

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**MARCEL NEITZKE**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DOIS SOLOS  
ARGILOSOS COMPACTADOS E MELHORADOS COM A INSERÇÃO  
DE BRITA**

Santa Maria, RS  
2024

**Marcel Neitzke**

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DOIS SOLOS ARGILOSOS  
COMPACTADOS E MELHORADOS COM A INSERÇÃO DE BRITA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao curso de Engenharia Civil da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), com requisito parcial para obtenção do grau de **Bacharel em Engenharia Civil**.

Orientador: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht  
Coorientador: Dra. Paula Taiane Pascoal

Santa Maria, RS  
2024

## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à Deus por sempre me guiar e estar no controle de tudo, mesmo nos momentos mais difíceis, sempre esteve ao meu lado, me dando sabedoria e conhecimento para enfrentar mais uma importante etapa da minha vida.

À minha família, principalmente meus pais Valter e Regina, e minha irmã, Lauren, por todo suporte e apoio durante todos esses anos, sem vocês eu não teria chegado até aqui. Obrigado por sempre acreditarem em mim, serei eternamente grato. E também à minha avó, Elsa Waldow Neitzke, que nos deixou durante a realização do trabalho em questão. Me ensinou a ser guerreiro, batalhador e sempre me incentivou, por isso, te dedico mais essa conquista pessoal em forma de gratidão por tudo que significas para mim.

À minha noiva, Ariela, por ser minha maior incentivadora e exemplo de determinação, por estar presente em todos os momentos, me ajudar em todas as dificuldades e tornar tudo mais leve.

Aos professores e colegas, por tornarem essa caminhada única, levarei os ensinamentos, histórias e amizades para o resto da minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht e a coorientadora Dra. Paula Taiane Pascoal que me passaram todo o conhecimento necessário e me deram todo o suporte para a realização desta pesquisa.

Ao GEPPASV e a todo pessoal que me ajudou na realização dos ensaios para o presente trabalho, entre eles: Dêreck Hummel Becher, Luiz Henrique Ferrador Ben, Vinicius Marafiga Alves, Pedro Ribeiro da Fonseca, Enzo Borin Souza, João Felipe Quadros Gonçalves, José Leonardo dos Santos e Patrícia Rodrigues Falcão.

À UFSM, por oferecer uma estrutura de qualidade e de extrema excelência, lugar que se tornou minha segunda casa durante esses anos de graduação.

## RESUMO

### ANÁLISE DO COMPORTAMENTO RESILIENTE DE DOIS SOLOS ARGILOSOS COMPACTADOS E MELHORADOS COM A INSERÇÃO DE BRITA

AUTOR: Marcel Neitzke

ORIENTADOR: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

COORIENTADOR: Dra. Paula Taiane Pascoal

Com o avanço tecnológico das últimas décadas, a pavimentação em geral também está passando por modernizações e adequações com o intuito de desenvolver novas técnicas e aperfeiçoar métodos empíricos utilizados até os dias de hoje. Em vista disso, foi desenvolvida, no Brasil, uma nova metodologia para dimensionamento de pavimentos flexíveis, conhecida como Método MeDiNa (Método de Dimensionamento Nacional), que considera as propriedades mecânicas dos materiais que serão utilizados em camadas estruturais do pavimento. Desse modo, se deu início aos estudos sobre o comportamento resiliente dos materiais que são utilizados na pavimentação, através de ensaios triaxiais de cargas repetidas. O presente trabalho tem como objetivo analisar o comportamento resiliente de dois solos, sendo denominados de Solo SR (Santa Rosa) e de Solo SLG (São Luiz Gonzaga) e duas misturas de solo-brita, sendo elas denominadas de Mistura SR+BRITA e Mistura SLG+BRITA, compostas por 50% de solo e 50% de brita 3/4", totalizando quatro condições, observando o comportamento que cada uma vai ter de acordo com a sua composição previamente definida. Os solos são oriundos dos municípios de Santa Rosa e de São Luiz Gonzaga, sendo duas condições para cada tipo de solo. O agregado basáltico foi retirado da pedreira da Carpenedo e Cia Ltda, também de Santa Rosa e está presente nas duas condições da pesquisa. Os ensaios de Módulo de Resiliência atingiram resultados satisfatórios, principalmente para as misturas de solo-brita, que apresentaram melhor desempenho pela presença de agregado, verificando a possível utilização desse material para camadas estruturais de pavimentos, como sub-base. Para prever o comportamento resiliente dos materiais das quatro condições em estudo, foram analisados modelos de regressão matemática, onde foi comprovado uma correlação mais adequada com o Modelo Composto pelo fato do Solo SR, Solo SLG, Mistura SR+BRITA e Mistura SLG+BRITA apresentarem  $R^2$  de 0,82, 0,74, 0,74 e 0,79, respectivamente. As análises e comparações mostram que uma mudança na composição, material, granulometria, jazida, podem interferir no comportamento resiliente, portanto, o estudo desses fatores é fundamental para um melhor dimensionamento.

**Palavras-chave:** Solo, Solo-brita, Pavimentação, Módulo de Resiliência.

## ABSTRACT

### ANALYSIS OF THE RESILIENT BEHAVIOR OF TWO COMPACTED CLAY SOILS IMPROVED WITH THE INSERTION OF CRUSHED STONE

AUTHOR: Marcel Neitzke

ADVISOR: Prof. Dr. Luciano Pivoto Specht

CO-ADVISOR: Dra. Paula Taiane Pascoal

With the technological advancements of recent decades, pavement engineering has also undergone modernizations and adjustments aimed at developing new techniques and refining empirical methods used to date. In Brazil, a new methodology for designing flexible pavements, known as the MeDiNa Method (National Design Method), has been developed. This method considers the mechanical properties of materials used in pavement structural layers. Consequently, studies on the resilient behavior of pavement materials have been initiated through repeated triaxial loading tests. This study aims to analyze the resilient behavior of two soils, referred to as SR Soil (Santa Rosa) and SLG Soil (São Luiz Gonzaga), as well as two soil-crushed stone mixtures, referred to as SR+STONE Mixture and SLG+STONE Mixture, composed of 50% soil and 50% crushed stone (3/4"), totaling four conditions, to observe their behavior based on predefined compositions. The soils were sourced from Santa Rosa and São Luiz Gonzaga municipalities, with two conditions for each soil type. The basaltic aggregate was sourced from Carpenedo and Cia Ltda quarry, also in Santa Rosa, and was used in all research conditions. Resilient Modulus tests yielded satisfactory results, particularly for soil-crushed stone mixtures, which showed improved performance due to the presence of aggregate, suggesting potential use in pavement structural layers such as sub-base. Mathematical regression models were employed to predict the resilient behavior of the materials under study, confirming better correlation with the Composite Model, as Soil SR, Soil SLG, SR+STONE Mixture and SLG+STONE Mixture exhibited  $R^2$  values of 0.82, 0.74, 0.74, and 0.79, respectively. Analysis and comparisons demonstrate that changes in composition, material type, particle size distribution, and quarry source can significantly influence resilient behavior, underscoring the importance of studying these factors for improved pavement design.

**Keywords:** Soil, Soil-crushed stone mixtures, Pavement, Resilient Modulus.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Camadas de um pavimento flexível e suas tensões solicitantes .....	13
Figura 2 - Equipamento triaxial.....	20
Figura 3 - Localização da jazida de Santa Rosa .....	23
Figura 4 - Localização da jazida de São Luiz Gonzaga .....	23
Figura 5 - Localização da pedreira Carpenedo e Cia LTDA.....	23
Figura 6 - Ensaio de granulometria .....	25
Figura 7 - Ensaio de compactação com compactador mecânico .....	27
Figura 8 - Ensaio triaxial de cargas repetidas.....	29
Figura 9 - Curva granulométrica do Solo SR .....	32
Figura 10 - Curva de compactação do Solo SR.....	33
Figura 11 - Amostra 04 do Solo SR .....	34
Figura 12 - Curva granulométrica do Solo SLG.....	37
Figura 13 - Curva de compactação do Solo SLG .....	38
Figura 14 - Amostra 03 do Solo SLG.....	38
Figura 15 - Curva de compactação da mistura Solo-brita SR .....	41
Figura 16 - Amostra 01 da mistura Solo-brita SR.....	42
Figura 17 - Curva de compactação da mistura Solo-brita SLG.....	44
Figura 18 - Amostra 05 da mistura Solo-brita SLG .....	45
Figura 19 - Comparativo entre as condições a partir do Modelo Composto.....	51

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Amostras ensaiadas .....	24
Tabela 2 - Parâmetros de ensaio para a energia intermediária .....	28
Tabela 3 - Etapa de condicionamento do ensaio triaxial .....	30
Tabela 4 - Sequência de tensões para a determinação do módulo de resiliência .....	30
Tabela 5 - Resultados do ensaio de granulometria do Solo SR.....	31
Tabela 6 - Parâmetros de compactação do Solo SR .....	35
Tabela 7 - Valores de MR do Solo SR .....	35
Tabela 8 - Parâmetros dos modelos de regressão do Solo SR.....	36
Tabela 9 - Resultados do ensaio de granulometria do Solo SLG .....	37
Tabela 10 - Parâmetros de compactação do Solo SLG .....	39
Tabela 11 - Valores de MR do Solo SLG.....	39
Tabela 12 - Parâmetros dos modelos de regressão do Solo SLG .....	40
Tabela 13 - Parâmetros de compactação da Mistura Solo-brita SR .....	42
Tabela 14 - Valores de MR da Mistura Solo-brita SR .....	43
Tabela 15 - Parâmetros dos modelos de regressão da Mistura Solo-brita SR.....	43
Tabela 16 - Parâmetros de compactação da Mistura Solo-brita SLG.....	45
Tabela 17 - Valores de MR da Mistura Solo-brita SLG.....	45
Tabela 18 - Parâmetros dos modelos de regressão da Mistura Solo-brita SLG .....	46
Tabela 19 - Resumo geral do MR do Solo SR .....	47
Tabela 20 - Resumo geral do MR do Solo SLG.....	47
Tabela 21 - Resumo geral do MR da Mistura Solo-brita SR.....	48
Tabela 22 - Resumo geral do MR da Mistura Solo-brita SLG.....	49

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	10
1.1	OBJETIVOS .....	11
1.2	ESTRUTURA DO TRABALHO .....	11
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	12
2.1	SOLOS EM PAVIMENTOS .....	14
2.2	AGREGADOS EM PAVIMENTOS .....	15
2.3	MISTURAS SOLO-BRITA NA PAVIMENTAÇÃO.....	17
2.4	MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS .....	18
<b>2.4.1</b>	<b>Modelos de determinação do módulo de resiliência</b> .....	21
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	22
3.1	CONDIÇÕES E MISTURAS AVALIADAS.....	24
3.2	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO .....	24
<b>3.2.1</b>	<b>Ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento</b> .....	25
<b>3.2.2</b>	<b>Ensaio de Determinação de Massa Específica</b> .....	25
3.3	CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO .....	26
<b>3.3.1</b>	<b>Ensaio de Resistência Abrasão Los Angeles</b> .....	26
<b>3.3.2</b>	<b>Ensaio de Absorção e Massa Específica</b> .....	26
3.4	ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO.....	27
3.5	ENSAIO TRIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS .....	28
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E ANÁLISES</b> .....	31
4.1	SOLO SANTA ROSA .....	31
4.2	SOLO SÃO LUIZ GONZAGA .....	36
4.3	MISTURA SOLO-BRITA SANTA ROSA.....	40
4.4	MISTURA SOLO-BRITA SÃO LUIZ GONZAGA .....	44
4.5	COMPARATIVO ENTRE AS CONDIÇÕES .....	46
<b>4.5.1</b>	<b>Solo SR e Solo SLG</b> .....	46
<b>4.5.2</b>	<b>Solo SR e Mistura Solo-brita SR</b> .....	48
<b>4.5.3</b>	<b>Solo SLG e Mistura Solo-brita SLG</b> .....	49
<b>4.5.4</b>	<b>Mistura Solo-brita SR e Mistura Solo-brita SLG</b> .....	50
<b>4.5.5</b>	<b>Comparativo entre as condições</b> .....	50
<b>4.5.6</b>	<b>Comparação com outros estudos</b> .....	52
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	53
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	55



## 1 INTRODUÇÃO

As rodovias têm papel fundamental no cotidiano de uma sociedade e possibilitam o deslocamento de pessoas e mercadorias. Dito isso, é essencial dimensionar adequadamente o pavimento para garantir uma maior qualidade e segurança do usuário. A pavimentação visa proporcionar conforto ao usuário durante a viagem, diminuir o tempo de deslocamento e, além disso, economizar combustível e custos de manutenção (BERNUCCI et al., 2022).

Com o avanço acelerado do número de veículos no Brasil, a necessidade de um estudo detalhado do pavimento se tornou evidente, assim como entender as camadas existentes e conhecer os materiais presentes em cada uma das camadas que compõe a estrutura. Além disso, rodovias bem dimensionadas evitam o aparecimento de patologias precoces, trazendo várias vantagens econômicas como um prazo maior para uma futura manutenção do pavimento tanto como reduzindo problemas com manutenção de veículos. Em um pavimento flexível, a estrutura pode ser constituída por subleito, reforço de subleito, sub-base e base, sendo essas camadas compostos por materiais granulares e terrosos, e por uma ou mais camadas de revestimentos, usualmente composta por concreto betuminoso usinado a quente.

A base e sub-base desempenham papéis fundamentais na garantia da estabilidade e durabilidade da via. A sub-base, localizada abaixo da base, no âmbito do Rio Grande do Sul, geralmente é composta por materiais granulares de formatos maiores, como macadame a seco, britas ou solo-brita, que são compactados para fornecer suporte e drenagem adequada. Sua principal função é distribuir, uniformemente, os esforços causados pelas solicitações do tráfego de veículos para o subleito, evitando que esse desforme. Por sua vez, a base, localizada sobre a sub-base, é composta por materiais mais finos, sendo geralmente utilizada a brita graduada, e tem a função de proporcionar uma superfície sólida para a camada de revestimento, auxiliar no controle de deformações e atuar como uma camada drenante, facilitando o escoamento das águas pluviais.

Ademais, torna-se essencial o conhecimento das propriedades e parâmetros dos materiais de cada camada para entender os comportamentos de cada um. Um dos parâmetros mais importantes ao discutir materiais para uso na infraestrutura de transportes é o módulo de resiliência (MR). Segundo Bernucci et al. (2022), resiliência é a capacidade de um material recuperar sua forma original sem deformações permanentes após o fim da aplicação de cargas dinâmicas, sendo quantificada pelo módulo de resiliência.

Em vista disso, essa pesquisa busca compreender o comportamento de solos e misturas

de solo-brita através do MR, sendo este fundamental quando se busca materiais com boa capacidade de suporte para a aplicação nas camadas estruturais de pavimentos.

## 1.1 OBJETIVOS

A presente pesquisa tem como objetivo geral compreender o comportamento resiliente de dois solos e duas misturas de solo-brita, a serem utilizados como camada de sub-base.

Os objetivos específicos deste estudo são:

- Avaliar a resposta do comportamento resiliente em relação a composição de cada condição;
- Analisar a influência das propriedades de cada solo no comportamento resiliente dos materiais;
- Verificar o efeito da adição de britas no módulo de resiliência;
- Obter parâmetros de modelos de regressão para prever o comportamento resiliente do solo e misturas solo-brita.

## 1.2 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em cinco capítulos, descritos a seguir:

- Capítulo 1 – introduz o tema que será abordado, descreve os objetivos e apresenta a estrutura do trabalho;
- Capítulo 2 – apresenta o referencial teórico que embasa a realização do estudo, exibindo temas importantes como a pavimentação em geral, pavimentos flexíveis, solos em pavimentação, agregados em pavimentação, misturas solos-brita na pavimentação, módulo de resiliência de materiais geotécnicos e modelos de determinação do módulo de resiliência;
- Capítulo 3 – apresenta a metodologia da pesquisa, explicando os ensaios realizados, a composição de cada condição ensaiada, além de exibir os equipamentos e normas utilizadas;
- Capítulo 4 – apresenta todos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização do solo, ensaios de compactação e ensaios triaxiais, assim como a análise dos resultados, comparação entre cada condição e comparação geral dos resultados;
- Capítulo 5 – constitui-se da apresentação das conclusões e sugestões de pesquisas futuras.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo, serão discutidos temas fundamentais para compreender e embasar a pesquisa, os quais têm como base literaturas relevantes. Os temas abordados incluem pavimentos flexíveis, solos, agregados e misturas solo-brita na pavimentação e módulo de resiliência de materiais geotécnicos, cada um sendo brevemente explorado.

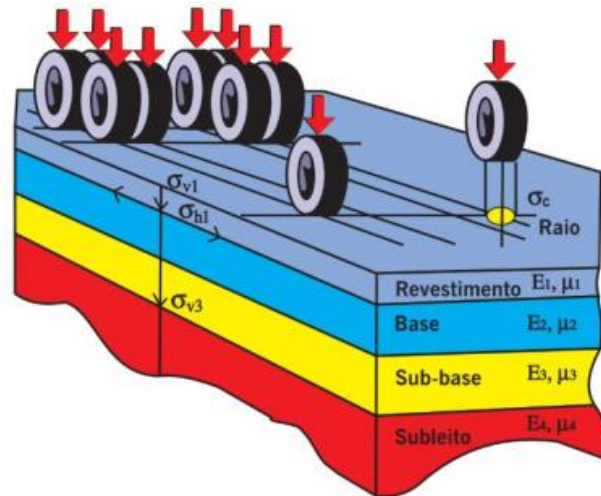
A pavimentação é uma obra civil que visa a melhoria operacional para o tráfego e que tem como objetivo proporcionar segurança, conforto e economia ao usuário. Dessa forma, é essencial uma superfície mais regular, aderente e menos ruidosa (BALBO, 2007).

O pavimento é composto por várias camadas de espessuras finitas, estruturadas sobre a camada final de terraplanagem e projetado de modo que cada camada possua uma espessura e rigidez específicas. Essas camadas devem interagir de maneira conjunta e adequada com as condições climáticas e geométricas do local, bem como com o tráfego, ao longo de sua vida útil de projeto. A partir disso, existem dois tipos de pavimentos: flexíveis e rígidos. Essa divisão surge devido à forma como as cargas são distribuídas entre as diferentes camadas do pavimento (BERNUCCI et al., 2022).

Segundo Huang (2003), a parte superior do pavimento deve ser composta por materiais de maior qualidade, capazes de suportar os esforços solicitados, enquanto os materiais menos resistentes são utilizados nas camadas inferiores, onde recebem uma parcela menor do esforço. Para garantir que o pavimento receba e suporte as solicitações, a estrutura deve atuar de forma conjunta e individual, na qual cada camada desempenha suas funções de acordo com suas características (BALBO, 2007). A Figura 1 apresenta uma seção de pavimento flexível e suas tensões solicitantes.

Segundo Bernucci et al. (2022), a estrutura completa de um pavimento flexível consiste em camadas formadas por diferentes materiais, que são chamadas: revestimento, base, sub-base, reforço do subleito e subleito. A qualidade dos materiais utilizados em cada camada é um fator crucial para determinar quais camadas serão necessárias na composição do pavimento, permitindo suprimir algumas delas quando apropriado.

Figura 1 - Camadas de um pavimento flexível e suas tensões solicitantes



Fonte: Bernucci et al. (2022)

Os materiais e funções de cada camada são citadas por Balbo (2007) e são definidas como:

- Revestimento:** camada superior do pavimento e composta por agregados pétreos e ligantes betuminosos. Tem como função principal receber e aliviar as cargas sem sofrer grandes deformações e perda de compactação;
- Base:** camada abaixo do revestimento, é composta geralmente por materiais como solo estabilizado, mistura de solo e brita graduada simples (BGS). Sua função é, assim como a camada anterior, aliviar e distribuir as tensões para as camadas inferiores;
- Sub-base:** camada muito similar à base, utiliza materiais estruturalmente semelhantes, porém com menor custo. A implantação da sub-base torna-se necessária apenas quando a camada superior possui uma espessura excessiva, tornando sua aplicação economicamente inviável;
- Reforço do Subleito:** camada não obrigatória, composta por um solo de melhor qualidade que a camada subjacente e é empregada somente quando o subleito possui baixa resistência, o que demanda a utilização de camadas de base e sub-base com maiores espessuras;
- Subleito:** conhecido como a fundação dos pavimentos, onde os esforços induzidos pelo carregamento do tráfego são dissipados. Esta camada é composta por material natural compactado.

## 2.1 SOLOS EM PAVIMENTOS

O solo é um material natural composto por camada ou horizontes minerais com espessuras variadas, diferindo de seu material de origem por propriedades físicas, químicas, mineralógicas e hidrológicas (BIRKLAND, 1974). Ainda, o solo é composto por partículas sólidas que apresentam vazios entre si. Estes vazios podem ser preenchidos por água e/ou ar e desta forma tem-se 3 fases: sólida, líquida e gasosa (PINTO, 2000).

Os solos lateríticos predominante na região Sul são finos e ricos em ferro e alumínio, mas podem não ser adequados para a base de vias de alto volume de tráfego, por apresentar capacidade suporte inferior à normalmente exigida. Nos solos superficiais lateríticos, o quartzo é encontrado com muita frequência, principalmente nas frações de areia e pedregulho. Esse mineral tem como características aumento da resistência à compressão e do módulo de elasticidade, alta sensibilidade química e dissolução lenta durante o processo de laterização (NOGAMI, 1995).

Com base na origem, os solos podem ser divididos em duas grandes categorias denominadas solos residuais e solos transportados (DNIT, 2006). Os solos residuais são os que permanecem no local da rocha de origem, observando-se uma gradual transição da superfície até a rocha. Para que ocorram é necessário que a velocidade de decomposição de rocha seja maior que a velocidade de remoção pelos agentes externos. Já os solos sedimentares ou transportados, são os que sofrem a ação de agentes transportadores, podendo ser aluvionares (quando transportados pela água), eólicos (vento), coluvionares (gravidade) e glaciares (geleiras) (PINTO, 2000).

DNIT (2006) classifica os solos pelo tamanho de suas partículas:

- a) Pedregulho: representa a fração do solo passante na 3" e retida na peneira de nº 100 (2,0 mm);
- b) Areia: representa a fração de solo compreendida entre as peneiras de nº10 e nº200 (0,075 mm);
- c) Areia grossa: representa a fração granulométrica compreendida entre as peneiras de nº10 e nº40 (0,42 mm);
- d) Areia fina: representa a fração granulométrica compreendida entre as peneiras de nº40 (0,42 mm) e nº200 (0,075 mm);
- e) Silte: representa a fração granulométrica passante na peneira de nº200 (0,075 mm) e retida na peneira de 0,005 mm de abertura;
- f) Argila: é a fração granulométrica restante, passante na peneira de 0,005 mm de abertura.

Os solos são empregados em camadas de subleito e reforço do subleito, na sua maioria. Quando os materiais apresentam capacidade de suporte adequada, podem ser aplicados em camada de sub-base e base. Além disso, quando não possuem um bom comportamento, é possível acrescentar modificações e adições para melhorar o seu desempenho.

Quando se trata de solos e sua aplicação em pavimentos, em geral, esse material passa por um processo de compactação, que visa diminuir o índice de vazios por meio da ação de um estímulo mecânico, onde os grãos são reacomodados ocupando o lugar de vazios preenchidos por ar anteriormente. A compactação fornece um aumento na resistência ao cisalhamento e redução na permeabilidade e deformabilidade (CRISPIM et al., 2011). Além disso, Holtz e Kovacs (1981) complementam que a compactação influencia positivamente na estabilidade e na redução da probabilidade de ocorrência de adensamento de um material terroso, concluindo que o comportamento mecânico de um solo é diretamente influenciado pelo processo de compactação.

Existem vários fatores que afetam significativamente a compactação, entre eles o teor de umidade, a energia de compactação e o tipo de solo. Em relação à umidade, é fundamental encontrar a umidade ótima do material para um melhor desempenho na compactação. Quanto à energia, à medida que a energia aumenta, o teor de umidade ótimo diminui e o peso específico seco máximo se eleva. O método de ensaio, tipo de equipamento utilizado, o número de camadas e golpes em cada uma, são fatores que interferem diretamente na compactação de um solo.

## 2.2 AGREGADOS EM PAVIMENTOS

Os materiais pétreos, também conhecidos como agregados pétreos, podem ser definidos como naturais ou artificiais. Aqueles classificados como naturais são utilizados da mesma forma como se encontram na natureza, como o pedregulho, os seixos rolados, entre outros. Já os artificiais, compreendem os que necessitam transformação física e química do material natural para que seja utilizado, tendo como exemplo a escória e a argila expandida (DNIT, 2006).

De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte (DNIT, 2006) os agregados classificam-se de acordo com a natureza, tamanho e distribuição dos grãos. Conforme já citado anteriormente, quanto à natureza podem ser naturais ou artificiais. Quanto ao tamanho, podem ser classificados como agregado graúdo, aquele retido na peneira nº 10 (2,0 mm), como britas e cascalhos; agregado miúdo, sendo o material que passa na peneira nº 10

(2,0 mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075 mm) tendo como exemplo o pó-de-pedra e areia; ou ainda, agregado de enchimento que é o que passa pelo menos 65% na peneira nº 200, como cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé, entre outros.

Ainda, de acordo com a distribuição dos grãos, o DNIT (2006) classifica-os como agregados de graduação densa, agregado de graduação aberta e agregado tipo macadame, os quais são caracterizados a seguir:

- a) Agregado de graduação densa: é aquele que possui uma curva granulométrica bem distribuída e contínua, contendo uma quantidade adequada de material fino para preencher os espaços entre as partículas maiores;
- b) Agregado de graduação aberta: possui uma curva granulométrica bem distribuída e contínua, mas com uma quantidade insuficiente de material fino para preencher os espaços entre as partículas maiores;
- c) Agregado tipo macadame: possui partículas de um mesmo tamanho, o chamado "one size aggregate". Trata-se de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é cerca de o dobro do diâmetro mínimo.

Ademais, é importante salientar que os agregados necessitam, na maioria das vezes, de uma operação de aperfeiçoamento para que sejam utilizados, originando diferentes composições, como a brita graduada, pedrisco e pó-de-pedra.

Para a aplicação de agregados em camadas estruturais de pavimentação, o material deve possuir alta resistência à compressão para suportar as cargas aplicadas pelo tráfego. Segundo Chen e Lin (2001), agregados com alta resistência mecânica contribuem para a durabilidade do pavimento, minimizando deformações permanentes e falhas estruturais.

A distribuição granulométrica dos agregados deve ser adequada para garantir uma compactação eficiente e a formação de uma estrutura interna estável. Roberts et al. (1996) afirmam que uma boa graduação contribui para a densidade e estabilidade do pavimento, reduzindo a susceptibilidade a problemas como a formação de trilhas de roda.

Os agregados são materiais versáteis, adequados para uma variedade de aplicações em pavimentação, incluindo bases, sub-bases e camadas de revestimento. Segundo Leite (2011), essa versatilidade permite a otimização do desempenho do pavimento em diferentes condições de tráfego e climáticas.

### 2.3 MISTURAS SOLO-BRITA NA PAVIMENTAÇÃO

No Brasil, as misturas de solo e brita já são empregadas em diversos locais e tem se tornado uma alternativa economicamente viável para a construção de camadas como base e sub-base. Além da questão econômica, os materiais tradicionais usados na pavimentação não são renováveis, ao passo que, a mistura solo-brita apresenta considerável estabilidade e durabilidade. Geralmente, são apresentadas nas proporções de 70% a 80% de material pétreo, complementadas com solos, conforme especificado por diferentes estudos e práticas de engenharia (SOUSA et al., 2019).

A estabilidade de uma mistura de solo agregado depende de diversos fatores, entre eles a granulometria, forma dos grãos, densidade relativa, atrito interno entre as partículas e da coesão (YODER, 1975). A brita, sendo um material granular, contribui para a drenagem e reduz a expansão e a contração do solo, o que é particularmente benéfico em climas variáveis.

Costa et al. (2019) realizaram um estudo sobre a mistura de pó de brita com solos, analisando que a adição de brita, em certas proporções, pode prejudicar a resistência inicial do solo, mas a mistura ainda é viável para camadas de base e sub-base, especialmente em termos de controle de expansão.

Yoder (1975) classificou as misturas dividindo-as em três categorias de acordo com a densidade e estabilidade:

- a) Solo agregado sem a presença de finos: A mistura contém uma quantidade muito pequena ou nenhuma de finos. Sua estabilidade é garantida pelo contato entre as partículas. No entanto, é difícil compactá-la, pois não possui coesão.
- b) Solo agregado com finos: quantidade de finos é suficiente para preencher os espaços entre os agregados. Isso resulta em uma maior resistência devido ao contato entre as partículas. Apresenta uma densidade superior e uma permeabilidade menor em comparação ao primeiro.
- c) Solo agregado com muitos finos: não há contato entre os agregados porque estes estão envolvidos por finos. A densidade é menor, em comparação ao segundo, e pouca a nenhuma permeabilidade, a depender da natureza dos finos. Além disso, sua compactação apresenta maior facilidade.

De acordo com Bernucci et al. (2022), a natureza do solo empregado nas misturas apresenta relevância significativa em relação ao seu comportamento mecânico. Nogami e Villibor (1995) destacam o excelente comportamento mecânico e hidráulico dos solos argilosos quando utilizados como materiais finos, atribuindo isso à sua capacidade de drenagem eficiente, baixa expansibilidade e, principalmente, à sua boa coesão.



Silveira (2000) investigou misturas de solo-brita, alterando as proporções de solo entre 20% e 40% da composição, utilizando agregados com granulometrias variando de 1” a 3/8”. O estudo citado apresentou resultados positivos para a aplicação em camadas estruturais de pavimentos. Além disso, foi observado que o emprego de solo oferece resultados superiores em termos de propriedades resilientes.

Wallau (2004) estudou misturas de solo-brita com proporções crescentes de agregado, partindo de 50% agregado e 50% solo, até chegar em 90% agregado e 10% solo, usando a energia de compactação modificada. Após a análise de todas as curvas obtidas, concluiu-se que a medida em que se eleva o teor de agregado a umidade ótima da mistura diminui, pois o agregado possui uma superfície específica menor que a do solo, resultando em menos consumo de água do que as misturas com o solo em maiores quantidades. Ademais, foi possível observar um aumento da densidade aparente seca máxima conforme o teor de agregado crescia, isto se deve à massa específica do agregado ser maior que a do solo.

As normas pertinentes a esse tipo de mistura utilizam o ensaio Índice de Suporte Califórnia (ISC) como referência de desempenho, desconsiderando a importância dos ensaios de módulo de resiliência e deformação permanente. Ademais, observava-se a ausência de uma normativa que determine um método mais eficaz de compactação e homogeneização da mistura, visto que são empregados materiais com propriedades significativamente distintas em sua composição (NORBACK, 2018).

## 2.4 MÓDULO DE RESILIÊNCIA DE MATERIAIS GEOTÉCNICOS

Resiliência é a capacidade de um material regressar ao seu estado original sem deformações após a remoção de cargas dinâmicas, sendo quantificada pelo módulo de resiliência. Portanto, torna-se crucial a compreensão do comportamento elástico de um material que compõe uma camada de pavimento, pois está relacionada à rigidez e à capacidade de suporte do solo, influenciando diretamente a resposta estrutural da camada e do pavimento como um todo (BERNUCCI et al., 2022).

Segundo Medina e Motta (2015), na mecânica dos pavimentos, o módulo de resiliência é definido como a relação entre a tensão aplicada e a deformação recuperável sob carregamento cíclico. Este parâmetro é fundamental para avaliar o comportamento de materiais granulares, solos e britas quando submetidos a cargas repetidas, como aquelas geradas pelo tráfego de veículos sobre o pavimento. A avaliação do módulo de resiliência pode ser realizada em laboratório por meio de ensaios específicos que simulam as condições de carregamento cíclico.

O módulo de resiliência é obtido pela relação da tensão desvio  $\sigma_d$  (diferença entre as tensões  $\sigma_1$  e  $\sigma_3$ ) pela deformação resultante considerada recuperável, conforme a Equação 1.

$$MR = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência (MPa);

$\sigma_d$ : ( $\sigma_1 - \sigma_3$ ) denominada tensão desvio;

$\sigma_1$  é a tensão principal maior;

$\sigma_3$  é a tensão principal menor ou tensão de confinamento;

$\epsilon_r$  é a deformação específica axial resiliente (relação entre o deslocamento vertical máximo e o comprimento inicial do corpo de prova).

O parâmetro de MR, caracteriza diversos materiais utilizados em camadas estruturais de pavimentos, tais como subleito, sub-base, base e revestimento, a partir da simulação das condições de tráfego reais. Este parâmetro prevê o comportamento mecânico dos materiais frente às tensões aplicadas, permitindo a avaliação de sua capacidade de suporte e rigidez (SANTOS, 2016).

Existem alguns fatores que podem influenciar o comportamento resiliente dos materiais, tais como: intensidade das tensões aplicadas; razão das tensões principais; quantidade de repetições da tensão desvio; histórico de tensões; duração e frequência de aplicação da tensão desvio; densidade e umidade de compactação, grau de saturação e método de compactação e tipo de agregado (SEED et al., 1967).

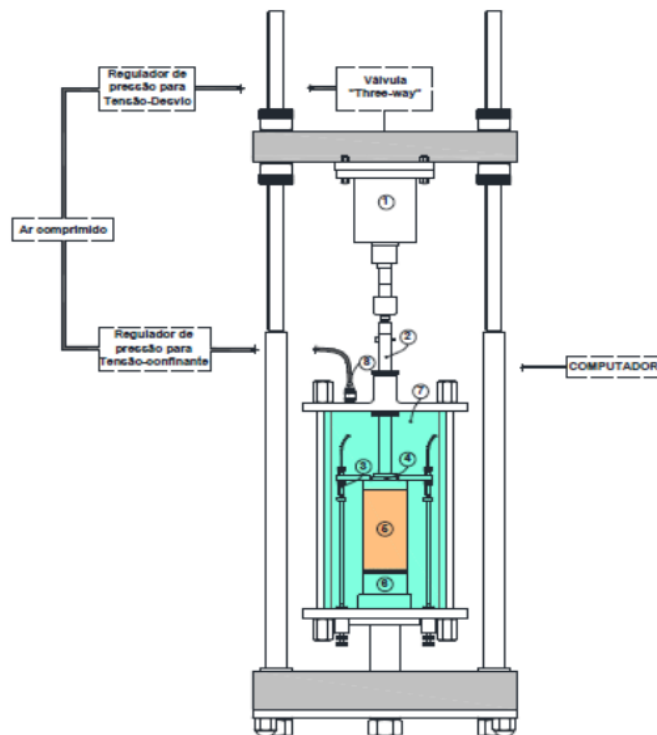
Segundo Franco (2007), cada material possui um comportamento único e, portanto, um desempenho específico em relação ao MR. Dessa forma, a caracterização mecânica dos materiais tornou-se essencial e é dada através do ensaio triaxial de cargas repetidas realizado em laboratório.

O ensaio triaxial de cargas repetidas opera impondo um esforço vertical através da aplicação de uma tensão principal com uma frequência de 1 Hz (60 ciclos por minuto), sendo o pulso de carga de 0,1 segundo e 0,9 segundo de repouso, repetido até atingir uma quantidade previamente estabelecida. São aplicadas variadas tensões de confinamento, determinadas pela pressão de ar dentro da célula triaxial e tensões solicitantes aplicadas pela célula de carga. As tensões aplicadas são baseadas na normativa do DNIT (2018).

O equipamento triaxial de cargas repetidas é representado pela Figura 2. Com o auxílio de um compressor, é fornecido ar comprimido ao sistema, alimentando o regulador de pressão

para tensão confinante e o regulador de pressão para a tensão desvio. A tensão desvio é aplicada por meio de um cilindro de pressão (número 1), que transfere o estímulo ao pistão de carga (número 2), solicitando assim o corpo de prova (número 5). A tensão confinante atua sobre o corpo de prova através da pressão aplicada na câmara triaxial (número 7). Ademais, para a realização da medição de deslocamentos, utiliza-se um sistema de transdutores mecânicos, denominados LVDT (Transformador Diferencial Variável Linear) (número 3), que por sua vez, devem ser posicionados diametralmente opostos, para obter uma precisão de  $1 \times 10^{-3}$  na leitura dos deslocamentos. Finalmente, os dados recebidos pelo ensaio são processados pelo computador e através do software Seepav é feita a leitura da deformação elástica para cada solitação do pistão de carga, permitindo, a determinação do Módulo de Resiliência.

Figura 2 - Equipamento triaxial



Fonte: DNIT (2018)

Na busca por um ensaio mais simples para estimar os valores do MR, vários pesquisadores tentaram achar um modo de facilitar esse método. Segundo Bernucci et al. (2022), a utilização de correlações baseadas em valores do Índice de Suporte Califórnia (ISC) para a determinação do MR não é aconselhada, visto que, tais correlações possuem diferença nos fatores considerados em cada tipo de ensaio, e por consequência, são inadequadas.

### 2.4.1 Modelos de determinação do módulo de resiliência

Sabendo que cada solo tem suas particularidades e composições granulométricas, foram criados diversos modelos para encontrar uma correlação válida entre o módulo de resiliência e as tensões atuantes, resultando em constantes de determinação ( $R^2$ ). Biarez (1962) propôs um modelo com o objetivo de averiguar o comportamento referente ao MR de solos granulares, levando em consideração a influência da tensão confinante. A Equação 2 mostra o modelo de Biarez.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \quad (2)$$

Onde:

MR é o módulo de resiliência (MPa);

$\sigma_3$  é a tensão confinante;

$k_1$  e  $k_2$  são parâmetros de resiliência.

Svenson (1980) simplificou o modelo proposto por Hicks (1970) que tinha como objetivo a análise de solos coesivos, portanto, a tensão desvio assume enorme importância. O modelo é representado pela Equação 3.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_d^{k_2} \quad (3)$$

Onde:

$\sigma_d$  é a tensão desvio.

É possível notar que a diferença entre o Modelo de Svenson e o Modelo de Biarez é apenas a tensão que está atuando. Svenson analisa a tensão desvio enquanto Biarez analisa a tensão confinante.

Por fim, Macêdo (1996) introduziu o Modelo Composto no Brasil, tendo como principal objetivo obter o módulo de resiliência de qualquer tipo de material, através de uma regressão linear, considerando tensões confinantes e desvio para o cálculo. A equação 4 apresenta o modelo proposto.

$$MR = k_1 \cdot \sigma_3^{k_2} \cdot \sigma_d^{k_3} \quad (4)$$

Onde:

$k_1$ ,  $k_2$  e  $k_3$  são parâmetros de resiliência.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, será detalhada a estrutura da pesquisa e o planejamento preliminar, que aborda, inicialmente, a seleção das jazidas e o processo de coleta dos materiais. Em seguida, serão expostos os métodos laboratoriais utilizados para classificação e caracterização dos materiais coletados, para posteriormente, possibilitar os ensaios triaxiais e obter as propriedades resilientes dos materiais.

A escolha dos solos se deu a partir da proposta da empresa de pavimentação Carpenedo e Cia Ltda, empresa escolhida para estágio obrigatório, em realizar um estudo mais aprofundado sobre misturas de solo-brita, um método já bastante utilizado pela empresa na execução de sub-bases. Em vista disso, foram escolhidas duas obras que seriam executadas futuramente para coletar o material, sendo um solo de São Luiz Gonzaga (RS) e outro de Santa Rosa (RS). Além disso, o agregado foi coletado na pedreira da Carpenedo em Santa Rosa (RS).

O Laboratório de Materiais de Construção Civil (LMCC) da UFSM, foi o local onde foram realizados todos os ensaios dos solos, por sua vez, os ensaios de agregados foram realizados no laboratório da Carpenedo e Cia Ltda.

Para a presente pesquisa, foram utilizados solos de duas cidades gaúchas situadas na região noroeste do estado, sendo elas, Santa Rosa (RS) e São Luiz Gonzaga (RS), como evidenciado nas Figuras 3 e 4. A coleta do solo de Santa Rosa foi realizada em uma jazida localizada nas coordenadas 27°50'51" sul e 54°31'57" oeste, onde se localiza uma estrada com início na BR 472 e liga ao Lajeado Tarumã, comunidade do interior da cidade, assim como mostra a Figura 3. Por sua vez, a coleta do material de São Luiz Gonzaga foi feita em uma jazida nas coordenadas 28°27'10" sul e 54°42'23" oeste, trecho que liga a BR 285 às Ruínas de São Lourenço Mártir, na localidade de São Lourenço das Missões, como mostra a Figura 4. Após coletados os solos, esse material foi seco ao ar, destorroado e, em seguida, peneirado na peneira de 4,75 mm, para utilizar a fração passante nos ensaios de caracterização.

A brita utilizada para essa pesquisa também foi retirada da Pedreira da Carpenedo e Cia Ltda, em Santa Rosa (RS), que é localizada nas coordenadas 27°52'45" sul e 54°30'19" oeste. Foi utilizada somente essa fonte de agregado, sendo combinado nas duas misturas de solo. O material coletado é um material basáltico e está apresentado na Figura 5.

O agregado foi coletado na pilha da Brita 3/4", fração utilizada nos ensaios posteriores e também nas obras da própria empresa. Para garantir que não houvesse agregados maiores do que o tamanho ideal, o material foi novamente peneirado na peneira 3/4", passando apenas os agregados inferiores a 19 mm.

Figura 3 - Localização da jazida de Santa Rosa



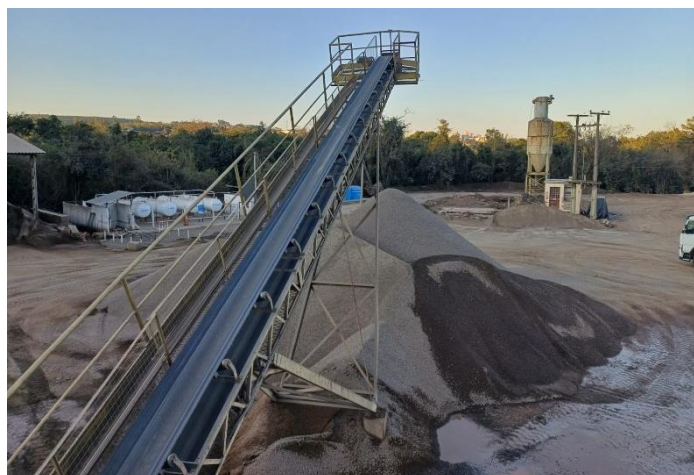
Fonte: Autor

Figura 4 - Localização da jazida de São Luiz Gonzaga



Fonte: Autor

Figura 5 - Localização da pedreira Carpenedo e Cia LTDA



Fonte: Autor

### 3.1 CONDIÇÕES E MISTURAS AVALIADAS

Com os solos já caracterizados, definiu-se duas nomenclaturas para reconhecer e diferenciar cada um dos solos para os ensaios posteriores, sendo denominadas de Solo SR (para o solo de Santa Rosa) e Solo SLG (para o solo de São Luiz Gonzaga). Após os solos e a brita estarem caracterizados e classificados, foi feita a separação dos materiais para a realização das misturas de solo-brita. Foram definidas duas misturas, a Mistura SR+BRITA (50% solo de Santa Rosa e 50% agregado) e a Mistura SLG+BRITA (50% solo de São Luiz Gonzaga e 50% agregado), proporção que a empresa utiliza no emprego de solo-brita.

Para cada condição foi separado dez amostras de 4 kg para a realização dos ensaios de compactação e triaxial, conforme a Tabela 1, para determinação da curva de compactação e do módulo de resiliência, respectivamente.

Tabela 1 - Amostras ensaiadas

<b>Mistura</b>	<b>Total de Amostras</b>	<b>Curva de Compactação</b>	<b>Ensaio de MR</b>
Solo SR	10	6	4
Solo SLG	10	6	4
Mistura SR+BRITA	10	6	4
Mistura SLG+BRITA	10	6	4

Fonte: Autor

### 3.2 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DO SOLO

Nesta seção serão apresentados os ensaios de caracterização do solo que foram realizados para conhecer mais sobre o comportamento e as características de cada um dos solos em estudo. Após a coleta de todo o material necessário para a pesquisa, foi realizada a preparação dos solos para os ensaios de acordo com a NBR 6457/16 (ABNT, 2016). Inicialmente, foi feita a secagem ao ar de todo o material até atingir a umidade higroscópica, seguido do destorroamento de grãos e peneiramento na peneira 3/4", deixando assim, o material pronto para os ensaios.

### 3.2.1 Ensaio de granulometria por sedimentação e peneiramento

Com base na NBR 7181/17 (ABNT, 2017), foi realizado o ensaio granulométrico com o objetivo de conhecer a dimensão dos grãos que constituem cada tipo de solo e, por consequente, obter um diâmetro equivalente aproximado. Na Figura 6, é possível visualizar as quatro provetas em que o ensaio foi realizado, sendo duas para cada solo, uma com e outra sem defloculante. São utilizados um densímetro e um termômetro para realizar as leituras em períodos de tempo pré-estabelecidos. Após a análise, é elaborada uma curva granulométrica que representa as porcentagens das diferentes frações dimensionais do solo. Ademais, cada fração recebe uma nomenclatura que permite prever o comportamento do solo.

Figura 6 - Ensaio de granulometria



Fonte: Autor

### 3.2.2 Ensaios de Determinação de Massa Específica

Conforme a NBR 6458/16 (ABNT, 2016), que estabelece os procedimentos para a determinação da massa específica do material, foi realizado o ensaio para definir esse índice. O teste consiste em determinar o peso dos sólidos em relação ao seu volume total, utilizando um picnômetro. Esse índice é crucial para a execução de ensaios posteriores.



### **3.2.3 Ensaios Limites de Atterberg**

Os ensaios de limites de Atterberg, que incluem o limite de liquidez e o limite de plasticidade, são fundamentais para estimar o comportamento do solo, proporcionando um maior entendimento sobre os finos presentes no material. As propriedades das porções de argila variam conforme a quantidade de água presente. O limite de plasticidade é o teor de umidade mínimo no qual o solo ainda não se torna quebradiço, permitindo formar um cilindro de 3 mm de diâmetro e aproximadamente 100 mm de comprimento sem se fragmentar, conforme a NBR 7180/16 (ABNT, 2016). Já o limite de liquidez, é o teor de umidade no qual são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura na concha, conforme padronizado pela NBR 6459/17 (ABNT, 2017). Além disso, foi determinado o índice de plasticidade do material, que é a diferença entre o limite de liquidez e o limite de plasticidade.

### **3.3 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO**

A caracterização do agregado foi realizada pelo laboratório da Carpenedo e Cia Ltda, porém serão apresentados somente os ensaios de interesse para o presente trabalho e seus respectivos resultados.

#### **3.3.1 Ensaio de Resistência Abrasão Los Angeles**

Regulamentado pela norma ME 35 (DNER, 1998), o Ensaio de Abrasão Los Angeles tem como objetivo determinar a resistência mecânica do agregado frente ao impacto de esferas de aço dentro de um tambor rotativo. No ensaio realizado, obteve-se um resultado de 15% de abrasão, o que indica conformidade com as especificações do DNIT, que limita a abrasão em 50%, e do DAER, que limita em 40%, para obras de pavimentação.

#### **3.3.2 Ensaio de Absorção e Massa Específica**

Seguindo a norma ME 195 (DNER, 1997), foram realizados os Ensaios de Absorção e Massa Específica, fundamentais para avaliar a qualidade e as propriedades do agregado. O Ensaio de Massa Específica visa determinar a densidade do agregado, ou seja, a relação entre a massa do agregado e o volume que ele ocupa. O resultado obtido foi de 2,958 g/cm<sup>3</sup>. Já o Ensaio

de Absorção, visa determinar a quantidade de água que o agregado pode absorver em relação à sua massa seca. O resultado obtido foi de 1,12% de absorção.

### 3.4 ENSAIOS DE COMPACTAÇÃO

A curva de compactação é um gráfico que relaciona a densidade seca de um solo com o teor de umidade, obtendo assim, a umidade ótima do material, na qual apresenta melhor desempenho quando submetido à um dado esforço de compactação. A partir disso, o ensaio de compactação foi realizado para obter esses parâmetros e poder realizar as moldagens para os ensaios triaxiais.

Seguindo a norma do DNIT 443/23 (DNIT, 2023), foi realizado a curva de compactação na energia intermediária para cada solo, possibilitando determinar a umidade ótima de compactação dos materiais, onde se obtém a maior densidade seca com a menor umidade. Os pontos na curva possuem uma variação aproximada de 2% de umidade, o que resultou em uma curva com seis pontos em cada curva, sendo dois no ramo seco, dois no ramo úmido e dois no ramo intermediário, próximo a umidade ótima.

Seguindo a norma do DNIT 443/23 (DNIT, 2023), o ensaio foi realizado utilizando um molde tripartido de 20 cm de altura e 10 cm de diâmetro. Ademais, foi realizado o ensaio na energia intermediária, submetido à 27 golpes por camada, com altura de queda de 30,5 cm e sem sobrepeso, totalizando 10 camadas, conforme a Figura 7. Além disso, a Tabela 2 apresenta os parâmetros de moldagem de cada energia, conforme norma do DNIT (2023).

Figura 7 - Ensaio de compactação com compactador mecânico



Fonte: Autor

Tabela 2 - Parâmetros de ensaio para a energia intermediária

Diâmetro (cm)	Altura (cm)	Volume (cm <sup>3</sup> )	Energia (kgf.cm/cm <sup>3</sup> )	Nº de camadas	Altura de queda (cm)	Peso do soquete (kgf)	Nº de golpes por camada
					30,5	2,5	27
10	20	1570,8	Intermediária (13)	10	45,7	4,53	10
					30,5	4,53	15
					45,7	2,5	18

Fonte: DNIT (2018)

Após a preparação do molde, equipamentos e material, foram moldados 6 CPs em umidades crescentes para determinação da curva de compactação que indica a umidade ótima e a massa específica aparente seca (MEAS) da mistura. A fim de obter a umidade de compactação, foram retiradas umidades da amostra logo após o acréscimo de água e após o processo de compactação.

Com a umidade ótima obtida a partir da curva de compactação, as outras três amostras foram moldadas nessa umidade e separadas para a realização do ensaio de módulo de resiliência. A quarta amostra seria utilizada caso necessário por motivo de algum erro nas moldagens e ensaios anteriores.

### 3.5 ENSAIO TRIAXIAL DE CARGAS REPETIDAS

A partir das diretrizes do DNIT 134/18 (DNIT, 2018), que regulamenta o processo de determinação do módulo de resiliência de um material, foram ensaiados os moldes no equipamento triaxial, conforme as Figuras 8 e 9. O ensaio permite prever o desempenho estrutural do material ao aplicar repetidamente uma tensão desvio ( $\sigma_d$ ), resultando em uma deformação elástica recuperável correspondente (DNIT, 2018).

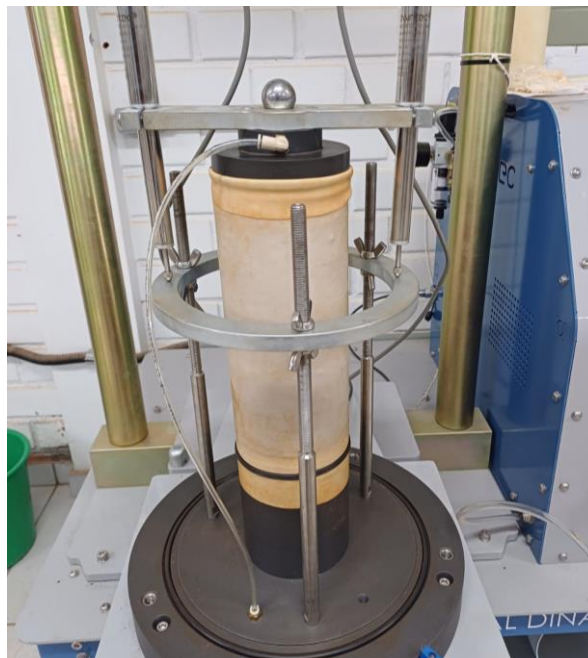
A amostra foi inserida na câmara triaxial, onde foi envolvida por uma membrana de látex, como mostra a Figura 9. Após a montagem do equipamento e as configurações necessárias, iniciou-se o ensaio separado em duas etapas. A primeira etapa é denominada condicionamento, onde ocorre a aplicação de 500 repetições de cada par de tensão da Tabela 3, a fim de eliminar as possíveis deformações iniciais. Se a deformação inicial exceder 5% da altura do corpo de prova, a amostra deve ser descartada e o ensaio reiniciado com outra amostra, até que se obtenham três amostras válidas.

Figura 8 - Ensaio triaxial de cargas repetidas



Fonte: Autor

Figura 9 - Amostra posicionada no equipamento triaxial de cargas repetidas



Fonte: Autor

A segunda etapa é a determinação do módulo, que consiste na aplicação de 18 pares de tensões, conforme apresentado na Tabela 4, com 100 ciclos de carga, resultando em deformações específicas. Os resultados do módulo obtidos pelo equipamento foram avaliados

utilizando modelos matemáticos de previsão de comportamento elástico não linear, visando obter os parâmetros de regressão e compreender o que melhor representasse o comportamento do material. Esses modelos foram aprofundados com o auxílio do software Statistica, que realiza a análise dos dados por meio de regressões múltiplas não lineares.

Tabela 3 - Etapa de condicionamento do ensaio triaxial

<b>Nº repetições</b>	<b>Tensão Confinante <math>\sigma_3</math> (MPa)</b>	<b>Tensão de Desvio <math>\sigma_d</math> (MPa)</b>	<b>Razão de Tensões <math>\sigma_1/\sigma_3</math></b>
500	0,070	0,070	2
500	0,070	0,210	4
500	0,105	0,315	4

Fonte: DNIT (2018)

Tabela 4 - Sequência de tensões para a determinação do módulo de resiliência

<b><math>\sigma_3</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_d</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_1/\sigma_3</math></b>
0,020	0,020	2
	0,040	3
	0,060	4
0,035	0,035	2
	0,070	3
	0,105	4
0,050	0,050	2
	0,100	3
	0,150	4
0,070	0,070	2
	0,140	3
	0,210	4
0,105	0,105	2
	0,210	3
	0,315	4
0,140	0,140	2
	0,280	3
	0,420	4

Fonte: DNIT (2018)

## 4 RESULTADOS E ANÁLISES

Após todos os ensaios descritos no capítulo anterior realizados, foram obtidos os resultados de cada condição proposta e serão apresentados e comparados neste capítulo junto com análises sobre o tema em questão.

### 4.1 SOLO SANTA ROSA

Neste tópico serão apresentados os resultados dos ensaios de caracterização física, compactação e dos ensaios de módulo de resiliência realizados com o solo de Santa Rosa. Para a caracterização do solo foram realizados os ensaios já mencionados anteriormente, com o intuito de compreender acerca do solo em estudo. Os ensaios de granulometria e massa específica do solo de Santa Rosa estão apresentados na Tabela 5 e, posteriormente, a curva granulométrica na Figura 10. Os ensaios de granulometria foram realizados com e sem defloculante.

Tabela 5 - Resultados do ensaio de granulometria do Solo SR

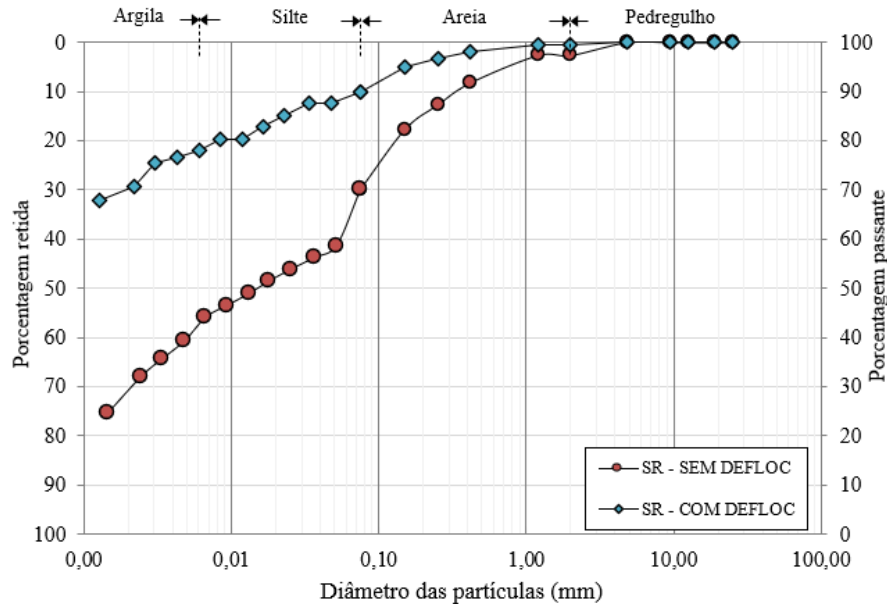
<b>Solo de Santa Rosa</b>	
% pedregulho (2,0 - 4,0 mm)	0
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	1
% areia média (0,2 - 0,6 mm)	3
% areia fina (0,06 - 0,2 mm)	5
% silte (2 $\mu$ m - 0,06 mm)	21
% argila (%<2 $\mu$ m)	70
Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	26,14

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos e pelas análises granulométricas, é possível afirmar que o solo em questão é considerado um material fino, composto por grãos muito pequenos e com mais de 90% representados por argila e silte. A curva obtida pela amostra com defloculante apresenta uma melhor distribuição granulométrica dos finos, resultante da ação do defloculante (hexametáfosfato de sódio), que tem importante atuação na separação de materiais mais finos que possam ficar aderidos à grãos maiores. O ensaio evidencia essa afirmação, pois a porcentagem de material fino com defloculante é de 91%, por sua vez, sem defloculante essa

porcentagem cai para 69%, mostrando a importância da desagregação da maior parte do material para melhores resultados.

Figura 9 - Curva granulométrica do Solo SR



Fonte: Autor

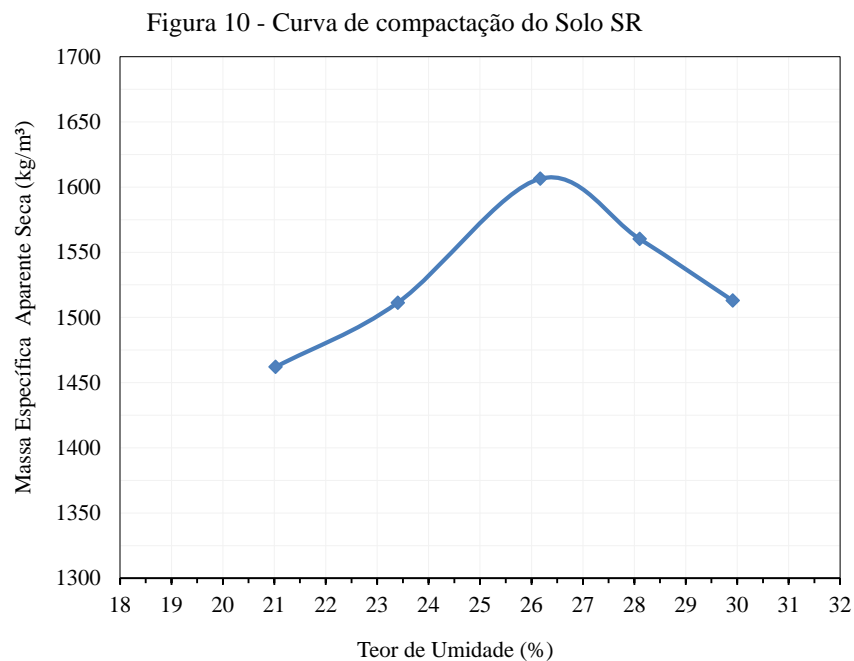
O peso específico dos sólidos obteve um valor de  $26,14 \text{ kN/m}^3$  através do ensaio de determinação de massa específica dos sólidos com auxílio de um picnômetro, valor essencial para encontrar valores granulométricos mais precisos. Por fim, foram realizados os ensaios de Limites de Atterbeg, com o objetivo de obter o limite de liquidez e de plasticidade do material em estudo. O limite de liquidez apresentou uma umidade de 54%, já o limite de plasticidade apresentou uma umidade de 35%. Com a subtração de ambos os resultados, obteve-se o Índice de Plasticidade no valor de 19% de umidade.

A partir dos resultados obtidos, é possível realizar a classificação do solo em questão por meio de métodos tradicionais como o Sistema Unificado de Classificação dos Solos (SUCS) e a *Transportation Research Board* (TRB). De acordo com o SUCS, o Solo SR foi classificado como CH (argila de alta plasticidade), pois possui um limite de liquidez superior à 50 e Índice de Plasticidade maior que 17, sendo assim, um solo com alta plasticidade e variação volumétrica, fatores que podem comprometer a estabilidade e a capacidade de suporte da camada estrutural. Pela TRB, a classificação obtida pertence ao grupo A-7-6, resultando em uma argila de alta plasticidade também, sendo assim, considera-se um solo pobre para a utilização em sub-bases rodoviárias.

Diante das duas classificações, conclui-se que o Solo SR não é adequado para o uso em camadas estruturais de pavimentação devido à sua baixa capacidade de suporte e alta sensibilidade às mudanças de umidade.

Após a caracterização física, foi elaborada a curva de compactação do solo por meio do ensaio de compactação. Este que é fundamental para obter os parâmetros de umidade ótima e massa específica aparente seca máxima (MEAS) do material. O ensaio foi realizado na energia intermediária, com 27 golpes por camada, altura de queda de 30,5 cm e sem sobrepeso, totalizando dez camadas.

Segundo Pinto (2006), a energia utilizada no ensaio influencia consideravelmente nos parâmetros de umidade e MEAS, sendo assim, quanto maior a energia aplicada sobre o material, menor será sua umidade ótima e maior será seu MEAS. A partir disso, a energia intermediária possibilita um equilíbrio adequado entre os parâmetros, além do mais, é a mais prática e eficiente para ser aplicada em condições de campo. A curva de compactação do Solo de Santa Rosa está ilustrada na Figura 11. O material apresentou uma umidade ótima de, aproximadamente, 26,50% e massa específica aparente seca de 1615 kg/m<sup>3</sup>.



Fonte: Autor

A fim de investigar o comportamento mecânico do solo em estudo, foram realizados ensaios triaxiais de cargas repetidas, possibilitando a determinação de seu módulo de resiliência. A compactação das amostras para o ensaio envolveu a compactação do material de acordo com a umidade ótima previamente determinada. Com a amostra já compactada, a



Amostra 04, apresentada na Figura 12, foi inserida no equipamento triaxial dinâmico, onde foi realizado o ensaio.

Figura 11 - Amostra 04 do Solo SR



Fonte: Autor

Inicialmente, foi aplicado uma sequência de carregamentos cíclicos, denominada condicionamento, a fim de eliminar as possíveis deformações permanentes que podem ocorrer nas primeiras aplicações de tensão desvio. O condicionamento foi realizado para determinar o módulo de resiliência para material de base de pavimentação.

Após as duas primeiras amostras ensaiadas, notou-se uma deformação permanente excessiva ainda no condicionamento, excedendo os 5% que são aceitáveis e, assim, invalidou-se as amostras. Portanto, para as próximas duas amostras, mudou-se a etapa de condicionamento em que foi aplicado o condicionamento do protocolo reduzido, onde este é composto por 500 repetições do primeiro par de tensões ( $\sigma_3 = 0,07$  MPa e  $\sigma_d = 0,07$  MPa). Essa redução é prevista em norma para os solos de subleitos. Os 18 pares de tensões foram mantidos para obtenção do MR do solo em questão. Essa medida foi feita para o material suportar as deformações do condicionamento e poder analisar se suportaria aos 18 pares de tensões.

A Tabela 6 demonstra os parâmetros de compactação das duas amostras que foram ensaiadas para obtenção do MR, e a Tabela 7 apresenta os valores brutos de MR de cada amostra ensaiada. Os parâmetros de compactação calculados foram a umidade de compactação, a densidade e grau de compactação, sendo estes de grande valia para avaliar a similaridade das amostras. Ambas possuem valores semelhantes, fazendo com que o desvio padrão tenha uma dispersão de dados baixa em relação à média, indicando maior uniformidade nas propriedades das amostras compactadas. Além disso, o coeficiente de variação é a razão entre o desvio padrão e a média, permitindo comparar a dispersão entre conjunto de dados com diferentes médias. Portanto, quando menor o desvio padrão, menor o coeficiente de variação e, conseqüentemente,

maior a similaridade entre as amostras. O coeficiente de variação da umidade de compactação apresentou um valor de 1,3%, obtendo um resultado mais alto em comparação aos outros coeficientes que foram nulos, porém com um valor ainda baixo, indicando uniformidade nos valores encontrados.

Tabela 6 - Parâmetros de compactação do Solo SR

<b>Parâmetros</b>	<b>AM04</b>	<b>AM05</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coef. Variação</b>
Umidade compactação (%)	26,33	26,81	26,57	0,34	1,3%
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1600,4	1599,4	1599,90	0,71	0,0%
Grau de compactação (%)	99,10	99,03	99,07	0,04	0,0%

Fonte: Autor

Tabela 7 - Valores de MR do Solo SR

<b><math>\sigma_3</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_d</math> (MPa)</b>	<b>MR (MPa)</b>	
		<b>AM 03</b>	<b>AM 04</b>
0,020	0,020	192,7	169,1
	0,040	144,1	121,7
	0,060	125,2	105,7
0,035	0,035	158,3	136,3
	0,070	131,0	109,1
	0,105	111,0	84,8
0,050	0,050	155,2	132,6
	0,100	121,6	95,1
	0,150	92,0	64,9
0,070	0,070	140,2	117,5
	0,140	107,1	75,4
	0,210	81,0	57,3
0,105	0,105	143,8	100,5
	0,210	94,1	67,1
	0,315	74,8	55,6
0,140	0,140	143,2	100,0
	0,280	88,7	66,3
	0,420	0,0	55,1

Fonte: Autor

Após o término do ensaio, foram obtidos os valores de MR bruto de cada amostra, onde foi possível perceber que ambas tiveram valores decrescentes para o MR conforme o aumento das tensões impostas, tendo a tensão desvio como principal atuante. A Amostra 03 apresentou valores superiores à Amostra 04 durante todo o ensaio, porém a Amostra 03 não teve seu ensaio

finalizado, pois o corpo de prova atingiu deformação permanente excessiva e, desse modo, os LVDTs atingiram o limite do seu curso, significando que a capacidade de medição foi ultrapassada.

De posse dos valores de MR determinados pelo equipamento triaxial para cada amostra, esses dados foram inseridos no software e analisados com base nos modelos de regressão citados anteriormente. A Tabela 8 apresenta os resultados obtidos entre as duas amostras, determinando valores médios e parâmetros estatísticos referentes ao conjunto testado.

O coeficiente de determinação  $R^2$  quantifica a eficiência que os dados se ajustam ao modelo de regressão em questão. Ao comparar modelos de regressão diferentes, o  $R^2$  auxilia na determinação do modelo que fornece um melhor ajuste aos dados obtidos. Em vista disso, o  $R^2$  que apresentou um valor mais próximo de 1 foi para o Modelo Composto, seguido do Modelo de Svenson, ambos acima de 0,74, indicando que estes modelos eram mais adequados para esse material. Como o MR da amostra diminuiu com o aumento das tensões, a tensão atuante predominantemente era a tensão desvio. O Modelo de Biarez teve um  $R^2$  baixo, pois esse modelo se enquadra melhor quando a tensão confinante é a tensão atuante. Portanto, o melhor modelo de regressão para o Solo SR é o Modelo Composto.

Tabela 8 - Parâmetros dos modelos de regressão do Solo SR

<b>Modelo</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Biarez	49,73	-0,267		0,30
Svenson	48,64	-0,337		0,75
Composto	64,89	0,213	-0,478	0,82

Fonte: Autor

#### 4.2 SOLO SÃO LUIZ GONZAGA

O solo de São Luiz Gonzaga também foi caracterizado seguindo as mesmas normas e ensaios. Os resultados dos ensaios de granulometria e massa específica estão apresentados na Tabela 9 e, posteriormente, é ilustrada a curva granulométrica na Figura 13. Novamente, é possível perceber a diferença que o hexametáfosfato de sódio causa nas amostras, atuando na separação das partículas de menor diâmetro que ficaram aderidas a partículas maiores. O presente solo também é considerado um material fino e tem 96% de sua composição formada por argila e silte. O peso específico dos sólidos apresentou um valor de 24,94 kN/m<sup>3</sup>.

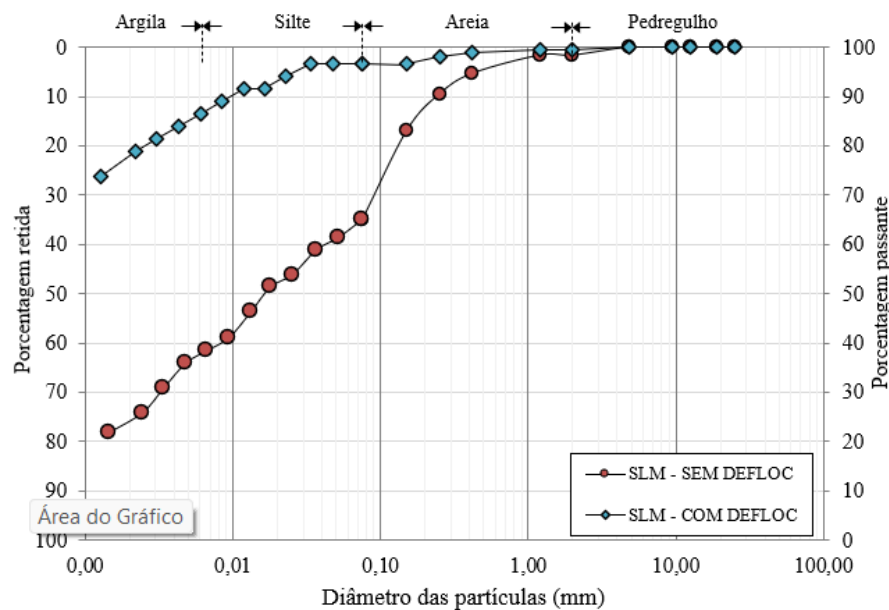
Por fim, foram realizados os ensaios de Limites de Atteberg, em que para o limite de liquidez obteve uma umidade de 63%, já o limite de plasticidade foi de 39%. O Índice de Plasticidade resultou em um valor de 24%.

Tabela 9 - Resultados do ensaio de granulometria do Solo SLG

<b>Solo de São Luiz Gonzaga</b>	
% pedregulho (2,0 - 4,0 mm)	0
% areia grossa (0,6 - 2,0 mm)	1
% areia média (0,2 - 0,6 mm)	2
% areia fina (0,06 - 0,2 mm)	1
% silte (2 $\mu\text{m}$ - 0,06 mm)	18
% argila (% < 2 $\mu\text{m}$ )	78
Peso Específico (kN/m <sup>3</sup> )	24,94

Fonte: Autor

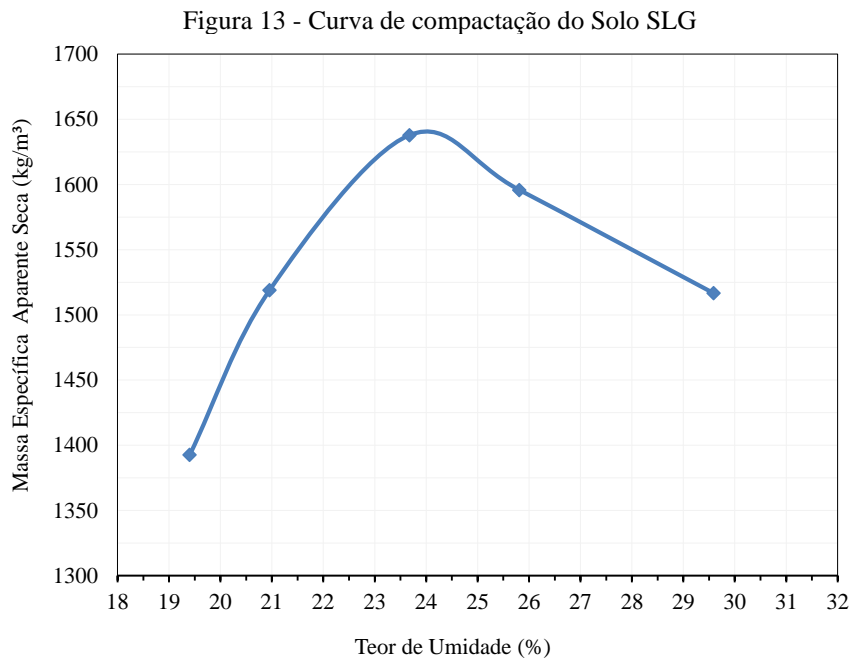
Figura 12 - Curva granulométrica do Solo SLG



Fonte: Autor

Em posse dos valores citados acima, foi realizada a classificação do solo de acordo com o SUCS e a TRB. Em ambas metodologias, o Solo SLG apresentou resultados semelhantes ao Solo SR, sendo um solo argiloso de alta plasticidade (CH) e no grupo A-7-6. Dessa forma, o Solo SLG também é considerado um solo podre e não adequado para o uso em sub-bases de pavimentos.

Com o solo já caracterizado, foi elaborada a curva de compactação para o solo de São Luiz Gonzaga através do ensaio de compactação. A curva de compactação está ilustrada na Figura 14 e apresentou uma umidade ótima de, aproximadamente, 24,30% e uma MEAS de 1640 kg/m<sup>3</sup>.



Fonte: Autor

Utilizando a umidade ótima previamente determinada, foram compactadas as amostras para ensaio triaxial de cargas repetidas. A Figura 15 mostra a Amostra 03 já compactada e pronta para iniciar o ensaio.

Figura 14 - Amostra 03 do Solo SLG



Fonte: Autor

A Tabela 10 apresenta os parâmetros de compactação, essenciais para obter a similaridade das amostras. Apesar de possuir os valores semelhantes para as duas amostras, a densidade apresentou um desvio padrão maior pelo fato da Amostra 04 ter uma densidade superior à Amostra 05. Todavia, os coeficientes de variação apresentaram valores idênticos de 0,1%, bem próximos a zero, mostrando a uniformidade do material presente nas amostras.

Assim como no Solo de Santa Rosa, o condicionamento foi alterado de 1500 para 500 repetições, assumindo um solo de subleito. Os 18 pares de tensões foram mantidos e os valores do ensaio estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 10 - Parâmetros de compactação do Solo SLG

<b>Parâmetros</b>	<b>AM04</b>	<b>AM05</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coef. Variação</b>
Umidade compactação (%)	24,64	24,59	24,62	0,03	0,1%
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	1641,2	1639,2	1640,2	1,41	0,1%
Grau de compactação (%)	100,07	99,95	100,01	0,09	0,1%

Fonte: Autor

Tabela 11 - Valores de MR do Solo SLG

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	MR (MPa)	
		AM 03	AM 04
0,020	0,020	303,5	315,3
	0,040	263,8	304,0
	0,060	251,1	306,7
0,035	0,035	276,2	334,5
	0,070	264,6	220,4
	0,105	246,4	204,4
0,050	0,050	281,6	239,7
	0,100	259,7	216,2
	0,150	236,7	187,1
0,070	0,070	280,0	235,5
	0,140	252,3	199,3
	0,210	206,8	159,1
0,105	0,105	275,6	230,2
	0,210	216,1	169,5
	0,315	172,0	133,4
0,140	0,140	262,6	212,1
	0,280	187,0	145,7
	0,420	138,8	113,7

Fonte: Autor

Após ter os resultados dos MR para cada par de tensões, foi possível analisar que os valores máximos foram encontrados no início do ensaio, apresentando um valor acima de 300 MPa para ambas as amostras. Conforme as tensões aumentaram, os valores de MR foram diminuindo, até chegarem em seus valores mínimos, abaixo de 140 MPa, nos últimos pares de tensões. O valor médio entre as duas amostras foi de 231 MPa. Pode-se concluir que as amostras apresentaram valores de MR semelhantes durante todo o ensaio, confirmando a similaridade das amostras. Além disso, por reduzir os valores do módulo de resiliência com o aumento das tensões, é possível perceber que a tensão desvio está atuando principalmente.

Com a obtenção dos valores de MR, os dados foram inseridos no software e analisados com base nos mesmos modelos de regressão. Os resultados obtidos para as duas amostras estão apresentados na Tabela 12, determinando valores médios e parâmetros estatísticos referentes ao conjunto testado.

Após a execução dos modelos de regressão, é possível perceber os modelos que se ajustaram melhor para as amostras ensaiadas. Para o Solo SLG, o Modelo Composto e o Modelo de Svenson tiveram resultados iguais, com um  $R^2$  de 0,74. Assim como na condição anterior, por se tratar de um solo coesivo, as tensões que predominaram são as tensões desvio.

Tabela 12 - Parâmetros dos modelos de regressão do Solo SLG

<b>Modelo</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Biarez	114,61	-0,240		0,46
Svenson	131,19	-0,242		0,74
Composto	137,97	0,037	-0,266	0,74

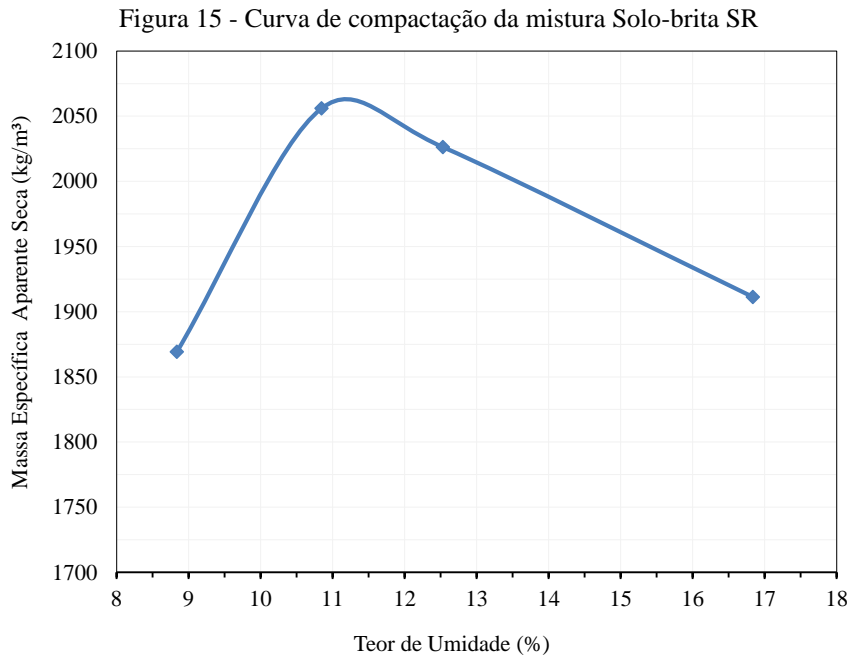
Fonte: Autor

#### 4.3 MISTURA SOLO-BRITA SANTA ROSA

Como o solo e a brita já foram caracterizados e seus valores apresentados anteriormente, a seguir, serão apresentados os resultados dos ensaios de compactação e MR realizados com o solo e o agregado de Santa Rosa e suas devidas análises.

Após as amostras preparadas e misturadas, foi realizado o ensaio de compactação para determinar a curva de compactação do material. O ensaio foi feito na energia intermediária, assim como nos ensaios com solo, e buscou-se manter a proporção proposta previamente de 50% de solo e 50% brita em cada amostra compactada. A Figura 16 ilustra a curva de

compactação obtida e seus resultados. A umidade encontrada foi de, aproximadamente, 11,40% e a MEAS de 2065 kg/m<sup>3</sup>.



Fonte: Autor

Com a curva de compactação determinada e seus parâmetros obtidos, é possível perceber que materiais granulares influenciam na umidade e massa específica aparente seca, tal que a umidade diminuiu consideravelmente e a MEAS aumentou, em relação as curvas determinadas com apenas solo na sua composição.

Com os parâmetros da curva de compactação já determinados, foi possível iniciar as compactações das amostras necessárias para o ensaio triaxial. A Amostra 01 está ilustrada na Figura 17 e foi a primeira amostra ensaiada. Seguindo na mesma lógica dos ensaios triaxiais anteriores em relação ao condicionamento, foram ensaiadas três amostras (AM 01, AM 02 e AM 03) da mistura de solo-brita de Santa Rosa. Os valores de MR obtidos pelo ensaio estão dispostos na Tabela 14.



Figura 16 - Amostra 01 da mistura Solo-brita SR



Fonte: Autor

Os parâmetros de compactação estão apresentados na Tabela 13, sendo estes, essenciais para analisar a similaridade das amostras. Observa-se que as umidades diminuíram e as densidades aumentaram em relação as condições anteriores, isto se dá pelo fato da incorporação de agregado na condição em questão. As três amostras apresentaram valores semelhantes, principalmente as Amostras 01 e 03. O coeficiente de variação foi o mais elevado com um valor de 3,6%, mas a uniformidade do material é aceitável.

Tabela 13 - Parâmetros de compactação da Mistura Solo-brita SR

<b>Parâmetros</b>	<b>AM01</b>	<b>AM02</b>	<b>AM03</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coef. Variação</b>
Umidade compactação (%)	10,45	11,20	10,69	10,78	0,38	3,6%
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2027,6	2025,4	2027,9	2026,97	1,37	0,1%
Grau de compactação (%)	99,15	99,04	99,16	99,12	0,07	0,1%

Fonte: Autor

Para a Mistura Solo-brita SR, os valores de MR obtidos apresentaram valores mínimos nos primeiros pares de tensões e durante o ensaio, tiveram uma crescente chegando aos seus valores máximos nos últimos pares de tensões, todos acima de 475 MPa. O valor médio do MR foi 370 MPa, apresentando um valor alto em comparação às outras condições. A Amostra 01 foi a que apresentou melhores resultados e os MR superiores em todos os pares de tensões, em especial, no ultimo par onde alcançou 529,8 MPa. Como os módulos de resiliência apresentaram crescimento com o aumento das tensões confinantes e desvio, a tensão confinante é a principal atuante nas amostras. Em posse dos valores de MR, estes dados foram inseridos

no software para análise de acordo com os modelos de regressão propostos. A Tabela 15 apresenta os valores obtidos para cada modelo.

Tabela 14 - Valores de MR da Mistura Solo-brita SR

$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_d$ (MPa)	MR (MPa)		
		AM 01	AM 02	AM 03
0,020	0,020	375,3	355,2	306,3
	0,040	334,6	314,8	286,4
	0,060	323,9	302,9	273,9
0,035	0,035	342,3	336,1	319,2
	0,070	341,9	324,5	302,8
	0,105	343,2	333,0	292,5
0,050	0,050	389,5	364,2	338,2
	0,100	372,8	356,6	312,0
	0,150	352,4	336,5	306,2
0,070	0,070	416,1	392,0	369,6
	0,140	393,3	375,1	347,0
	0,210	381,8	365,2	321,7
0,105	0,105	460,6	464,8	423,5
	0,210	432,2	421,0	379,4
	0,315	412,6	387,3	337,5
0,140	0,140	529,8	485,9	476,4
	0,280	465,2	430,0	386,3
	0,420	431,8	383,5	347,0

Fonte: Autor

Na condição em estudo, o Modelo Composto apresentou um  $R^2$  de 0,74, conferindo o melhor ajuste aos dados observados, permitindo selecionar este modelo como o mais apropriado para prever o comportamento da mistura. O modelo de Biarez apresentou um  $R^2$  um pouco abaixo do anterior, o que mostra a atuação das tensões confinantes nas amostras.

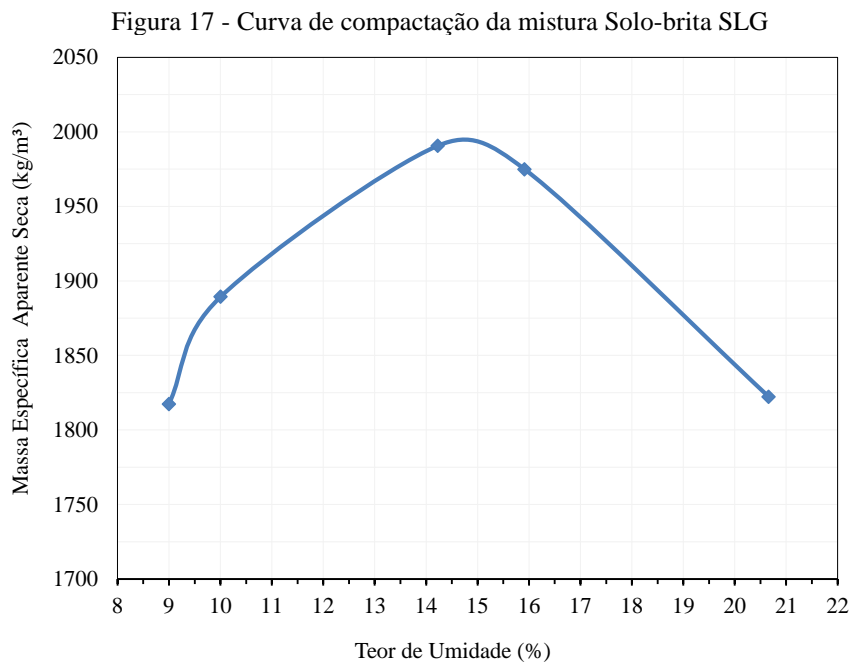
Tabela 15 - Parâmetros dos modelos de regressão da Mistura Solo-brita SR

Modelo	k1	k2	k3	$R^2$
Biarez	614,08	0,180		0,59
Svenson	438,57	0,076		0,17
Composto	665,57	0,311	-0,128	0,74

Fonte: Autor

#### 4.4 MISTURA SOLO-BRITA SÃO LUIZ GONZAGA

Nessa última condição proposta, foi utilizado solo de SLG e agregado de SR, ambos já caracterizados e citados anteriormente. A partir disso, serão apresentados os resultados dos ensaios de compactação e MR realizados com essa mistura. Seguindo o mesmo método da mistura de solo-brita anterior, foi realizado o ensaio de compactação para a presente mistura. Com isso, foi possível determinar a curva de compactação apresentada na Figura 18 e seus respectivos parâmetros. Através da curva, obteve-se uma umidade ótima de, aproximadamente, 15% e uma MEAS de 2000 kg/m<sup>3</sup>.



Fonte: Autor

Utilizando a umidade ótima e a MEAS determinados pela curva de compactação, foram compactadas cinco amostras para o ensaio triaxial, onde a Amostra 02 e Amostra 04 tiveram deformação excessiva no condicionamento. Apenas a Amostra 05, Amostra 06 e Amostra 07 foram válidas para obter o MR. A Amostra 05 está ilustrada da Figura 19.

Com os parâmetros de compactação obtidos conforme a Tabela 16, é possível perceber a similaridade das amostras, sendo que a densidade e o grau de compactação apresentaram valores bem próximos. A umidade de compactação teve a maior disparidade, apresentando um desvio padrão de 0,61 e um coeficiente de variação de 4,1%. Seguindo o mesmo método dos outros ensaios triaxiais, foram ensaiadas as amostras e seus resultados estão apresentados na Tabela 17. Apenas a Amostra 05 e Amostra 07 foram consideradas para o restante do ensaio.

Figura 18 - Amostra 05 da mistura Solo-brita SLG



Fonte: Autor

Tabela 16 - Parâmetros de compactação da Mistura Solo-brita SLG

<b>Parâmetros</b>	<b>AM05</b>	<b>AM07</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio Padrão</b>	<b>Coef. Variação</b>
Umidade compactação (%)	15,43	14,56	14,99	0,61	4,1%
Densidade (kg/m <sup>3</sup> )	2004,5	2004,0	2004,25	0,35	0%
Grau de compactação (%)	100,23	100,20	100,21	0,02	0%

Fonte: Autor

Tabela 17 - Valores de MR da Mistura Solo-brita SLG

<b><math>\sigma_3</math> (MPa)</b>	<b><math>\sigma_d</math> (MPa)</b>	<b>MR (MPa)</b>	
		<b>AM 05</b>	<b>AM 07</b>
0,020	0,020	266,9	277,1
	0,040	225,0	220,1
	0,060	208,9	201,8
0,035	0,035	251,2	239,0
	0,070	227,0	217,5
	0,105	199,1	200,9
0,050	0,050	254,8	241,7
	0,100	221,8	222,0
	0,150	184,0	183,2
0,070	0,070	272,4	253,8
	0,140	215,3	213,6
	0,210	176,0	184,4
0,105	0,105	269,0	303,4
	0,210	217,5	230,5
	0,315	173,8	194,0
0,140	0,140	298,1	329,7
	0,280	212,9	238,9
	0,420	175,6	221,4

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos no ensaio triaxial, é possível perceber que as amostras apresentam o mesmo comportamento, onde nos primeiros pares de tensões aplicados houve uma diminuição dos valores de MR, até chegar nos seus valores mínimos nos pares intermediários. A partir da metade do ensaio, os valores de MR apresentaram crescimento até o último par, onde apresentou resultado máximo, de 298,1 MPa para a Amostra 05 e 329,7 MPa para a Amostra 07. O valor médio do módulo de resiliência foi de 230 MPa. Em posse dos valores de MR, a Tabela 18 apresenta os valores obtidos para cada modelo de regressão proposto anteriormente.

Tabela 18 - Parâmetros dos modelos de regressão da Mistura Solo-brita SLG

<b>Modelo</b>	<b>k1</b>	<b>k2</b>	<b>k3</b>	<b>R<sup>2</sup></b>
Biarez	246,32	0,027		0,000
Svenson	188,62	-0,084		0,171
Composto	300,33	0,646	-0,312	0,792

Fonte: Autor

A partir dos valores de R<sup>2</sup>, percebe-se que os modelos de Svenson e Biarez são praticamente nulos, já o Modelo Composto apresenta R<sup>2</sup> de 0,792, sendo o modelo mais adequado para ser utilizado. Como os valores diminuem e depois aumentam durante a aplicação dos pares de tensões, tanto as tensões desvio quanto as tensões confinantes estão atuando nas amostras.

#### 4.5 COMPARATIVO ENTRE AS CONDIÇÕES

A seguir, serão analisados os resultados e efetuado um comparativo entre as condições. Serão realizadas quatro comparações, sendo elas: Solo SR x Solo SLG; Solo SR x Mistura Solo-brita SR; Solo SLG x Mistura Solo-brita SLG; e por fim, Mistura Solo-brita SR x Mistura Solo-brita SLG.

##### 4.5.1 Solo SR e Solo SLG

A partir dos resultados obtidos referentes ao módulo de resiliência, a Tabela 19 apresenta um resumo geral do Solo SR. Neste ensaio, o módulo de resiliência iniciou com seu valor máximo nas duas amostras e foi diminuindo conforme as tensões aumentavam. Já os

valores mínimos se deram quase no final do ensaio. A partir disso, a média do MR ficou em 106 MPa. Foi possível perceber que durante a aplicação dos pares de tensões, o MR foi diminuindo em relação ao aumento das tensões, evidenciando que o Solo SR tem o seu MR dependente das tensões desvio. Isto se dá por conta da granulometria do solo, tendo em vista que o solo em questão é um solo altamente fino e coesivo.

Tabela 19 - Resumo geral do MR do Solo SR

Amostra	MR (MPa)			
	Mínimo	Médio	Máximo	Média MR
AM 03	75	117	193	106
AM 04	55	95	165	
Modelo Composto	Tensão Desvio			R <sup>2</sup> = 0,82

Fonte: Autor

Como apresentado na Tabela 19, o valor de R<sup>2</sup> obtido quantifica o quão bem os dados se ajustam aos modelos de regressões propostos, sendo assim, o Modelo Composto é o mais adequado, pois 82% da variação do módulo de resiliência pode ser explicada por tal modelo. Este leva em consideração todas as tensões, representando materiais de todas as granulometrias. Para o Solo SLG, a Tabela 20 apresenta um resumo geral dos seus resultados. Para o Solo SLG, o módulo de resiliência começou com valores altos e foram diminuindo durante o ensaio. O valor médio determinado para o MR foi de 231 MPa. Para este solo em questão, a tensão atuante também é a tensão desvio, pelo fato de que conforme as tensões aumentavam, o MR diminuía.

Tabela 20 - Resumo geral do MR do Solo SLG

Amostra	MR (MPa)			
	Mínimo	Médio	Máximo	Média MR
AM 03	139	243	304	231
AM 04	114	218	335	
Modelo Composto	Tensão Desvio			R <sup>2</sup> = 0,74

Fonte: Autor

O modelo que mais se ajusta para o MR deste solo é o Modelo Composto, possuindo um R<sup>2</sup> de 0,74. Porém, o modelo de Svenson teve um valor muito próximo, chegando a 0,74, evidenciando a atuação da tensão desvio.

A partir das análises feitas sobre os dois solos em questão, é possível afirmar que ambos possuem semelhanças por se tratar de materiais similares, sendo os dois solos de composição fina e, conseqüentemente, faz com que a tensão desvio atue predominantemente nas duas condições. O modelo que mais se adequou foi o Modelo Composto, seguido do modelo de Svenson, que representa bem os solos mais finos. O maior diferencial entre as duas condições foi o módulo de resiliência, pois enquanto o Solo SR teve um MR médio de 106 MPa, o Solo SLG obteve um MR de 231 MPa. Conclui-se que o Solo SLG possui uma durabilidade e suporte maior que o Solo SR quando submetidos a cargas cíclicas ou repetidas.

#### 4.5.2 Solo SR e Mistura Solo-brita SR

Neste tópico, será realizada a comparação entre as duas condições da cidade de Santa Rosa, uma de solo e outra de solo-brita. No que diz respeito ao Solo SR, já foi mencionado no tópico anterior e foi exposto um resumo geral na Tabela 19. Para a Mistura de Solo-brita SR foi feito um resumo geral com os valores obtidos apresentados na Tabela 21.

Tabela 21 - Resumo geral do MR da Mistura Solo-brita SR

Amostra	MR (MPa)			Média MR
	Mínimo	Médio	Máximo	
AM 01	324	394	530	370
AM 02	303	374	486	
AM 03	274	340	476	
Modelo Composto	Tensão Confinante			$R^2 = 0,75$

Fonte: Autor

Diante dos valores apresentados na Tabela 21, o Modelo Composto obteve um  $R^2$  de 0,75, seguido pelo Modelo de Svenson, com  $R^2$  de 0,59. Este último, leva em consideração a influência apenas da tensão confinante, representando bem solos granulares. Por sua vez, o primeiro modelo leva em consideração todas as tensões e representa materiais de todas as granulometrias.

Durante o ensaio, foi possível observar que o MR aumentava em relação ao aumento da tensão confinante aplicada. Isso se deve a um melhor acomodamento das partículas por se tratar de um solo com granulometria fina, pode proporcionar um melhor preenchimento dos vazios entre os agregados adicionados à mistura. Os MR mínimos foram observados nos primeiros pares de tensões confinantes, já os MR máximos foram observados nos últimos pares. O valor médio dos MR ficou em um valor de 370 MPa.

Para efeito comparativo, pode se perceber que as duas condições possuem características bem diferentes, mesmo utilizando o mesmo solo. Para um material fino e coesivo, a tensão atuante é a tensão desvio, sendo que conforme aumenta as tensões, o MR diminui. Por sua vez, na mistura de solo-brita, quem atua predominantemente é a tensão confinante, por ser mais adequada para materiais granulares, sendo que conforme aumente as tensões, o MR cresce junto. Enquanto o Solo SR obteve um MR de 106 MPa, a Mistura Solo-brita SR obteve um MR de 370 MPa, conferindo muito mais durabilidade e suporte. Portanto, é verificado que a inserção de agregado na mistura somado a um solo aumenta os valores de módulo de resiliência.

#### 4.5.3 Solo SLG e Mistura Solo-brita SLG

Nesta seção, será feita a comparação entre duas condições da cidade de São Luiz Gonzaga, uma de solo e outra de solo-brita. A condição do Solo SLG já foi abordada no tópico 4.5.1 e um resumo geral pode ser encontrado na Tabela 20. Na Tabela 22, é possível encontrar um resumo geral com os valores obtidos para a Mistura Solo-brita SLG.

Tabela 22 - Resumo geral do MR da Mistura Solo-brita SLG

Amostra	MR (MPa)			
	Mínimo	Médio	Máximo	Média MR
AM 03	174	225	298	230
AM 04	183	232	330	
Modelo Composto	Tensão Desvio e Confinante			R <sup>2</sup> = 0,79

Fonte: Autor

A partir dos resultados obtidos, pode-se observar que o R<sup>2</sup> do Modelo Composto foi de 0,79, sendo que os outros tiveram valores bem inferiores. Desse modo, foi possível verificar que a Mistura Solo SLG tem o seu MR dependente tanto das tensões desvio, quanto das tensões confinantes. Este modelo representou bem a mistura, pois com o aumento de ambas tensões, o módulo de resiliência apresentou um crescimento. Os MR máximos foram obtidos nos últimos pares de tensões confinantes, já o valor médio de MR teve um valor de 230 MPa.

Comparando as duas condições mencionadas, é possível perceber várias diferenças fundamentais para o comportamento do material. O solo possui a tensão desvio como a tensão atuante, já a mistura solo-brita depende tanto da tensão desvio quanto da tensão confinante. O



MR do Solo SLG começou alta e foi diminuindo durante a realização do ensaio, por sua vez, o MR da Mistura Solo-brita SLG começou pequena e cresceu com o passar do ensaio. Apesar das duas condições apresentarem parâmetros e modelos diferentes, o MR obtido foi praticamente igual.

#### **4.5.4 Mistura Solo-brita SR e Mistura Solo-brita SLG**

Neste tópico, serão comparadas as duas misturas de solo-brita e suas respectivas análises. Ambas as misturas já foram previamente apresentadas, a Tabela 21 apresenta o resumo geral da Mistura Solo-brita SR, por sua vez, a Tabela 22 apresenta o resumo geral da Mistura Solo-brita SLG.

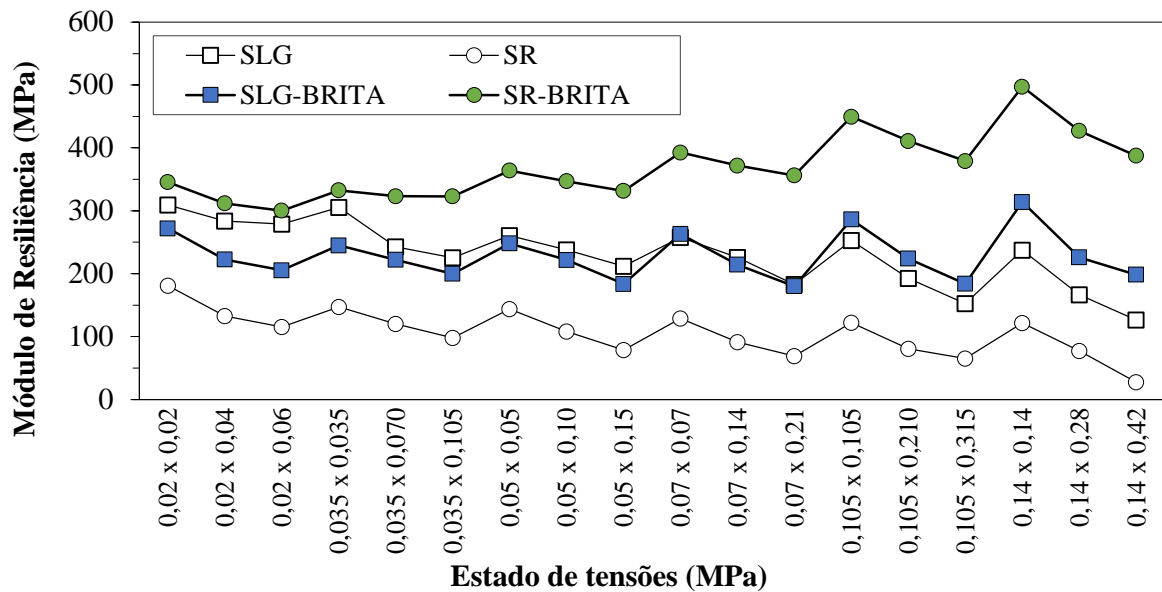
Analisando as duas condições em questão, é possível observar que ambas tiveram um crescimento do MR conforme aumentavam as tensões impostas pelos pares de tensões. Apesar disso, a Mistura Solo-brita SR era dependente da atuação das tensões confinantes, já para a Mistura Solo-brita SLG, as duas tensões eram atuantes. Além disso, ambas obtiveram o Modelo Composto com maior  $R^2$ .

#### **4.5.5 Comparativo entre as condições**

Os ensaios de MR foram executados para cada condição na umidade ótima. A partir disso, para cada condição é possível perceber similaridades, quando se tratado do mesmo tipo de material, por exemplo, e divergências, pelo fato de não apresentarem o mesmo solo ou composição, entre outras. Considerando que o Modelo Composto apresentou a melhor regressão em cada condição analisadas anteriormente, a Figura 19 apresenta um comparativo dos parâmetros derivados dessa regressão, com os MR médios das amostras entre as quatro condições em estudo, facilitando a análise de seus desempenhos após o ensaio.

Foi verificado que para as duas condições de solo, a medida em que a tensão desvio se elevou, o MR diminuiu. Já para a Mistura Solo-brita SR, o MR aumentou à medida que a tensão confinante se elevou. Por fim, a Mistura Solo-brita SLG, apresentou crescimento à medida que tanto a tensão desvio quanto a tensão confinante aumentaram.

Figura 19 - Comparativo entre as condições a partir do Modelo Composto



Fonte: Autor

Outra análise interessante é a comparação das condições com o solo da mesma jazida. Enquanto que o Solo SR e a Mistura Solo-brita SR tiveram valores bem distintos, mostrando o contraste entre a condição de maior e menor MR, as condições de São Luiz Gonzaga apresentaram valores semelhantes, mesmo tendo uma composição diferente. O MR da Mistura Solo-brita SR melhorou e alterou o comportamento em comparação ao Solo SR. Assim, conclui-se que 50% de brita foi suficiente para proporcionar uma rigidez satisfatória para o material e conseguir distribuir mais as tensões aplicadas. Para a Mistura Solo-brita SLG, o comportamento foi muito similar ao Solo SLG, mostrando a possibilidade da brita não ter travado da maneira ideal, pois somente o solo resultou em um comportamento resiliente superior ao de SR. Assim, a mistura solo-brita SLG não atingiu às expectativas. Conclui-se então, que para a Mistura Solo-brita, deve-se verificar outras proporções de agregado, visando buscar um aumento do MR.

Ademais, foi possível perceber que com a adição de materiais granulares na amostra, esta tende a ter um MR maior. Isto foi verificado, principalmente, na Mistura Solo-brita SR, que teve um bom desempenho e teve um MR de 370 MPa, o maior entre todas as condições.

Portanto, o aumento do MR é essencial para as camadas estruturas dos pavimentos, pois com um comportamento resiliente bom, o pavimento terá menos deformações elásticas, garantindo uma preservação muito maior do revestimento em relação ao trincamento por fadiga, uma das principais patologias encontradas nos pavimentos.

#### 4.5.6 Comparação com outros estudos

Chiarello (2019) conduziu uma análise sobre o comportamento resiliente de duas misturas de solo-brita com diferentes proporções granulométricas do solo de Cruz Alta, RS. Uma das misturas, denominada M02, consistia em 75% de agregado descontínuo e 25% de solo laterítico, enquanto a outra mistura, M03, continha 65% de agregado descontínuo e 35% de solo laterítico. A partir dos resultados obtidos, observou-se um pequeno decréscimo no MR da segunda mistura em comparação com a primeira, devido à menor proporção de agregado na M03. Apesar da M03 apresentar um comportamento resiliente inferior, ambas as misturas demonstraram comportamentos semelhantes no ensaio triaxial, onde o MR aumentava conforme as tensões confinantes e as tensões desviadoras cresciam, sendo melhor representado pelo modelo Composto.

Mello (2019) estudou o mesmo solo de Cruz Alta, porém estudou uma amostra com proporção de 70% de agregado descontínuo e 30% solo laterítico e realizou ensaios com umidades no ramo seco, na umidade ótima e no ramo úmido. Em vista de comparação, foi analisado somente os resultados obtidos na umidade ótima. Com os resultados obtidos, foi possível perceber que as duas amostras ensaiadas na umidade ótima apresentaram resultados semelhantes e próximos ao previsto pelo autor. A partir que as tensões aumentaram, os MR cresceram também, evidenciando que a presença de agregado aumenta o módulo de resiliência. O modelo Composto foi o melhor representado ( $R^2 = 0,90$ ), pois tanto a tensão confinante quanto a tensão desvio estavam atuantes.

Assim como as misturas da presente pesquisa, as misturas citadas anteriormente apresentaram um aumento no módulo de resiliência à medida que a proporção de agregado aumentava, evidenciando a melhoria proporcionada pelo agregado no comportamento resiliente do material. Isso resulta em maior rigidez da camada estrutural do pavimento e, conseqüentemente, aumenta a capacidade do material de recuperar sua forma original após a aplicação de cargas cíclicas. Com isso, supõem-se que se caso seja aumentada a proporção de agregado nas misturas, seja possível melhorar a capacidade resiliente do material.

Por fim, a interação entre os agregados e o solo cria uma estrutura mais coesa e estável, o que contribui para um desempenho mecânico superior. Portanto, a incorporação de agregados em proporções adequadas é fundamental para melhorar o comportamento resiliente das misturas, resultando em pavimentos mais duráveis e resistentes ao trincamento por fadiga.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo buscou verificar o comportamento resiliente de dois solos e duas misturas solo-brita, a serem utilizadas como camadas estruturais de pavimentos. O objetivo principal foi analisar o comportamento resiliente de quatro condições, variando a fonte da jazida, sendo o material terroso de dois lugares distintos, e a composição, sendo dois solos e duas misturas solo-brita com 50% de solo e 50% de brita 3/4".

Após os ensaios triaxiais de cargas repetidas finalizados, as quatro condições apresentaram um desempenho satisfatório em relação ao MR e seu comportamento resiliente, onde este foi estudado no teor de umidade ótima, obtido através da curva de compactação de cada condição.

O Solo SR e o Solo SLG tiveram resultados semelhantes em alguns casos por se tratarem de duas condições compostas apenas por solo. Apesar de serem retiradas de lugares diferentes, ambos materiais são considerados finos e coesivos. Entretanto, o Solo SR apresentou um MR médio de 106 MPa, enquanto o Solo SLG obteve um MR médio de 231 MPa, comprovando um comportamento resiliente superior.

Por sua vez, as misturas solos-brita apresentaram comportamento satisfatório, em destaque, a Mistura Solo-brita SR, que obteve um MR de 370 MPa, resultado bem superior às outras condições. A Mistura Solo-brita SLG teve um MR de 230 MPa, apresentando um resultado similar ao Solo SLG. Apesar da Mistura Solo-brita SLG desempenhar um comportamento abaixo do esperado, pode-se concluir que misturas solos-brita tendem a ter com um comportamento resiliente superior, pois o agregado confere maior resistência à carga e capacidade de suporte.

As análises e correlações em relação ao módulo de resiliência com base nos modelos de regressões matemáticas se mostraram satisfatórias. Embora observado comportamentos distintos em relação as tensões desvio e confinante aplicadas, todas amostras apresentaram um modelo de comportamento bem similar ao proposto pelo Modelo Composto. O Solo SR, Solo SLG, Mistura Solo-brita SR e Mistura Solo-brita SLG tiveram valores de  $R^2$  de 0,82, 0,74, 0,74 e 0,79, respectivamente, evidenciando uma correlação adequada ao modelo proposto.

Portanto, as condições propostas no trabalho em questão se mostraram em condições de atuar em camadas estruturais de pavimentos, principalmente, a mistura solo-brita para sub-base. Esta é uma excelente opção para rodovias com um tráfego moderado, que não exija muito esforço, mas que ao mesmo tempo suporte as solicitações impostas. Além do mais, em comparação com materiais comumente usados em sub-base, como rachão e macadame, a

mistura solo-brita torna-se uma opção mais viável do ponto de vista econômico. A partir das análises e conclusões demonstradas aqui, é possível verificar que os objetivos almejados foram alcançados.

A partir de todos os resultados obtidos, vale destacar alguns estudos que podem ser realizados futuramente. Sugere-se algumas ideias para a elaboração de novas pesquisas sobre o tema, como estudar a proporção de solo-brita que melhor se encaixe nos parâmetros propostos e demonstre um comportamento resiliente superior ao da presente pesquisa, e buscar compreender acerca do solo-brita cimento para o Solo SR e analisar os comportamentos e a viabilidade para execução.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 6459**: Solo - Determinação do limite de liquidez. Rio de Janeiro, 2017.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7181**: Solo - Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS **NBR 7182**: Solo – Ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 2016.

BALBO, J. T. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto e restauração**. São Paulo: Ed. Oficina de texto, 2007.

BERNUCCI, et al. **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: Ed. Abeda, 2022.

BIRKLAND, P. W. **Pedology, weathering, and geomorphological research**. New York: Pub. Oxford University Press. 1974.

CHEN, J. S., LIN, K. Y. “**Evaluation of Aggregate Strength in HMA Mixtures**”. Journal of Materials in Civil Engineering, v. 13, n. 6, p. 453-459, 2001.

COSTA, SITYÁ E MACHADO (2019). "**Análise da Viabilidade de Uso de Pó de Brita em Pavimentação**".

CRISPIM, F. A.; LIMA, D.C.; SHAEFER, C. E. G.R.; SILVA, C. H. C.; CARVALHO, C. C. B.; BARBOSA, P. S. A.; BRANDÃO, E. H. **The influence of laboratory compaction methods on soil structure: mechanical and micromorphological analysis**. Soils and Rocks, p. 91-98, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **Manual de pavimentação**. DNIT, Rio de Janeiro, 2006.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA E TRANSPORTES. **DNIT ME 134**: Pavimentação - Solos - Determinação do módulo de resiliência -Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2010.

FRANCO, F. A. C. P. **Método de dimensionamento mecânico empírico de pavimentos asfálticos – SisPav**. 2007. Tese de doutorado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2007.

HOLTZ, R. D.; KOVACS, W. D. **An introduction to geotechnical engineering**. Prentice-Hall Inc. Englewood Cliffs. New Jersey, 34 p, 1981.

HUANG, Y. H. **Pavement Analysis and Design**. New Jersey: Pub. Pearson Education Inc., 2004.

LEITE, L. F. M. “**Material de Construção de Pavimentos**”. Universidade Federal de Viçosa, 2011.

MACÊDO, J. A. G. **Interpretação de ensaios deflectométricos para avaliação estrutural de pavimentos flexíveis: A Experiência com FWD no Brasil**. 1996. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1996.

MEDINA, J., MOTTA, L. M. G., **Mecânica dos Pavimentos**. Rio de Janeiro: Ed. UFRJ, 2015.  
NOGAMI, J. S., VILLIBOR, D. F. **Pavimentação de Baixo Custo com Solos Lateríticos**, São Paulo, Vilibor, 1995.

NORBACK, Carine. **Caracterização do módulo de resiliência e da deformação permanente de três solos e misturas solo-brita**. 2018. 180 f. Dissertação de Mestrado (Programa de PósGraduação em Engenharia Civil) – COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 2018.

PINTO, Carlos de Souza. **Curso Básico de Mecânica dos Solos**. São Paulo: Oficina de Textos, 2000.

SANTOS, T. A. **Avaliação da resistência e da deformabilidade de quatro solos empregados em subleitos rodoviários no estado do Rio Grande do Sul**. 2006. Dissertação de mestrado - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2006

SILVEIRA, J., 2000, **Metodologia para projeto de pavimentos flexíveis em vias urbanas da região metropolitana de Porto Alegre**. 2000. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2000.

SOUSA, W. M.; RIBEIRO, A. J. A.; XAVIER, I. W. P.; SANTOS, M. V. **Resíduos de Cerâmica Vermelha como um Material Ambientalmente Sustentável para Uso na Pavimentação**. *Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais (GESTA)*. v.7, n.2, p. 202-2013, 2019.

SVENSON, M., 1980, **Ensaio triaxiais dinâmicos de solos argilosos**. 1980. Tese de Mestrado – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, 1980.

ROBERTS, F. L., KANDHAL, P. S., BROWN, E. R., LEE, D. Y., KENNEDY, T. W. “**Hot Mix Asphalt Materials, Mixture Design, and Construction**”. 2ª ed. National Asphalt Pavement Association Research and Education Foundation, 1996.

WALLAU, J. R., 2004, **Avaliação da Técnica de Estabilização Granulométrica como Revestimento Primário de Rodovias Não-Pavimentadas**. 2004. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Regional do Noroeste do Estado do Rio Grande do Sul, Ijuí, RS, 2004.

YODER, E. J., WITCZAK, M. W. **Principles of pavements design**. New York: Pub. Wiley, 1975.