, baixa resistência nas profundidades de interesse do presente estudo. Foram utilizados ensaios de caracterização, compactação e compressão simples para analisar a eficácia da estabilização do solo com a mistura criada com o pó de mármore. Foram obtidos resultados positivos em sua maioria, indicando que a adição de cal com o pó de mármore apesar de não ter uma melhora na resistência do solo se mostrou uma solução ecológica na destinação do resíduo, enquanto a adição isolada de pó de mármore reduziu a resistência. Os resultados obtiveram variações, sugerindo uma interação entre as porcentagens desses materiais. Por fim, essa pesquisa tem como objetivo contribuir para o reuso sustentável do pó de mármore na engenharia civil, sem a perda dos benefícios econômicos, necessários para a manutenção da atividade.

Palavras-chave: Estabilização de Solos; Pó de Mármore; Resistência à Compressão Simples, Soluções Sustentáveis.

## **ABSTRACT**

Environmental issues related to the improper disposal of marble dust have become a challenge for Brazilian marble companies, with an estimated 240 thousand tons of pollutant material being discarded annually, impacting water bodies and degrading soils. In light of this scenario, and considering the pursuit of the 17 Sustainable Development Goals (SDGs) of the United Nations (UN), there is a need to find sustainable solutions to reduce or control the disposal of these wastes. One alternative, which will be explored in this study, is the possibility of using a mixture of marble dust and lime to improve the properties of soils for engineering applications, such as paving. This study focused specifically on evaluating the soil of the Guabirota Formation, characterized by high plasticity and, particularly, low resistance at the depths of interest for this research. Characterization, compaction, and unconfined compression tests were conducted to analyze the effectiveness of soil stabilization with the marble dust mixture. The results were mostly positive, indicating that the addition of lime with marble dust, although not improving the soil's resistance, proved to be an ecological solution for waste disposal, while the sole addition of marble dust reduced resistance. The results varied, suggesting an interaction between the percentages of these materials. Finally, this research aims to contribute to the sustainable reuse of marble dust in civil engineering, without sacrificing the economic benefits necessary for maintaining the industry.

**Keywords:** Soil Stabilization; Marble Dust; Unconfined Compression Strength; Sustainable Solutions.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1 - Mapa da Formação Guabirotuba (UT-IV).....</b>	<b>16</b>
<b>Figura 2- Camadas de estrutura do pavimento .....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 3– Curva Granulométrica do solo estudado .....</b>	<b>23</b>
<b>Figura 4– Curva granulométrica do pó de mármore .....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 5 - Curvas de compactação do solo puro e adições .....</b>	<b>27</b>
<b>Figura 6 - Gráfico de qu por % de Cal .....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 7 - Gráfico de qu por % de PM.....</b>	<b>29</b>
<b>Figura 8 - Gráfico de qu de amostra de cal fixo em 5% com adição de PM .....</b>	<b>30</b>
<b>Figura 9 - Resumo dos resultados de compressão simples .....</b>	<b>31</b>

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de LL e LP e IP (LL-LP).....	18
Tabela 2 – Resultados dos ensaios de LL e LP e IP (LL - LP) para Solo-Cal .....	18
Tabela 3 – Composição Granulométrica do solo estudado.....	23
Tabela 4– Misturas estudadas.....	24
Tabela 5 - Resumo parâmetros de compactação .....	26
Tabela 6 - Resumo dos resultados de compressão simples por mistura, % cal, % PM e qu .....	28

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
CC	Coeficiente de Curvatura
cm	Centímetros
cm <sup>3</sup>	Centímetros cúbicos
CP	Corpo de Prova
DNER	Departamento Nacional de Estradas e Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura e Transporte
g	Grama
IG	Índice de Grupo
IP	Índice de Plasticidade
h	Teor de Umidade Inicial
kg	Quilograma
kgf	Quilogramas-força
km <sup>2</sup>	Quilômetros quadrados
KPa	Quilopascal
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
m <sup>2</sup>	Metros quadrados
mm	Milímetros
MPa	Megapascal
N	Newton
NBR	Norma Brasileira
°C	Graus Celsius
pH	Potencial Hidrogeniônico
PM	Pó de Mármore
SPT	Standard Penetration Test
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>11</b>
<b>1.1 Objetivos</b>	<b>12</b>
1.1.1 Objetivo Geral	12
1.1.2 Objetivos Específicos	12
<b>1.2 Justificativa</b>	<b>12</b>
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>14</b>
<b>2.1 Solos</b>	<b>14</b>
2.1.1 Tipos de Solo	14
2.1.2 Formação Guabiro tuba	15
<b>2.2 Estabilização do solo</b>	<b>16</b>
2.2.1 Estabilização Mecânica	17
2.2.2 Estabilização Química	17
<b>2.3 Resíduo de pó de mármore</b>	<b>17</b>
<b>2.4 Cal</b>	<b>18</b>
<b>2.5 Pavimentação</b>	<b>18</b>
2.5.1 Camadas do pavimento	19
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>21</b>
<b>3.1 Materiais</b>	<b>21</b>
3.1.1 Solo	21
3.1.2 Pó de mármore	21
3.1.3 Cal	21
3.1.4 Água	22
<b>3.2 Equipamentos</b>	<b>22</b>
<b>3.3 Métodos</b>	<b>22</b>
3.3.1 Ensaio de caracterização	22

3.3.2	Ensaio de compactação Proctor.....	24
3.3.3	Ensaio de compressão simples.....	25
<b>4</b>	<b>RESULTADOS.....</b>	<b>26</b>
<b>4.1</b>	<b>Caracterização do Pó de mármore .....</b>	<b>26</b>
<b>4.2</b>	<b>Parâmetros de compactação.....</b>	<b>26</b>
<b>4.3</b>	<b>Compressão simples .....</b>	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>32</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>33</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Considerando o atual contexto de iniciativas globais e multissetoriais que visam à promoção da sustentabilidade, temas relacionados à busca por um melhor aproveitamento e destinação dos resíduos sólidos se mostram de extrema relevância, sobretudo porque estão alinhados aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU).

As marmorarias no Brasil geraram 240 mil toneladas de resíduo do corte de mármore e granito segundo Rosato (2013), e ano após ano esse valor tem aumentado, sem a destinação correta esse resíduo pode gerar impactos ambientais, entre eles pode-se citar poluição de rios, depósitos irregulares e até poluição do ar.

O solo da região de Curitiba e seus municípios limítrofes é característico por possuir alta plasticidade, expansibilidade, potencial dispersivo e, de forma especial, baixa resistência nas profundidades de interesse do presente estudo (Salamuni, 1998). A Formação geológica que possui este tipo de solo é chamada Formação Guabirota.

O melhoramento de solos é uma técnica antiga, comumente utilizada já na primeira metade do século 19 (Braja, 2019). Muitos pesquisadores já utilizaram materiais cimentícios e resíduos para melhorar o solo aplicado na engenharia (Tenório, 2019) e (Mello, 2019).

Na área da geotecnia, exige-se dos pavimentos durabilidade, qualidade que atendam às novas normas de dimensionamento para se adequar a um alto fluxo de veículos pesados, exigindo solos estáveis e de boa resistência nas suas camadas superficiais (Braja, 2019). Como citado anteriormente, o solo de Curitiba apresenta baixa resistência e para sua utilização é necessário um melhoramento, onde podem ser aplicadas diversas técnicas, entre elas a aplicação de resíduos.

Em encontro com a problemática, buscou-se entender o comportamento físico e mecânico da mistura de um solo local (Formação Guabirota) com o pó de mármore mais cal, com objetivo de avaliar se existe uma melhora do solo visando sua aplicação em diversas obras de engenharia, como a pavimentação.

## **1.1 Objetivos**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

O objetivo principal do trabalho é analisar o comportamento físico e mecânico da mistura de solo com a cal e o pó de mármore para aplicação em subleito de pavimento de rodovias.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Caracterizar o pó de mármore;
- Conduzir ensaios de compactação do solo com variações de percentagem de pó de mármore e de cal;
- Avaliar como a mistura influencia as características físicas e mecânicas dos solos;
- Determinar a resistência à compressão simples das diferentes misturas examinadas.

## **1.2 Justificativa**

Esse trabalho tem como objetivo utilizar o pó de mármore, que é gerado nas marmorarias do polimento de peças de mármore, como aditivo em misturas com solo, trazendo benefícios físicos e mecânicos. Também visa a reintrodução consciente do pó de mármore nos processos de construção, que comumente é descartado, proporcionando uma destinação mais apropriada para esse resíduo.

A destinação inadequada do pó de mármore, um subproduto da indústria de mármore, pode trazer problemas ambientais. Em alguns casos, quando esse pó é descartado em corpos d'água, pode aumentar a turbidez, afetando os ecossistemas aquáticos. Outro problema é o depósito desse pó em áreas abertas, levando ao assoreamento de rios e córregos. Isso reduz a capacidade de drenagem e aumenta o risco de inundações. Em grandes quantidades, ele também interfere na composição do solo, afetando a flora e a fauna locais, e potencialmente contaminando lençóis freáticos.

Solos inadequados podem não suportar um alto fluxo de veículos, resultando em problemas de engenharia e infraestrutura. Essa baixa capacidade de suporte somada a uma alta deformabilidade do solo resulta em afundamentos, rachaduras e ondulações nas superfícies das estradas. Além de aumentar os custos de manutenção e reparo, também compromete a segurança dos usuários. Solos instáveis estão propensos a causar deformações permanentes nas estradas, resultando em pistas irregulares que afetam a dirigibilidade e a eficiência do transporte. Em casos extremos, essas falhas podem levar a acidentes graves, colocando em risco a vida de motoristas e passageiros.

Os ensaios realizados nesse trabalho servirão como base para um enriquecimento do estudo das propriedades mecânicas do melhoramento de solo da Formação Guabirotuba.

Por fim é importante destacar que a busca por alternativas para o manejo desses resíduos pode contribuir com o ODS 12, "Assegurar padrões de produção e de consumo sustentáveis", especificamente para três das onze metas estabelecidas pelo Brasil para esse ODS, a saber: "12.2 - Até 2030, alcançar a gestão sustentável e o uso eficiente dos recursos naturais"; "12.5 - Até 2030, reduzir substancialmente a geração de resíduos por meio da prevenção, redução, reciclagem e reuso"; e "12.6 - Incentivar as empresas, especialmente as grandes e transnacionais, a adotarem práticas sustentáveis".

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Solos

Os solos em suma são uma mistura de partículas sólidas, água e ar e são formados da decomposição das rochas, decorrentes de agentes físicos e químicos (Pinto, 2006). A composição das rochas pode ser provocada por variação de temperatura, água, presente na fauna e flora, esses processos são muito mais extremos em climas quentes do que em frios. Isso forma os mais diversos tipos de solo.

#### 2.1.1 Tipos de Solo

Os solos podem ser classificados de várias maneiras, com base em sua origem, composição mineralógica, textura, estrutura e propriedades físicas e químicas (Pinto, 2006).

Segundo Vaz (1996), os solos residuais são aqueles que se originam da decomposição das rochas e são aqueles que permanecem no local onde foram formados, normalmente são formados em regiões tropicais, devido a influência de fatores de temperatura, precipitação e cobertura vegetal a degradação da rocha é mais rápida, o Brasil tenha uma grande parte do seu solo residual.

Os solos transportados são levados para o seu local atual por algum agente transportador, seja o vento, chuva, geleiras e outros. As suas características são função do agente transportador, existindo uma subdivisão dessa classificação de solo (Pinto, 2006).

De acordo com Souza (2015), Solos orgânicos contêm uma quantidade relevante de matéria em decomposição de vegetais e animais. Eles são bastante problemáticos por apresentarem uma camada sedimentar de argila, areia fina e silte e são muito compressíveis, apresentando um elevado índice de vazios e baixa capacidade de suporte.

Os solos lateríticos têm argila constituída por minerais caulínícos e elevada concentração de ferro e alumínio na forma de óxidos e hidróxidos. Eles se apresentam como não saturados e com índice de vazio elevado. Depois de compactados, são bastante empregados em pavimentação e em aterros (Pinto, 2006).

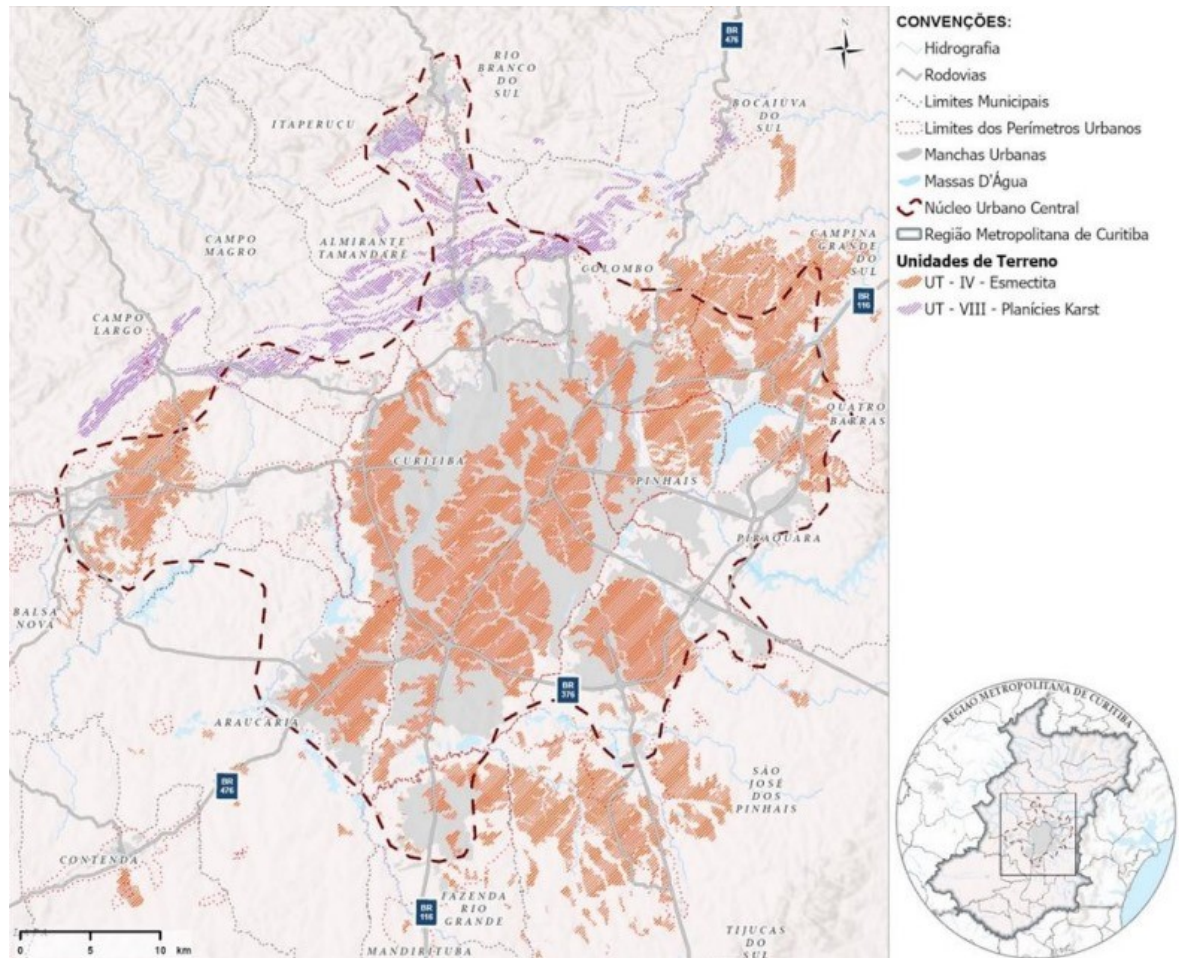
### 2.1.2 Formação Guabirota

Os solos sedimentares da região de Curitiba são basicamente duas formações geológicas, chamadas Formação Guabirota e Formação Tinguis, abundantes em toda a região metropolitana e de características bem definidas sobre o ponto de vista geotécnico (Salamuni, 1998). Tratam-se normalmente de argilas siltosas ou de siltes argilosos, tipicamente de coloração cinza-esverdeada, marrom ou avermelhada, nas quais diversos tipos de obras de engenharia são constantemente erguidos.

A Formação Guabirota é composta por sedimentos majoritariamente originados da decomposição química das rochas Pré-Cambrianas, depositados em um intervalo de 23 a 1,8 milhões de anos atrás, os quais atingem espessuras na ordem de 60 a 80 metros e compreendem sequências litológicas com predomínio de argilas (cauliníticas e esmectíticas) e areias arcólicas (Salamuni, 1998).

A maior parte das argilas da Formação Guabirota pertencem ao grupo das esmectitas (tipo 2:1), que são argilas expansivas e higroscópicas (perdem e reabsorvem água com facilidade), o que as tornam muito retrativas e com alta suscetibilidade à erosão e ao movimento de massa em encostas (Felipe, 2011). Os valores do ensaio Standard Penetration Test (SPT) para o solo dessa região fornece valores de 15 a 30 golpes, isso sugere que se trata de um solo com resistência intermediária a alta, dependendo da profundidade e das características. Na Figura 1 pode-se ver a localização da bacia sedimentar de Curitiba.

**Figura 1 - Mapa da Formação Guabirotuba (UT-IV)**



Fonte: AMEP (2025).

## 2.2 Estabilização do solo

Segundo Fioratti (2008), estabilização do solo se refere a um conjunto de técnicas e processos que visam melhorar as propriedades mecânicas para torná-lo mais adequado para suportar cargas e atender às demandas de estruturas, podendo ser feitas com agentes estabilizadores tais quais, cal, cimento fibra e vegetais, por exemplo.

O solo estabilizado apresenta maior resistência à compressão e ao cisalhamento, permitindo que ele suporte cargas mais elevadas sofrendo deformações aceitáveis. Tal característica auxiliará na durabilidade do pavimento (Souza, 2015).

A adição de materiais estabilizadores pode aumentar a permeabilidade do solo, facilitando a drenagem da água e reduzindo o risco de saturação e instabilidade.

Essa medida previne a erosão, o alagamento e a formação de lama, garantindo a estabilidade de encostas, canais e outras obras em áreas com alta pluviosidade (Makusa, 2013).

### 2.2.1 Estabilização Mecânica

Segundo Caputo (1996), os solos são parte essencial e funcionam como base para diversas obras: fundações, pavimentação e aterros. Nem sempre eles se encontram nas condições ideais para suportar as cargas e esforços que serão solicitados. Então, a estabilização do solo entra como uma solução técnica para deixá-lo adequado para as futuras obras.

A estabilização mecânica é atualmente considerada a técnica mais utilizada, especialmente para a construção de estradas. Trata-se de uma melhoria que tem como princípios a compactação e a granulometria. O processo de compactação aumenta a densidade do solo e reduz o espaço de vazios, fazendo com que o solo aumente sua resistência à compressão simples e dificulte a percolação da água e a erosão. A granulometria do solo pode ser alterada pela adição de materiais granulares, como areia e cascalho. A adição desses materiais homogeneiza as partículas do solo, deixando-o bem graduado e contribuindo para a capacidade de carga e resistência mecânica do solo (Medina, 1987).

### 2.2.2 Estabilização Química

A estabilização química faz o melhoramento das propriedades do solo através da adição de materiais químicos que modificam suas propriedades internas. Os materiais mais utilizados são cimento, cal, asfalto, polímeros, eles permitem com que sejam geradas reações químicas que ajudam a atingir com maior facilidade a umidade ótima, melhorando as propriedades físicas e mecânicas do solo (Makusa, 2013).

## 2.3 Resíduo de pó de mármore

Em sua pesquisa, Tenório (2019) teve como resultado para a massa específica real dos grãos do mármore de  $2,74 \text{ g/cm}^3$ . Os limites físicos de consistência para a amostra de pó de mármore que foram obtidos através dos ensaios de limite de liquidez

(LL) e limite de plasticidade (LP) realizados por Tenório (2019). São apresentados na Tabela 1, os valores para o pó de mármore.

**Tabela 1 - Resultados dos ensaios de LL e LP e IP (LL-LP)**

Ensaio	Resultados
Limite de Liquidez	58%
Limite de Plasticidade	46%
Índice de Plasticidade	12%

**Fonte: TENÓRIO (2019).**

## 2.4 Cal

Em sua pesquisa, Rissardi (2018), teve como resultado para a massa específica real dos grãos de cal 2,40 g/cm<sup>3</sup>. Os limites físicos de consistência para a amostra de pó de mármore que foram obtidos através dos ensaios de limite de liquidez (LL) e limite de plasticidade (LP). Serão apresentados na Tabela 2 os valores para o Solo – Cal.

**Tabela 2 – Resultados dos ensaios de LL e LP e IP (LL - LP) para Solo-Cal**

Ensaio	Teor de Cal				
	0%	3%	5%	7%	9%
LL (%)	48	48	49	48	47
LP (%)	34	34	33	32	34
IP (%)	14	14	16	16	13

**Fonte: Rissardi (2018).**

## 2.5 Pavimentação

A superfície de rodagem de uma via é crucial para a segurança e conforto dos usuários. Uma superfície bem projetada e construída reduz a incidência de acidentes, melhora a aderência dos pneus e diminui a produção de ruído. Balbo (2007), destaca a importância de uma superfície uniforme e aderente para garantir a segurança em

condições de pista molhada, enquanto uma superfície menos ruidosa contribui para o conforto ambiental.

Bernucci *et al.* (2008), descrevem o pavimento como uma estrutura em camadas, cada uma com uma função específica para distribuir cargas e resistir a diferentes tipos de esforços. As camadas incluem reforço de subleito, sub-base, base e revestimento, contribuindo para a estabilidade e durabilidade do pavimento.

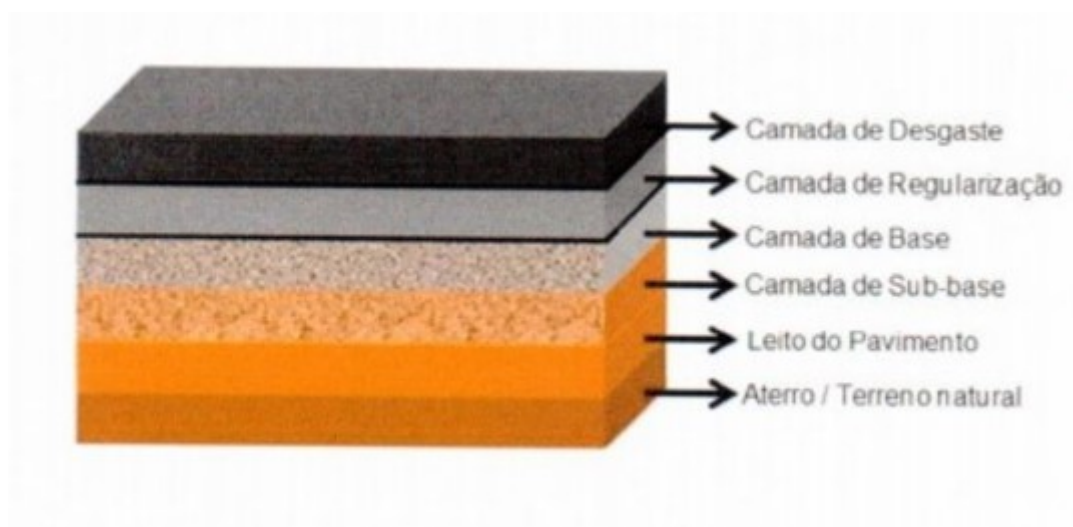
A escolha dos materiais para cada camada do pavimento é essencial para assegurar que a estrutura como um todo possa resistir às cargas aplicadas e às condições ambientais. A resistência e a deformabilidade dos materiais são fatores chave na determinação da capacidade de carga e da longevidade segundo Bernucci *et al.* (2008).

O DNER (1997), enfatiza a complexidade envolvida no cálculo das tensões e deformações em pavimentos. A interação entre as diferentes camadas de materiais de resistência variada exige uma análise cuidadosa para garantir que a estrutura suporte as cargas do tráfego sem falhas prematuras.

### 2.5.1 Camadas do pavimento

De acordo com Bernucci (2006), um pavimento é composto por várias camadas conforme Figura 2, cada uma desempenhando uma função específica. Essas camadas incluem a fundação, o subleito, e outras camadas de espessuras e materiais variados, dimensionadas de acordo com as necessidades.

**Figura 2- Camadas de estrutura do pavimento**



Fonte: DNER (1997).

Segundo Bernucci *et al.* (2008) os pavimentos são geralmente divididos em camadas distintas, e sua composição é definida com base no tipo de pavimento. Em termos gerais, os pavimentos são divididos em Revestimento ou Capa de rolamento, Base, Sub-base, Reforço do subleito e Subleito.

O revestimento asfáltico é a camada superior do pavimento de uma via, composta por agregados e o ligante asfáltico. Essa camada garante a impermeabilidade, resistência ao tráfego e o conforto do rolamento e transmite as ações do tráfego de forma atenuada às camadas inferiores (Bernucci et al., 2008).

Conforme o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a base é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego. Esta camada é fundamental para a construção do revestimento, servindo como suporte direto para a camada superior.

De acordo com o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), a sub-base é uma camada complementar à base. Ela é utilizada quando, por razões técnico-econômicas, não é aconselhável construir a base diretamente sobre o terreno de regularização. A sub-base contribui para a distribuição das cargas e aumenta a durabilidade do pavimento.

Segundo o Manual de Pavimentação do DNIT (2006), o reforço do subleito é uma camada de espessura constante, aplicada por razões técnico-econômicas. Esta camada é colocada acima da regularização, utilizando materiais com características geotécnicas inferiores ao da camada superior, mas melhores do que o material do subleito.

A regularização do pavimento é a faixa de espessura irregular construída sobre o subleito. Sua função é conformar a superfície do pavimento, tanto transversalmente quanto longitudinalmente, de acordo com o projeto (Senço, 1997).

O subleito é a camada fundamental do pavimento, servindo como terreno natural, talvez necessite ter suas propriedades mecânicas melhoradas a partir de uma camada sobrejacente chamada de reforço do subleito. O subleito é o solo de fundação sobre o qual o pavimento será apoiado, desempenhando um papel crucial na estabilidade e suporte da estrutura, DNIT (2006).

## **3 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **3.1 Materiais**

Nesse capítulo serão abordados todos os materiais que foram usados para a realização do estudo, características físicas, local de captação e todas as informações relevantes para o mesmo.

#### **3.1.1 Solo**

O solo que será utilizado para a execução dos estudos terá origem de um terreno nas proximidades da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR) – Sede Ecoville, localizada na Rua Monsenhor Ivo Zanlorenzi, número 4722. Foi feita a coleta manual com a utilização de pá e carrinho de mão para o transporte até o laboratório onde foram realizados os estudos.

O solo da Formação Guabirota, retirado das proximidades da UTFPR, apresenta coloração vermelha e não está contaminado, mantendo assim todas as suas características mineralógicas. Segundo a pesquisa realizada por Rissardi (2018), a massa específica real dos grãos foi de 2,37 g/cm<sup>3</sup>.

#### **3.1.2 Pó de mármore**

Na pesquisa, foi utilizado o pó de mármore (PM) que é classificado como material não perigoso Classe II B – Inerte segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004).

Segundo Silva (2018), a adição de pó de mármore pode diminuir o limite de liquidez do solo, isso significa que o solo se torna menos suscetível à deformação e à ruptura quando saturado com água, o limite de plasticidade também é reduzido, fazendo com que o solo se torne mais coeso e menos propenso à formação de rachaduras quando seco.

#### **3.1.3 Cal**

Segundo a NBR 6473:2003 (ABNT, 2003) a cal hidratada tipo CH-III que será utilizada apresenta riqueza em hidróxidos de cálcio e magnésio, os principais responsáveis por sua capacidade aglomerante. Essa propriedade crucial permite que

a cal hidratada CH-III se torne o elemento essencial na criação de argamassas resistentes e duráveis.

A composição da cal hidratada CH-III vai além dos hidróxidos. Pequenas quantidades de hidróxidos não hidratados e carbonatos de cálcio e magnésio também fazem parte da fórmula, através de um processo chamado hidratação, seja pela exposição ao ar úmido ou pela ação de hidratadores, a cal virgem se transforma em cal hidratada, também conhecida como "extinção" da cal.

#### 3.1.4 Água

Foi utilizada água destilada nos ensaios de resistência à compressão simples radial e no ensaio de Proctor, pois ela é livre de impurezas, o que faz com que não interfira nos resultados dos ensaios e traga assim análises mais confiáveis.

### 3.2 Equipamentos

Duas balanças digitais (uma com precisão 0,01G - 500G, e outra com capacidade de 50 KG);

Estufa de secagem de  $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ;

Quinze cápsulas de metal;

Almofariz e mão com borracha;

Espátula metálica de lâmina flexível com 8 cm de comprimento e 2 cm de largura;

Peneira # 4 (4,8 mm);

Molde cilíndrico de 1000 cm<sup>3</sup> e dimensões de 12,73cm de altura e 9,95cm de diâmetro com base e colarinho;

Soquete cilíndrico padrão de 5,08cm de diâmetro e altura de queda de 31cm;

Régua metálica, Paquímetro, e;

Extrator de amostras.

### 3.3 Métodos

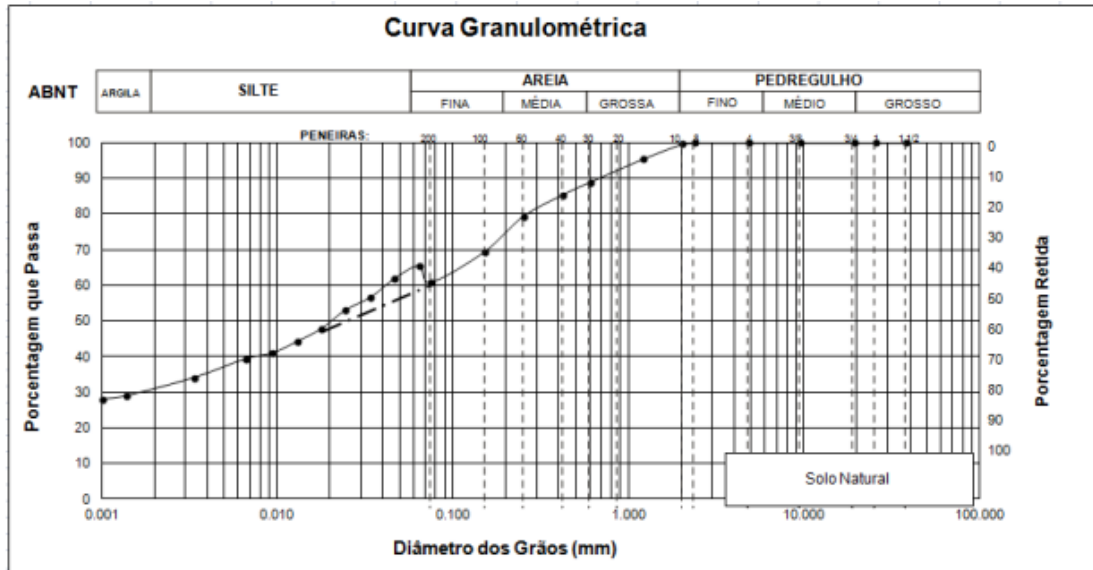
#### 3.3.1 Ensaio de caracterização

Com o objetivo específico de descobrir o comportamento mecânico de uma mistura de solo estabilizada com cal e pó de mármore, as propriedades físicas e

químicas de cada componente desempenham um papel crucial. Portanto, é necessário realizar ensaios de caracterização para definir tais propriedades.

Rissardi (2018), realizou os ensaios de caracterização por peneiramento e sedimentação, e apresentou a curva granulométrica para o solo estudado. Na Figura 3 tem-se a curva granulométrica.

**Figura 3– Curva Granulométrica do solo estudado**



Fonte: Rissardi (2018)

A partir dessa curva granulométrica e usado a escala utilizada pela NBR 6508 (2014), a amostra estudada por Rissardi (2018), mostra as seguintes composições granulométricas apresentadas na Tabela 3.

**Tabela 3 – Composição Granulométrica do solo estudado**

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

Fonte: Rissardi (2018).

### 3.3.1.1 Pó de mármore

Para o pó de mármore serão realizados os ensaios de determinação da granulometria, massa específica dos grãos, limites de liquidez e plasticidade, bem como a compactação do solo. Todos os ensaios seguirão as diretrizes das normas estabelecidas pela ABNT.

No ensaio de compactação de solo será realizado tanto para o solo estudado, quanto para a mistura de solo com adição de cal mais resíduo de pó de mármore, nas proporções propostas pelo estudo.

### 3.3.2 Ensaio de compactação Proctor

O ensaio de compactação será realizado de acordo com a NBR 7182 (2016), a partir desse procedimento será obtido o peso específico aparente seco máximo e a umidade ótima do solo estudado. Esse ensaio será reproduzido para a amostra de solo natural, bem como para as misturas de solo com adição de cal e o resíduo de mármore, fazendo uso da energia de compactação normal e nas quantidades da tabela 4:

**Tabela 4– Misturas estudadas**

	Solo (%)	Cal (%)	PM (%)
Mistura 1	100	0	0
Mistura 2	85	0	15
Mistura 3	70	0	30
Mistura 4	95	5	0
Mistura 5	80	5	15
Mistura 6	65	5	30

**Fonte: Autoria própria (2025).**

Sendo o objetivo desse processo, definir a umidade ótima e o peso específico aparente seco, para cada teor de resíduo citado, tais dados nortearão a moldagem dos corpos de prova a seguir.

A preparação da amostra consiste em secar em estufa a 60°C, destorroar a amostra no almofariz pela mão de gral, passar pela peneira de 4,78mm e

homogeneizar com a quantidade de pó de mármore calculada em cima do solo seco. Em seguida a amostra é homogeneizada com água em teores crescentes, tantas vezes quantas necessárias para concretizar a curva de compactação do material e, no mínimo, cinco vezes.

O processo repete-se com amostras não trabalhadas, um novo material para cada ponto da curva de compactação. A execução do ensaio consiste em fixar o molde à base metálica, ajustar as borboletas (presilhas) e colocar um fundo de papel para a amostra não grudar. Aplica-se, então, 26 golpes em 3 camadas de espessuras semelhantes do material preparado, escarificando a face superior de camada para garantir aderência.

Com a régua de aço biselada rasar o excesso de material na altura exata do molde e determinar, com aproximação de 1 g, a massa do material úmido compactado mais a do molde. Por subtração da massa do molde se determina a massa do material úmido compactado. Por fim, obtém-se a umidade da amostra através de três cápsulas com material compactado e secar em estufa numa temperatura de  $110^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , até constância de massa, fazer as determinações de massas com a aproximação de 0,01 g e tomar a média como umidade representativa do corpo de prova compactado.

### 3.3.3 Ensaio de compressão simples

Trabalhos e pesquisas que procuram verificar a eficácia da estabilização do solo com resíduos, frequentemente utilizam ensaios de resistência à compressão simples (RCS), também conhecido como *Unconfined Compression Strength* (UCS). De acordo com Foppa, 2005, esses ensaios são muito utilizados por apresentarem baixos custos de execução, além de serem rápidos e de resultados confiáveis. Por experiência, sabe-se que danos significativos podem surgir quando se aplica camadas compactadas de solo e cimento sobre outra camada de solo com baixa capacidade de suporte.

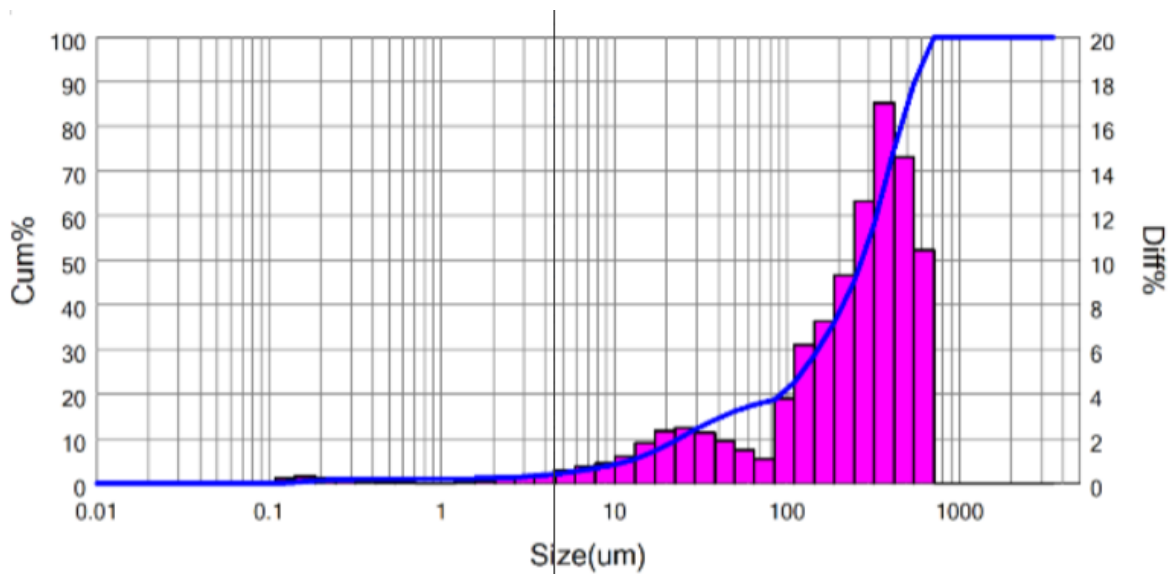
A NBR 12025 (2012) descreve procedimentos gerais que serviram como guia para a realização dos ensaios de compressão simples. Nesses ensaios, os corpos de prova foram submetidos a rompimento em prensas, e os dados gerados foram devidamente registrados para análise dos resultados.

## 4 RESULTADOS

### 4.1 Caracterização do Pó de mármore

O pó de mármore é composto de 0% de pedregulho (acima de 2mm), 83% de areia (0,06 a 2mm), 17% de silte (0,002 a 0,06mm) e 0% de argila (abaixo de 0,002mm), conforme Figura 4.

Figura 4– Curva granulométrica do pó de mármore



Fonte: Autoria própria (2025).

### 4.2 Parâmetros de compactação

Os parâmetros de compactação estão resumidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Resumo parâmetros de compactação

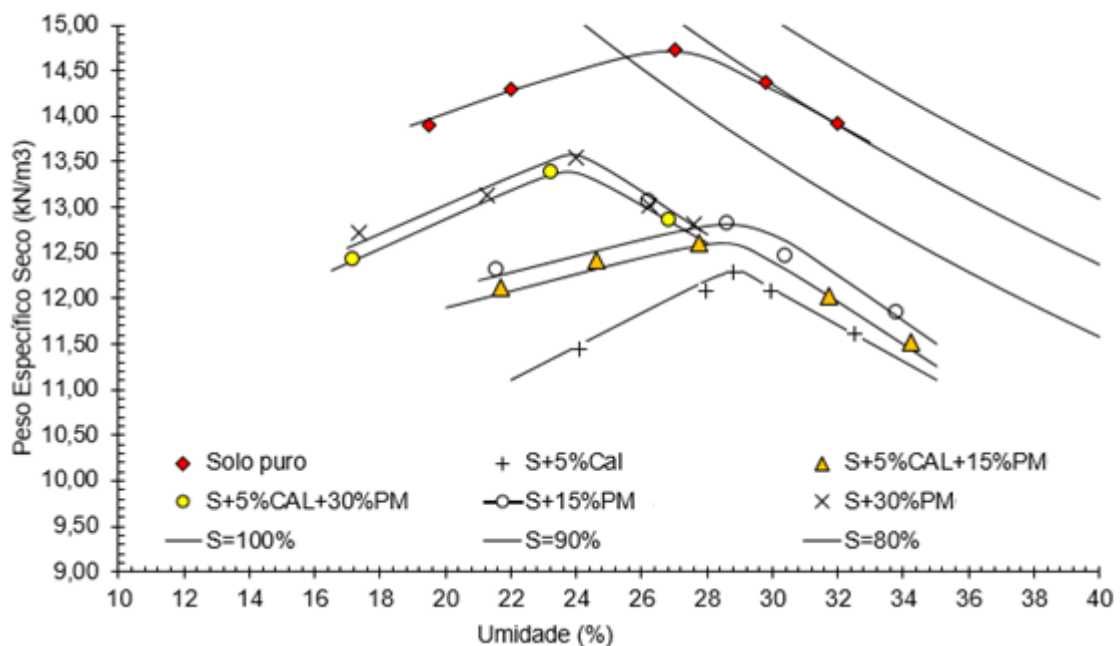
	Umidade ótima (%)	Peso esp. seco máximo (kN/m <sup>3</sup> )
Mistura 1	27	14,72
Mistura 2	29	12,70
Mistura 3	24	13,55
Mistura 4	29	12,30
Mistura 5	29	12,40
Mistura 6	24	13,35

Fonte: Autoria própria (2025).

Os parâmetros de compactação foram retirados a partir da Figura 5. Com a interpretação dos resultados, percebe-se que:

- A adição de PM reduziu a umidade ótima e reduziu o peso específico seco máximo, quando comparados ao solo puro;
- Entre as curvas de compactação somente com adição de PM, conforme aumenta a adição de resíduo, reduz a umidade ótima e aumenta o peso específico seco máximo;
- A adição de cal reduziu a umidade ótima e diminuiu o peso específico, comparado ao solo puro, e;
- Entre as curvas de compactação de adição de cal e PM, conforme aumenta a adição de PM, reduz a umidade ótima e aumenta o peso específico seco máximo. A Figura 5 apresenta essa relação.

**Figura 5 - Curvas de compactação do solo puro e adições**



Fonte: Autoria própria (2025).

### 4.3 Compressão simples

Os resultados do ensaio de compressão simples estão resumidos por mistura, porcentagem de aditivos e tensão de ruptura ( $q_u$ ) na Tabela 6.

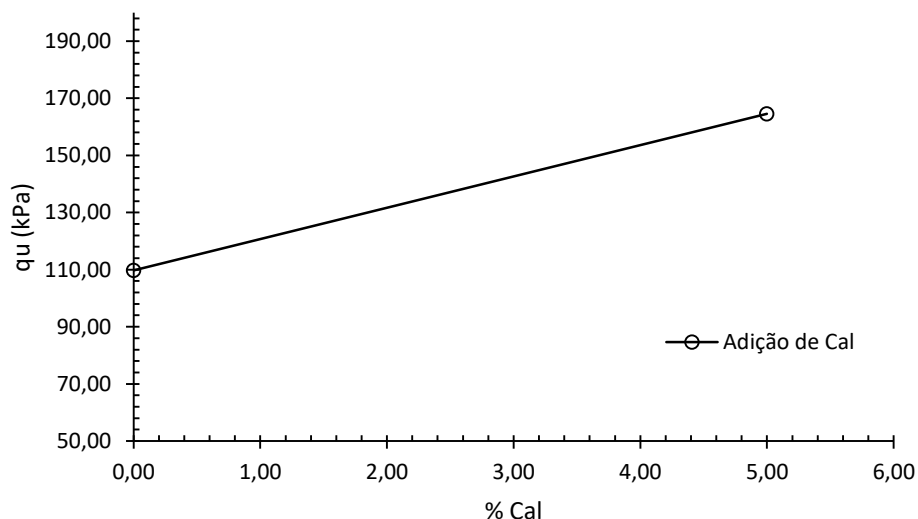
**Tabela 6 - Resumo dos resultados de compressão simples por mistura, % cal, % PM e  $q_u$**

Mistura	Cal (%)	PM (%)	$q_u$ (kPa)
Solo	0	0	109,69
15% PM	0	15	71,43
30% PM	0	30	63,78
5% CAL	5	0	164,54
5% CAL + 15% PM	5	15	89,29
5% CAL + 30% PM	5	30	91,84

Fonte: Autoria própria (2025).

As amostras que foram adicionadas 5% de cal, e curadas ao ar por 30 dias, resultaram em uma média  $q_u$  igual a 164,54 kPa, aumentando em 50% do resultado obtido com o solo puro, conforme mostra a Figura 6. No estudo de Rissardi (2018), foi encontrado uma média de  $q_u$  de 660 kPa. A diferença nos resultados pode ser atribuída ao fato de que, no estudo mencionado, a compactação foi realizada na umidade ótima das misturas.

**Figura 6 - Gráfico de  $q_u$  por % de Cal**

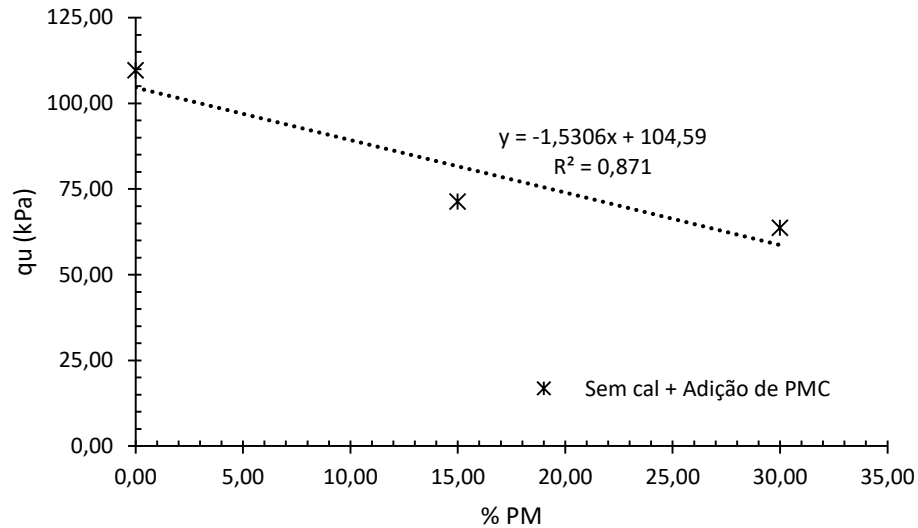


Fonte: Autoria própria (2025).

Conforme mostra a Figura 7, as amostras que foram adicionadas somente PM, e curadas por 30 dias, resultaram em uma média final  $q_u$  igual a 71,43 kPa para 15%

de PM e 63,78 kPa para 30% de PM, reduzindo em 35% e 42%, respectivamente, do resultado obtido com o solo puro.

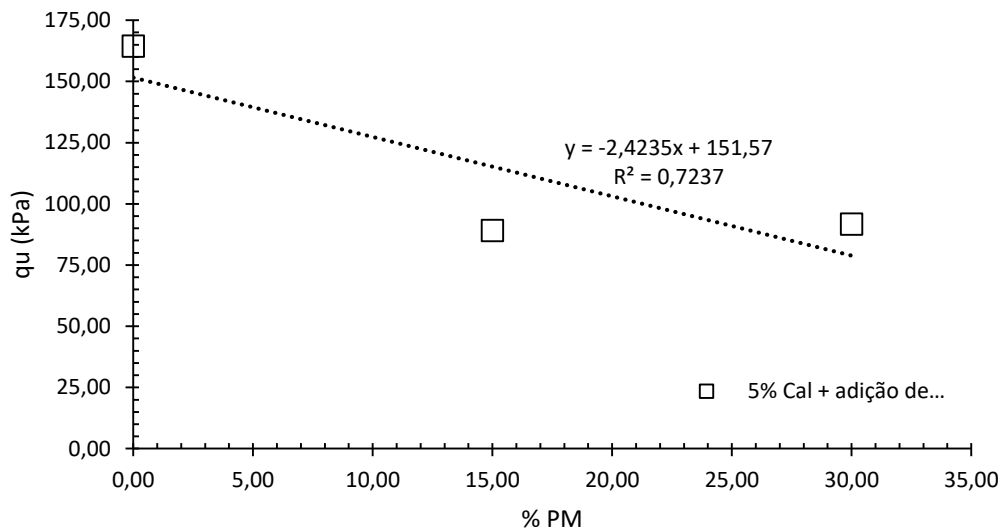
**Figura 7 - Gráfico de  $q_u$  por % de PM**



**Fonte: Autoria própria (2025).**

Conforme mostra a Figura 8, as amostras que foram adicionadas um teor de cal fixo em 5% e variou-se a adição de PM, e curadas por 30 dias, resultaram em uma média final  $q_u$  igual a 89,29 kPa para 5% de cal e 15% de PM e 91,84 kPa para 5% de cal e 30% de PM, reduzindo em 19% e 17%, respectivamente, do resultado obtido com o solo puro. Mesmo variando a adição de PM, a redução do resultado  $q_u$  não foi progressivo, sugerindo uma reação da cal com o solo e com o PM.

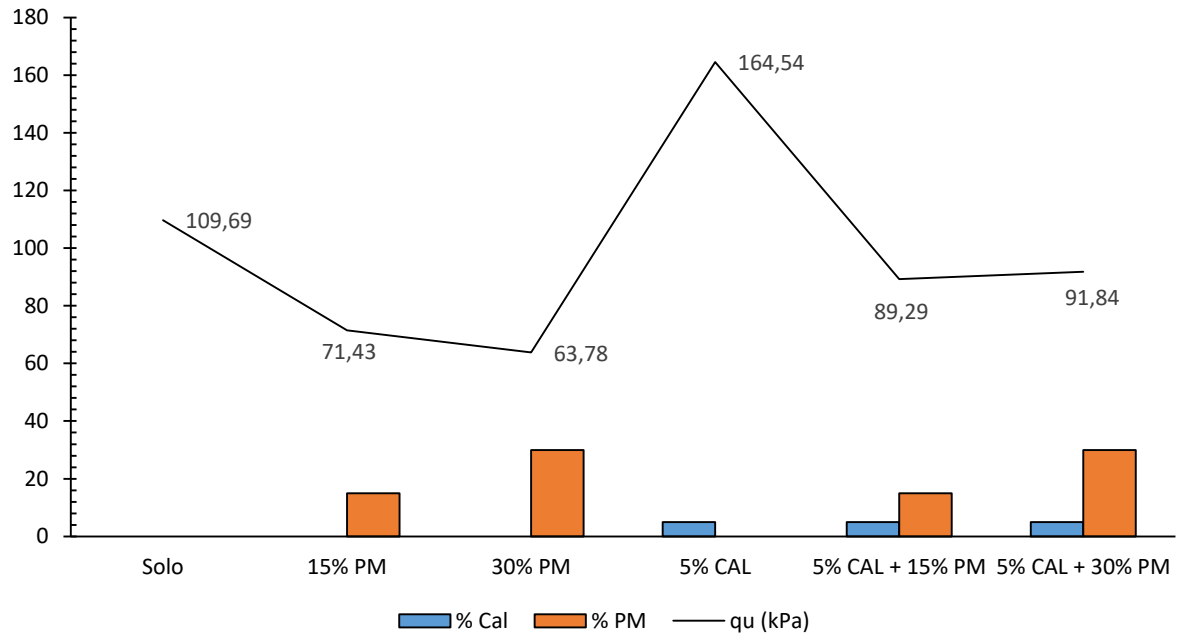
**Figura 8 - Gráfico de qu de amostra de cal fixo em 5% com adição de PM**



**Fonte: Autoria própria (2025).**

Os resultados foram plotados em um gráfico de barras com uma linha de tendência dos resultados de qu. A Figura 9 demonstra que a adição somente de PM reduz o resultado qu; a adição de cal aumenta o resultado qu; e, por fim, a adição de cal e PM reduzem o resultado qu, porém não progressivamente, sugerindo uma reação entre os materiais.

É importante destacar que mesmo reduzindo o valor qu quando se adiciona 5% de cal em 30% de PM, o qu se aproxima do registrado pelo solo puro. No entanto, considerando o ensejo de promover a destinação adequada do resíduo sem impactar a resistência, avalia-se como necessário, adicionar uma quantidade de cal para o melhoramento de qu, que embora implique em custos, pode se mostrar mais viável em termos de custo-benefício.

**Figura 9 - Resumo dos resultados de compressão simples**

Fonte: Autoria própria (2025).

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O objetivo principal do trabalho foi analisar o comportamento físico e mecânico da mistura de solo com a cal e o pó de mármore para aplicação em subleito de pavimento de rodovias. Após realização dos ensaios e análise dos resultados, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A compactação das amostras com PM obteve uma menor umidade ótima e menor peso específico seco máximo; entre as curvas de compactação somente com adição de PM, conforme aumenta a adição de resíduo, reduz a umidade ótima e aumenta o peso específico seco máximo;

- A compactação das amostras com cal obteve uma menor umidade ótima e menor peso específico; entre as curvas de compactação de adição de cal e PM, conforme aumenta a adição de PM, reduz a umidade ótima e aumenta o peso específico seco máximo.

- Os resultados de resistência à compressão simples comprovaram que a adição somente de PM reduz a resistência, a adição de cal aumenta a resistência, e a adição de cal e PM reduzem a resistência, porém não progressivamente, sugerindo uma reação entre os materiais.

- Por fim, a adição de cal e PM aumenta a resistência das amostras submetidas ao ensaio de resistência à compressão simples, quando comparados aos resultados somente com adição de PM.

A pesquisa comprova que o pó de mármore proveniente das serrarias, é um material viável como aditivo para a melhoria das propriedades físicas e mecânicas do solo da Formação Guabirota, contribuindo para o uso sustentável de resíduos em aplicações de obras na engenharia civil. Ademais, este trabalho contribuiu para a compreensão do comportamento das misturas de solo, cal e PM, para maior confiabilidade e previsão de resultados.

Por fim, sugere-se como pesquisas futuras, a realização de outras misturas e maior período de cura, visto que a cimentação da cal em 30 dias é ainda lenta e tem potencial de alcançar valores mais significativos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

**ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR 12025: *Solo-cimento — Ensaio de compressão simples de corpos de prova cilíndricos — Método de ensaio.* Rio de Janeiro, ago. 2012.

**ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR 6508: *Grãos de solos que passam na peneira de 4,8 mm - Determinação da massa específica.* Rio de Janeiro, set. 2014.

**ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR 7182: *Solo - Ensaio de compactação.* Rio de Janeiro, set. 2016.

**ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas.** NBR 10004: *Classificação dos resíduos sólidos.* 2. ed. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6473: **Determinação da granulometria de solos - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 12025: **Execução de pavimentos rígidos de concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, 2012.

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

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

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

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. **Especificação de Serviço 303/97. Pavimentação – base estabilizada Granulometricamente.** Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro, 1997.

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

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

MAKUSA, G. P. **Soil stabilization methods and materials in engineering practice: State of the art review**. Sweden: Luleå University of Technology, 2013.

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

MELLO, H.M. Estabilização de solos de subleito de pavimentos com a utilização do resíduo de corte de mármore e granito (RCMG). **Trabalho de conclusão de curso de engenharia civil, Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia da Paraíba, Cajazeiras, 2019.**

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

RISSARDI, J. L. **Análise da resistência à tração de um solo da Formação Guabirotuba estabilizado com cal**. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Civil) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, Curitiba, PR, 2018.

ROSATO, C.S.O. **Um estudo quantitativo e estratégico sobre reaproveitamento e reciclagem de resíduos de rochas ornamentais**. Dissertação de mestrado do curso de engenharia civil, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013.

SALAMUNI, EDUARDO. **Tectônica da bacia sedimentar de Curitiba (PR). Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista - Rio Claro**. Tese de doutorado em geologia regional, 1998. 214 p.

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

TENÓRIO, E.A.G. Controle da expansão dos solos com resíduos de mármore e cal. **Dissertação de mestrado do curso de engenharia civil, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2019.**