

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

Wagner Merode Bujak

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ESTRUTURAL DA
UTILIZAÇÃO DO PAVIMENTO INTERTRAVADO DE
CONCRETO PARA PROJETO DE VIAS MUNICIPAIS NO RIO
GRANDE DO SUL**

Porto Alegre
Agosto de 2024

WAGNER MERODE BUJAK

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ESTRUTURAL DA
UTILIZAÇÃO DO PAVIMENTO INTERTRAVADO DE
CONCRETO PARA PROJETO DE VIAS MUNICIPAIS NO RIO
GRANDE DO SUL**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Comissão de
Graduação do Curso de Engenharia Civil da Escola de Engenharia
da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para obtenção do título de Engenheiro Civil

Orientador: Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Coorientadora: Prof.^a Dra. Thaís Radünz Kleinert

Porto Alegre
Agosto de 2024

WAGNER MERODE BUJAK

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ESTRUTURAL DA
UTILIZAÇÃO DO PAVIMENTO INTERTRAVADO DE
CONCRETO PARA PROJETO DE VIAS MUNICIPAIS NO RIO
GRANDE DO SUL**

Este Trabalho de Diplomação foi julgado adequado como pré-requisito para a obtenção do título de ENGENHEIRO CIVIL e aprovado em sua forma final pela Banca Examinadora, pelo/a Professor/a Orientador/a e pela Comissão de Graduação do Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Porto Alegre, 15 de agosto de 2024

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Washington Peres Núñez
Dr. Em Engenharia pela UFRGS, Brasil

Prof.^a Dra. Thaís Radünz Kleinert
Dr.^a pelo PPGCI/UFRGS, Brasil

Prof.^a Dra. Gracieli Bordin Colpo
Dr.^a pelo PPGCI/UFRGS, Brasil

Prof. Me. Lucas Fraporti Heller
Me. pelo PPGCI/UFRGS, Brasil

Dedico este trabalho a minha família, que sempre me deram a base para evoluir e me tornar uma pessoa melhor.

AGRADECIMENTOS

Inicialmente gostaria de agradecer aos meus pais, Arlete e Gilberto, por me disponibilizarem os melhores meios para minha evolução. Agradeço o apoio, carinho e amor que sempre dedicaram para mim, isso realmente foi essencial para que conseguisse concluir esse objetivo, muito obrigado, de coração. Agradeço também meu irmão Thiago, por sempre estar disponível para me ajudar independente do momento ou situação, apesar da fase da briga enquanto éramos pequenos, agora tenho um grande melhor amigo, sou sortudo em te ter como meu irmão.

Quero agradecer também meu padrinho Alexsandro e madrinhas Cíntia e Magali, por sempre estarem comigo em todos os momentos de minha vida, comemorando minhas conquistas como se fossem suas e me ajudando quando estou com contratempos, sou muito grato por tê-los em minha vida. E ao restante da minha família, estejam eles nesse plano ou não, estendo meu agradecimento a cada um de vocês, apesar de não escrever o nome de cada um, vocês são muitos importantes para mim e sou muito feliz em ter vocês comigo, em especial minhas avós.

Agradeço também a minha namorada, Celine, por sempre estar sempre comigo nos momentos bons e ruins, me ensinando o real significado de união, sou muito grato em te ter como parceira e desejo que consigamos conquistar e evoluir muito juntos. Aos meus amigos, muito obrigado, por estarem comigo e por deixarem o cotidiano mais tranquilos principalmente durante nossas longas conversas, jogatinas e churrascos.

Por fim, sou muito grato aos meus orientadores, Prof. Dr. Washinton Peres Núñez e a Prof.^a Dra. Thaís Radünz Kleinert por todo suporte que me deram em toda minha vida acadêmica, obrigado pelo apoio e parceria, vocês são exemplos de pessoas e profissionais. Ainda, agradeço aos meus amigos do LAPAV, por serem tão especiais e receptivos comigo, obrigado!

Lembre-se de que a sua real riqueza pode ser medida,
não pelo que você tem, mas pelo que você é.
Napoleon Hill.

RESUMO

As mudanças climáticas, combinadas com a verticalização das cidades, sobrecarregam os sistemas de saneamento e drenagem, uma vez que essas estruturas estão localizadas sob o pavimento e sua manutenção pode causar interferências no tráfego. Portanto, é necessário desenvolver uma metodologia construtiva específica para as cidades modernas. No entanto, esse procedimento já é utilizado desde os tempos dos egípcios e romanos, mantendo uma sistemática semelhante ao longo dos séculos. Essa estrutura é chamada de pavimento intertravado, antigamente utilizava-se de pedras ou tijolos para camada de rolamento, entretanto essa camada não era padronizável. Assim sendo, esse trabalho propõe a análise da viabilidade estrutural da utilização do pavimento intertravado de concreto para projeto de vias municipais no Rio Grande do Sul. Em relação às normas, no Brasil só existem metodologias empíricas. Porém essa técnica baseia-se em modelos criados a partir da experimentação, e o intuito dessa pesquisa é analisar mecanística empiricamente as estruturas. Para isso, foram selecionados sete subleitos encontrados no Rio Grande do Sul, e suas características foram obtidas a partir de dissertações de mestrado e teses de doutorado. Em relação à camada granular foram utilizados de dois materiais, a brita e o resíduo de construção de demolição. Para cada subleito foram estudadas quatro estruturas. A primeira somente subleito, camada de assentamento e bloco de concreto. A segunda, adicionou-se uma camada de 10 centímetros de brita como camada de base. A terceira majorou-se para 15 centímetros de brita. E na última foi utilizado de 15 centímetros de resíduo de construção em substituição à brita, para tentar dar um destino adequado a esse material, principalmente após a pior catástrofe climática ocorrida no estado, em 2024. A análise mecanística inicia-se com o modelo de equivalência de espessuras do Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico da África do Sul - *South African Mechanistic-Empirical Design Method* – (SAMDM), para substituir o bloco de concreto e a camada de assentamento por uma espessura equivalente. Após isso, realiza-se a análise elástica das camadas através do *software* AEMC. Por conseguinte, obtidas as tensões e deformações nas espessuras desejadas, é realizado o cálculo da capacidade em números de eixos padrão, conforme SAMDM. Por fim, as capacidades das estruturas são comparadas aos tráfegos das vias municipais para verificar sua viabilidade estrutural.

Palavras chaves: pavimento intertravado de bloco de concreto; dimensionamento mecanístico-empírico; subleitos do Rio Grande do Sul.

ABSTRACT

Climate change, together with the vertical expansion of cities, overloads sanitation and drainage systems, considering that these structures are located beneath the pavement and their maintenance causes the destruction of the road. Therefore, there is a need for a specific construction methodology for urban areas. However, this procedure has been used since the time of the Egyptians and Romans, maintaining an analogous system. This structure is known as interlocking pavement; in the past, stones or bricks were used for the wearing course, but this layer is not very standardizable. Thus, this work proposes the use of concrete blocks as the wearing course for municipal roads. Regarding standards, Brazil only has empirical methodologies. However, this technique is based on models created through experimentation, and the aim of this research is to empirically analyze the mechanistic structures. For this purpose, seven subgrades found in Rio Grande do Sul were selected, and their characteristics were obtained from master's theses and doctoral dissertations. Two materials were used for the granular layer: gravel and construction and demolition waste. Four structures were studied for each subgrade. The first one had only subgrade, bedding layer, and concrete block. The second added a 10-centimeter layer of gravel as the base layer. The third increased the gravel layer to 15 centimeters. In the last, 15 centimeters of construction waste was used instead of gravel, to attempt to give an appropriate destination to this material, especially after the worst climatic catastrophe in the state occurred in 2024. The mechanistic analysis starts with the thickness equivalence model of the South African Mechanistic-Empirical Design Method (SAMDM) to replace the concrete block and bedding layer with an equivalent thickness. After that, elastic analysis of the layers is performed using the AEMC software. Consequently, with the obtained stresses and strains at the desired thicknesses, the calculation of the capacity in terms of standard axle loads is carried out, according to (SAMDM). Finally, the capacities of the structures are compared with the traffic loads of the municipal roads to assess their structural viability.

Key words: interlocking concrete block pavement; mechanistic-empirical design; oils of Rio Grande do Sul.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura do pavimento romano.....	16
Figura 2 - Materiais de origem por região do estado do Rio Grande do Sul.....	20
Figura 3 - Tipos de Solos no RS.....	21
Figura 4 - Graduação do material granular.....	22
Figura 5 - Efeito do grau de saturação na camada granular	24
Figura 6 - Nível sonoro de pavimentos em função da velocidade	28
Figura 7 - Variação da deformação permanente com variação da espessura das juntas.....	29
Figura 8 - Deformação permanente variando a espessura e resistência a compressão dos blocos	29
Figura 9 - Posições críticas para tensão e deformação	32
Figura 10 - Fluxograma do Dimensionamento de pavimento intertravado com blocos de concreto	35
Figura 11 - Solos utilizados para subleito.....	36
Figura 12 - Estrutura 01 e 02.....	38
Figura 13 - Estrutura 03 e 04.....	38
Figura 14 - Gráfico de comparação da resistência estrutural	40
Figura 15 - Estrutura 01 - Solo Argiloso - Cruz Alta – Tese João Bonzanini.....	41
Figura 16 – Parâmetros do eixo padrão rodoviário e vista superior das cargas sobre a estrutura.	42
Figura 17 - Resultados software AEMC.....	42
Figura 18 - Capacidade de suporte Subleito 01	46
Figura 19 - Capacidade de suporte Subleito 02.....	47
Figura 20 - Capacidade de suporte Subleito 03.....	47
Figura 21 - Capacidade de suporte Subleito 04.....	48
Figura 22 - Capacidade de suporte Subleito 05.....	48
Figura 23 - Capacidade de suporte Subleito 06.....	49
Figura 24 - Capacidade de suporte Subleito 07.....	49
Figura 25 - Resumo da capacidade de suporte	50
Figura 26 - Resumo dos módulos das estruturas	50

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego	31
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Qualidades e defeitos de camadas de rolamento	18
Tabela 2 – Distribuição granulométricas recomendada da base.....	23
Tabela 3 - Distribuição granulométricas recomendada da camada de assentamento	25
Tabela 4 - Comparação de luminância de um pavimento de concreto e asfáltico.....	27
Tabela 5 - Distâncias de frenagem com base no tipo de pavimento.....	28
Tabela 6 – Resumo da equivalência de espessura	33
Tabela 7 - Subleitos analisados.....	36
Tabela 8 - Dados para o dimensionamento camada granular	37
Tabela 9 – Resumo da equivalência de espessura	39
Tabela 10 - Confiabilidade recomendada pela AASHTO C(%).....	43
Tabela 11 - Constante "a" deformação permanente do subleito	44
Tabela 12 - Constantes " α " e " β " da ruptura por cisalhamento da camada granular	45
Tabela 13 - Constante para umidade "K"	45

LISTA DE SIGLAS

AASHTO	<i>American Association of State Highway and Transportation Official</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AEMC	Análise Estática de múltiplas Camadas
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CG	Camada Granular
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IP	Instrução de Projeto
LPAV	Laboratório de Pavimentação da UFRGS
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
NBR	Norma Brasileira
SAMDM	<i>South African Mechanistic-Empirical Design Method</i>
SL	Subleito
UFRGS	Universidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
1.1	PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS.....	14
1.3	DELINEAMENTO E ESTRUTURA DO TRABALHO.....	14
2	PAVIMENTAÇÃO.....	16
2.1	TIPOS DE PAVIMENTOS.....	17
2.2	SUBLEITO.....	18
2.3	CAMADA DE BASE GRANULAR.....	21
2.4	CAMADA DE ASSENTAMENTO.....	24
2.5	CAMADA DE ROLAMENTO.....	26
2.6	NORMAS UTILIZADAS NO DIMENSIONAMENTO.....	29
2.6.1	Classificação Viária.....	30
2.6.2	SAMDM (2014).....	32
2.6.3	MeDiNa (2020).....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	35
3.1	SELEÇÃO DOS MATERIAIS.....	36
3.2	CONCEPÇÃO DAS ESTRUTURAS.....	37
3.3	EQUIVALÊNCIA DE ESPESSURAS (SAMDM 2014).....	39
3.4	ANÁLISE MECANÍSTICA DO LIMITE ESTRUTURAL.....	41
3.5	MODELOS EMPÍRICOS SAMDM (2014).....	43
3.5.1	Subleito.....	43
3.5.2	Camada Granular.....	44
4	RESULTADOS.....	46
5	CONCLUSÃO.....	51

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA DE PESQUISA E JUSTIFICATIVA

A verticalização das cidades, um fenômeno global, diretamente ligada à urbanização aumenta a densidade populacional. Segundo o Censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) de 2010, o número de apartamentos cresceu cerca de 43% entre 2000 e 2010, essa concentração exige de um planejamento adequado da cidade. Entretanto, apesar desse fluxo movimentar a economia e aumentar a arrecadação de imposto, carece da readequação da infraestrutura local. Assim sendo, sistemas como o de saneamento exigem reparos e melhorias, contudo por estarem no subsolo, abaixo dos pavimentos já existentes, provocam grandes obras que interferem muito na mobilidade urbana.

Outro fator crucial, em se tratando do planejamento urbano, mais especificamente da drenagem pluvial, é a mudança climática. O estado do Rio Grande do Sul está localizado em uma região de encontro entre sistemas polares e tropicais, ou seja, encontro entre ar frio e quente que ocasiona eventos climáticos extremos. Assim, potencializado por eventos como El Niño e o aquecimento global, a região sul do Brasil sofre com chuvas extremas, As quais são cada vez mais frequentes, segundo o ClimaMeter 15% são ocasionadas pelas mudanças climáticas. Conseqüentemente, no ano de 2024, o Rio Grande do Sul, entre os meses de abril e junho, sofreu sua pior catástrofe climática sendo a maior enchente registrada no estado. Ela atingiu 437 cidades, afetando 1,9 milhões de pessoas, com um custo aproximado de reconstrução de 100 bilhões de reais, segundo o economista Claudio Frischtak.

Desse modo, juntando os dois eventos acima, o sistema urbano de saneamento necessitará de mudanças. Entretanto, eles estão sob o pavimento, e no Rio Grande do Sul, principalmente em regiões mais povoadas, essas vias têm sua camada de rolamento formada por concreto asfáltico. Esse material nobre, não pode ser reutilizado de maneira acessível, pois precisa ser destruído para posteriormente ser reconstruído. Em consequência, essas manutenções cada vez mais frequentes dos sistemas sob a via, influem na mobilidade urbana, causada por obras com tempo prolongado. Portanto, há a necessidade de uma estrutura viária mais acessível e que comporte o tráfego urbano.

Nesse caso, os pavimentos com blocos na camada de rolamento, destacam-se, pois permitem a reutilização deles, e tem métodos construtivos mais facilitados, haja vista que não necessitam de maquinário, nem mão de obra tão especializada. No contexto brasileiro, o pavimento intertravado ainda não é amplamente utilizado como na Europa e nos Estados Unidos, restringindo-se geralmente a áreas de estacionamento e calçamento.

A difusão do uso do pavimento intertravado em cidades, parte inicialmente de um dimensionamento adequado. O desenvolvimento tecnológico permitiu a evolução de uma análise somente empírica para uma mecanística. Entretanto, não existe nenhum método mecanístico-empírico normatizado específico para pavimentos intertravados. Assim, muitos engenheiros optam por utilizar do pavimento asfáltico, muito mais estudado e normatizado no Brasil.

Diante dessas considerações, o presente estudo visa analisar a viabilidade e os benefícios do pavimento intertravado em centros urbanos do estado do Rio Grande do Sul. Esse trabalho utilizará do *software* de Análise Estática de múltiplas Camadas (AEMC), integrante do Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa), para análise mecanicista. Já a análise empírica, será embasada no Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico da África do Sul - South African Mechanistic-Empirical Design Method (SAMDM).

1.2 OBJETIVO

Analisar a viabilidade estrutural do uso do pavimento intertravado de concreto em vias urbanas no estado do Rio Grande do Sul, a partir do dimensionamento mecanístico-empírico.

1.3 DELINEAMENTO E ESTRUTURA DO TRABALHO

O desenvolvimento deste trabalho foi dividido em cinco capítulos, os quais serão descritos de maneira resumida. No primeiro capítulo, foi apresentada a motivação para a

utilização do pavimento intertravado de blocos de concreto, além do objetivo principal do trabalho.

O segundo capítulo trata de uma revisão bibliográfica sucinta sobre os materiais e normas relacionados ao pavimento intertravado. Inicialmente, descreve os tipos de pavimentos existentes e a categoria a qual o pavimento intertravado pertence. Em seguida, com base em trabalhos e outras pesquisas, aborda os materiais utilizados no pavimento e suas particularidades. Além disso, discute brevemente metodologias construtivas que aumentam a qualidade e o suporte do pavimento. Por fim, aborda algumas das normas que fundamentam o dimensionamento dessa estrutura.

O terceiro capítulo descreve os materiais escolhidos para o subleito e para a camada granular. Em seguida, aborda os processos para a verificação das estruturas, começando com o conceito de equivalência de espessuras, seguido pela análise mecanística de múltiplas camadas e, por fim, a conversão de tensões e deformações para o número N_{AASHTO} por meio de fórmulas empíricas.

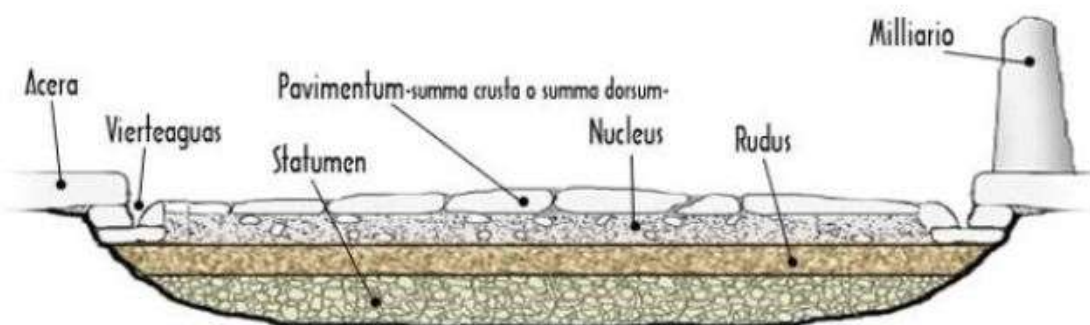
O quarto capítulo disserta sobre os resultados obtidos a partir da verificação da viabilidade estrutural, citando quais pavimentos suportam o tráfego leve com base no tipo de subleito, na camada granular e na estrutura. Finalmente, no capítulo 5, apresenta-se a conclusão, na qual são feitas algumas considerações a respeito dos resultados, correlacionando os problemas e as soluções.

2 PAVIMENTAÇÃO

A mais antiga via pavimentada, conforme Bernucci (2008), está localizada ao sul do Cairo, no Egito. Construída em 4.600 a.C., a via Faiyumhollow tinha 13 quilômetros e conectava uma pedreira de basalto a um aqueduto que desembocava no Rio Nilo. Segundo Balbo (2007), a principal função das estradas não era o transporte de cargas, mas sim serviços.

Entretanto, com a necessidade de avanço e expansão territorial, foram criadas mais estradas, sendo os romanos os primeiros a desenvolver essas vias, criando estradas mais elaboradas e duradouras. Sua metodologia construtiva (Figura 1) consistia, primeiramente, em remover a camada superficial do solo até alcançar um material consistente. Em seguida, eram construídas três camadas de material granular: o *Statumen*, composto por pedras maiores para melhorar as condições de apoio; o *Rudus*, formado por pedras fragmentadas misturadas com areia, argila e cinza vulcânica; e, por fim, o *Nucleus*, composto por pedras miúdas misturadas com material fino para impermeabilizar as camadas inferiores. Na camada de rolamento, *Summa Crusta*, eram colocadas rochas basálticas justapostas.

Figura 1 - Estrutura do pavimento romano



Fonte: <http://www.spanisharts.com/>. Acesso em 18 jun. 2024.

A utilização das técnicas romanas de pavimentação perdurou até o século XVIII. Em 1770, o engenheiro francês Pierre-Marie-Jérôme Trésaguet desenvolveu novas metodologias para a pavimentação no país, com uma fundação de 30 centímetros de pedras para uniformizar o apoio e, por cima, uma camada de 10 centímetros de pedras trituradas, compactadas para reduzir o número de vazios. Em 1820, com base em sua experiência, o engenheiro escocês John

Loudon McAdam ajustou a metodologia de Trésaguet, criando um pavimento drenável, com uma camada granular de granulometria uniforme, pois acreditava que a água agiria como aglomerante.

Portanto, apesar da evolução do conhecimento, com diversas teorias, como a teoria da elasticidade, resistência dos materiais e geologia, a estrutura básica do pavimento se manteve. A utilização do subleito como fundação, seguido de camadas granulares e, por fim, uma camada de rolamento, estrutura presente em muitas estradas e vias da atualidade. Entretanto, as técnicas evoluíram para suportar o tráfego crescente e aproveitar todos os materiais em sua máxima capacidade.

2.1 TIPOS DE PAVIMENTOS

O pavimento em rodovias, segundo o DNIT IPR 714 (2005), refere-se a uma superestrutura composta por camadas de espessuras finitas, assentadas sobre uma camada teoricamente infinita, também conhecida como terreno de fundação ou simplesmente subleito. Com o avanço cronológico e tecnológico, foi necessário evoluir os métodos utilizados devido ao aumento da globalização e da utilização das malhas rodoviárias.

Em se tratando da classificação, de acordo com o DNIT IPR 719 (2006), os pavimentos são categorizados em rígidos, semirrígidos e flexíveis. Pinto e Preussler (2002) descrevem os conceitos dessas classificações como:

- a) flexível: aquele em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob o carregamento aplicado e, portanto, a carga se distribui em parcelas aproximadamente equivalentes entre as camadas;
- b) rígido: aquele em que o revestimento tem uma elevada rigidez em relação às camadas inferiores e, portanto, absorve praticamente todas as tensões provenientes do carregamento aplicado;
- c) semirrígido: caracteriza-se por uma base cimentada quimicamente.

O pavimento intertravado, apesar de ser um pavimento rígido por causa dos blocos de concreto na camada superior, tem certa flexibilidade. Isso se deve ao fato de que os blocos retangulares não estão conectados, portanto, não resistem à tração. Em termos de resistência, o

piso intertravado se assemelha muito ao pavimento rígido de concreto, pois tem grande resistência à compressão e vida útil maior. Entretanto, em relação à elasticidade, o bloco intertravado tem maior semelhança ao pavimento flexível, considerando o trabalho conjunto de toda a camada de rolamento para resistir e compartilhar os esforços horizontais.

Os três tipos de pavimento têm suas qualidades e defeitos (Tabela 1). Entretanto, o pavimento intertravado de blocos de concreto para utilização em cidades traz benefícios consideráveis, especialmente em relação à facilidade de manutenção e ao tempo de execução e manutenção reduzidos. Assim, caso haja a necessidade de acesso ao sistema de saneamento, esse pode ser realizado sem grandes prejuízos à mobilidade local.

Tabela 1 - Qualidades e defeitos de camadas de rolamento

	Camada de Rolamento		
	Concreto de Cimento Portland	Concreto Asfáltico	Blocos de Concreto
Tipo de Pavimento	Rígido	Flexível	Semiflexível
Resistência química	Alta	Baixa	Alta
Manutenção	Pequena necessidade de manutenção, entretanto caso haja provoca grande prejuízo ao tráfego	Manutenção média, com prejuízo considerável do tráfego	Pequena necessidade de manutenção, quando necessária pode-se trocar o bloco
Sinalização	Pintura	Pintura	Blocos Coloridos
Tempo de execução	Alto	Médio	Médio
Mão de obra	Mecanizado	Maquinário Específico	Mecanizado ou manual
Acesso à rede de saneamento	Difícil	Média	Fácil

Fonte: autoria própria.

2.2 SUBLEITO

A palavra "solo" possui diversos significados dependendo da área de conhecimento que a estuda, sendo mais comum o entendimento como chão ou terra, (Vargas, 1978). Segundo a ABNT NBR 6502 (1995), define-se solo como material proveniente da decomposição das

rochas pela ação de agentes físicos ou químicos, podendo ou não conter matéria orgânica. Assim, percebe-se a influência significativa do meio ambiente na desintegração física e química das rochas, sendo a desintegração química especialmente dependente da presença de água.

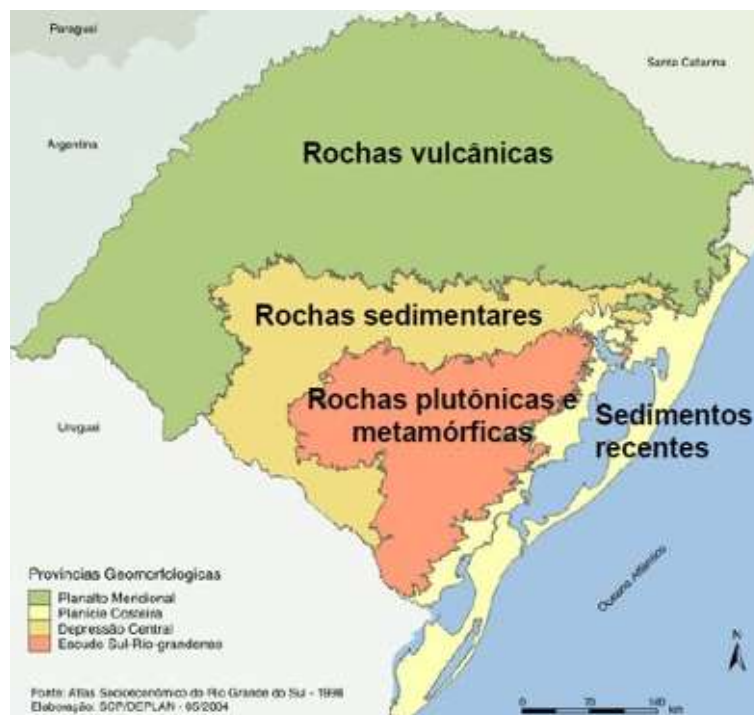
De acordo com Caputo (2022), a pedologia é a ciência que estuda e analisa os fatores que interferem na formação e classificação da crosta terrestre, descrevendo a formação do solo com base na rocha original, na ação de organismos vivos, no clima, na fisiografia e no tempo. Conseqüentemente, os solos, após sofrerem essas alterações, são classificados em três grandes grupos: solos residuais, solos sedimentares e solos de formação orgânica.

Para a engenharia rodoviária, o solo é considerado um material orgânico ou inorgânico, com ou sem coesão, encontrado na superfície terrestre, que pode ser escavado sem o uso de explosivos, conforme DNIT IPR 719 (2006). No entanto, apesar dessa definição generalista, os materiais terrosos, resultantes da decomposição das rochas, podem ser divididos em dois grandes grupos com base na localização da rocha matriz. O primeiro grupo é formado pelos solos residuais, resultantes da decomposição das rochas pelo intemperismo e localizados junto à rocha matriz. Já os solos transportados são carregados por agentes geológicos e não permanecem no local da rocha matriz.

É relevante ressaltar que a formação desses materiais terrosos, como mencionado anteriormente, resulta do intemperismo físico, que consiste na desintegração da rocha em fragmentos menores, e do intemperismo químico, que envolve a decomposição química da rocha. Nesse processo, os minerais reagem com agentes como água, oxigênio e ácidos, alterando sua estrutura química e formando novos compostos.

Saindo um pouco da definição de solo e indo para a estrutura, o subleito é conhecido como a fundação do pavimento. No Rio Grande do Sul, existem quatro grandes grupos que representam os materiais de origem do solo gaúcho (Figura 2).

Figura 2 - Materiais de origem por região do estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Atlas Socioeconômico do RS 6ª edição.

As rochas vulcânicas resultam do extravasamento de magma na superfície, que rapidamente esfria e forma pequenos cristais. Em ambientes úmidos, esses cristais contribuem para a formação de solos argilosos profundos e altamente intemperizados, enquanto em ambientes secos essa profundidade é reduzida.

Na região central, predominam rochas sedimentares mais antigas, influenciadas por intensa ação dos agentes externos, resultando em uma diversidade de solos e planícies com sedimentos depositados por rios.

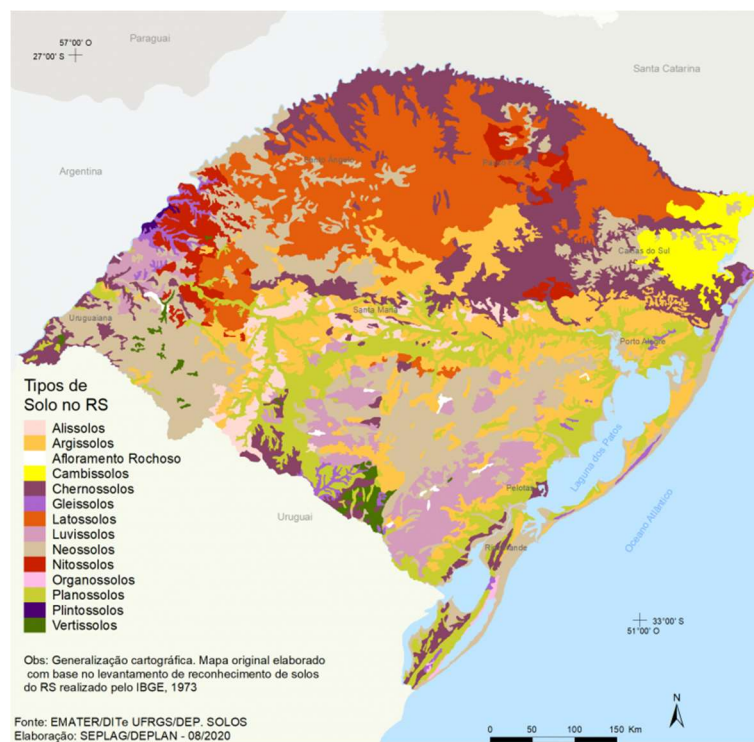
No escudo sul-rio-grandense, encontram-se as rochas plutônicas e metamórficas, formadas pelo lento resfriamento do magma, resultando em granitos e, quando intemperizados, em solos arenosos. Estes solos possuem alguns dos maiores módulos de resistência do estado.

Por fim, na planície costeira, predominam sedimentos recentes depositados por variações de maré, provenientes de sedimentos marinhos.

Apesar dos quatro principais grupos de materiais de origem, as características do solo local podem variar significativamente (Figura 3) devido ao nível de intemperismo e ao transporte de sedimentos. Assim, os municípios que optem pela utilização do bloco intertravado

devem fazer os ensaios adequados para identificar e classificar o solo, além de determinar sua resistência, preferencialmente através do módulo de resiliência com ensaio triaxial, em vez do *California Bearing Ratio* (CBR).

Figura 3 - Tipos de Solos no RS



Fonte: Atlas Socioeconômico do RS 6ª edição.

2.3 CAMADA DE BASE GRANULAR

Os materiais pétreos usados para pavimentação, comumente conhecidos como agregados, podem ser naturais ou artificiais, sendo inertes e não plásticos em relação aos demais componentes. Os naturais, como o pedregulho, são encontrados na natureza, enquanto os artificiais, como a escória e a argila expandida, são originados por transformações físicas e químicas, conforme Pinto (2019). Além da categorização quanto à natureza, os materiais pétreos também são classificados com base no tamanho e na graduação.

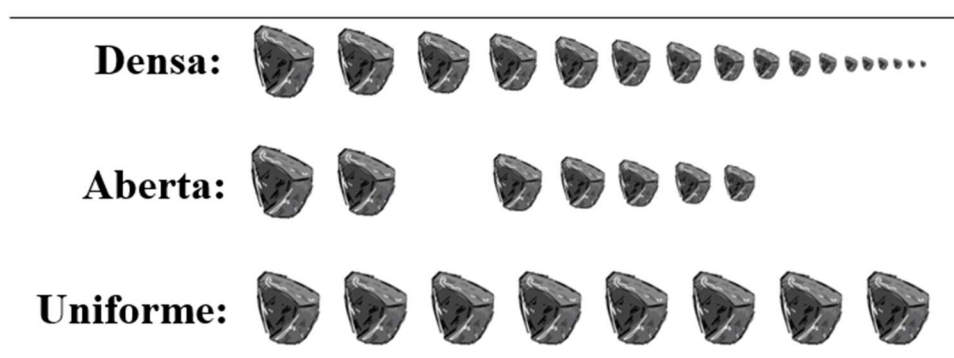
Segundo o DNIT IPR 719 (2006), em relação ao tamanho, os agregados podem ser:

- a) Agregado graúdo é o material retido na peneira nº 10 (2,0 mm): britas, cascalhos, seixos, etc;
- b) Agregado miúdo é o material que passa na peneira nº 10 (2,0 mm) e fica retido na peneira nº 200 (0,075 mm): pó-de-pedra, areia, etc;
- c) Agregado de enchimento ou material de enchimento (filler) é o que passa pelo menos 65 % na peneira nº 200 (0,075 mm): cal extinta, cimento Portland, pó de chaminé, etc.

(DNIT IPR 719, 2006), a graduação dos agregados quanto à granulometria é dividida em (Figura 4):

- a) Agregado de graduação densa é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com quantidade de material fino, suficiente para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- b) Agregado de graduação aberta é aquele que apresenta uma curva granulométrica de material bem graduado e contínua, com insuficiência de material fino, para preencher os vazios entre as partículas maiores.
- c) Agregado tipo macadame ou uniforme é aquele que possui partículas de um único tamanho, o chamado "*one size aggregate*". Trata-se, portanto, de um agregado de granulometria uniforme onde o diâmetro máximo é, aproximadamente, o dobro do diâmetro mínimo.

Figura 4 - Graduação do material granular



Fonte: autoria própria.

A camada de base, de acordo com a ABNT NBR 15953 (2011), tem como função principal resistir às forças verticais provenientes dos veículos e distribuí-las para a camada inferior. Muller (2005), também menciona que a camada de base ajuda a prevenir grandes deformações no subleito, o que poderia levar à deterioração precoce do pavimento. Esta camada é geralmente composta por materiais pétreos ou misturas estabilizadas.

Na seleção do material para a camada de base, é crucial adotar precauções para evitar problemas futuros, como destacado por Morgado (2008). Isso inclui garantir que o material esteja limpo, livre de pó e sujeira, e bem graduado (graduação densa) para facilitar a compactação e evitar que a areia de assentamento preencha os espaços vazios. Em se tratando da graduação a Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), na prática recomendada 01 recomenda uma distribuição granulométrica (Tabela 2) específica para obter uma camada com bom arranjo e amarração, ABCP (2024).

Tabela 2 – Distribuição granulométricas recomendada da base

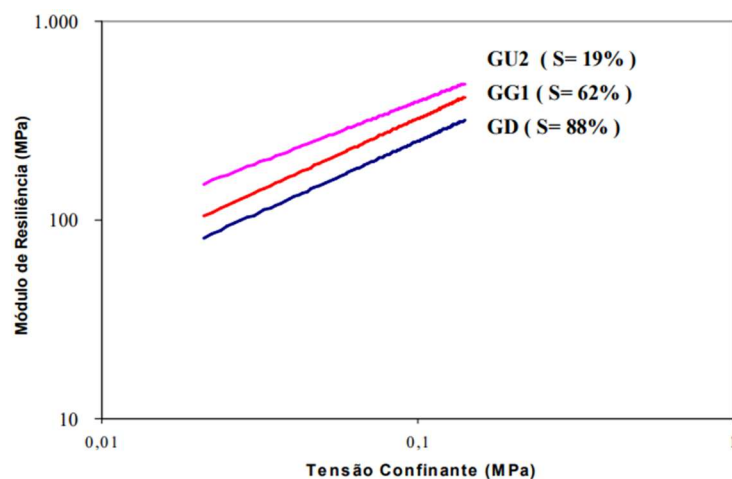
Abertura da Peneira (mm)	% retida em massa Base
50,00	-
25,00	10 - 25
19,00	-
9,50	25 - 60
4,80	40 - 70
2,00	55 - 80
1,20	-
0,60	-
0,40	70 - 85
0,08	85 - 95

Fonte: ABCP PR1 (2024)

Segundo Casagrande (2003), o teor de finos e a saturação da camada são fatores substanciais para o dimensionamento da camada granular. A porcentagem do teor de finos influi diretamente na resistência da camada, principalmente para níveis de tensões altos. Em relação à saturação, o alto teor de fino prejudica à condutividade hidráulica no material, gerando aumento da poropressão e reduzindo seu módulo de resiliência (Figura 5). Malysz (2003), também afirma que a resistência ao cisalhamento das britas está diretamente ligada ao crescimento da tensão confinante e a granulometria do material. Portanto, a utilização de britas

com grande quantidade de finos não é aconselhada para pavimentos que estejam sob condições de alta saturação ou que tenha tráfego leve.

Figura 5 - Efeito do grau de saturação na camada granular



Fonte: Casagrande (2003).

2.4 CAMADA DE ASSENTAMENTO

A camada de assentamento, também conhecida como colchão de areia nos pavimentos com blocos intertravados, desempenha uma função essencial na regularização e nivelamento dos blocos de concreto. Embora não seja diretamente considerada nas verificações mecânicas empíricas deste trabalho, ela serve como uma camada de base sobre a qual os blocos são assentados.

Essa camada proporciona um leito uniforme para os blocos intertravados, ajudando a distribuir as cargas aplicadas e permitindo um assentamento adequado. Isso, contribui para a estabilidade e durabilidade do pavimento. Mesmo que sua função principal seja de regularização e nivelamento, é importante que a camada de assentamento seja devidamente compactada para evitar movimentos indesejados dos blocos e garantir a integridade estrutural do pavimento intertravado ao longo do tempo.

De acordo com a ABNT NBR 15953 (2011), a camada de assentamento em pavimentos com blocos intertravados deve atender às seguintes especificações:

- a umidade do material deve estar entre 3% e 7% no momento da aplicação. Isso garante que a areia esteja na condição ideal para a compactação e para o assentamento dos blocos;
- a dimensão máxima característica do material (areia) não deve ser maior que 5 vezes a espessura da camada de assentamento já compactada. Isso assegura que não haja grandes partículas que possam comprometer a uniformidade e a estabilidade da camada;
- a espessura da camada de assentamento deve ser uniforme e constante, com uma espessura de 5 cm, podendo variar ± 2 cm na condição compactada.

Em relação à distribuição granulométrica recomendada para a camada de assentamento, é crucial prestar especial atenção ao material retido na peneira de 75 μm . Pois, o excesso de material fino pode resultar em compactação excessiva e deformações no pavimento, como mencionado por Muller (2005). Nesses casos, é aconselhável lavar a areia com água para remover partículas finas indesejadas e evitar que elas entrem em contato direto com o solo.

Tabela 3 - Distribuição granulométrica recomendada da camada de assentamento

Abertura da Peneira (mm)	% retida em massa Camada de assentamento
50,00	-
25,00	10 - 25
19,00	-
9,50	25 - 60
4,80	40 - 70
2,00	55 - 80
1,20	-
0,60	-
0,40	70 - 85
0,08	85 - 95

Fonte: ABNT NBR 15953 (2021).

Apesar de a norma ABNT 15953 (2011) recomendar que a espessura da camada média de assentamento seja de 5 cm, Gordilho (2020) argumenta que reduzir essa espessura para 3 cm pode ser benéfico para diminuir as deformações permanentes no pavimento. No entanto, essa redução pode aumentar as tensões atuantes sobre os blocos de pavimentação, mas o risco

oriundo da má compactação dessa camada, causando deformação precoce da camada de rolamento, justifica a diminuição. Deve-se destacar que a utilização de 3 ao invés de 5 cm, é uma prática construtiva que não foi normatizada.

2.5 CAMADA DE ROLAMENTO

O avanço da industrialização e melhorias no processo construtivo permitiram a produção de blocos de concreto padronizados e de alta qualidade. Assim, países como África do Sul, Alemanha, Austrália, Estados Unidos, Nova Zelândia registraram grande crescimento das áreas pavimentadas com blocos de concreto, conforme Morgado (2008). Smith (2003), por exemplo, menciona que a utilização do bloco intertravado nos Estados Unidos quase duplica a cada cinco anos. Entre os anos de 1980 e 2000, a área pavimentada foi de 4 milhões para 40 milhões de metros quadrados, evidenciando o potencial dessa camada de rolamento quando bem utilizada.

Esse aumento da utilização dos blocos no ambiente urbano, tem ganhado força, principalmente por causa das vantagens que oferece ao comparado com outras alternativas. Por exemplo, para manutenção de instalações subterrâneas de água e esgoto, o pavimento permite o reaproveitamento dos blocos, além de não precisar de equipamentos específicos. Portanto, segundo Bezzerra (2021), em vias urbanas sujeitas a frequentes intervenções nos sistemas de saneamento, o uso do pavimento intertravado se justifica.

A camada de rolamento nos pavimentos desempenha diversas funções, sendo uma das mais reconhecidas o conforto proporcionado aos usuários. O pavimento de bloco intertravado, além desse benefício, destaca-se por outras vantagens quando comparado ao concreto asfáltico, (ABCP, 2010, 2022):

- redução da distância de frenagem em 24%, isso é atribuído ao maior coeficiente de atrito da superfície dos blocos intertravados, proporcionando uma resposta mais eficiente ao sistema de frenagem dos veículos;
- possibilidade de reutilização dos blocos, em caso de necessidade de manutenção na estrutura da via ou no sistema de saneamento abaixo da via. Os blocos intertravados

podem ser facilmente removidos e reutilizados, o que contribui para reduzir custos e impactos ambientais;

- desempenho luminotécnico superior, a luminância média é 1,77 vezes superior em comparação ao concreto, conforme indicado na (Tabela 4). Isso possibilita a redução da potência das lâmpadas públicas necessárias para iluminação, resultando em economia significativa de energia;
- durabilidade extremamente alta, com uma vida útil de projeto média maior ou igual a 17 anos, em alguns casos, blocos de concreto suportam mais de 50 anos e ainda continuam funcionais. Essa longevidade é explicada pela grande resistência do bloco à umidade, ataque químico - segundo ensaio ANBT NBR 15575-3 - resistência ao fogo e à abrasão, principalmente quando utilizado cimento com resistência à compressão de 50 MPa.

Tabela 4 - Comparação de luminância de um pavimento de concreto e asfáltico

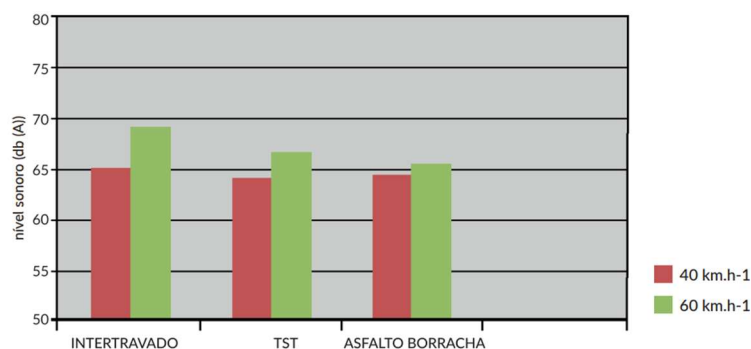
Tipo de Pavimento	Potência (W)	LB - Luminância de fundo (cd/m ²)			
		Média	Mínimo	Máximo	Max/Min
Asfalto	400	3,40	1,06	11,14	10,40
Concreto	400	6,03	2,67	14,25	5,28
variação	0,00%	77,35%	151,89%	27,92%	-49,23%

Fonte: ABCP (2022).

O único aspecto em que o bloco intertravado é considerado inferior ao asfalto, de acordo com a comparação feita pela Associação Brasileira de Cimento Portland, está relacionado ao nível sonoro durante a passagem de veículos. Conforme indicado na Figura 6 - Nível sonoro de pavimentos em função da velocidade, o nível sonoro dos blocos intertravados, com veículos a 60 km/h, é aproximadamente 7% maior em comparação ao asfalto. Essa diferença tende a ser ainda menor em velocidades mais baixas.

No contexto deste trabalho, que se concentra principalmente em vias de tráfego leve, esse fator não é considerado prejudicial. Portanto, apesar do aumento no nível sonoro, os benefícios adicionais do pavimento intertravado, como durabilidade, reutilização dos blocos, desempenho lumínico superior e segurança viária, continuam sendo vantajosos para aplicações específicas, especialmente em áreas urbanas e de baixa velocidade de tráfego.

Figura 6 - Nível sonoro de pavimentos em função da velocidade



Fonte: ABCP (2022).

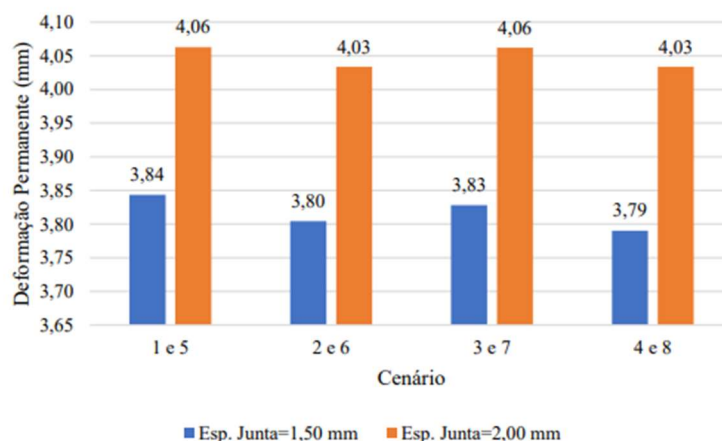
Tabela 5 - Distâncias de frenagem com base no tipo de pavimento

Tipo de Pavimento	Distância de frenagem (m)					
	20 km/h seco	20 km/h úmido	40 km/h seco	40 km/h úmido	60 km/h seco	60 km/h úmido
Pavimento de asfalto	1,70	3,20	5,85	9,60	14,20	26,70
Pavimento Intertravado	1,68	2,50	5,23	8,15	13,60	21,30

Fonte: ABCP (2022).

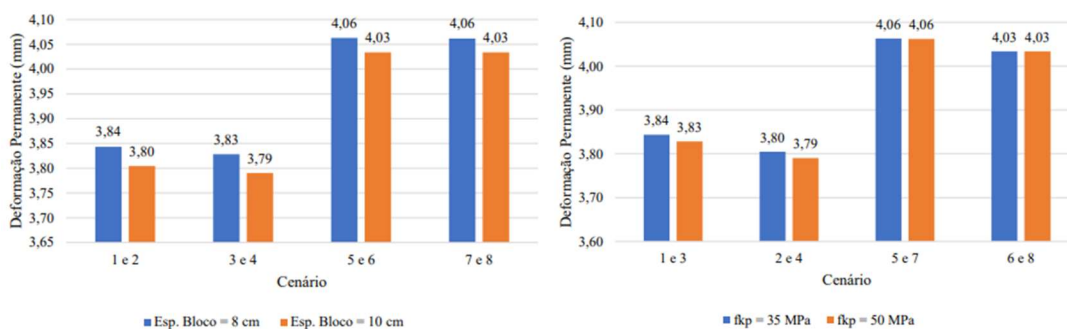
Em suma, o pavimento intertravado tem inúmeros benefícios. Entretanto, o processo construtivo, apesar de simples, deve seguir os procedimentos especificados, principalmente em relação às espessuras. Nesse ínterim, conforme Bezerra (2020), alguns fatores são essenciais para a redução da deformação permanente das camadas abaixo do bloco intertravado, entre eles a espessura da junta, que preferencialmente deve ser de 1,50 em vez de 2,00 mm, conforme Figura 7. Em relação à resistência a compressão dos blocos, majorando de 35 para 50 Mpa, e a espessura do bloco de 8 cm para 10 cm (Figura 8), não houve mudanças consideráveis na deformação permanente do subleito que justifiquem tais incrementos.

Figura 7 - Variação da deformação permanente com variação da espessura das juntas



Fonte: Bezzerra (2020).

Figura 8 - Deformação permanente variando a espessura e resistência a compressão dos blocos



Fonte: Bezzerra (2020).

2.6 NORMAS UTILIZADAS NO DIMENSIONAMENTO

O dimensionamento e a aplicação dos blocos intertravados de concreto desenvolveram-se muito nos últimos 25 anos, passando da utilização majoritária em calçadas para pavimentação de áreas especiais como aeroportos e portos (Morgado, 2008). Os métodos para dimensionamento, conforme Shackel (1990) e Hallac (1998) citam que existem 4 principais, dentre eles os baseados em:

- a) experiência de campo ou experiências locais;

- b) dados empíricos;
- c) modificações dos métodos existentes para pavimentos flexíveis, através da equivalência de materiais;
- d) modelos computacionais.

No Brasil, o método de dimensionamento mais utilizado é conforme a Instrução de Projetos (IP) 06/2004 da Secretaria de Infraestrutura Urbana e Obras da cidade de São Paulo. Nesse documento estão especificados dois procedimentos. O primeiro procedimento é baseado no Estudo Técnico 27 do ano de 1998 da Associação Brasileira de Cimento Portland. Nesse método, as espessuras da base e sub-base são extraídas a partir de gráficos padrão que interpolam a espessura, CBR e número de eixos padrão. Já a camada de rolamento tem suas características especificadas com base no tráfego em eixos padrão.

O segundo procedimento é baseado em pesquisas da Austrália, África do Sul, Grã-Bretanha e Estados Unidos. Utilizando do método USACE para pavimentos flexíveis como embasamento, essa metodologia utilizada de uma tabela para correlacionar espessura da base a partir do CBR e número de solicitações. Por fim, pode-se fazer por equivalência entre camadas a inserção de sub-base.

No desenvolvimento dessa pesquisa serão utilizados majoritariamente de *softwares* computacionais, para trazer uma análise mecânica ao trabalho. Entretanto, por ainda não existir nenhum modelo totalmente mecânico no Brasil para blocos intertravados, será utilizado de funções de transferência empíricas do SAMDM, conforme 2.6.2.

2.6.1 Classificação Viária

A classificação viária, conforme Goldner (2008), divide as vias em nove classificações: quanto ao gênero: aerovias, dutovias, ferrovias, hidrovias e rodovias; quanto à espécie: urbana, interurbana, metropolitana e rural; quanto à posição: radial, perimetral, longitudinal, transversal, anular, tangencial, diametral; quanto ao tipo: em nível, rebaixada, elevada, em túnel; quanto ao número de pistas: simples e múltiplas; quanto à natureza da superfície de rolamento: pavimentada, simplesmente revestida, em terreno natural; quanto à operação: sentido único, sentido duplo, reversível, interditada, com ou sem estacionamento; quanto à jurisdição: federal, estadual, municipal e particular; quanto à função das vias urbanas: expressa, arterial, coletora e local.

Entretanto, apesar das inúmeras distinções, dificilmente elas correlacionam o tipo de via com o número de eixos padrão que a mesma deve suportar. Assim, fica a cargo dos municípios a partir de seus planos diretores fazerem essa classificação. Contudo, nem todos as cidades têm um plano diretor. No Rio Grande do Sul, estado desse trabalho, dos 497 municípios apenas 295 tinham um Plano Diretor vigente, ou seja, mais de 40% das cidades não tinham esse documento.

Contudo a prefeitura municipal de São Paulo (PMSP) tem regulação específica para a classificação viária (IP 02/2004) e para o dimensionamento de pavimento com blocos intertravados de concreto (IP 06/2004), esse de forma empírica. A classificação das vias em função do tráfego (Quadro 1), considera a carga máxima legal no Brasil, de 10 toneladas por eixo (100 kN/ESRD). Já o número “N” indica as solicitações de um eixo traseiro simples de rodagem dupla com 80 kN, conforme o Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos EUA (AASHTO).

Quadro 1 - Classificação das vias e parâmetros de tráfego

Função predominante	Tráfego previsto	Vida de projeto	Volume inicial faixa mais carregada		Equivalente / Veículo	N	N característico
			Veículo Leve	Caminhão/Ônibus			
Via local	LEVE	10	100 a 400	4 a 20	1,50	2,70 x 10 ⁴ a 1,40 x 10 ⁵	10 ⁵
Via Local e Coletora	MÉDIO	10	401 a 1500	21 a 100	1,50	1,40x 10 ⁵ a 6,80x 10 ⁵	5 x 10 ⁵
Vias Coletoras e Estruturais	MEIO PESADO	10	1501 a 5000	101 a 300	2,30	1,4 x 10 ⁶ a 3,1 x 10 ⁶	2 x 10 ⁶
	PESADO	12	5001 a 10000	301 a 1000	5,90	1,0 x 10 ⁷ a 3,3 x 10 ⁷	2 x 10 ⁷
	MUITO PESADO	12	> 10000	1001 a 2000	5,90	3,3 x 10 ⁷ a 6,7 x 10 ⁷	5 x 10 ⁷
Faixa Exclusiva de Ônibus	VOLUME MÉDIO	12		< 500		3 x 10 ⁶ (1)	10 ⁷
	VOLUME PESADO	12		> 500		5 x 10 ⁷	5 x 10 ⁷

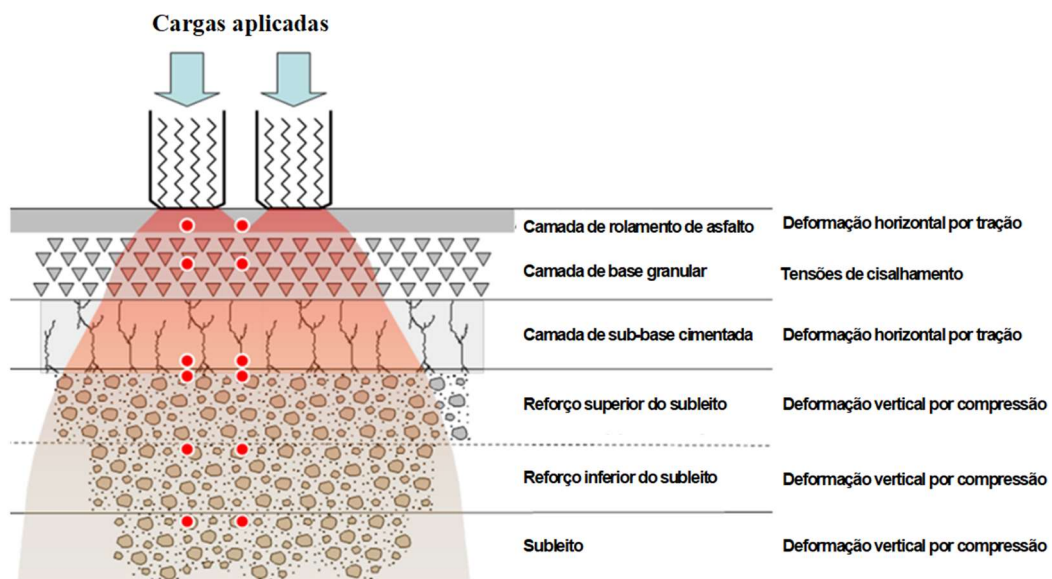
Fonte: IP-06 (2004).

2.6.2 SAMDM (2014)

O Método de Dimensionamento Mecanístico-Empírico da África do Sul - *South African Mechanistic-Empirical Design Method* – (SAMDM), permite a conversão de tensões e deformações da estrutura para a vida útil da camada em número N_{AASHTO} .

O subleito e as camadas inferiores, caso existam, são analisados quanto à deformação permanente na camada (Figura 9), a qual se manifesta através de deformações propriamente ditas ou sulcos na superfície do subleito. Para a função de transferência, utiliza-se das tensões verticais no topo do subleito, podendo-se escolher, durante o dimensionamento, o nível de confiança do pavimento e a espessura do sulco terminal do pavimento.

Figura 9 - Posições críticas para tensão e deformação



Fonte: SAMDM (2014).

A deformação permanente é obtida através do ensaio de deformação permanente com a utilização do equipamento triaxial de carga repetida. Esse ensaio, segundo DNIT IPR 719 (2018), consiste na aplicação de vários ciclos de cargas em estados de tensões predeterminados, analisando as deformações permanentes acumuladas ao longo do ensaio. Por fim, com base no módulo de resiliência obtido através do ensaio, criam-se modelos que descrevam o comportamento do solo a partir de diferentes tensões.

Em se tratando da deformação permanente nos solos, existem dois mecanismos principais de deformação: o adensamento, também chamado de deformação por fluência, e a compactação. O adensamento ocorre quando solos finos são submetidos a cargas altas e constantes ao longo do tempo, ocasionando o rearranjo das partículas de solo e a posterior redução de volume dele. Essa deformação é fortemente influenciada pela permeabilidade do solo, visto que a deformação ocorre através da remoção dos vazios, sejam eles preenchidos por água ou ar.

O outro mecanismo de deformação é a compactação, oriunda da aplicação de cargas elevadas e repetidas, como, por exemplo, caminhões e carros na estrada, provocando o rearranjo das partículas. Entretanto, como o ciclo de carga é finito, o solo tende a voltar parcialmente para sua posição original, e a parcela que não consegue se recuperar consiste na deformação permanente.

Os materiais granulares, conforme SAMDM (2014), são analisados a partir da comparação entre a tensão cisalhante no meio da camada (Figura 9) e a resistência ao cisalhamento do material. Caso a força cisalhante supere a resistência há deslizamento relativo entre as partículas. Em estruturas estáticas não existem forças cisalhantes. Entretanto no caso de pavimentos, as tensões são móveis. Basicamente, o processo de ruptura por cisalhamento inicia-se com forças atuantes nos eixos horizontais e verticais, essas tensões são transmitidas pelas camadas superiores chegando à camada granular e criando uma distribuição complexa de tensões na camada, por fim, caso não resista, há o deslizamento das partículas na região frágil.

O Método de Dimensionamento Mecânico-Empírico da África do Sul, ainda assume que o dimensionamento do pavimento intertravado de bloco de concreto pode ser realizado através do mesmo procedimento feito para pavimentos flexíveis. Entretanto, deve-se ajustar e assumir uma equivalência entre a espessura dos blocos de concreto mais a camada de adensamento (Tabela 6).

Tabela 6 – Resumo da equivalência de espessura

País		Pavimentação em Blocos de Concreto é Equivalente a...
Argentina	1	2.5 vezes a espessura da sub-base granular
Austrália	1	2.1 – 2.9 vezes a espessura da base de rocha britada
	2	1.1 – 1.5 vezes de concreto asfáltico de granulometria densa
USA AASHTO	1	165 mm de revestimento
	2	2 - 2,85 vezes a espessura da base granular
Inglaterra	1	225 mm de solo cimento
	2	160 mm de asfalto

Fonte: SAMDM (2014), adaptada pelo autor.

2.6.3 MeDiNa (2020)

O Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa) é um software que realiza e verifica condições mecanístico-empíricas da estrutura, para dimensionamento de pavimentos asfálticos. Esse software é dividido em três subprogramas: o BackMeDiNa, que possibilita a retroanálise dos módulos de resiliência a partir de bacias deflectométricas obtidas em campo com o equipamento *Falling Weight Deflectometer* (FWD); o MeDiNa realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas de pavimento asfálticos por meio da análise de camadas elásticas de múltiplas camadas; Programa de Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), calcula as tensões e deformações em regiões selecionadas na estrutura do pavimento, sob carregamento de rodas do tipo eixo rodoviário.

O AEMC (2020) na estrutura geral de cálculo das equações integrais utiliza a integração de Gauss-Laguerre. E, para a solução dos problemas de elasticidade linear através do *software*, considera algumas hipóteses fundamentais:

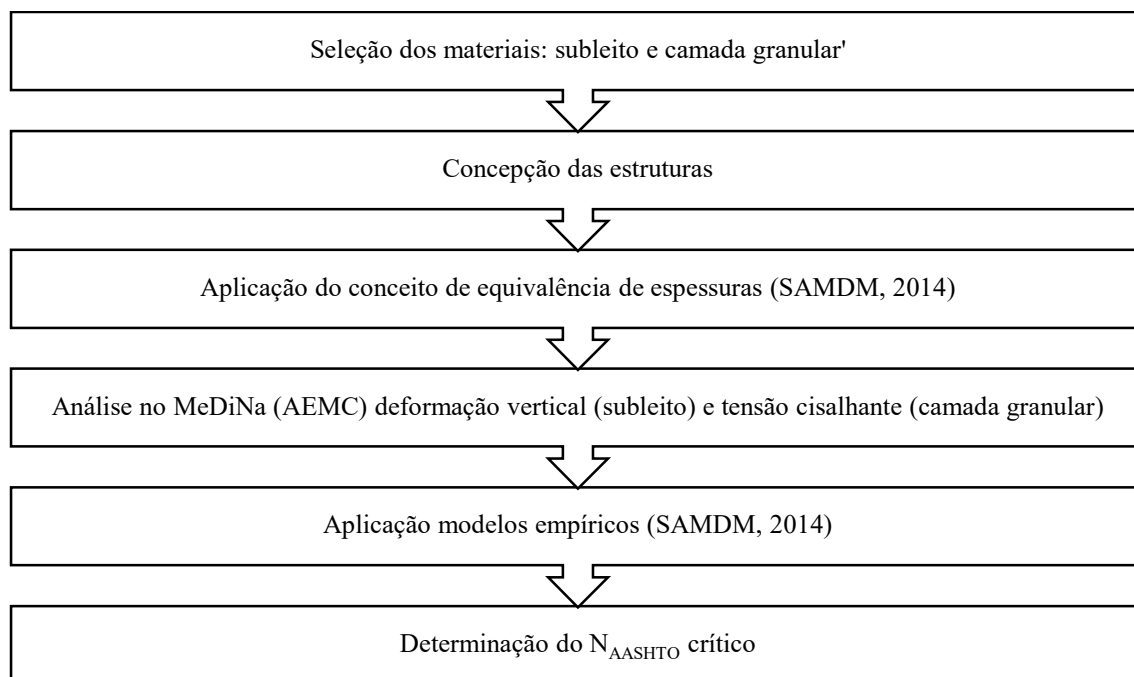
- a) os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- b) a Lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- c) as camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- d) todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- e) a superfícies da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- f) na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- g) a carga aplicada é considerada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda área circular de contato;
- h) a grande profundidade as tensões e deformações são nulas;
- i) as condições de aderência na interface das camadas podem variar de totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O dimensionamento mecanístico-empírico de pavimentos intertravados de blocos de concreto, ainda não foi normatizado no Brasil. Assim, como descrito no capítulo 2, os pavimentos em bloco de concreto têm características semelhantes tanto ao pavimento de concreto asfáltico quanto ao concreto de cimento. Portanto, a análise e posterior dimensionamento dessa estrutura, parte de algumas adaptações presentes nas normas brasileiras e internacionais, conforme 2.6.

Em relação à análise das deformações e tensões presentes nas estruturas, utiliza-se do *software* AEMC (2020). Conforme às orientações de análise presentes no SAMDM (2014). Vale destacar que a camada de rolamento e assentamento, são transformadas respeitando a equivalência de espessuras do SAMDM (2014), pois o AEMC não tem uma análise específica para o bloco de concreto. Por fim, com as deformações e tensões obtidas, serão utilizadas de modelos empíricos do SAMDM (2014) para determinação do número de eixos padrão. Para facilitar o entendimento desses processos, tem-se o fluxograma da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma do Dimensionamento de pavimento intertravado com blocos de concreto



Fonte: autoria própria.

3.1 SELEÇÃO DOS MATERIAIS

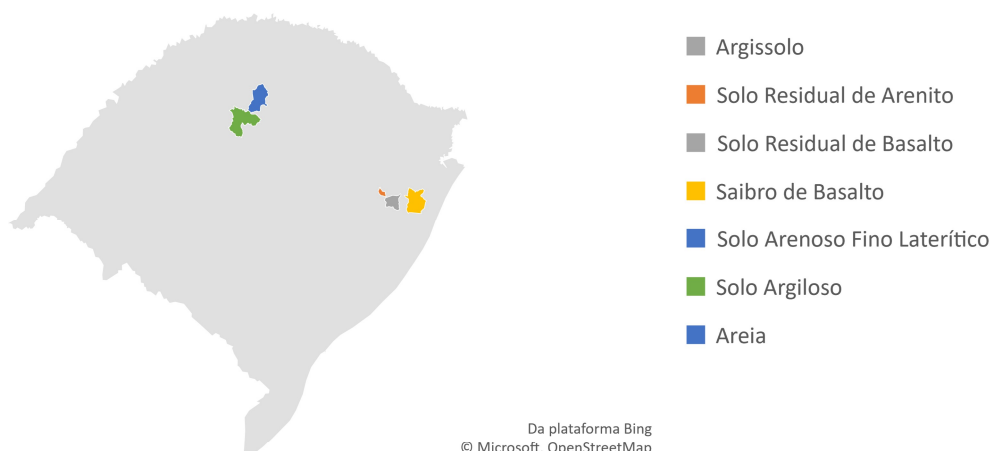
Nesse trabalho foram utilizados de sete subleitos distintos (Tabela 7), e localizados no Rio Grande do Sul (Figura 11), cujas características foram obtidas a partir de dissertações de mestrado e teses de doutorado realizadas na UFRGS.

Tabela 7 - Subleitos analisados

TIPOS DE SOLOS	DISSERTAÇÃO / TESE	MASSA ESPECÍFICA (g/cm ³)	MODELO COMPOSTO			
			K1	K2	K3	R ²
1. SOLO ARGILOSO	(Bonzanini, 2011)	1,54	28,00	0,00	-0,82	0,98
2. ARGISSOLO	(Diniz, 2022)	1,52	34,76	0,18	-0,29	0,81
3. ARGISSOLO	(Schreinert, 2021)	1,54	186,69	0,80	-0,30	0,80
4. SOLO ARENOSO FINO LATERÍTICO - SAFL	(Bonzanini, 2011)	1,95	292,82	0,33	-0,24	0,88
5. AREIA	(Bonzanini, 2011)	1,95	526,58	0,33	-0,13	0,83
6. SOLO RESIDUAL DE ARENITO	(Schreinert, 2021)	1,91	837,29	0,58	-0,01	0,97
7. SAIBRO DE BASALTO	(Schreinert, 2021)	1,85	1412,98	0,72	0,09	0,99

Fonte: autoria própria.

Figura 11 - Solos utilizados para subleito



Fonte: autoria própria.

Foi utilizado como materiais para a camada granular, dois agregados. O primeiro foi brita de basalto, utilizada na camada granular das estruturas 02 e 03, proveniente de uma pedreira localizada no km 30 da BR 290/RS, dados conforme Malysz (2004), Malysz (2009) e ensaios realizados no Laboratório de Pavimentação da UFRGS (LAPAV). Já o segundo material é o resíduo de construção de demolição, usado na estrutura 04, e os dados foram obtidos a partir da dissertação de mestrado de Matuella (2017). Os principais dados a serem utilizados no posterior dimensionamento estão descritos na Tabela 8.

Tabela 8 - Dados para o dimensionamento camada granular

Teses/Dissertações	Ângulo de Atrito	Coesão C	Modelo MR- σ_3	
	ϕ		k_1	k_2
Brita de Basalto - Malysz (2004) e (2009)	60 °	71,00 kPa	2206	0,73
RCD 100% - Matuella (2017)	55 °	44 kPa	1463	0,81

Fonte: autoria própria.

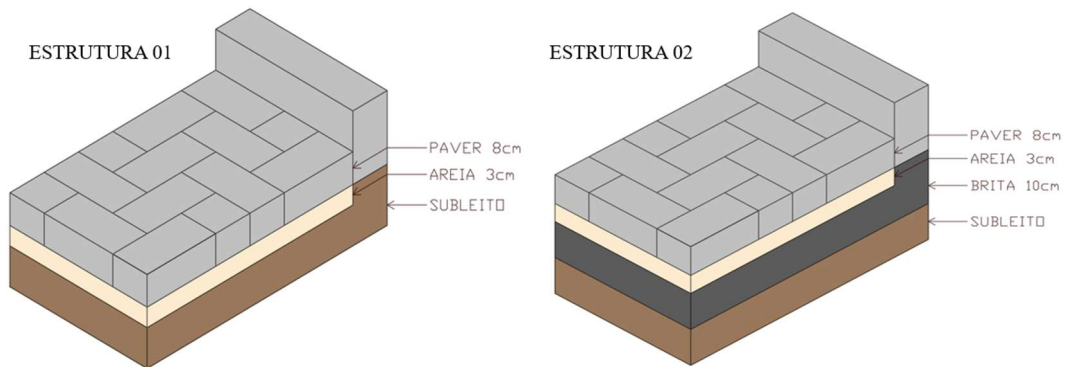
3.2 CONCEPÇÃO DAS ESTRUTURAS

A Estrutura 01 é a mais simples de todas, baseada no conceito das antigas estradas, onde os blocos são assentados diretamente sobre um terreno de bom suporte. Nesta estrutura, não há a presença de uma camada de base entre os blocos e o subleito. A única camada presente é a camada de assentamento de areia, com espessura de 3 cm, conforme ilustrado na Figura 12. Contudo, a camada de assentamento é considerada durante a equivalência das espessuras. Assim, não é analisada individualmente. Essa abordagem simplificada pressupõe que o subleito é suficientemente resistente para suportar diretamente os blocos intertravados, com a camada de assentamento de areia servindo principalmente para nivelar e proporcionar um leito uniforme. A normatização brasileira para dimensionamento de pavimentos flexíveis prevê uma camada mínima de 15 cm de material granular. Entretanto, esse trabalho tem o intuito de verificar a capacidade em diversos contextos.

A Estrutura 02 considera uma configuração com uma camada de base esbelta de 10 cm de espessura, composta por brita, além da camada de assentamento de areia com 3 cm, conforme ilustrado na Figura 12. Essa configuração é mais robusta do que a Estrutura 01, pois inclui uma

camada de base que oferece suporte adicional e ajuda a melhorar a distribuição das cargas, prolongando assim a vida útil do pavimento intertravado e reduzindo as tensões que chegam ao subleito.

Figura 12 - Estrutura 01 e 02

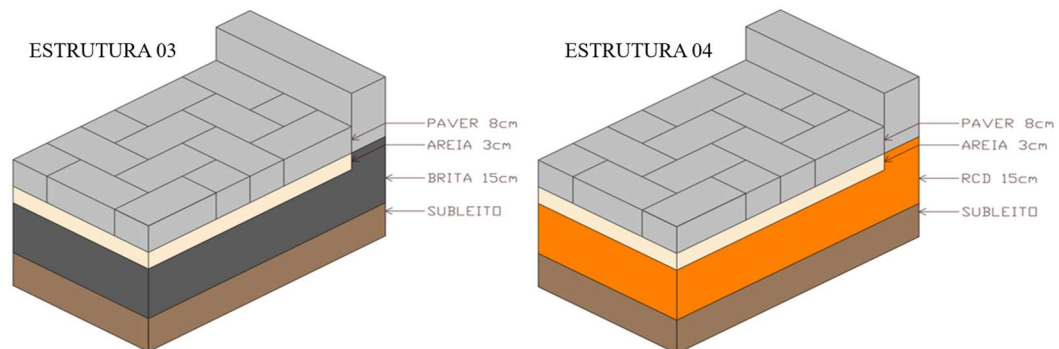


Fonte: autoria própria.

A Estrutura 03 foi configurada com uma camada de base mais espessa, composta por 15 cm de brita, além da camada de assentamento de areia com 3 cm, conforme representado na Figura 12. Aumentar a espessura da camada de base para 15 cm torna essa estrutura mais adequada para locais onde são esperadas cargas mais pesadas ou condições de tráfego mais intensas.

A Estrutura 04 foi projetada com uma camada de base de 15 cm de espessura de RCD (Resíduo de Construção e Demolição), escolhido com o objetivo de proporcionar um destino viável para os grandes volumes de entulho gerados pelas enchentes no Rio Grande do Sul em 2024. Além da camada de base de RCD, a estrutura inclui uma camada de assentamento de areia com 3 cm de espessura, conforme ilustrado na Figura 13.

Figura 13 - Estrutura 03 e 04



Fonte: autoria própria.

Vale ressaltar que a escolha do RCD como material de base para pavimentos requer uma análise meticulosa de suas propriedades mecânicas e de resistência, devido à possibilidade de variações na composição do resíduo gerado. O RCD pode conter materiais orgânicos em sua composição, o que pode ser altamente prejudicial para a durabilidade e desempenho do pavimento. Os materiais orgânicos presentes no RCD resultam em instabilidade e perda de capacidade de suporte da camada de base, causando deformações prematuras no pavimento e comprometendo sua durabilidade.

3.3 EQUIVALÊNCIA DE ESPESSURAS (SAMDM 2014)

Conforme SAMDM (2014), esse método assume que o conceito de dimensionamento pode ser realizado através do mesmo procedimento feito para pavimentos flexíveis. Entretanto, assume-se uma equivalência entre a espessura dos blocos de concreto, incluindo a camada de adensamento, e as espessuras de outros materiais conforme Tabela 9.

Tabela 9 – Resumo da equivalência de espessura

País	Pavimentação em Blocos de Concreto é Equivalente a...	
Argentina	1	2.5 vezes a espessura da sub-base granular
Austrália	1	2.1 – 2.9 vezes a espessura da base de rocha britada
	2	1.1 – 1.5 vezes de concreto asfáltico de granulometria densa

Fonte: SAMDM (2014), adaptada pelo autor.

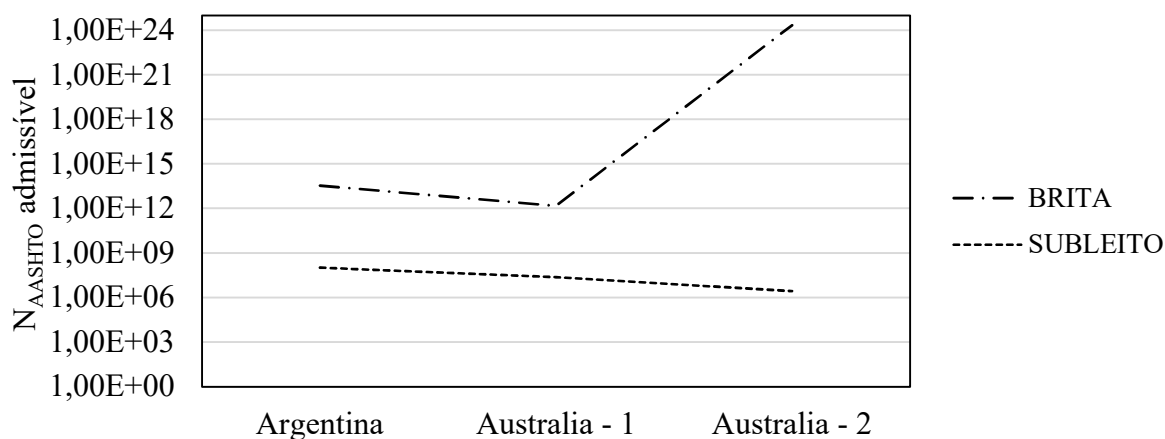
Durante o desenvolvimento desse trabalho, foram escolhidos 3 modelos de equivalência para a camada de blocos de concreto, no qual os dados da camada de rolamento são substituídos por outros materiais, majorando ou minorando sua espessura:

- o modelo argentino assume que a camada de bloco de concreto pode ser substituída por uma camada de sub-base granular. Além disso, a espessura dessa camada respectiva deve ser majorada 2,5 vezes a da camada de bloco.
- o primeiro modelo australiano assume que a camada de bloco de concreto pode ser substituída por uma camada de rocha britada. Além disso, a espessura dessa camada respectiva deve ser majorada 2,1 a 2,9 vezes a da camada de bloco.

- o segundo modelo australiano assume que a camada de bloco de concreto pode ser substituída por uma camada de concreto asfáltico de granulometria densa. E, a espessura dessa camada respectiva deve ser minorada 1,1 a 1,5 vezes a da camada de bloco. Ou seja, 1 cm de concreto asfáltico equivale a 1,5 cm de bloco no cenário mais seguro.

Assim padronizando o subleito e a camada granular em espessura e material, variando somente a equivalência, obteve-se através do *software* AEMC a deformação no subleito e as tensões verticais e horizontais na camada granular. Depois, utilizando as equações (1), (2) e (3) extraídas do SAMDM (2014), se tem o valor admissível de eixos padrão para cada tipo de equivalência. Nesse caso, conforme gráfico da Figura 14, a equivalência que resultou em menor resistência foi a Austrália 2, ou seja, nesse trabalho será considerado que 1cm de bloco corresponde a 0,667cm de concreto asfáltico. Vale destacar que a metodologia de cálculo será descrita no item 3.5. Portanto, para fins de análise elástica mecanística das camadas, seguindo a orientação descrita, será utilizado 5,333 cm de pavimento asfáltico ao invés de 8 cm de bloco de concreto como camada de rolamento.

Figura 14 - Gráfico de comparação da resistência estrutural



Fonte: autoria própria.

3.4 ANÁLISE MECANÍSTICA DO LIMITE ESTRUTURAL

Todos os subleitos foram abordados no dimensionamento das quatro estruturas, descritas no item 3.1. Objetivando assim, calcular a influência do aumento da espessura e/ou troca de material da base na capacidade resistente de cada estrutura.

O cálculo começa com a modelagem da estrutura no *software* AEMC, vide Figura 15. Como citado anteriormente, a espessura utilizada como equivalência para o bloco é de 5,333 cm de concreto asfáltico, com módulo, massa específica e coeficiente de Poisson, oriundo do sistema de análise AEMC. Nesse caso, por se tratar da estrutura 01, item 3.2, não existe camada granular, portanto a estrutura é somente “bloco de concreto” e o subleito (espessura 0, no AEMC representa que ela é a fundação, ou seja, espessura semi-infinita).

Figura 15 - Estrutura 01 - Solo Argiloso - Cruz Alta – Tese João Bonzanini

CAMADA	ESPESSURA (cm)	MASSA ESP (g/cm ³)	COMPORTEAMENTO	MÓDULO (MPa)	k1	k2	k3	k4	COEF POISSON	ADERÊNCIA
1	5,333	2,4	LINEAR	4500	0,0	0,0	0,0	0,0	0,30	0,0
2	0,0	1,54	NÃO LINEAR	(55)	28	0,33	-0,82	0	0,40	0,0

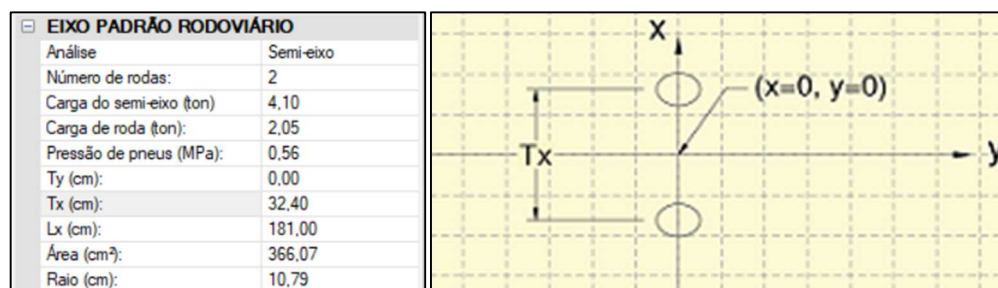
Fonte: autoria própria.

Após a criação do modelo, deve-se verificar os pontos de análise desejados. A Figura 9 apresenta a localização e o mecanismo de falha de um pavimento com diversas camadas. Contudo, esse trabalho aborda somente a análise da camada granular e do subleito.

A aderência, última coluna da Figura 15, varia entre os valores de 0 e 1, onde 0 é não aderido e 1 é aderido. No trabalho foi considerado que todas as camadas são não aderidas, pois não foi realizado nenhum estudo específico sobre a aderência entre as camadas nesse pavimento. Portanto para aumentar a segurança no dimensionamento, reduzindo o número N, será utilizado 0 para aderência entre as camadas.

Em relação a posição X, no AEMC, deve-se analisar duas posições críticas. Primeiramente, o ponto entre o eixo das rodas, conforme Figura 16, na posição 0, pois o somatório dos bulbos de tensões dos eixos padrão, podem ultrapassar a carga na posição imediatamente inferior ao centro da roda. O segundo ponto, é imediatamente, abaixo da roda, considerando que a distância entre rodas “Tx”, Figura 16, é de 32,40 cm, metade desse valor corresponde a distância do eixo ao centro da roda, portanto 16,2 cm. Em suma, em relação ao eixo X, os pontos críticos são 0 e 16,2 cm. O eixo Y sempre terá seu valor máximo sob seu eixo, pois nele estarão as maiores cargas na análise do eixo padrão rodoviário.

Figura 16 – Parâmetros do eixo padrão rodoviário e vista superior das cargas sobre a estrutura.



Fonte: *software* AEMC (2023).

Por fim, segundo Figura 17, o eixo Z, representa a espessura que será realizada a análise. Conforme SAMDM (2014), a espessura crítica de materiais granulares é no meio da camada, deve-se atentar para não esquecer de somar a camada de rolamento durante o cálculo. Já no subleito, a análise no eixo Z, é realizada imediatamente abaixo de sua superfície, ou seja, é a espessura total da camada de rolamento, mais a camada granular, mais 0,001 cm.

Após incluir a estrutura e os pontos para análise no *software* AEMC, são calculadas as tensões principais s1 e s3 (material granular), e a deformação E_z (subleito), vide Figura 17. Deve-se calcular o valor “F” (equação (3) e escolher o menor valor, entre o ponto entre os eixos ($X=0$) e abaixo da roda ($X=16,2$ cm), e atentar-se que caso o valor da tensão seja negativo representa que o ponto está sob tração, necessitando ajuste no cálculo.

Figura 17 - Resultados software AEMC

Ponto	X (cm)	Y (cm)	Z (cm)	E_z (m/m)	E_{xy} (m/m)	E_{yz} (m/m)	E_{xz} (m/m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
1	0	0	10,333	7,95437e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,144953	0,040882	0,009728
2	0	0	15,334	6,86820e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	0,00000e+00	0,145061	0,135903	0,125187
3	16,2	0	10,333	1,02743e-03	0,00000e+00	0,00000e+00	8,28004e-05	0,183498	0,033744	0,020343
4	16,2	0	15,334	7,28926e-04	0,00000e+00	0,00000e+00	8,45785e-08	0,153939	0,141965	0,135092

Fonte: *software* AEMC (2023).

Outra definição importante é quanto a confiabilidade de projeto, ou seja, determina a probabilidade de o pavimento manter suas propriedades conforme planejado durante sua vida útil. Essa medida é crucial no dimensionamento, haja vista que pavimentos de maior importância como rodovias interestaduais devem ter confiabilidades maiores, enquanto ruas vicinais podem ter valores reduzidos, para o desenvolvimento desse trabalho foi definida em 90% a confiabilidade. Destaca-se que esse valor é extremamente alto para vias urbanas de tráfego leve, contudo objetivando ter maior segurança foi utilizado dessa confiabilidade. Assim

em 90% dos trechos as características da estrutura manter-se-ão em conformidade ao planejado. Na Tabela 10 estão alguns valores aconselhados pela AASHTO, pelo método AASHTO 93. Vale destacar que o valor de 90% é maior que o recomendado para vias vicinais, entretanto caso o município use para outras classes de vias o valor de 90% se enquadra em todas, e no caso da vicinais terá melhor desempenho apesar do aumento de custo.

Tabela 10 - Confiabilidade recomendada pela AASHTO C(%)

Classe Funcional	Zona Urbana	Zona Rural
Interestadual	85 a 99,9	85 a 99,9
Artéria Principal	80 a 99	75 a 95
Coletora	80 a 95	75 a 95
Vicinal	50 a 80	50 a 80

Fonte: Almeida (2015).

3.5 MODELOS EMPÍRICOS SAMDM (2014)

Considerando que a metodologia para a verificação do subleito é diferente da camada granular, serão separados em dois subitens as metodologias correspondentes.

3.5.1 Subleito

A análise da deformação e capacidade resistiva do subleito é analisada quanto sua deformação permanente na camada superior. Assim, a partir dos dados da deformação no eixo z (espessura), tanto abaixo da roda, quanto entre eixos, obtém-se a deformação específica no plano E_z imediatamente abaixo do topo da superfície da camada do subleito, conforme Figura 17. A confiabilidade do dimensionamento do subleito foi fixada em 90%, e foi utilizado 20 mm como a espessura de sulco terminal, ou seja, quando o sulco ultrapassar 20 mm, considera-se que o subleito rompeu. Assim, de acordo com a Tabela 11, obtém-se a constante “a” utilizada na equação (1).

Tabela 11 - Constante "a" deformação permanente do subleito

Nível de Confiança	Constantes	
	10 mm Profundidade de deformação terminal	20 mm Profundidade de deformação terminal
95% (Categoria A)	33,30	36,30
90% (Categoria B)	33,38	36,38
80% (Categoria C)	33,47	36,47
50% (Categoria D)	33,70	36,70

Fonte: SAMDM (2014)

Desse modo, com a deformação do eixo z obtida através do *software* AEMC (2023) e a constante “a” tem-se todas as variáveis necessária para o cálculo do número N_{AASHTO} , conforme equação (1).

$$N_{PD} = 10^{(a-10 \cdot \log \cdot \varepsilon_V)} \quad (1)$$

Onde:

N_{PD} – número equivalente de eixos padrão para definir o nível de deformação permanente;

ε_V – deformação vertical de compressão no topo da camada;

a – constante relacionada ao nível de confiabilidade e à profundidade do sulco gerado pela deformação permanente.

3.5.2 Camada Granular

Nas camadas granulares se analisa a tensão de cisalhamento no centro da camada. Em estruturas estáticas, não há forças cisalhantes, mas nos pavimentos, as cargas móveis geram tensões verticais e horizontais, causando cisalhamento nos materiais. Esse processo de ruptura começa com forças horizontais e verticais que são transmitidas às camadas inferiores, resultando em uma distribuição complexa de tensões na camada granular. Se não resistirem, ocorre o deslizamento das partículas na área vulnerável da estrutura.

Por conseguinte, as tensões principais σ_1 e σ_3 obtidas através do *software* AEMC, e com uma confiabilidade de 90% tem-se as constantes α e β (Tabela 12). Em ambientes urbanos, local

onde a drenagem da estrutura raramente funciona adequadamente, a constante para umidade “K” (Tabela 13), foi de uma camada saturada. Aumentando, assim, o nível de segurança, apesar de reduzir a capacidade do pavimento.

Tabela 12 - Constantes "α" e "β" da ruptura por cisalhamento da camada granular

Constata para materiais granulares		
Nível de Confiança	α	β
95% (Categoria A)	2,605122	3,480098
90% (Categoria B)	2,605122	3,707667
80% (Categoria C)	2,605122	3,983324
50% (Categoria D)	2,605122	4,510819

Fonte: SAMDM (2014)

Tabela 13 - Constante para umidade "K"

Constante para umidade	K
saturado	0,65
moderado	0,80
normal	0,95

Fonte: SAMDM (2014).

Finalmente, com todas as variáveis obtidas, calcula-se a relação de tensões obtida pela equação (3), e depois aplicando esse valor calculado na equação (2), tem-se o número de eixos padrão equivalentes para proteção contra falhas por cisalhamento.

$$N = 10^{(\alpha F + \beta)} \quad (2)$$

$$F = \frac{\sigma_3 K [\tan^2 \left(45 + \frac{\phi}{2}\right) - 1] + 2KC \tan \left(45 + \frac{\phi}{2}\right)}{(\sigma_1 - \sigma_3)} \quad (3)$$

N – número equivalente de eixos padrão;

α e β – constantes relacionadas ao nível de confiabilidade;

F – relação de tensões, obtida pela equação (3);

σ₁ e σ₃ – tensões principais maior e menor atuando na metade da camada granular;

C – coesão;

φ – ângulo de atrito;

4 RESULTADOS

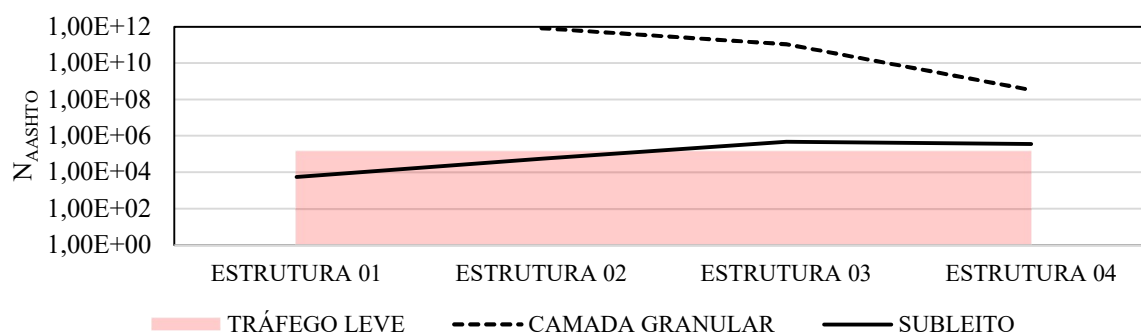
Neste capítulo apresenta os resultados da capacidade de suporte do subleito (SL) e da camada granular (CG) das quatro estruturas, das quais:

- Estrutura 01: constituída do subleito, 3 cm de areia de assentamento, e 8 cm de bloco de concreto;
- Estrutura 02: constituída do subleito, 10 cm de brita, 3 cm de areia de assentamento, e 8 cm de bloco de concreto;
- Estrutura 03: constituída do subleito, 15 cm de brita, 3 cm de areia de assentamento, e 8 cm de bloco de concreto;
- Estrutura 04: constituída do subleito, 15 cm de RCD, 3 cm de areia de assentamento, e 8 cm de bloco de concreto.

Além disso, foram feitos comentários e discussões sobre esses resultados. Os resultados são apresentados com base nos diferentes subleitos deste trabalho, representando graficamente se as estruturas suportam o tráfego leve, conforme descrito na seção 2.6.1.

O solo argiloso (Subleito 01), oriundo de Cruz Alta – BR337, não resistiu em todas as estruturas (Figura 18). Por se tratar de um subleito com baixa capacidade de suporte, a camada granular deverá ser de 15 cm ou maior. Caso seja inferior, haverá ruptura por deformação do solo, originando deformações permanentes nas camadas superiores.

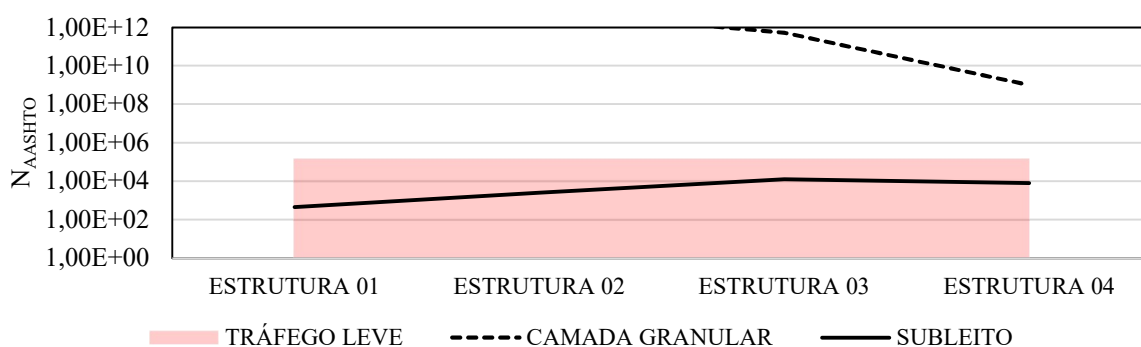
Figura 18 - Capacidade de suporte Subleito 01



Fonte: autoria própria.

O argissolo (Subleito 02), oriundo de Gravataí – BR118, não resistiu em nenhuma das estruturas (Figura 19). Por se tratar de um subleito com baixíssima capacidade de suporte, a camada granular deverá ser maior que 15 cm. Entretanto, considerando que não foi calculadas estruturas maiores que 15 cm de camada granular, não será possível verificar qual espessura atenderá ao tráfego leve. Nessa estrutura haverá ruptura por deformação permanente do subleito em todos os casos, originando posteriormente deformações nas camadas superiores.

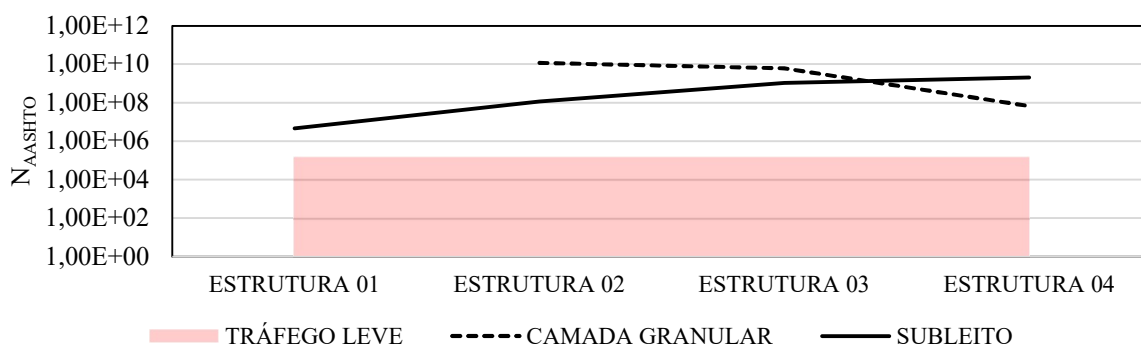
Figura 19 - Capacidade de suporte Subleito 02



Fonte: autoria própria.

O argissolo (Subleito 03) oriundo de Gravataí BR118 e RS020 (Figura 20), provavelmente é oriundo de outra jazida, diferente do subleito 02, haja vista que resistiu ao tráfego leve em todas suas estruturas. Nesse caso, qualquer estrutura comportará o tráfego leve. Caso seja necessária uma capacidade de suporte maior, aconselha-se o uso das estruturas 03 e 04.

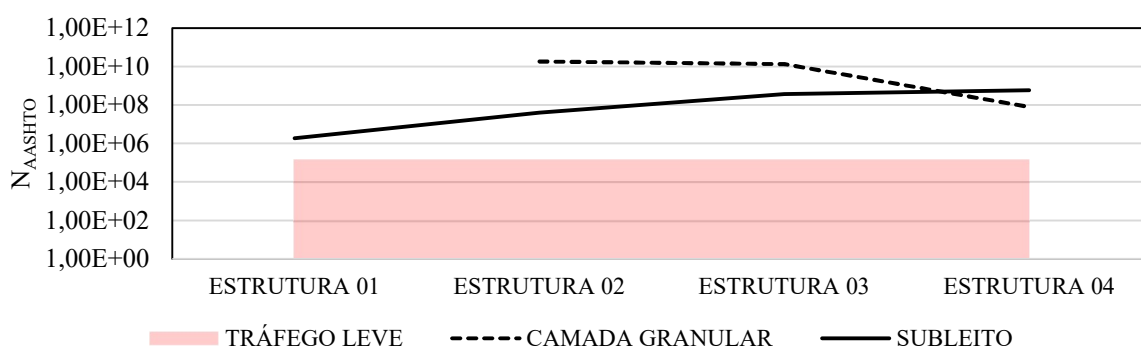
Figura 20 - Capacidade de suporte Subleito 03



Fonte: autoria própria.

O solo arenoso fino laterítico (SAFL - Subleito 04) oriundo de Santa Bárbara do Sul – RS506 (Figura 21), resistiu ao tráfego leve em todas suas estruturas. Nesse caso, qualquer estrutura comportará o tráfego leve, caso seja necessária uma capacidade de suporte maior, aconselha-se o uso das estruturas 03 e 04, as quais tiveram resultados promissores.

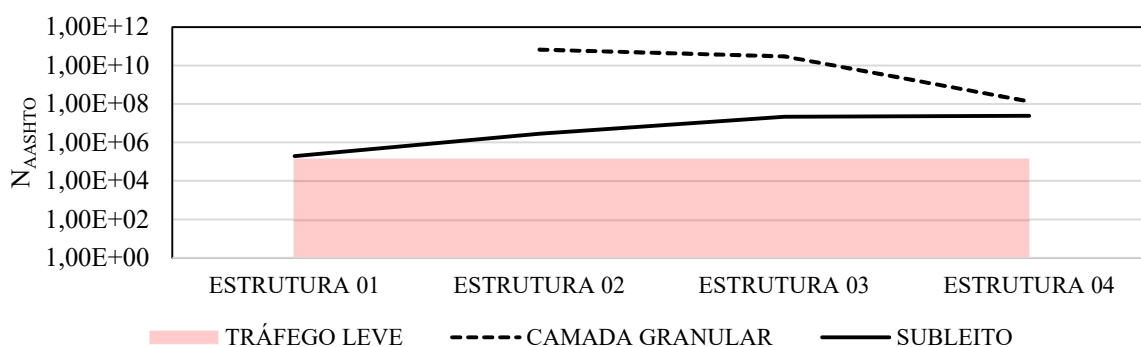
Figura 21 - Capacidade de suporte Subleito 04



Fonte: autoria própria.

A areia (Subleito 05) oriunda de Santa Bárbara do Sul – RS506 (Figura 22), resistiu ao tráfego leve em todas suas estruturas. Nesse caso, qualquer estrutura comportará o tráfego leve, caso seja necessária uma capacidade de suporte maior, aconselha-se o uso das estruturas 03 e 04.

Figura 22 - Capacidade de suporte Subleito 05

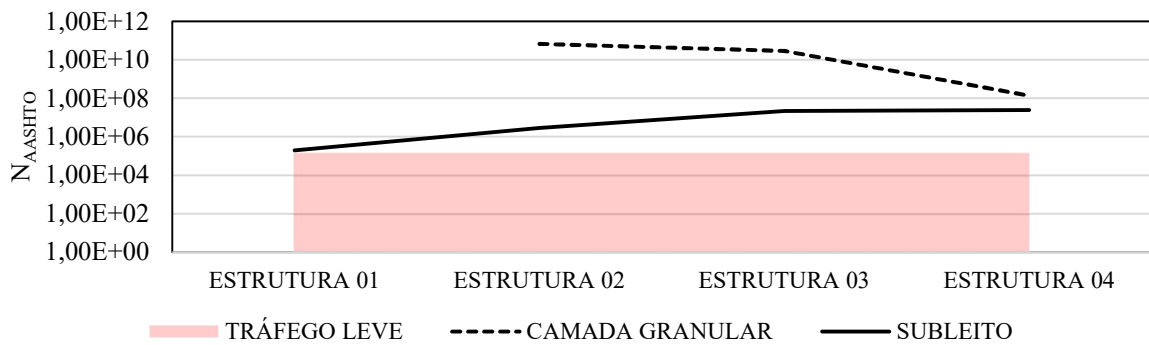


Fonte: autoria própria.

O solo residual de arenito (AS - Subleito 06) oriundo de São Leopoldo (Figura 23), resistiu ao tráfego leve em todas suas estruturas, entretanto a estrutura sem camada granular

(01) ficou extremamente próxima da capacidade mínima, com $N = 1,97.10^5$. Nesse caso, qualquer estrutura comportará o tráfego leve, caso seja necessária uma capacidade de suporte maior, aconselha-se o uso das estruturas 03 e 04.

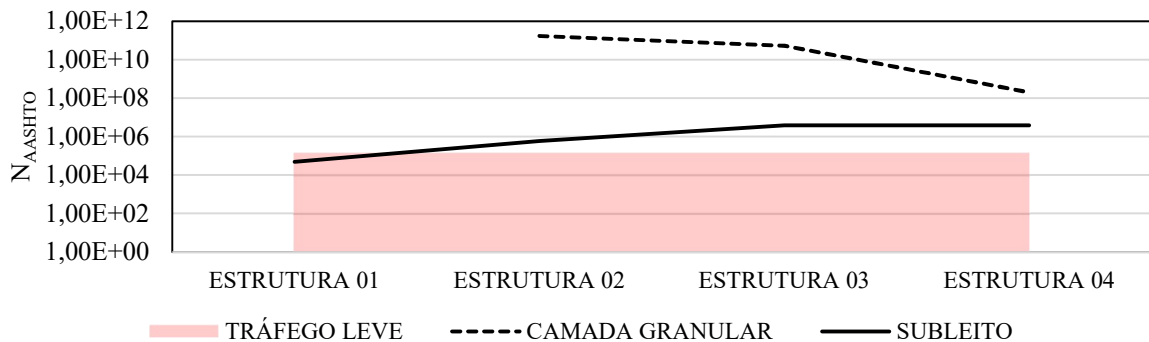
Figura 23 - Capacidade de suporte Subleito 06



Fonte: autoria própria.

O saibro de basalto (SB - Subleito 07) oriundo de Santo Antônio da Patrulha (Figura 24), não resistiu ao tráfego leve na estrutura 01, pois ficou abaixo da capacidade mínima para o tráfego leve, com $N = 4,94.10^4$. Nesse caso, devem ser escolhidas entre as estruturas 02, 03 ou 04, com preferência para as de maiores espessuras haja vista maior vida útil.

Figura 24 - Capacidade de suporte Subleito 07

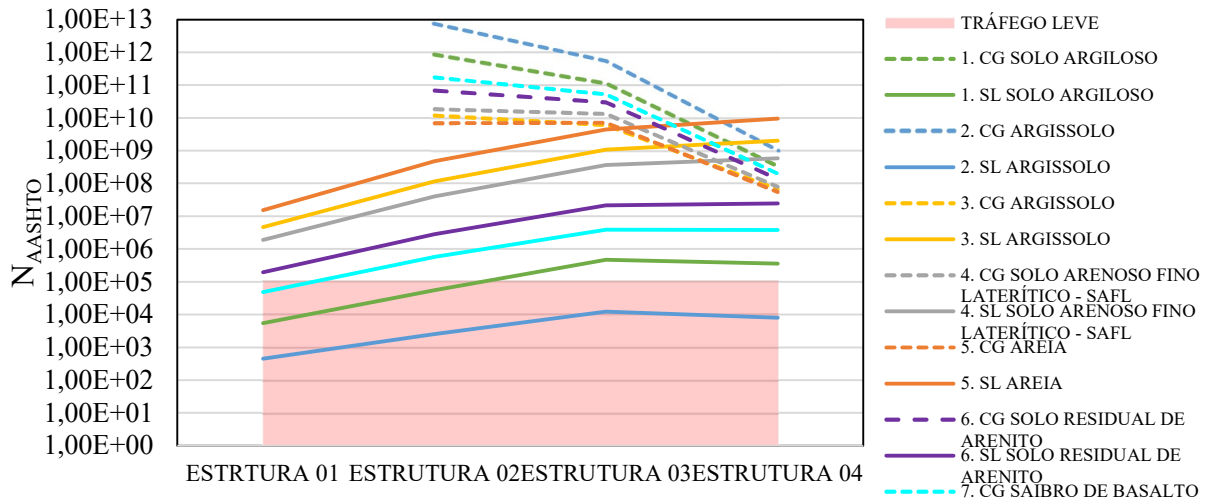


Fonte: autoria própria.

Em suma, 7 das 28 estruturas não suportaram o tráfego leve (Figura 25). Os subleitos (SL) apresentaram capacidades inferiores nas estruturas 1, 2 e 3 ao comparado às camadas granulares (CG). Já na estrutura 4, o RCD teve capacidade inferior à alguns subleitos. Assim sendo, com 75% das estruturas aptas para receber o tráfego contido em vias locais dos municípios, evidencia-se o potencial do pavimento com bloco intertravado de concreto. Vale destacar que algumas das estruturas tiveram resultados superior ao esperado, como o solo

arenoso fino laterítico e a areia. Haja vista, que ambos suportam tráfego pesado, com número N maior que 1.10^8 para a estrutura 03, conforme 3.2.

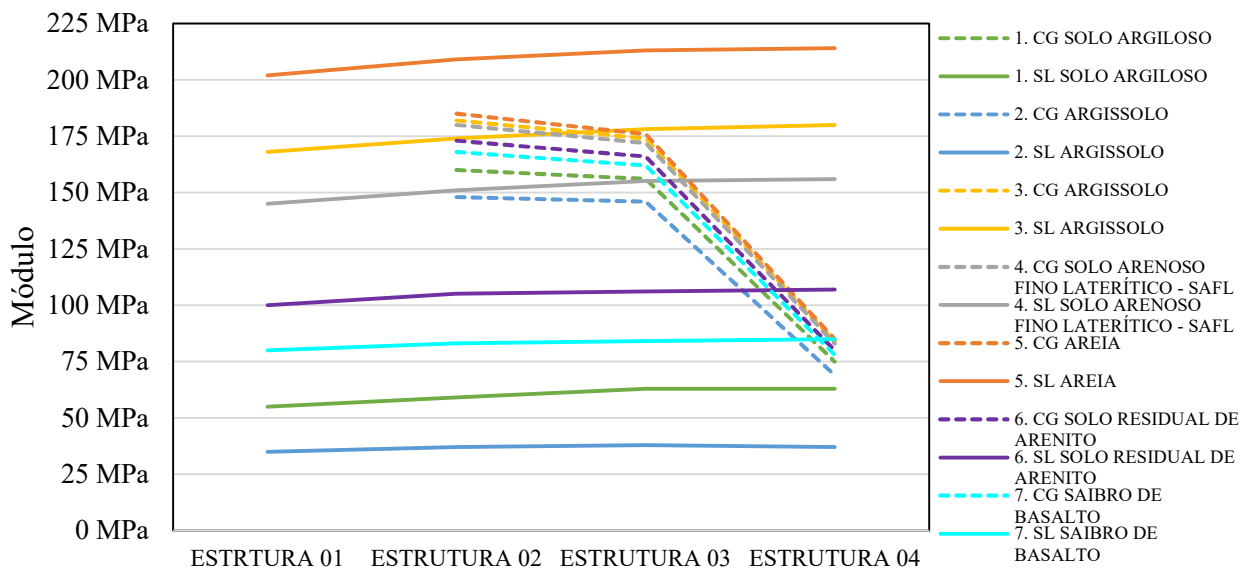
Figura 25 - Resumo da capacidade de suporte



Fonte: autoria própria.

Em relação aos módulos das estruturas (Figura 26), observa-se que os subleitos independentemente da estrutura mantiveram um módulo quase constante. Entretanto, as camadas granulares ao se substituir a brita por RCD, houve uma redução abrupta do módulo, indicando menor capacidade de suporte dessa camada, conforme (Figura 25).

Figura 26 - Resumo dos módulos das estruturas



Fonte: autoria própria.

5 CONCLUSÃO

A utilização da metodologia mecânica empírica para a verificação da capacidade estrutural de pavimentos intertravados com blocos de concreto apresentou resultados viáveis estruturalmente. Haja vista que apenas dois dos sete subleitos estudados no Rio Grande do Sul tiveram estruturas que não suportaram o tráfego leve. Mais especificamente, 75% das estruturas suportaram tráfego leve.

Entretanto, a validação desse modelo utilizado parte de algumas premissas, pois, apesar de resultados satisfatórios, seria essencial a construção de pavimentos testes para monitorar o comportamento e resistência da estrutura. Objetivando, assim, validar se o método empregado está adequado. Ainda, salienta-se da importância da realização de ensaios de módulo de resiliência e caracterização do subleito e da camada granular antes do dimensionamento e construção, pois há grande variabilidade entre os materiais.

Assim sendo, a partir da verificação mecânica-empírica utilizada nesse trabalho, conclui-se da viabilidade, da substituição para o pavimento intertravado, das vias municipais de tráfego leve. Contudo, alguns resultados foram superiores ao previsto, como nos subleitos 3 e 4. Esses valores podem representar que os solos estudados nessa pesquisa não correspondem aos empregados nos países da concepção do modelo, gerando tais valores possivelmente superestimados.

Considerando que nenhum trabalho já realizado estudou especificamente esses solos, e essas estruturas para o dimensionamento de pavimentos intertravados. Aconselha-se para pesquisas futuras a comparação do resultado desse trabalho, com os oriundos dos dimensionamentos empíricos, ou provenientes da construção de trechos experimentais que permitam tal comparação.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, B. S; OLIVEIRA, F. H. L; AGUIAR, M. F. P. Análise de confiabilidade do pavimento executado suportar o tráfego estimado em projeto. **44ª RAPv. 18º ENACOR**. Foz do Iguaçu, 2015. Disponível em: <https://marcosporto.eng.br/wp-content/uploads/2018/01/An%C3%A1lise-de-Confiabilidade-do-Pavimento-Executado-Suportar-o-tr%C3%A1fego-Estimado-em-Projeto.pdf>. Acesso em: 21 jul. 2024.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de Pavimento Intertravado**. São Paulo, 2010
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **PR 01: pavimentos intertravados – Preparo da Fundação**. São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **PR 02: pavimentos intertravados – Prática Recomendada**. São Paulo, 2010.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Sistema de piso com peças de concreto pavimento intertravado**. São Paulo. 2022
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15953: Pavimento intertravado com peças de concreto – execução**. Rio de Janeiro, 2011.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502: Rochas e solos**. Rio de Janeiro, 1995.
- BALBO, J. T., **PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA: Materiais, projeto e restauração**”. São Paulo, 2007.
- Bernucci, L. B. *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. Petrobras. Rio de Janeiro, 2008.
- BEZZERRA, F. S. C.; BEZZERRA, F. A. C.; OLIVEIRA, F. H. L. A influência da camada de base no dimensionamento de pavimentos intertravados com tráfego leve. **46º RAPV**. Brasília, 2021.
- BEZZERRA, F. S. C; GONZANA, C. M. G; OLIVEIRA, F. H. L. Influência da resistência à compressão e da espessura dos blocos de concreto e as espessuras das juntas na deformação permanente dos pavimentos em blocos intertravados. **34º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transporte da ANPET**. Brasil, 2020.

BONZANINI, J. A. F. **Estudo dos Efeitos do Tamanho de Corpos-de-Prova no Módulo de Resiliência de Quatro Solos**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2021.

CAPUTO, Homero P.; CAPUTO, Armando N. **Mecânica dos Solos: Teoria e Aplicações**. Rio de Janeiro: Grupo GEN, 2022. E-book. ISBN 9788521638032. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521638032/>. Acesso em: 23 abr. 2024.

CASAGRANDE, F. L. **Estudo da influência do teor de finos na condutividade hidráulica e deformabilidade elástica de britas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT IPR 714**: Manual de Pavimentos Rígidos. Rio de Janeiro. 2005.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. **DNIT IPR 719**: Manual de Pavimentação. Rio de Janeiro. 2006.

DINIZ, B, C. **Estabilização Físico-Química de um Argissolo para Emprego em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2022.

GOLDNER, L. G. **Engenharia de tráfego – módulo 1**. Universidade Federal de Santa Catarina – Centro Tecnológico, Departamento de Engenharia Civil. Florianópolis, 2008.

GORDILLO, M. T. **Pavimento urbano de adoquines de H°**. Asociación Argentina del Bloque de Hormigón, 2020.

HALLAC, A. **Dimensionamento de Pavimento com Revestimento de Peças Pré-Moldadas de Concreto para Áreas Portuárias e Industriais**. São Paulo: Escola Politécnica, 1998.

MALYSZ, R. (2004) **Comportamento Mecânico de Britas Empregadas em Pavimentação**. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 166 p.

MALYSZ, R. (2009) **Desenvolvimento de um equipamento triaxial de grande porte para avaliação de agregados utilizados como camada de pavimentos**. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – PPGEC/UFRGS. Porto Alegre, 348 p.

MATUELLA, M, F. **Efeitos da Composição de Resíduos de Construção e Demolição em seu Comportamento Mecânico para Utilização em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2017.

MORGADO, P. R. S. **Concepção e Dimensionamento de Pavimentos em Blocos**. Dissertação de Mestrado. Universidade Técnica de Lisboa. 89 páginas. 2008.

MULLER, R. M. **Avaliação de Transmissão de Esforços em Pavimentos Intertravados de Blocos de Concreto**. Dissertação (Mestrado), Sc. COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <http://www.coc.ufrj.br/pt/dissertacoes-de-mestrado/105-msc-pt-2005/2007-rodrigo-menegazmueller>. Acesso em: 15 jun. 2024

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação rodoviária: conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. Rio de Janeiro: Copiarte, 2002.

PINTO, S; PINTO, I. S. **Pavimentação asfáltica: conceitos fundamentais sobre materiais e revestimentos asfálticos**. Rio de Janeiro, 1. Ed. LTC, 2019.

SCHREINERT, G, G. **Estudo do Comportamento Mecânico de Solos Residuais para Emprego em Pavimentação**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, 2021.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA E OBRAS DE SÃO PAULO. **IP 02:2004** – Classificação das Vias. São Paulo. 2004. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUCAO%20DE%20PROJETOS/ip_02_2004_classificacao_das_vias.pdf Acesso em: 22 mar. 2024.

SECRETARIA MUNICIPAL DE INFRAESTRUTURA E OBRAS DE SÃO PAULO. **IP 06:2004** - Dimensionamento de pavimentos com blocos intertravados de concreto. São Paulo. 2004. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SMSO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUCAO%20DE%20PROJETOS/ip_06_2004%20dimensionamento_de_pavimentos_em_blocos_intertravados_de_concreto.pdf. Acesso em: 22 mar. 2024.

SHACKEL, B. **Design and Construction of Interlocking Concrete Block**. New York and London. First Edition, 1990.

SMITH, D. R., (2003). “Grand Entrances”, **Interlocking Concrete Pavement Magazine**, Vol. 10, Number 2, pp.4, May 2003.

SOUTH AFRICAN NATIONAL ROADS AGENCY LIMITED. **South African Pavement Engineering Manual - Chapter 10: Pavement Design**. 2 ed.ed. Pretoria, 2014.

VARGAS, M. (1978), **Introdução à Mecânica dos Solos**, São Paulo, McGraw-Hill do Brasil, Ed. Da Universidade de São Paulo.