

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL BUENO BRANDÃO SIMÕES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE
AGREGADOS RECICLADOS EM UM PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO
ASFÁLTICA EM GUARAPUAVA – PR**

GUARAPUAVA

2022

GABRIEL BUENO BRANDÃO SIMÕES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICO-ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE
AGREGADOS RECICLADOS EM UM PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO
ASFÁLTICA EM GUARAPUAVA – PR**

**ANALYSIS OF TECHNICAL-ECONOMIC FEASIBILITY OF THE USE OF
RECYCLED AGGREGATE IN AN ASPHALT PAVING PROJECT IN
GUARAPUAVA – PR**

Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientador(a): Prof. Dr. Gustavo de Miranda Saleme Gidrão

GUARAPUAVA

2022



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

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

GABRIEL BUENO BRANDÃO SIMÕES

**ANÁLISE DA VIABILIDADE ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS
RECICLADOS EM UM PROJETO DE PAVIMENTAÇÃO ASFÁLTICA EM
GUARAPUAVA – PR**

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

04 de julho de 2022

Gustavo de Miranda Saleme Gidrão
Doutor em Engenharia Civil
Universidade de São Paulo

Rodrigo Scoczynski Ribeiro
Doutor em Engenharia Civil
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Diego de Oliveira Martins
Doutorado em Engenharia de Transportes
Universidade de São Paulo

GUARAPUAVA
2022

Dedico este trabalho à minha família, Cesário, Paula, Felipe e Sofia e à minha namorada, Thalissa, por todo amor, carinho, apoio e compreensão por todos esses anos de faculdade.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer a minha família, Cesário, Paula, Sofia e Felipe, e especialmente aos meus pais, por me apoiarem e por terem me dado todo o suporte, amor, carinho e os recursos necessários por todos esses anos para concluir a minha formação. Muito obrigado, família, sem vocês eu não seria ninguém!

Gostaria de agradecer em especial, minha namorada Thalissa, por todo apoio, amor, carinho e suporte nessa reta final de graduação, saiba que você foi muito importante em muitos momentos difíceis que eu atravesssei e você me ajudou a me reerguer e a ter mais motivação para as atividades laborais da faculdade.

Aos meus amigos, principalmente os que eu conheci na faculdade, que são muitos para mencionar aqui, mas alguns deles que vou citar por terem me ajudado ao longo dessa graduação, com apoio o mínimo que seja. São eles: Adam, Nikolaus, Juan, João Henrique, Mateus Bilyk, Gabriel Cittadin, Matheus Pianca, Guilherme Fortunato, Guilherme Gallo, Tiago, Welington, Willian, André Ângelo, André Ricardo, Fábio, João Marcos, Ketlyn, Luana Tiemi, Gabriela Furtado, Vanessa e Giovanna.

Gostaria de agradecer todos que estiveram envolvidos no começo da minha vida profissional, me ajudando com conhecimentos e experiências de vida e principalmente profissionais. Entre eles Eduardo da Alia, Paulo, Rudineia, João Guilherme e todos os colaboradores da PRG. Por fim, Marcos, Samara, Lourdes, Leitão e todos os colaboradores da Esteio e em especial, Leonardo Sbroggio, por toda parceria e convivência durante esse período turbulento de trabalho e TCC.

Aos professores e em especial o meu orientador professor Gustavo que me auxiliou na realização desse trabalho, sanando minhas dúvidas e dando o apoio necessário. Aos professores Rodrigo e Diego pela disposição em ser minha banca na defesa deste trabalho.

Agradeço também a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

Eu posso aceitar o fracasso. Todo mundo falha em alguma coisa. Mas eu não posso aceitar não tentar. (Michael Jordan).

RESUMO

A Indústria da Construção Civil é um forte vetor do desenvolvimento econômico do Brasil, mas é também o ramo responsável pela geração de resíduos ao longo de toda a sua cadeia produtiva, sendo esses pelo menos 50% de todos os resíduos sólidos gerados no nosso país. Vale ressaltar que muitos desses resíduos são destinados de maneira incorreta. Dado este contexto no dia 2 de agosto de 2010, foi decretada e sancionada a Lei nº 12.305, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). Esta Lei, determina que as pessoas que atuam no ramo da Construção Civil, por exemplo, destinem da maneira ambientalmente mais adequada os Resíduos da Construção Civil (RCC). Além da quantidade de entulho produzido, tem-se dois problemas críticos: a falta de gerenciamento destes e o não reaproveitamento, seja através da reutilização ou da reciclagem. O Brasil possui um forte potencial de reciclagem de RCC, levando-se em conta a quantidade de entulho que é produzida, porém, no ano de 2002, o País tinha somente 16 Usinas de Reciclagem de RCC. Após a resolução número 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), o número de Usinas cresceu, chegando a 350 nos dias atuais. Com esses valores, o crescimento da demanda por materiais reciclados só aumenta. Além do aspecto ambiental, a utilização de agregados reciclados também apresenta vantagens financeiras para as obras. Com isto, este trabalho, avança na investigação sobre a comparação econômica visando utilizar os agregados reciclados oriundos da indústria da construção civil na cidade de Guarapuava – PR. O beneficiamento do agregado foi realizado em uma Usina de Reciclagem de RCC em operação, tendo em vista que o Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos (PMGIRS) da cidade forneceu dados de que os entulhos produzidos fossem de 93.744 toneladas no ano de 2020. Vamos saber quais guerras devemos travar, com isso, este estudo utilizou o orçamento de um projeto de pavimentação com composições do banco de dados da Tabela de Composição de Preços para Orçamentos (TCPO). Assim, se objetivou a substituição do rachão como camada de sub-base de pavimentação por brita 1 reciclada. Foram avaliadas 14 situações de valores de resistência do solo, com solo mais frágil, média de todas e com o solo mais resistente, todas obtiveram resultados satisfatórios no desempenho mecânico, entretanto, somente no solo mais frágil e na média tivemos viabilidade econômica de 9,81% e 5,33% respectivamente, enquanto com o solo mais resistente apenas 1,11% de economia.

Palavras-chave: Impacto Ambiental; Resíduos da Construção Civil; Pavimentação; Viabilidade Econômica

ABSTRACT

The Civil Construction Industry is a strong vector of economic development in Brazil, but it is also the branch responsible for the generation of waste throughout its production chain, with at least 50% of all solid waste generated in our country. It is worth mentioning that many of these wastes are disposed of incorrectly. Given this context, on August 2, 2010, Law No. 12,305 was enacted and sanctioned, establishing the National Policy on Solid Waste (PNRS). This Law determines that people who work in the field of Civil Construction, for example, dispose of Civil Construction Waste (RCC) in the most environmentally appropriate way. In addition to the amount of waste produced, there are two critical problems: the lack of management of these and the non-reuse, either through reuse or recycling. Brazil has a strong potential for recycling RCC, taking into account the amount of waste that is produced, however, in 2002, the country had only 16 RCC Recycling Plants. After resolution number 307 of the National Council for the Environment (CONAMA), the number of plants grew, reaching 350 today. With these values, the growth in demand for recycled materials only increases. In addition to the environmental aspect, the use of recycled aggregates also presents financial advantages for the works. With this, this work advances in the investigation of the economic comparison in order to use recycled aggregates from the construction industry in the city of Guarapuava - PR. The processing of the aggregate was carried out in an RCC Recycling Plant in operation, given that the city's Municipal Plan for Integrated Management of Solid Waste (PMGIRS) provided data that the debris produced was 93,744 tons in the year 2020. Let's know which wars we should fight, with that, this study used the budget of a paving project with compositions from the Composition of Prices Table for Budgets (TCPO) database. Thus, the objective was to replace the rachão as a paving sub-base layer with recycled gravel 1. Fourteen situations of soil resistance values were evaluated, with more fragile soil, average of all and with the most resistant soil, all obtained satisfactory results in mechanical performance, however, only in the most fragile soil and on average we had economic viability of 9, 81% and 5.33% respectively, while with the most resistant soil only 1.11% savings.

Keywords: Environmental Impact; Construction and Demolition Waste Environmental Impact; Paving; Sustainability.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos sólidos	17
Figura 2 – Fluxograma do processo de reciclagem dos RCC's	24
Figura 3 – Corte longitudinal do pavimento rígido.....	28
Figura 4 – Corte longitudinal do pavimento flexível	29
Figura 5 – Agregados reciclados em pavimentação	30
Figura 6 – Dimensionamento do pavimento	35
Figura 7 – Ábaco para determinar as espessuras dos pavimentos.....	36
Figura 8 – Fatores de equivalência de operação.....	39
Figura 9 – Sistema de coordenadas do AEMC	41
Figura 10 – Ábaco para deflexão admissível para concreto betuminoso	44
Figura 11 – Localização de Guarapuava – PR	45
Figura 12 – Esquema do procedimento.....	46
Figura 13 – Materiais para o ensaio de CBR	48
Figura 14 – Representação das simulações feitas.....	48
Figura 15 – Planta baixa projeto de pavimentação	49
Figura 16 – Corte esquemático do pavimento dimensionado.....	56
Fotografia 1 – Agregados reciclados comercializados na Usina de Reciclagem de Entulho de Guarapuava – PR.....	25
Gráfico 1 – <i>Boxplot</i> dos valores de CBR.....	53
Gráfico 2 – Gráfico penetração x Pressão calculada da média dos CBR's	53
Gráfico 3 – Gráfico da espessura do pavimento em relação aos CBR's estudados	57
Gráfico 4 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada simulação 1.....	60
Gráfico 5 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada simulação 2.....	61
Gráfico 6 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada	62
Gráfico 7 – Tensão da camada do pavimento x profundidade simulação 1	63
Gráfico 8 – Tensão da camada do pavimento x profundidade x simulação 2 ...	64
Gráfico 9 – Tensão da camada do pavimento x profundidade simulação 3	65
Gráfico 10 – Tensões admissíveis x solicitantes para o CBUQ	66
Gráfico 11 – Tensões admissíveis x solicitantes para a BGS	66
Gráfico 12 – Tensões admissíveis x solicitantes para Sub-base.....	67
Gráfico 13 – Comparativo orçamentário na simulação 1.....	71
Gráfico 14 – Comparativo orçamentário na simulação 1 em porcentagem	71
Gráfico 15 – Custo por metro quadrado dos dois métodos simulação 1.....	72
Gráfico 16 – Comparativo orçamentário na simulação 2.....	72
Gráfico 17 – Comparativo orçamentário na simulação 2 em porcentagem	73
Gráfico 18 – Custo por metro quadrado dos 2 métodos simulação 2	73
Gráfico 19 – Comparativo orçamentário na simulação 3.....	74
Gráfico 20 – Comparativo orçamentário na simulação 3 em porcentagem	75
Gráfico 21 – Custo por metro quadrado dos dois métodos simulação 3.....	75

Quadro 1 – Classes de Resíduos da Construção Civil	18
Quadro 2 – Normas e especificações técnicas para o gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil	21
Quadro 3 – Produtos reciclados e suas características	22
Quadro 4 – Critérios exigidos em norma destinado a pavimentação.....	31
Quadro 5 – Grupo de solos de acordo com o SUCS	32
Quadro 6 – Condições para as camadas do pavimento flexível	33
Quadro 7 – Cálculo do CBR.....	47
Quadro 8 – Média dos resultados do ensaio CBR dos 5 corpos de prova	52
Quadro 9 – Dimensionamento dos pavimentos em todos os CBR'S do solo de Guarapuava.....	56
Quadro 10 – Valores adotados nas 3 simulações de dimensionamento	58
Quadro 11 – Quantitativo de materiais do projeto para simulação 1	67
Quadro 12 – Quantitativo de materiais do projeto para simulação 2	68
Quadro 13 – Quantitativo de materiais do projeto para simulação 3	68

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização gravimétrica média dos trabalhos estudados.....	19
Tabela 2 – Materiais recebidos na usina de reciclagem de Guarapuava - PR ...	20
Tabela 3 – Provável valor de CBR para os tipos de solo	33
Tabela 4 – Coeficiente de equivalência estrutural.....	34
Tabela 5 – Espessuras mínimas de revestimento	35
Tabela 6 – Símbolos e significados do <i>software</i> com unidades de medida	42
Tabela 7 – Preço médio dos agregados convencionais em Guarapuava	51
Tabela 8 – Preço agregados reciclados em Guarapuava – PR.....	51
Tabela 9 – Materiais e especificações utilizadas no AEMC	59
Tabela 10 – Tensões admissíveis das camadas do pavimento.....	63
Tabela 11 – Orçamento do projeto com agregados convencionais simulação 1	68
Tabela 12 – Orçamento do projeto com agregados convencionais simulação 2	69
Tabela 13 – Orçamento do projeto com agregados convencionais simulação 3	69
Tabela 14 – Orçamento do projeto com brita 1 reciclada simulação 1.....	69
Tabela 15 – Orçamento do projeto com brita 1 reciclada simulação 2.....	70
Tabela 16 – Orçamento do projeto com brita 1 reciclada simulação 3.....	70

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Resíduos Especiais Normas Brasileiras
BGS	Brita Graduada Simples
CBR	<i>California Bearing Ratio</i>
CBUQ	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
MeDiNa	Método de Dimensionamento Nacional
NBR	Normas Brasileiras
PMGIRS	Plano Municipal de Gestão Integrada dos Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RCC	Resíduos da Construção Civil
TCPO	Tabela de Composição de Preços para Orçamentos
URE	Usina de Reciclagem de Entulhos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
2	OBJETIVOS	15
2.1	Objetivo principal	15
2.2	Objetivo secundários	15
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
3.1	Política Nacional dos Resíduos Sólidos	16
3.2	Resíduos Sólidos na Construção Civil	17
3.2.1	Definição	17
3.2.2	Classes.....	17
3.2.3	Geração de RCC	18
3.2.4	Destinação	20
3.3	Definição de agregados reciclados	21
3.4	Processos de reciclagem do RCC	23
3.5	Orçamento em Obras	25
3.5.1	Custos Diretos	25
3.5.2	Custos Indiretos.....	26
3.6	Pavimento	26
3.6.1	Definição	26
3.6.2	Pavimento com Agregado de RCC.....	29
3.6.3	Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis	31
3.6.4	Espessura das camadas do pavimento	34
3.6.5	Número de repetições (N)	37
3.6.6	Método mecanístico-empírico MeDiNA	40
<u>3.6.6.1</u>	<u>AEMC</u>	<u>41</u>
4	METODOLOGIA	45
4.1	Região de Estudo	45
4.2	Ensaio CBR	45
4.3	Dimensionamento do pavimento flexível	48
4.4	Orçamento do projeto	50
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	52
5.1	Ensaio CBR	52
5.2	Dimensionamento do pavimento flexível	54
5.3	Análise da Deformação do Pavimento com o AEMC	58

5.3.1	CBR de 2% (Primeira Simulação)	59
5.3.2	Média dos dimensionamentos (Segunda Simulação).....	60
5.3.3	CBR de 15% (Terceira Simulação).....	61
5.4	Análise das Tensões dos Pavimentos com o AEMC.....	62
5.5	Discussão baseada no quantitativo de um projeto de pavimentação	
asfáltica	67
5.5.1	Orçamento do projeto de pavimentação com agregados convencionais	68
5.5.2	Orçamento do projeto de pavimentação com agregados reciclados	69
5.5.3	Análise econômica da utilização da brita 1 reciclada em pavimentação	70
6	CONCLUSÃO	76
6.1	Sugestões para trabalhos futuros	77
	REFERÊNCIAS.....	78
	APÊNDICE A - Resultados dos ensaios CBR's	83
	APÊNDICE B - Deflexões e tensões do pavimento agregados	
	convencionais e brita 1 reciclada	86
	APÊNDICE C - Orçamento de pavimentação com agregados	
	convencionais e brita 1 reciclada	94
	ANEXO A - Planta Baixa do projeto de pavimentação.....	102
	ANEXO B - Tabela de encargos sociais (Folha de Salários) – Sem	
	desoneração	104

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, as atividades da construção civil geram enormes quantidades diárias de resíduos tais como: argamassa, areia, cerâmicas, concretos, madeira, metais, tijolos, tintas, entre outros o que acarreta sérios problemas na gestão inadequada dos resíduos sólidos oriundos dos canteiros de obras (MACENA; LEME, 2017).

O Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA, 2012), mostrou em seu relatório de pesquisa que cada brasileiro gera entre 230 e 760 kg de Resíduos Sólidos da Construção Civil (RCC) por ano. Utilizando as estimativas populacionais demonstradas pelo IBGE em 2019, o país teria gerado, no mínimo, 48,3 milhões de toneladas no referido ano. Entretanto, segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública de Resíduos Especiais (ABRELPE, 2020), no ano de 2019 foram coletados apenas 44,5 milhões de toneladas.

Segundo Manfrinato *et al* (2018), a geração de RCC continua crescendo devido ao desperdício observado na execução de empreendimentos sejam das esferas pública ou privada, gerando problemas quando estes resíduos são dispostos incorretamente. Assim, sendo este um problema ambiental para a sociedade, com poucas alternativas práticas e carente de estudos no Brasil.

Porém, este problema não é recorrente somente no Brasil, mas no mundo inteiro. A estimativa é que em torno de 35% das quantidades geradas de RCC sejam direcionadas para aterros, sem nenhum tratamento adicional, embora as formas de reciclar e reutilizar sejam cada vez mais investigadas. Embora esforços para reciclar e reutilizar sejam cada vez mais viabilizados (MENEGAKI; DAMIGOS, 2018).

Marques Neto (2009) diz que uma das grandes dificuldades para o gerenciamento do RCC é a falta de recursos financeiros, além da pouca demanda de profissionais especializados para identificar os problemas e implementar soluções para a destinação correta dos RCC.

A indústria da construção, além de ser um dos pilares do desenvolvimento socioeconômico do país, é também potencial gerador de impacto ambiental em sua cadeia produtiva. Portanto, faz-se necessário destacar a importância da identificação e separação dos resíduos sólidos na fase da construção, assim como, nas atividades no canteiro de obra, incentivando a prática da reciclagem no âmbito da engenharia e construção civil (MACENA; LEME, 2017; MATEUS, 2019).

Guarapuava não teria um cenário diferente do que acontece no Brasil. A estimativa da produção de RCC para o ano de 2020 seria de 93.774 toneladas (GUARAPUAVA, 2020). Porém, segundo o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Guarapuava (PMGIRS), foram coletadas apenas 28.371 toneladas. Um dos principais objetivos da PMGIRS, seria seguir a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), onde os responsáveis ou proprietários de obras na cidade, destinariam os restos de material de construção civil (GUARAPUAVA, 2020).

Guarapuava contém apenas uma Usina de Reciclagem de RCC, dado esse contexto na esfera nacional e municipal, o presente trabalho visa fazer um estudo de viabilidade técnica e econômica da utilização do RCC em um projeto de pavimentação asfáltica. Com o intuito de investigar se é possível utilizar esse material em alguma camada do pavimento, trazendo uma solução viável para a utilização do RCC para que ele possa ser cada vez mais utilizado na cidade. Assim, sendo cada vez mais explorado com a finalidade de ser uma solução mais sustentável e/ou econômica.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo principal

Analisar a viabilidade técnico-econômica de se utilizar agregados reciclados em um projeto de pavimentação asfáltica.

2.2 Objetivo secundários

- Avaliar o impacto mecânico da substituição dos agregados convencionais por agregados reciclados nas composições de um Projeto de Pavimentação Asfáltica;
- Analisar a viabilidade econômica da utilização do agregado reciclado em um projeto de pavimentação no município de Guarapuava;
- Identificar a resistência do solo para a utilização dos agregados reciclados.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Política Nacional dos Resíduos Sólidos

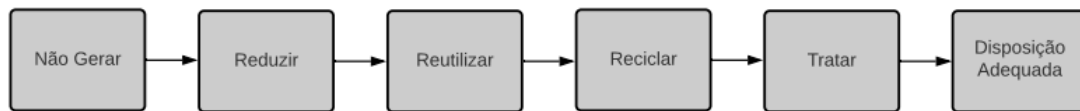
No dia 2 de agosto de 2010, foi decretada e sancionada pelo Presidente da República a Lei nº 12.305, alterando a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998. Esta Lei, institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), dispondo as diretrizes para a gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluindo os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público. Os objetivos desta Lei são: Art. 7º São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

- Art. 7º São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:
- I - proteção da saúde pública e da qualidade ambiental;
 - II - não geração, redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos resíduos sólidos, bem como disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos;
 - III - estímulo à adoção de padrões sustentáveis de produção e consumo de bens e serviços;
 - IV - adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;
 - V - redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;
 - VI - incentivo à indústria da reciclagem, tendo em vista fomentar o uso de matérias-primas e insumos derivados de materiais recicláveis e reciclados;
 - VII - gestão integrada de resíduos sólidos;
 - VIII - articulação entre as diferentes esferas do poder público, e destas com o setor empresarial, com vistas à cooperação técnica e financeira para a gestão integrada de resíduos sólidos;
 - IX - capacitação técnica continuada na área de resíduos sólidos;
 - X - regularidade, continuidade, funcionalidade e universalização da prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e de manejo de resíduos sólidos, com adoção de mecanismos gerenciais e econômicos que assegurem a recuperação dos custos dos serviços prestados, como forma de garantir sua sustentabilidade operacional e financeira, observada a Lei nº 11.445, de 2007;
 - XI - prioridade, nas aquisições e contratações governamentais, para:
 - a) produtos reciclados e recicláveis;
 - b) bens, serviços e obras que considerem critérios compatíveis com padrões de consumo social e ambientalmente sustentáveis;
 - XII - integração dos catadores de materiais reutilizáveis e recicláveis nas ações que envolvam a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;
 - XIII - estímulo à implementação da avaliação do ciclo de vida do produto;
 - XIV - incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético;
 - XV - estímulo à rotulagem ambiental e ao consumo sustentável
- (BRASIL, 2010, Artigo 7º)

A Lei, portanto, estabelece uma ordem da prioridade para às ações no gerenciamento de resíduos sólidos, onde a preferência seria a não geração, a redução, a reutilização, a reciclagem, o tratamento e somente por último, caso seja

necessário, a disposição mais adequada, conforme ilustrado na Figura 1 (MMA e ICLEI, 2012; BRASIL, 2010)

Figura 1 – Ordem de prioridade no gerenciamento de resíduos sólidos



Fonte: Adaptado MMA e ICLEI (2012)

Além disso, a PNRS foi de suma importância para a elaboração do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (PMGIRS) de Guarapuava, a partir do Decreto Municipal nº 4.128/2014 (GUARAPUAVA, 2014). Porém, o plano foi revisado para ser atualizado e adequado, de acordo com a Tomada de Preço nº 07/2019, aprovada em fase preliminar, em dezembro de 2020. A PMGIRS tem como objetivo principal, estar alinhada com as diretrizes da PNRS (GUARAPUAVA, 2020).

3.2 Resíduos Sólidos na Construção Civil

3.2.1 Definição

O Conselho Nacional do Meio Ambiente do Brasil (CONAMA), redigiu a Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002, sendo sua última alteração realizada pela Resolução nº 469/2015, na qual elaborou-se e estabeleceu-se diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos Resíduos da Construção Civil (RCC) no Brasil e definiu-se resíduos sólidos da construção civil como:

[...] os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha (BRASIL, 2002, Artigo 2º, inciso I)

3.2.2 Classes

Ainda segundo a Resolução nº 307, os RCC são classificados em quatro Classes: A, B, C e D conforme Quadro 1.

Quadro 1 – Classes de Resíduos da Construção Civil

CLASSE	CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS
Classe A	Resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras;
Classe B	Resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso.
Classe C	Resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem ou recuperação.
Classe D	Resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como, telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde

Fonte: Adaptado de Brasil (2002)

3.2.3 Geração de RCC

É explícito que a quantidade de resíduos gerados leva às sobrecargas dos sistemas de limpeza pública municipais, sendo que, no Brasil, estes podem representar de 50 a 70% em massa do total gerado, sendo que na verdade a coleta, transporte e disposição dos resíduos é responsabilidade dos geradores (Brasil, 2005). São coletados pelos municípios brasileiros, em média, mais de 122.000 toneladas diariamente de RCC (ABRELPE, 2019). Essa quantidade de entulho vem crescendo cada vez mais, e o estudo da ABRELPE (2020), mostra que em 2010 a coleta total foi de mais de 33,3 milhões de t/ano, e esse número cresceu para mais de 44,5 t/ano. Segundo a Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil

e Demolição (ABRECON), a principal causa de geração de entulhos, é no alto nível de perdas do setor produtivo, que pode chegar a cerca de 50% do material (ABRECON, 2018).

Aliado ao crescimento da quantidade de entulhos gerados, e com a resolução do CONAMA (2002), em seu estudo, Miranda *et al* (2009), a reciclagem de RCC acabou ganhando uma força extra no Brasil. No estudo do autor, em 2002, em nosso país, existiam apenas 16 Usinas de Reciclagem de Entulho (URE), com uma taxa de crescimento tímido, de até 3 usinas por ano. Após a publicação da resolução, a taxa de crescimento passou de 3 para 9 usinas instaladas por ano, chegando ao ano de 2008 com 47 URE's, sendo 24 públicas, e 23 privadas. Atualmente, segundo a ABRECON (2021) o Brasil conta com 350 Usinas distribuídas em todo seu território.

No trabalho realizado por Costa, Rosado e Penteadó (2017), mostrou-se que foi feita uma pesquisa com 63 trabalhos selecionados com as palavras-chave: “resíduo da construção civil”, “gerenciamento” e “Brasil”, destes 63, apenas 20 trabalhos contemplam os temas de geração e/ou caracterização dos RCC. Porém, apenas 10 trabalhos realizaram a caracterização gravimétrica dos resíduos da construção civil. Nesta análise, mostrou-se que 87% correspondem a RCC Classe A, 11% RCC classe B e 2% resíduos Classe C e Classe D (Quadro 1). A porcentagem segregada de cada um dos componentes está representada na Tabela 1.

Tabela 1 – Caracterização gravimétrica média dos trabalhos estudados

Materiais	Porcentagem
Concreto e argamassa	33,30%
Material cerâmico	21,74%
Madeira	18,85%
Demolição (diversos)	5,94%
Finos	4,05%
Papel/Plástico/Metal/Fios/Vidro	3,98%
Gesso	2,94%
Pedra/Rocha	2,63%
Tijolo	1,47%
Embalagens contaminadas	0,76%
Outros	0,65%
Fibrocimento	0,21%
Material orgânico	0,10%

Fonte: Adaptado de Costa, Rosa e Penteadó (2017)

A cidade de Guarapuava não é muito diferente com relação ao estudo mostrado anteriormente, segundo o estudo de Bilyk (2021), a Tabela 2 representa o percentual de cada um dos RCC's recebidos na Usina de reciclagem de Guarapuava.

Tabela 2 – Materiais recebidos na usina de reciclagem de Guarapuava - PR

Materiais	Porcentagem
Concreto e argamassa	28,78%
Solo e areia	25,45%
Plásticos	8,55%
Madeira	7,91%
Material cerâmico	7,53%
Tijolo	5,89%
Material Orgânico	2,44%
Pedras/Rocha	2,36%
Outros	2,33%
Papel/Papelão	1,91%
Gesso	1,82%
Embalagens contam.	1,40%
Metal	1,11%
Fibrocimento	1,09%
Vidro	0,73%
EPS	0,62%
Tintas/Solventes	0,99%

Fonte: Adaptado Bilyk (2021)

Dada a variabilidade apresentada nos estudos supracitados, evidente que os resíduos sólidos apresentam propriedades diversas, e os estudos de caracterização deste tipo de agregados devem ser efetuados com cuidado e precisão.

3.2.4 Destinação

Quanto à forma de destinação desses resíduos, a PNRS prevê que os de Classe A podem ser aproveitados no próprio canteiro de obras, mas se não for possível, devem ser encaminhados para usinas de reciclagem ou aterros específicos, que permitem sua reutilização ou reciclagem futura.

Já os de Classe B podem ser destinados às cooperativas de reciclagem ou áreas de transbordo e triagem, que são estabelecimentos privados destinados ao recebimento de RCC, para eventual transformação e posterior remoção e disposição. Os resíduos de Classe C devem ser separados dos demais e enviados, para aterros

sanitários preparados para esse tipo de recebimento. E por fim, os de Classe D devem ser separados e destinados aos aterros industriais licenciados.

Além da PNRS e das resoluções do CONAMA direcionadas para gestão de RCC, a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) elaborou algumas normas e especificações técnicas para melhorar o controle e acompanhamento da geração de resíduos até o seu destino (Quadro 2).

Quadro 2 – Normas e especificações técnicas para o gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil

NORMAS E ESPECIFICAÇÕES TÉCNICAS	DEFINIÇÃO
ABNT NBR 15112	Determina as diretrizes para projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos.
ABNT NBR 15113	Determina as diretrizes mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de aterros de resíduos sólidos da construção civil classe A e de resíduos inertes
ABNT NBR 15114	Determina as diretrizes mínimas exigíveis para projeto, implantação e operação de áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil classe A.
ABNT NBR 15115	Estabelece os critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, denominado agregado reciclado, em obras de pavimentação.
ABNT NBR 15116	Determina os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.

Fonte: Adaptado de ABNT (2004a/b/c/d/ef)

3.3 Definição de agregados reciclados

Segundo a NBR 7211, de 2005, define-se como agregados graúdos e miúdos como:

3.1 agregado miúdo: Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 µm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1.

3.2 agregado graúdo: Agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248, com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1 (BRASIL, 2005).

Complementar à NBR, os agregados para Construção Civil são materiais granulares sem forma e volume definidos, que podem ser naturais ou artificiais, com o intuito de se fabricar produtos utilizados construção civil (LA SERNA; REZENDE, 2009).

Segundo Brasileiro e Matos (2015), a construção civil é um dos setores que apresenta maior potencial para absorver os resíduos sólidos. No mesmo estudo, é mostrado que a reciclagem dos RCC's pode ser aplicada para diversos fins, tais como: Camadas de base e sub-base para pavimentação, fabricação de argamassas de assentamento e revestimento, fabricação de concretos, fabricação de pré-moldados (blocos, meio-fio, dentre outros), camadas drenantes etc.

O Quadro 3 (ABRECON, 2021) representa alguns produtos que a reciclagem de RCC faz, as suas características, e qual o seu uso recomendado na construção civil.

Quadro 3 – Produtos reciclados e suas características

Produto	Características	Uso Recomendado
Areia reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 4,8 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Argamassas de assentamento de alvenaria de vedação, contrapisos, solo-cimento, blocos e tijolos de vedação.
Pedrisco reciclado	Material com dimensão máxima característica de 6,3 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de artefatos de concreto, como blocos de vedação, pisos intertravados, manilhas de esgoto, entre outros.
Brita reciclada	Material com dimensão máxima característica inferior a 39 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Fabricação de concretos não estruturais e obras de drenagens.
Bica corrida	Material proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil, livre de impurezas, com dimensão máxima característica de 63 mm (ou a critério do cliente).	Obras de base e sub-base de pavimentos, reforço e subleito de pavimentos, além de regularização de vias não pavimentadas, aterros e acerto topográfico de terrenos.
Rachão	Material com dimensão máxima característica inferior a 150 mm, isento de impurezas, proveniente da reciclagem de concreto e blocos de concreto.	Obras de pavimentação, drenagens e terraplenagem

Fonte: Adaptado ABRECON (2021)

Portanto, pode-se observar por meio do Quadro 3 que os RCC'S podem ser aplicados para os mais variados fins na indústria da construção civil, seja para fins

nobres como argamassas, como blocos e tijolos, seja como fins menos nobres como por exemplo preenchimento de contra pisos, regularização de desníveis. Cabe ao projetista verificar tanto a viabilidade técnica mecanicista, quanto a garantia de não ocorrência de patologias bem como efetuar uma análise de viabilidade econômica.

3.4 Processos de reciclagem do RCC

Segundo Bilyk (2021), o processo de reciclagem do RCC na usina de reciclagem em operação de Guarapuava – PR, dá-se por:

O processo se inicia com o recebimento das caçambas, sejam elas estacionárias ou basculantes. Esse recebimento fica condicionado ao aceite da usina após uma análise visual dos materiais presentes nas caçambas. Os resíduos chegam sem nenhum tipo de separação e são acondicionados em montes para depois iniciar os processos de triagem e reciclagem destes materiais.

Em uma mesma caçamba é possível observar o recebimento de diversos tipos de materiais, como por exemplo: concreto, plástico, telhas, EPS, metal madeira, tijolos, embalagens contaminadas e outros. Após o recebimento, inicia-se o processo de triagem e separação. Com auxílio de uma retroescavadeira os resíduos são colocados em uma espécie de peneira vibratória com a finalidade de retirar os materiais finos, como por exemplo a terra que atrapalha no processo de reciclagem. Esse material fino é o primeiro material resultante da usina e é acondicionado em montes podendo ser utilizado para execução de aterros.

Após a retirada de todo o material fino, o resíduo não passante pela peneira é encaminhado para o processo de separação, a qual, é realizada em bags e baias. Esses resíduos passam lentamente por uma esteira rolante e de forma manual é retirado e separado: madeira, metal, plástico, papel/papelão e resíduos a serem destinados ao aterro sanitário. Já os resíduos passíveis de reciclagem para se tornar agregado, forma-se um monte para posterior britagem. Com essa separação, os recicláveis (metal, papel e papelão) são revendidos a empresas que tratam e reciclam esses materiais. Já a madeira recebe tratamento na própria usina (Figura 11), onde passa por um processo de trituração, transformando em cavaco para ser comercializado para uso em caldeiras e geração de energia.

Entretanto, junto com o RCC recebido na usina, normalmente é encontrado materiais que não tem uma reciclagem definida ou viável. Nesse caso esses materiais são separados e encaminhados ao aterro sanitário. Estes materiais são tratados na usina como contaminantes, pois atrapalham, dificultam ou até impossibilitam a reciclagem dos demais RCC.

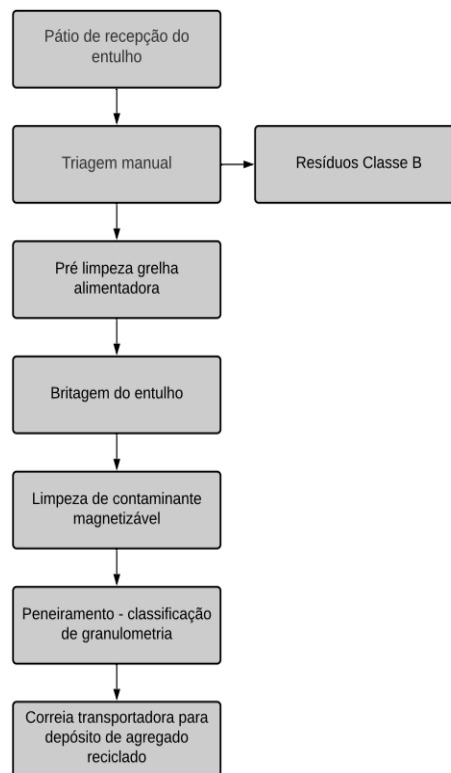
Por fim, tem-se o material que pode ser britado e se tornar agregado reciclado. Esses materiais normalmente são resíduos de concreto, argamassa, tijolos e cerâmicas que passam por uma máquina trituradora e após isso, por peneiras para separar de acordo com seu diâmetro e então obter-se os três tipos de agregado produzido pela usina. Esses agregados são estocados na própria usina para posterior comercialização.

Complementar a isso, Manfrinato et al. (2008) diz que o processo de reciclagem de entulho é recente, onde inicialmente o material é recebido no pátio da indústria e é feito uma triagem manual, após isso são separados os resíduos e é feito uma limpeza da grelha que receberá os entulhos. Feito isso, é realizado a britagem

do mesmo, limpando o material britado de contaminantes magneticamente, posteriormente realizando o peneiramento do material britado para a classificação granulométrica do agregado reciclado.

Por fim, o material após feito todos esses processos, é transportado para o depósito onde ficará alojado o material final. O fluxograma (Figura 2) a seguir mostra o processo de reciclagem dos RCC's descrito acima.

Figura 2 – Fluxograma do processo de reciclagem dos RCC's



Fonte: Adaptado Manfrinato et al. (2008)

O fornecimento típico dos materiais na Usina de Reciclagem de Guarapuava são areia reciclada, brita 1 reciclada e rachão respectivamente expostos na Fotografia 1.

Fotografia 1 – Agregados reciclados comercializados na Usina de Reciclagem de Entulho de Guarapuava – PR



Fonte – Autorial Própria (2021)

3.5 Orçamento em Obras

O orçamento da obra, segundo Limmer (1996 p. 86) tem como definição “[...] a determinação dos gastos necessários para a realização de um projeto, de acordo com um plano de execução previamente estabelecido”. O mesmo autor ainda afirma que um orçamento deve definir o custo da execução de cada atividade ou serviço, ter um documento contratual exemplificando o empreendimento, para não ter dúvidas entre contratado e contratante e servir como referência na análise dos rendimentos futuros e, por fim, servir como um controle de execução, desenvolvimento, para futuro aperfeiçoamento técnico e competitividade da empresa.

A orçamentação também pode ser definida como a determinação dos custos prováveis na execução das obras, ou seja, o orçamento é a soma dos custos diretos, custos indiretos, custos de acessórios junto com o Benefício e Despesas Indiretas (BDI) e o lucro para se chegar ao preço final de venda (MATTOS, 2006).

3.5.1 Custos Diretos

Os custos diretos são aqueles mais fáceis de atribuir valor, relacionados diretamente ao produto final. Para a construção civil, Limmer (1996) ressalta que são gastos feitos com insumos, como mão de obra, materiais ou equipamentos.

3.5.2 Custos Indiretos

Os custos indiretos consistem na soma de todos os gastos com elementos que se somam para a elaboração do produto, ou seja, tudo o que não apareceu como mão de obra, sendo que, no âmbito da construção civil, Limmer (1996) afirma que podem ser gastos com a alocação de uma determinante atividade ou serviço, taxas e contas que, no final, são diluídos pelo projeto no todo.

Para Mattos (2006), o custo indireto fica entre 5% a 30% do custo total da construção e os grandes influenciadores desse número são: a localização geográfica, pois um local remoto pode gerar muita despesa, a política da empresa - considerando que a quantidade de funcionários em cargos elevados pode onerar, o prazo, pois despesas administrativas estão ligadas diretamente ao tempo de execução, a complexidade da obra, porque obras difíceis tendem a exigir tempo extra e supervisão em campo.

3.6 Pavimento

3.6.1 Definição

Segundo o DNIT (2006), o manual de pavimentação define o pavimento como uma superestrutura composto por múltiplas camadas de espessuras finitas sobre uma fundação chamada subleito. O subleito, popularmente conhecido como solo é uma camada teoricamente infinita, que é responsável pela infra-estrutura do pavimento. Assim como o subleito, as camadas que os sobrepõe devem ser estudados afim de se determinar até onde este conjunto é solicitado pelos impactos solicitados oriundos do tráfego.

Além disso, o acervo dos materiais utilizados no pavimento é extenso, sendo estes de diferentes granulometrias, resistências mecânicas e custos, resultando em um alto grau de complexidade no que diz respeito seu dimensionamento. Principalmente no ato de elaborar essa superestrutura suportando às tensões e deformações impostas pelo tráfego com o menor custo.

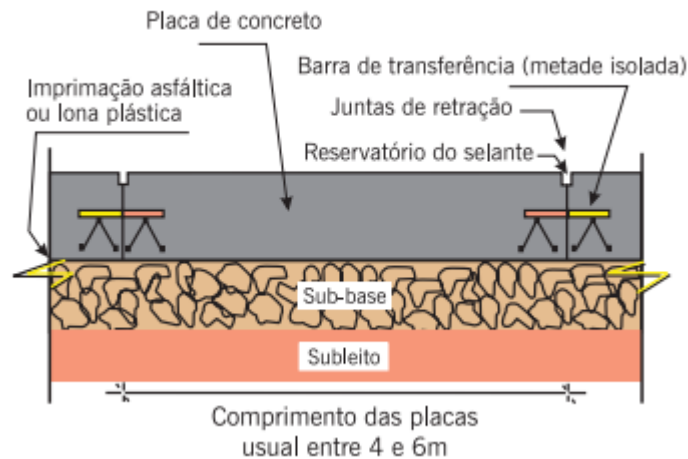
Ainda segundo o mesmo manual, descreve as camadas dos pavimentos como:

- a) Pavimento – é a estrutura construída após a terraplanagem e destinada, econômica e simultaneamente em seu conjunto, a:
- resistir a distribuir ao subleito os esforços verticais oriundos do tráfego;
 - melhorar as condições de rolamento quanto à comodidade e conforto;
 - resistir aos esforços horizontais (desgastes), tomando mais durável a superfície de rolamento.
- b) Subleito – é o terreno de fundação do pavimento;
- c) Leito – é a superfície obtida pela terraplanagem ou obra-de-arte e conformada ao seu greide e perfis transversais;
- d) Greide do leito – é o perfil do eixo longitudinal do leito;
- e) Regularização – é a camada posta sobre o leito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações; a regularização não constitui, propriamente uma camada de pavimento, sendo a rigor, uma operação que pode ser reduzida em corte do leito implantado ou em sobreposição a este, de camada com espessura variável;
- f) Reforço do subleito – é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da de regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito;
- g) Sub-base – é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre regularização;
- h) Base – é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento;
- i) Revestimento – é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste.

Os pavimentos são tradicionalmente divididos em dois grupos, os pavimentos flexíveis e os pavimentos rígidos. Segundo Bernucci *et. al* (2008), há uma tendência de nomenclatura diferente, sendo pavimentos asfálticos e pavimentos de cimento *Portland* respectivamente.

Os pavimentos rígidos, segundo o autor, são aqueles em que o revestimento é uma placa de concreto de cimento *Portland*, onde a espessura é fixada em função da resistência à flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes. Estas placas elas podem ser armadas ou não com barras de aço, solidarizadas com juntas de dilatação e armaduras de transferência. A Figura 3 representa o corte longitudinal típico de um pavimento rígido.

Figura 3 – Corte longitudinal do pavimento rígido

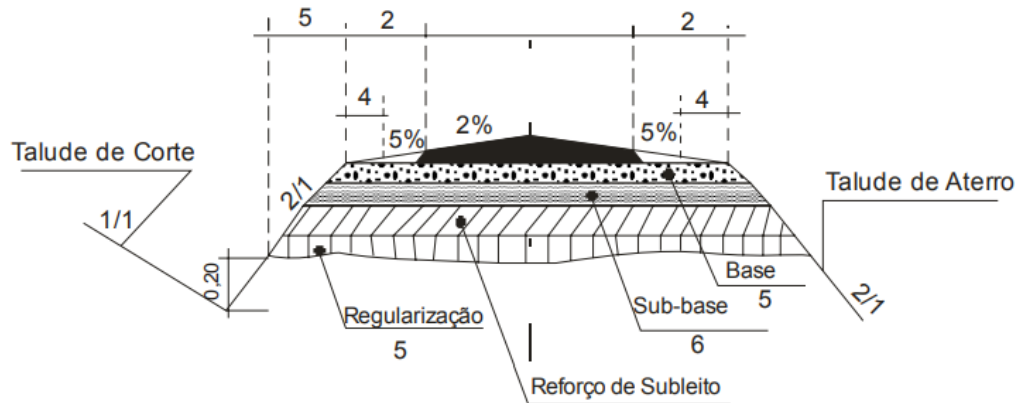


Fonte: Bernucci *et. al* (2008)

Já os pavimentos asfálticos são aqueles compostos por uma mistura de agregados e ligantes asfálticos. Normalmente constituído por quatro camadas principais: Revestimento asfáltico, base, sub-base e reforço do subleito, sendo que o revestimento asfáltico é responsável por estar em contato direto com as rodas dos veículos e pode ser composto por camada de rolamento. O revestimento asfáltico é a camada superior destinada a resistir diretamente às ações do tráfego, e transmiti-las de forma atenuada as camadas inferiores, além de impermeabilizar o pavimento e melhorar as condições de rolamento.

O revestimento flexível se difere estruturalmente em relação ao rígido pela deformação atuante. Enquanto os pavimentos flexíveis trabalham com alto grau de flexibilidade, os pavimentos rígidos se deformam igualmente, de acordo com o comportamento de fundação rígida (bloco rígido, sapata rígida). A Figura 4 representa o corte esquemático, para uma melhor visualização de como é constituído as camadas do pavimento asfáltico.

Figura 4 – Corte longitudinal do pavimento flexível



Fonte: DNIT (2006)

O enfoque deste trabalho é a aplicação do RCC em pavimentos flexíveis.

3.6.2 Pavimento com Agregado de RCC

A utilização dos agregados de RCC em camadas para pavimentação é algo que se mostrou viável tanto na parte econômica quanto na utilização deste material já que é vasta a quantidade de materiais gerados pela construção civil e pela possibilidade destes materiais serem reciclados (MOTTER, 2013). Segundo a ABRECON (2021), a utilização de brita reciclada para bases e sub-base de pavimentos flexíveis é a forma que exige menor utilização de tecnologia e acaba implicando um menor custo no processo. A Figura 5 mostra a utilização de agregados reciclados em pavimentação.

Figura 5 – Agregados reciclados em pavimentação



Fonte: ABRECON (2021)

Segundo MOTTER (2013), em sua revisão bibliográfica, são várias as cidades brasileiras e estrangeiras que fazem uso de agregados reciclados em pavimentos, tendo resultados satisfatórios, já que são alternativas para substituir materiais naturais que não são renováveis. A autora também salienta que este material deve ser aplicado em vias de pouco tráfego, sendo uma severa limitação de uso. Em seu estudo, ela reuniu outros 11 autores que demonstraram algumas cidades brasileiras que utilizavam os agregados recicláveis em pavimentação, principalmente como bases, sub-bases e reforços do subleito. Em Belo Horizonte, por exemplo, de 1996 até julho de 2001 foram utilizadas 136.840 toneladas, resultando em aproximadamente 400 km de ruas pavimentadas.

A substituição de frações de agregados graúdos por agregados reciclados na utilização na camada de Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ), a quantidade de estudos era recente e escassa. Nas conclusões, a autora mostra que a absorção do ligante do pavimento flexível a maior nos agregados graúdos reciclados em comparação com os agregados graúdos naturais. Enquanto os naturais tinham taxa de absorção entre 0,5% e 0,8%, os reciclados variou entre 4,3% e 9,1%. Em seu estudo, SANTOS (2018), conclui que devido a maior porosidade dos agregados

reciclados, aumentou o consumo do ligante em 6,1%, o que pode dificultar a utilização dos agregados reciclados, no âmbito econômico, visto que o ligante asfáltico é o material de maior custo da composição.

Vale salientar que Motter ainda conclui que os agregados reciclados obtiveram desempenhos satisfatórios em relação aos convencionais, cumprindo todos os critérios exigidos em normas. Os critérios exigidos na norma ABNT 15115 para utilização dos agregados reciclados em pavimentação estão demonstrados no Quadro 4.

Quadro 4 – Critérios exigidos em norma destinado a pavimentação

Aplicação	ISC (CBR) %	Expansibilidade %	Energia de Compactação
Material para execução de reforço do subleito	≥ 12	$\leq 1,0$	Normal
Material para execução de revestimento primário e sub-base	≥ 20	$\leq 1,0$	Intermediária
Material para execução de base de pavimento	≥ 60	$\leq 0,5$	Intermediária ou modificada

Fonte: Adaptado de Brasil (2004)

3.6.3 Dimensionamento de Pavimentos Flexíveis

No Brasil, o dimensionamento dos pavimentos flexíveis nos primeiros dois terços do século XX era estritamente empírico, conhecido como método *California Bearing Ratio* (CBR) ou método AASHTO até 1986, segundo Bernucci et. al (2008). Segundo o manual de pavimentação do DNIT (2006), a capacidade de Suporte do subleito e dos materiais constituintes dos pavimentos é feita pelo CBR esse método consiste em calcular cada uma das camadas do pavimento flexível, citadas anteriormente.

O método CBR consiste em calcular as sucessivas camadas da infraestrutura do pavimento, a fim de evitar o cisalhamento das camadas de suporte. Uma limitação deste método é a não consideração da fadiga da camada de asfalto, a degradação do módulo de elasticidade e a plasticidade acumulada.

Para realizar o dimensionamento dos pavimentos, faz-se necessário primeiramente conhecer que tipo de solo em que será executado o projeto de pavimentação, com isso, o DNIT separa os solos de acordo com o grupo Sistema Unificado de Classificação de Solos (SUCS).

Este sistema tem como finalidade identificar os solos de acordo com a porcentagem de pedregulhos, areia e materiais finos, analisando também a curva granulométrica do solo, índices de plasticidade e compressibilidade. O Quadro 5 representa quais são os tipos de solo através de símbolos e quais são os solos representados por esses grupos.

Quadro 5 – Grupo de solos de acordo com o SUCS

Símbolo dos Grupos	Significado dos Símbolos do SUCS
GW	Cascalho bem graduado, cascalho e areia sem muitos finos
GP	Cascalho mal graduado, cascalho e areia sem muitos finos
GM	Cascalho siltoso com areia
GC	Cascalho argiloso com areia
SW	Areia bem graduada, com cascalho e sem muitos finos
SP	Areia mal graduada, com cascalho e sem muitos finos
SM	Areia siltosa, mistura de areia e silte ou limo
SC	Areia argilosa, mistura de areia e argila
ML	Material siltoso e areias muito finas, pó-de-pedra, areias finas siltosas ou argilosas, ou siltes argilosos com baixa plasticidade
CL	Argilas magras, argilas de plasticidade baixa ou média, argilas com cascalho, areia ou silte
OL	Siltes orgânicos, argilosos ou não, com baixa plasticidade
MH	Siltes, limos, areia finas micáceas ou diatomáceas, solos siltosos, siltes elásticos
CH	Argilas gordas, de plasticidade média ou alta
OH	Argilas orgânicas de plasticidade média ou alta, siltes orgânicos
Pt	Turfa e outros solos altamente orgânicos

Fonte – DNIT (2006).

Além disso, segundo Senço (2007) o tipo de subleito tem valores prováveis para CBR, estipulado de acordo com o grupo SUCS sendo representado no Tabela 3. Conhecer o solo que está trabalhando é de suma importância, pois o valor do CBR está ligado diretamente na espessura do pavimento.

Tabela 3 – Provável valor de CBR para os tipos de solo

Solo (Classificação unificada)	CBR provável (%)
GW	40 a 80 (ou mais)
GP	30 ou 60 (ou mais)
GM	20 a 60 (ou mais)
GC e SW	20 a 40
SP e SM	10 a 40
SC	5 a 20
ML, CL, CH	2 (ou menos) a 15
MH	2 (ou menos) a 10
OL, OH	2 (ou menos) a 5

Fonte – Senço (2007)

Após conhecer o subleito que será executado o projeto de pavimentação, é necessário escolher quais os materiais que designarão as camadas do pavimento. Com isso, o Quadro 6 estabelece-se algumas condições para a classificação dos materiais empregados no pavimento, segundo o DNIT (2006).

Quadro 6 – Condições para as camadas do pavimento flexível

Camada	Condições
Material do subleito	Devem apresentar uma expansão, medida no ensaio C.B.R. menor ou igual a 2% e um C.B.R. $\geq 2\%$
Material para reforço do subleito	Devem apresentar C.B.R. maior que o do subleito, ou seja, $\geq 2\%$ e expansão $\leq 2\%$
Material para execução de sub-base	Devem apresentar C.B.R. $\geq 20\%$, I.G = 0 e expansão $\leq 1\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb)
Material para execução de base de pavimento	Devem apresentar C.B.R. $\geq 80\%$ e expansão $\leq 0,5\%$ (medida com sobrecarga de 10 lb), Limite de liquidez $\leq 25\%$ e Índice de plasticidade $\leq 6\%$

Fonte: Adaptado, DNIT (2006)

Ainda segundo o manual de Pavimentação do DNIT, caso o limite de liquidez seja maior a 25% e/ou índice de plasticidade superior a 6, o material poderá ser empregado como base de pavimento (satisfeitas as demais condições), desde que o equivalente de areia seja superior a 30.

3.6.4 Espessura das camadas do pavimento

O dimensionamento do pavimento pelo método do CBR é calculado a espessura total do pavimento, em função dos valores de N e CBR, em função destes valores, são determinados a espessura de cada uma das camadas que irão compor a estrutura (DNIT, 2006).

A fim de se determinar a espessura do pavimento, é necessário utilizar o coeficiente de equivalência estrutural em cada uma das camadas, devido ao acervo de diferentes materiais que podemos utilizar na constituição do pavimento. Cada material utilizado tem um comportamento mecânico e estrutural característico para se contemplar a diferença de rigidez entre os materiais (solo e asfalto), introduz-se o coeficiente estrutural K conforme a Tabela 4:

Tabela 4 – Coeficiente de equivalência estrutural

Componentes do Pavimento	Coeficiente K
Base ou revestimento de concreto betuminoso	2,00
Base ou revestimento pré-misturado a quente, de graduação densa	1,70
Base ou revestimento pré-misturado a frio, de graduação densa	1,40
Base ou revestimento betuminoso por penetração	1,20
Camadas granulares	1,00
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, superior a 45 kg/cm	1,70
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 45 kg/cm e 28 kg/cm	1,40
Solo cimento com resistência à compressão a 7 dias, entre 28 kg/cm e 21 kg/cm	1,20

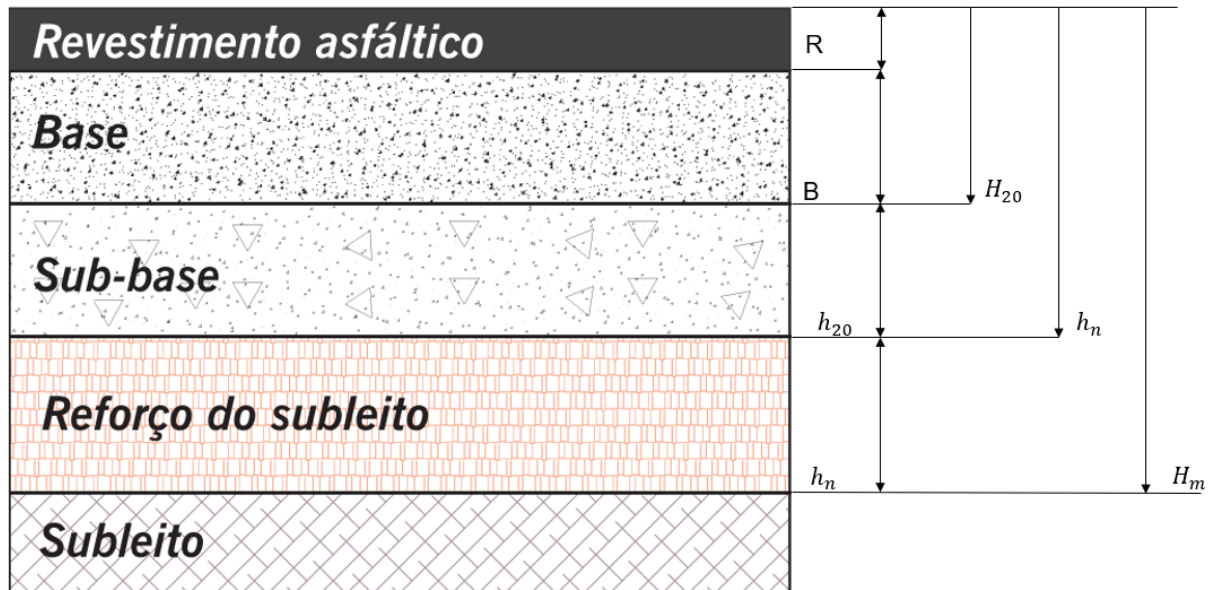
Fonte: DNIT (2006)

Os coeficientes são designados da seguinte forma, de acordo com as camadas que pertencem:

- Revestimento: K_r ;
- Base: K_b ;
- Sub-base: K_s ;
- Reforço: K_{ref} .

As espessuras das camadas do pavimento são expressas conforme as siglas representadas na Figura 6:

Figura 6 – Dimensionamento do pavimento



Fonte: Adaptado de Bernucci *et. al* (2008)

Sendo:

- R: Espessura da camada de revestimento (cm);
- B: Espessura da camada de base (cm);
- h₂₀: Espessura da camada de sub-base (cm);
- h_n: Espessura da camada de reforço do subleito (cm)
- H₂₀: Espessura até a sub-base (cm);
- H_n: Espessura até o reforço do subleito (cm);
- H_m: Espessura até o subleito (cm).

É adotado pelo método CBR, uma espessura mínima para os revestimentos, com o propósito de proteger a base dos esforços causados pelo tráfego. O valor é obtido em função do número N, utilizado principalmente em pavimentos com bases de comportamento puramente granular (DNIT, 2006), estes valores estão representados na Tabela 5:

Tabela 5 – Espessuras mínimas de revestimento

N	Espessura Mínima de Revestimento Betuminoso
$N \leq 10^6$	Tratamentos superficiais betuminosos
$10^6 > N \leq 5 \times 10^6$	Revestimentos betuminosos com 5,0 cm de espessura
$5 \times 10^6 < N \leq 10^7$	Concreto betuminoso com 7,5 cm de espessura
$10^7 < N \leq 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 10,0 cm de espessura
$N > 5 \times 10^7$	Concreto betuminoso com 12,5 cm de espessura

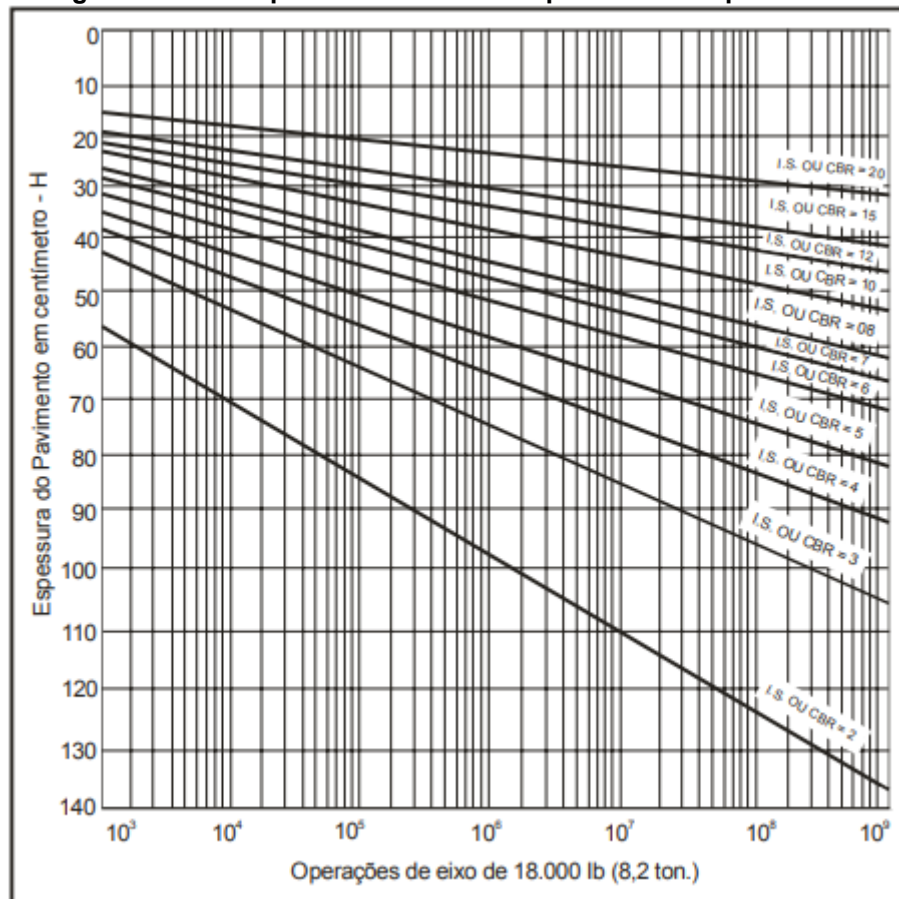
Fonte: DNIT (2006)

Sendo determinada a espessura do revestimento asfáltico utiliza-se a Equação 1 que determina a espessura total do pavimento. Onde H_t representa a espessura total do pavimento em centímetros, N seria o número de repetições de eixo padrão (8,2 toneladas) e o CBR seria o valor da resistência do subleito.

$$H_t = 77,67 * N^{0,0482} * CBR^{-0,598} \quad \text{Equação 4}$$

Esta equação pode ser utilizada para determinar a espessura de alguma camada do pavimento que possua valor de CBR, como por exemplo base ou sub-base de solo cimento. Uma maneira análoga de se obter a espessura do pavimento inteiro exposto anteriormente seria através do ábaco (Figura 7) a seguir:

Figura 7 – Ábaco para determinar as espessuras dos pavimentos



Fonte: DNIT (2006)

Após determinar o valor da espessura total do pavimento, faz-se necessário descobrir os valores de H_m , H_n e H_{20} com o intuito de obter as espessuras de base (B), sub-base (h_{20}) e reforço do subleito (h_n) respectivamente. Essas espessuras são

encontradas através das inequações a seguir, representadas pelas Equações 2, 3 e 4 sucessivamente.

$$R * K_r + B * K_b \geq H_{20} \quad \text{Equação 2}$$

$$R * K_r + B * K_b + h_{20} * K_s \geq Hn \quad \text{Equação 3}$$

$$R * K_r + B * K_b + h_{20} * K_s + h_n * K_{ref} \geq Hm \quad \text{Equação 4}$$

3.6.5 Número de repetições (N)

Para realizar o dimensionamento de um projeto de pavimentação, é imprescindível realizar a contagem de tráfego e determinação do número equivalente de operações do eixo simples padrão (N), o DNIT (2006), determina que o N é contabilizado por veículos com carga de 8,2 t (18.000 lb), conhecidos como eixo simples padrão. Para encontrar o N, é necessário medir o volume médio de tráfego (Equação 5) extrapolado para o período do projeto, e finalmente calcular o número de repetições de eixo padrão N (Equação 7), afim de se obter o N que estará representado na Equação 7.

$$V_m = \frac{VI * [(2 + (P - 1) * \frac{t}{100})]}{2} \quad \text{Equação 5}$$

Onde:

- VI: Volume diário de tráfego no ano de abertura em um sentido;
- t: taxa de crescimento anual, em progressão aritmética (%);
- P: Período do Projeto em anos.
- V_m : Volume médio diário de tráfego em um sentido

Após obter-se o valor de V_m , é necessário calcular o volume total de tráfego (V_m), descrito na Equação 6:

$$V_m = 365 * P * V_m \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

- VI: Volume diário de tráfego no ano de abertura em um sentido;

- P: Período do Projeto em anos.
- V_m : Volume médio diário de tráfego em um sentido

Após a realização do cálculo das duas equações anteriores, conhecendo o valor de V_t , poderemos calcular o N, expresso na Equação 7:

$$N = V_t * FE * FC * FC \text{ ou } N = V_t * FV \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

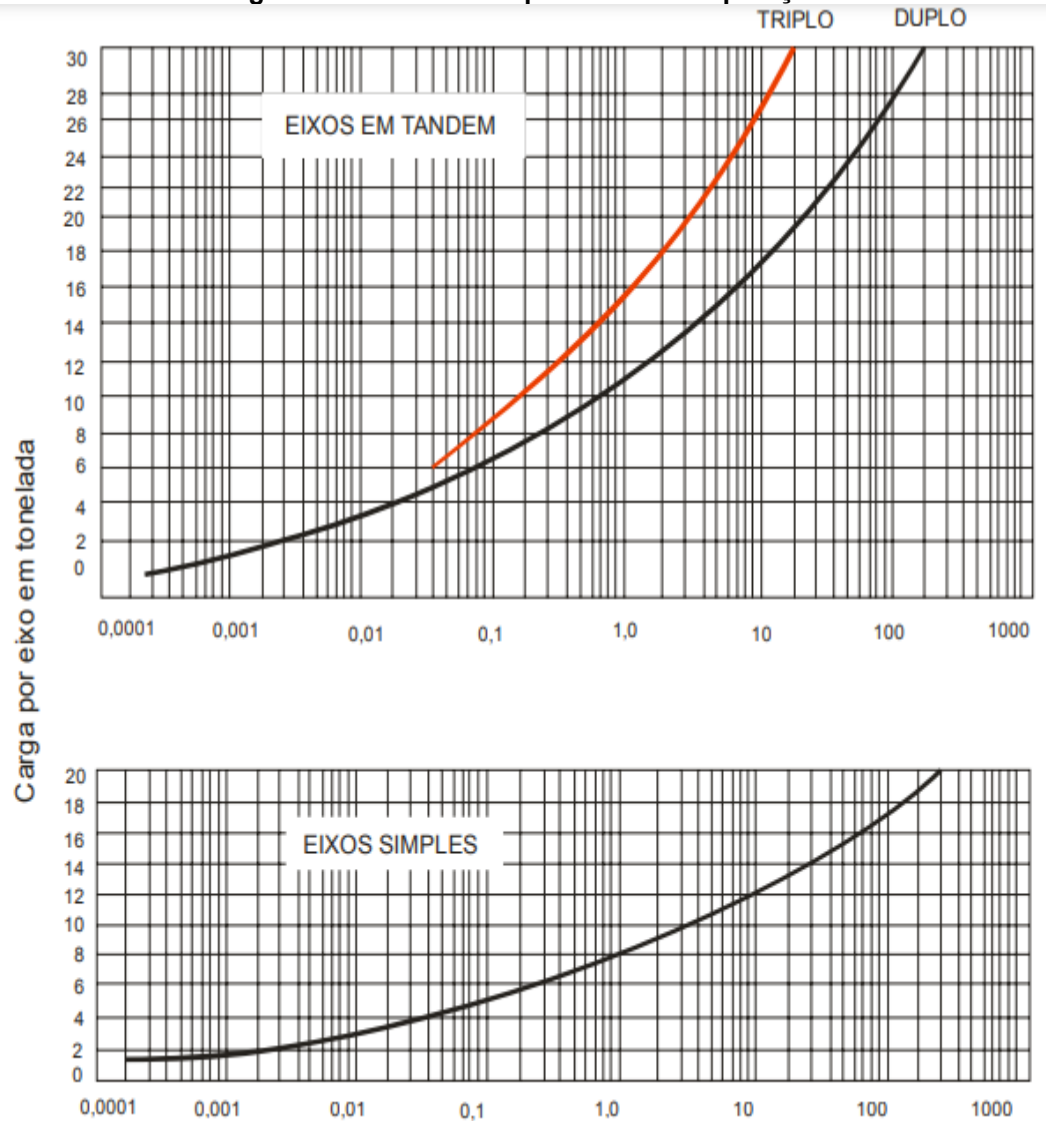
- V_t : Volume total de tráfego em um sentido durante o período;
- N: Número equivalente de operações do eixo simples padrão
- FE: Fator de eixos, número que multiplicado pelo número de veículos, resulta no número de eixos correspondentes.
- FC: Fator de Carga, número que multiplicado pelo número de eixos, resulta no número de eixos equivalentes ao eixo padrão
- FV: Fator de veículo, número que multiplicado pelo número de veículos resulta no número de eixos equivalentes ao eixo padrão

Para realizar o cálculo dos Fatores citados anteriormente, faz-se necessário ter a quantidade de veículos que operam no tráfego do projeto de pavimentação, sendo necessário realizar uma contagem discriminada de cada um dos veículos. Essa contagem pode ser feita por balanças, sensores e até câmeras com algoritmos de inteligência artificial. Segundo o DNIT (2006), os veículos são classificados nas seguintes categorias:

- Automóveis
- Ônibus
- Caminhões leves, com dois eixos simples, de rodas simples
- Caminhões médios, com dois eixos, sendo o traseiro de rodas duplas
- Caminhões pesados, com dois eixos, sendo o traseiro “tandem”
- Reboque e semi-reboques: as diferentes condições de veículos, em unidades múltiplas

Por fim, conhecendo o tráfego estudado, utiliza-se os seguintes valores para cálculo do fator de equivalência que estão demonstrados na Figura 8:

Figura 8 – Fatores de equivalência de operação



Fonte: DNIT (2006)

Para o cálculo do Fator de eixos, é utilizado a Equação 8:

$$FE = \frac{n}{V_t} \quad \text{Equação 8}$$

Onde:

- n: Número total de eixos;
- V_t : Volume total de veículos.

Para realizar o cálculo do Fator de veículo (FV), utiliza-se a equação 9:

$$FV = FE * FC$$

Equação 9

Outra maneira de se calcular o FV seria através do somatório dos FV's individuais (FVi), multiplicado pela porcentagem de veículos, de acordo com a categoria que estes veículos pertencem no projeto que está sendo estudado, sendo este representado na Equação 10.

$$FE = \frac{\sum(Pi) * (FVi)}{100}$$

Equação 10

Vale salientar que segundo o DNIT (2006), o FVi para automóveis e caminhões leves, embora sejam possíveis de se calcular, são desprezados devido não terem um peso considerável em relação ao eixo padrão, assim, os FVi's de interesse são para caminhões médios, pesados e reboques e semi-reboques.

3.6.6 Método mecanístico-empírico MeDiNA

Partindo do pressuposto que o método CBR consiste em uma maneira empírica de se dimensionar o pavimento, fez-se necessário uma atualização neste processo nos últimos anos, sendo assim, um *software* chamado SISPAV foi desenvolvido inicialmente por Franco (2007) e posteriormente denominado Método de Dimensionamento Nacional (MeDiNa). Este *software* foi elaborado através de pesquisas do DNIT em parceria com o COPPE/UFRJ e a Rede Temática de Asfaltos (Pereira, 2021).

O *software* possui um manual de utilização, elaborado por Franco e Motta (2020) e é composto de três programas: Análise Elástica de Múltiplas Camadas (AEMC), que calcula tensões, deformações na estrutura do pavimento, BackMeDiNa, que realiza a retroanálise dos módulos de resiliência das camadas do pavimento a partir de bacias deflectométricas levantadas em campo por equipamentos do tipo FWD. Por fim, o MeDiNa, que realiza a verificação e o dimensionamento de estruturas dos pavimentos mecanístico-empírico por meio da rotina AEMC de análise de camadas elásticas de múltiplas camadas (Franco e Motta, 2020).

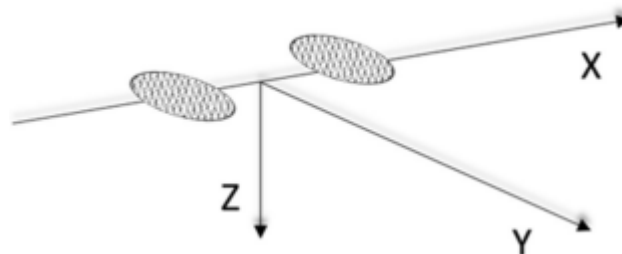
3.6.6.1 AEMC

Segundo o manual de utilização do MeDiNa (Franco e Motta, 2020), o *software* é capaz de calcular as tensões e deformações em estruturas de cada uma das camadas do pavimento, fazendo a análise de camadas elásticas, com no mínimo 2 camadas e podendo ser até 8 camadas sob carregamento de rodas do tipo eixo rodoviário.

Para o conhecimento das tensões e deformações, o programa adotou a carga da roda como uniformemente distribuída em uma área de contato circular entre o pneu e a superfície do pavimento. Conhecendo isso, é possível realizar o cálculo, que é feito através da integração de Gauss-Laguerre no cálculo das equações integrais.

Tratando-se de tensões e deformações em todas as direções, o *software* adotou um sistema de coordenadas X, Y e Z, onde X é perpendicular ao rolamento, Y é no sentido do rolamento e Z ao longo da profundidade do pavimento, conforme demonstra a Figura 9.

Figura 9 – Sistema de coordenadas do AEMC



Fonte – Franco e Motta (2020).

Após inserir no *software* todas as informações necessárias a respeito das características das camadas, selecionando os materiais, com suas respectivas profundidades, módulo de resiliência e massa específica, o mesmo retorna com alguns valores que estão expostos na Tabela 6.

Tabela 6 – Símbolos e significados do software com unidades de medida

Símbolo	Significado	Un.
X, Y	Distâncias no plano horizontal	cm
Z	Profundidade	cm
Ux, Uy, Uz	Deslocamentos nos eixos x, y e z respectivamente	μm
Sx, Sy, Sz	Tensões no plano X, Y e Z respectivamente	MPa
Sxy, Sxz, Syz	Tensões de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente	MPa
s1, s2, s3	Tensões principais	MPa
sOctNor, sOctCis	Tensões octaédricas normal e de cisalhamento	MPa
Ex, Ey, Ez	Deformações específicas no plano X, Y e Z respectivamente	m/m
Exy, Exz, Eyz	Deformações específicas de cisalhamento nos planos XY, XZ e YZ respectivamente	m/m
e1, e2, e3	Deformações específicas principais	m/m
Ty, Tx, Tz	Distância entre eixos e entre rodas e a bitola do eixo respectivamente	cm

Fonte – Adaptado de Franco e Motta (2020).

Para que o aplicativo consiga funcionar com exatidão alguns critérios são exigidos, que são os mesmos na solução de problemas de elasticidade linear em sistemas de multicamadas e contínuos, que são eles:

- Os materiais são elásticos lineares, isotrópicos e homogêneos;
- A lei de Hooke é válida e o módulo de compressão é semelhante ao módulo de tração;
- As camadas são ilimitadas na direção horizontal;
- Todas as camadas possuem uma espessura finita, à exceção da camada inferior que é considerada semi-infinita;
- A superfície da camada superior não está sujeita a tensões fora da área carregada;
- Na área carregada ocorrem apenas tensões normais;
- A carga aplicada é considerada estática, uniformemente distribuída em toda área circular de contato;
- A grandes profundidades as tensões e deformações são nulas;
- As condições de aderência na interface das camadas podem variar totalmente aderida para lisa ou sem aderência.

Afim de descobrir se os valores retornados pelo *software* estão de acordo no quesito segurança, fez-se necessário descobrir os valores de tensão admissível do pavimento e quais as deflexões máximas dos mesmos. Com isso, segundo Medina e Motta (2015), em seu livro a mecânica dos pavimentos, tem-se a correlação entre o módulo de resiliência do material, que foi divulgada por Heukelom e Klomp, representada pela Equação 11:

$$MR(\text{ou } E) = 10,4 * CBR \quad \text{Equação 11}$$

Descobrimo o valor do módulo de resiliência, é possível determinar a tensão admissível em cada uma das camadas do pavimento, o autor estipula o valor da tensão admissível através da Equação 12:

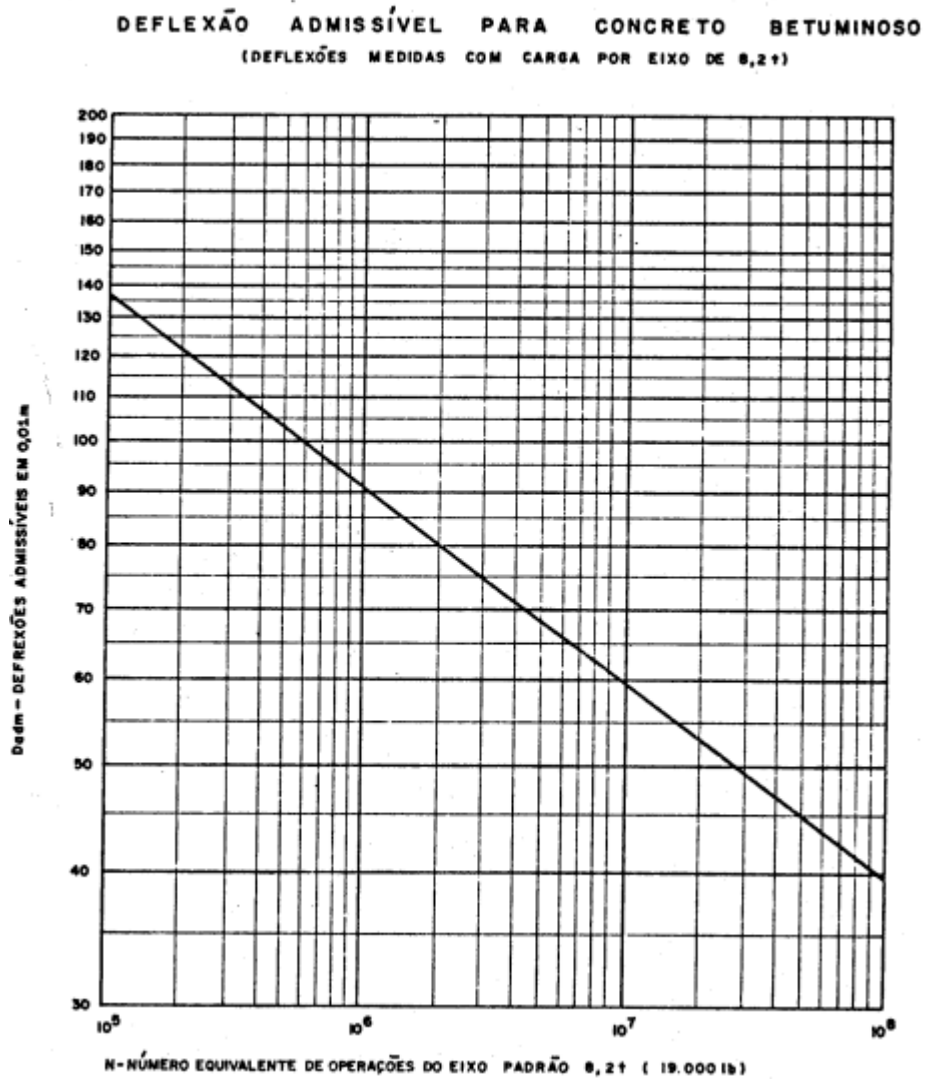
$$\sigma_{adm} = \frac{0,006MR}{1 + 0,7\log N} \quad \text{Equação 12}$$

Por último, fez-se necessário descobrir quais são os valores admissíveis para a deflexão do pavimento, segundo o Departamento Nacional de Estradas de Rodagem (DNER, 1979), a deflexão admissível para o concreto betuminoso pode ser obtida por meio da Equação 13, onde D_{adm} representa a deflexão admissível expresso em mm e N seria o número de repetições em eixo padrão já demonstrados anteriormente neste trabalho.

$$\log D_{adm} = 3,01 - 0,176\log N \quad \text{Equação 13}$$

Assim, a norma expressa graficamente a equação anterior através de um ábaco que está exposto na Figura 10, que será utilizada como um dos parâmetros para verificação mecânica da utilização do agregado reciclado.

Figura 10 – Ábaco para deflexão admissível para concreto betuminoso



Fonte - DNER (1979)

4 METODOLOGIA

A primeira etapa do trabalho foi realizar ensaios do tipo CBR para atestar a viabilidade da utilização do RCC, coletado no Município de Guarapuava. A partir de resultados que corroboram com a norma DNIT 172/2016, o pavimento flexível foi dimensionado com agregados convencionais, bem como com os RCCs. De modo a investigar a viabilidade econômica do material testado, um orçamento a partir do banco de dados da Tabela de Composições de Preços para Orçamentos (TCPO) foi elaborado.

4.1 Região de Estudo

Guarapuava é uma cidade que está localizada no centro-sul paranaense conforme a Figura 11, cerca de 256 km da capital do estado Curitiba. Segundo o último censo do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE, 2010), a população era de 167.328 habitantes, e para o ano de 2020, a população estimada era de 182.664 habitantes.



Fonte: COHAPAR – Companhia de Habitação do Paraná (2021).

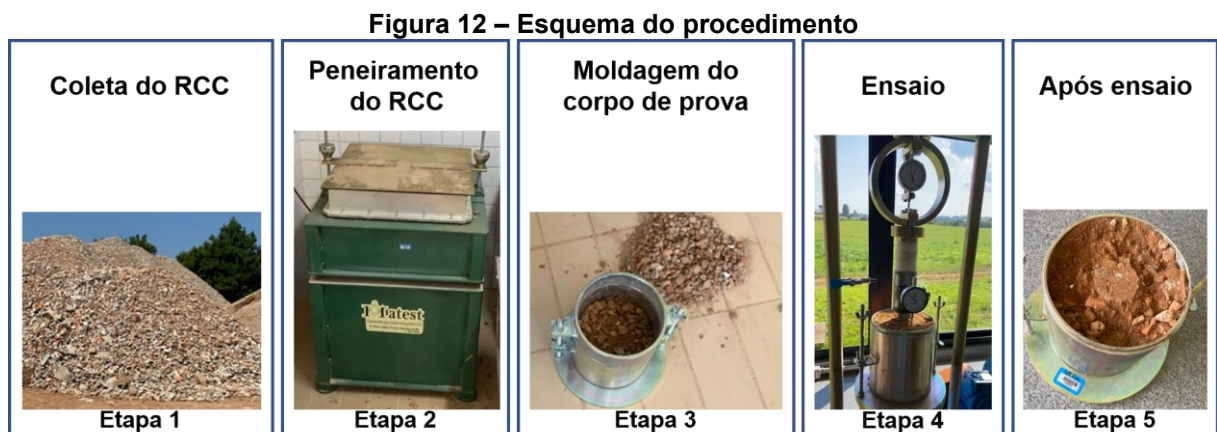
Guarapuava é detentora de somente uma Usina de Reciclagem de Entulho, a empresa responsável por informar a quantidade de entulho gerado na cidade.

4.2 Ensaio CBR

Segundo o DNIT (2006), o ensaio de CBR determina a relação entre a pressão necessária para produzir uma penetração de um pistão em um corpo de prova de solo e a pressão necessária para produzir a mesma penetração numa brita padronizada. O valor deste resultado, que é expresso em porcentagem, permite determinar por

meio de equações empíricas, a espessura de pavimento flexível necessária em função do tráfego.

O ensaio foi introduzido no Brasil pelo DNER segundo a Norma DNER – ME 04/94, sendo esta revisada e utilizada pela norma DNIT 172/2016. O procedimento do presente estudo ocorreu conforme a Figura 12, além disso, os materiais utilizados são mostrados na Figura 13.



Fonte: Autoria própria (2022)

Etapa 1: a coleta de RCC na Usina de Reciclagem de Entulhos de Guarapuava;

Etapa 2: o peneiramento do material coletado na peneira de 200 mm por 2 min, no qual, toda a amostra passou pela mesma;

Etapa 3: a moldagem do corpo de prova com brita 1 reciclada foi realizada para ensaio de sub-base com a distribuição do material dentro do cilindro em 5 camadas, sobre o disco espaçador metálico de 15 cm de altura e diâmetro de 6,35 cm. Cada uma das camadas recebeu 26 golpes do soquete, com massa de 4,536 kg e altura de queda de 45,72 cm. Após a compactação de cada uma das camadas, o material é nivelado com um prato perfurado com haste ajustável. Todo o material do corpo de prova é compactado com um cilindro complementar, que é removido após o preenchimento do corpo de prova, por fim, o material compactado é devidamente nivelado para ser ensaiado na prensa para penetração;

Etapa 4: o corpo de prova foi para a prensa para penetração com motor automatizado com potência de 0,75 cv. De modo que o motor eleva o prato, entrando

em contato com o pistão de penetração, que por sua vez, realiza a ação no dinamômetro e no extensômetro, sendo que o último deve estar nivelado ao pistão. O ensaio foi realizado 5 vezes, durante 10 minutos, com a leitura sendo realizada no extensômetro e no dinamômetro nos devidos intervalos estabelecidos pela norma;

Etapa 5: passados os 10 minutos de ensaio, o material é removido do corpo de prova e os valores coletados são empregados seguindo o Quadro 7, conforme estabelece a norma DNIT 172/2016.

Quadro 7 – Cálculo do CBR

Tempo min (1)	Penetração (2)		Pressão Padrão kgf/cm ² (3)	Molde nº			ISC % (7)
	mm	pol.		Leituras no extensômetro mm (4)	Pressão		
					Pressão calculada kfg/cm ² (5)	Corrigida kgf/cm ² (6)	
0,5	0,63	0,025	-				
1	1,27	0,05	-				
1,5	1,9	0,075	-				
2	2,54	0,1	70,31				
3	3,81	0,15	-				
4	5,08	0,2	105,46				
6	7,62	0,3	131,58				
8	10,16	0,4	161,71				
10	12,7	0,5	182,8				

Fonte – DNIT (2016).

Para obtenção do CBR (Equação 10), adotando-se o maior dos valores obtidos nas penetrações de 0,1 e 0,2 polegadas.

$$CBR = \frac{\textit{pressão calculada ou corrigida}}{\textit{pressão padrão}} * 100$$

Equação 10



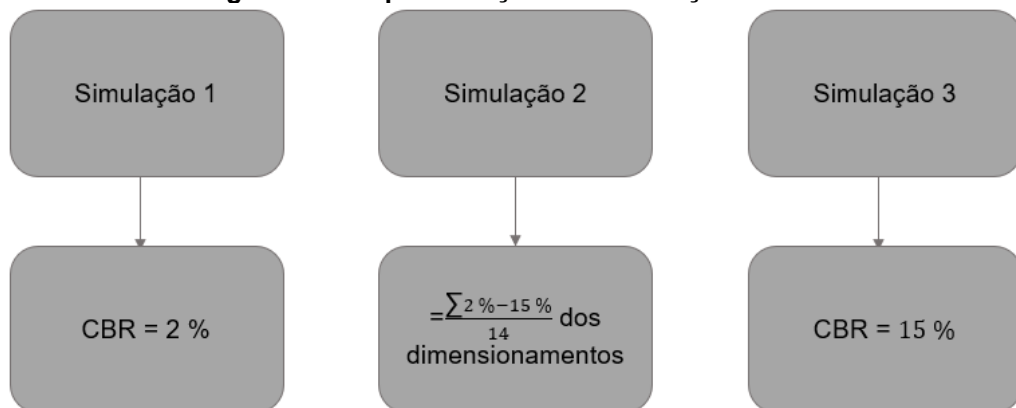
Fonte – Autoria própria (2022)

Vale salientar que o material utilizado para a determinação do CBR foi ensaiado em umidade ambiente.

4.3 Dimensionamento do pavimento flexível

Para o início do processo do dimensionamento, foi necessário conhecer as propriedades do solo da região de Guarapuava, segundo Bonifácio (2021) o solo de Guarapuava é considerado ML, assim, o possível valor de CBR segundo a classificação SUCS pode ser menor do que 2, até 15. Como o solo é um material variável, objetivou-se então 3 casos de dimensionamento para esse tipo de solo sem reforço do subleito, onde, foi utilizado o menor valor de CBR de (2%), a média de todos os dimensionamentos de 2% até 15% variando em 1% e por fim o maior valor que é de 15%. A Figura 14 representa todos os valores simulados de CBR descritos anteriormente.

Figura 14 – Representação das simulações feitas



Fonte – Autoria própria (2022)

dimensionamentos. Dessa forma, os coeficientes de equivalência estrutural utilizados foram: KR de 2,0; KB de 1,0; KS de 1,0.

Não foi utilizado agregado reciclado no concreto betuminoso usinado a quente, pois não foram realizados os ensaios exigidos pela norma a respeito da viabilidade técnica do produto com os agregados reciclados.

Posteriormente a isso, visando a verificação mecânica, realizou-se simulações de esforços mecânicos no pavimento com os agregados convencionais e nos agregados reciclados com o *software* AEMC do Medina. Foi-se necessário obter o Módulo de Resiliência e a massa específicas dos materiais utilizados na composição do pavimento. Segundo Suda (2021), a massa específica encontrada para o agregado reciclado foi de 2,04 g/cm³.

4.4 Orçamento do projeto

Para se obter a uma cotação aproximada do preço do mercado, foram utilizadas as composições de custos do banco de dados da TCPO de abril de 2022, que atualiza frequentemente os relatórios de preço em seu banco de insumos.

Além disso, considerando que o objetivo é o estudo da viabilidade econômica dos dois métodos construtivos, foi decidido que o orçamento englobaria apenas o serviço analisado e a execução do projeto de pavimentação asfáltica com agregados convencionais e agregados reciclados, desconsiderando execuções de terraplenagem e regularização e compactação de subleito.

O processo de orçamentação utilizado foi definido com base nas etapas apresentadas por Mattos (2006) e dividido nas seguintes etapas: levantamento de quantitativos; composição dos custos diretos e composição dos custos indiretos.

Com o intuito de se obter uma comparação mais justa, foi contatado com 10 empresas, sendo 8 de material de construção e 2 pedreiras em Guarapuava. Somente nas pedreiras, foram solicitados os preços do rachão, já nas demais empresas, foram orçados todos os agregados restantes.

Com isso, fez-se as médias dos valores dos agregados, e atualizando as respectivas composições com os preços médios destes agregados, a Tabela 7 ilustra o preço médio dos agregados convencionais cotados na cidade de Guarapuava.

Tabela 7 – Preço médio dos agregados convencionais em Guarapuava

Materiais (m ³)	Preço
Areia	R\$ 155,51
Brita 1	R\$ 75,68
Pó de Pedra	R\$ 83,19
Pedrisco	R\$ 77,07
Rachão	R\$ 60,50

Fonte: Autoria própria (2022)

O valor da areia no município de Guarapuava – PR é maior que o da brita 1 pelo fato de que a região geológica é predominantemente de basalto, contendo pedreiras próximas e não possuir nenhuma jazida.

Para a realização do orçamento dos projetos de pavimentação utilizando agregados reciclados, utilizou-se as mesmas composições para a pavimentação com agregados convencionais, com o mesmo preço pesquisados para a cidade de Guarapuava. Porém, na camada de sub-base, onde houve a substituição do material convencional por material reciclado, foi-se utilizado o valor de R\$ 50,00 o metro cúbico, haja em vista que o material estudado foi a brita 1. Os valores fornecidos pela Usina de Reciclagem para os agregados encontram-se na Tabela 8.

Tabela 8 – Preço agregados reciclados em Guarapuava – PR

Agregado (m ³)	Preço
Areia Reciclada	R\$ 60,00
Brita 1	R\$ 50,00
Rachãozinho	R\$ 50,00

Fonte: Autoria Própria (2021)

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Ensaio CBR

O ensaio CBR foi realizado 5 amostras com o material em umidade natural com o intuito de se obter um valor mais confiável, o valor da média de todos os ensaios foi de 20,92%, assim, a brita 1 estabeleceu-se o valor mínimo requerido pela norma ABNT 15115, podendo ser utilizado como sub-base de pavimentação ou reforço do subleito. Os resultados constam no Apêndice A deste trabalho, e a média dos resultados encontram-se no Quadro 8 a seguir.

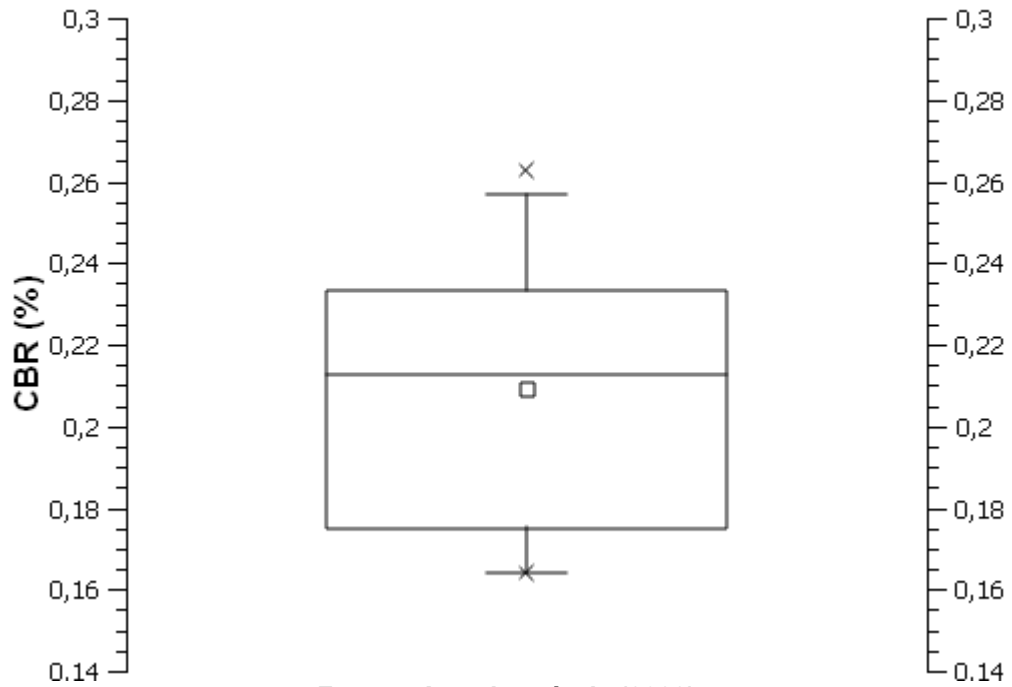
Quadro 8 – Média dos resultados do ensaio CBR dos 5 corpos de prova

Tempo min (1)	Penetração		Pressão Padrão kgf/cm ² (3)	Molde			
	mm	pol.		Leituras no extensômetro mm (4)	Pressão		ISC (%) 7
					Calculada kgf/cm ² (5)	Corrigida kgf/cm ² (6)	
0,5	0,63	0,025	-	57	2,225	2,225	
1	1,27	0,05	-	120	4,676	4,676	
1,5	1,9	0,075	-	181	7,271	7,271	
2	2,54	0,1	70,31	244	10,031	10,031	14,27
3	3,81	0,15	-	381	15,840	15,840	
4	5,08	0,2	105,46	477	22,061	22,061	20,92
6	7,62	0,3	131,58	665	32,545	32,545	24,73
8	10,16	0,4	161,71				
10	12,7	0,5	182,8				

Fonte: Autoria própria (2022)

O Gráfico 1 representa o *boxplot* de todos os valores de CBR do material ensaiado, onde o topo representa o maior valor, no meio representa a média dos valores e na base o menor valor.

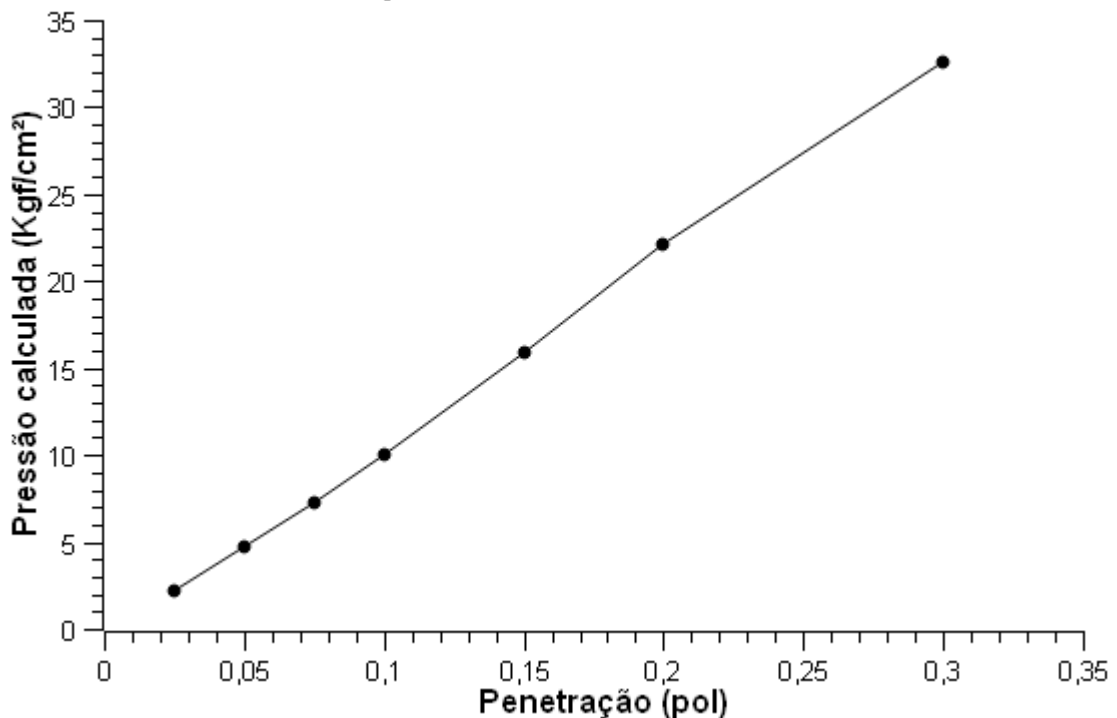
Gráfico 1 – Boxplot dos valores de CBR
Boxplot CBR's



Fonte – Autoria própria (2022)

O Gráfico 2 representa o gráfico característico de penetração vs. Deslocamento da média das amostras obtidos no CBR.

Gráfico 2 – Gráfico penetração x Pressão calculada da média dos CBR's
Gráfico penetração x Pressão calculada



Fonte – Autoria própria (2022)

Analisando os valores expostos acima, o material não pode ser utilizado como base de pavimentação, pois não obteve o valor mínimo de CBR maior ou igual a 60%, apenas sendo apto para ser utilizado como sub-base de pavimento. Sendo assim, será feito o dimensionamento do pavimento com o material em questão.

5.2 Dimensionamento do pavimento flexível

Para o dimensionamento do pavimento, foram utilizados revestimento betuminoso, brita graduada simples como base para o para ambos os pavimentos, sub-base de rachão nos agregados convencionais e o agregado reciclado para efeitos comparativos. Para ambos os dimensionamentos o CBR de sub-base adotado para calcular a camada de espessura dos pavimentos, foi o do material reciclado. Vale ressaltar que os CBR's adotados para o subleito são valores que não exigem reforço do subleito, como prescrito no manual de pavimentação do DNIT.

Para o início do primeiro dimensionamento, utilizou-se a Equação 6, exposta no Referencial Bibliográfico, com o intuito de se obter a espessura total do pavimento. Após determinado o valor total do pavimento, as etapas subsequentes serão determinar, de maneira preliminar, a espessura da sub-base pela mesma equação utilizada anteriormente, e posteriormente realizou-se a determinação da base. Por fim, utiliza-se da Equação 4 encontrar o valor que vai ser utilizado na sub-base.

O valor de CBR utilizado nesse primeiro cálculo foi de 2%, com isso, obteve-se os seguintes resultados:

$$H_t = 77,67 * 10^{6^{0,0482}} * 2^{-0,598}$$

$$H_t = 99,87 \text{ cm}$$

Por questões de concepções construtivas, foi-se adotado um $H_t = 100 \text{ cm}$, dando continuidade, foi dimensionado a espessura da sub-base, utilizando o CBR encontrado para o agregado reciclado. Utilizando a mesma equação, encontramos o valor da espessura da sub-base abaixo:

$$H_{20} = 77,67 * 10^{6^{0,0482}} * 20,92^{-0,598}$$

$$H_{20} = 24,54 \text{ cm}$$

Novamente, por questões de concepção construtiva, foi-se adotado de maneira preliminar uma espessura de sub-base igual a 25 cm. Dando continuidade no dimensionamento do pavimento, utilizaremos a Equação 4 para determinar a espessura da base, já que a espessura do revestimento betuminoso foi adotada de 5 cm. Para o cálculo da espessura da camada de base, foi adotado um coeficiente de equivalência estrutural de 2,0 para o revestimento betuminoso, e de 1,0 para a base, já que a camada de base é de material granular, assim, chegamos nos seguintes resultados:

$$R * KR + B * KB \geq H_{20}$$

$$5 * 2 + B * 1 \geq 25$$

$$B \geq 15 \text{ cm}$$

Segundo as exigências expressadas pelo DNIT, a espessura mínima construtiva para camadas granulares é de 15 cm, o manual de pavimentação ainda ressalta que o mínimo de revestimento para estas camadas é de 10 cm, e o máximo de 20 cm. Sendo assim, a espessura adotada da base para o dimensionamento deste pavimento flexível foi de 15 cm.

Assim, faz-se necessário recalcular o valor da espessura da sub-base utilizando a equação 5, com a espessura de 15 cm da base, com isso, o novo valor da sub-base foi:

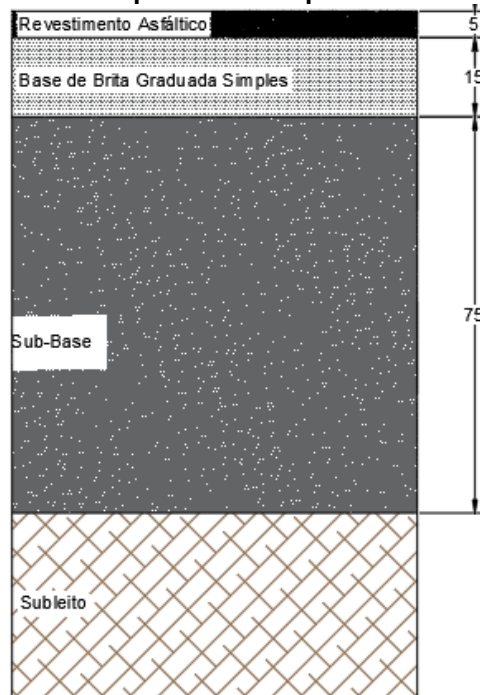
$$R * KR + B * KB + H_{20} * KS \geq H_m$$

$$5x2 + 15x1 + H_{20} * 1 \geq 100 \text{ cm}$$

$$H_{20} \geq 75 \text{ cm}$$

Sendo assim, o pavimento ficou com 5 cm de revestimento asfáltico, 15 cm de base, e 75 cm de sub-base até chegar no subleito, sendo representado pelo esquema a seguir, representado pela Figura 16.

Figura 16 – Corte esquemático do pavimento dimensionado



Fonte – Adaptador de Bernucci et. al (2008).

Com isso, foi repetido todo o procedimento de cálculo da espessura do pavimento, que está demonstrado no Quadro 9, inicialmente do CBR 2% até o CBR de 15% do subleito.

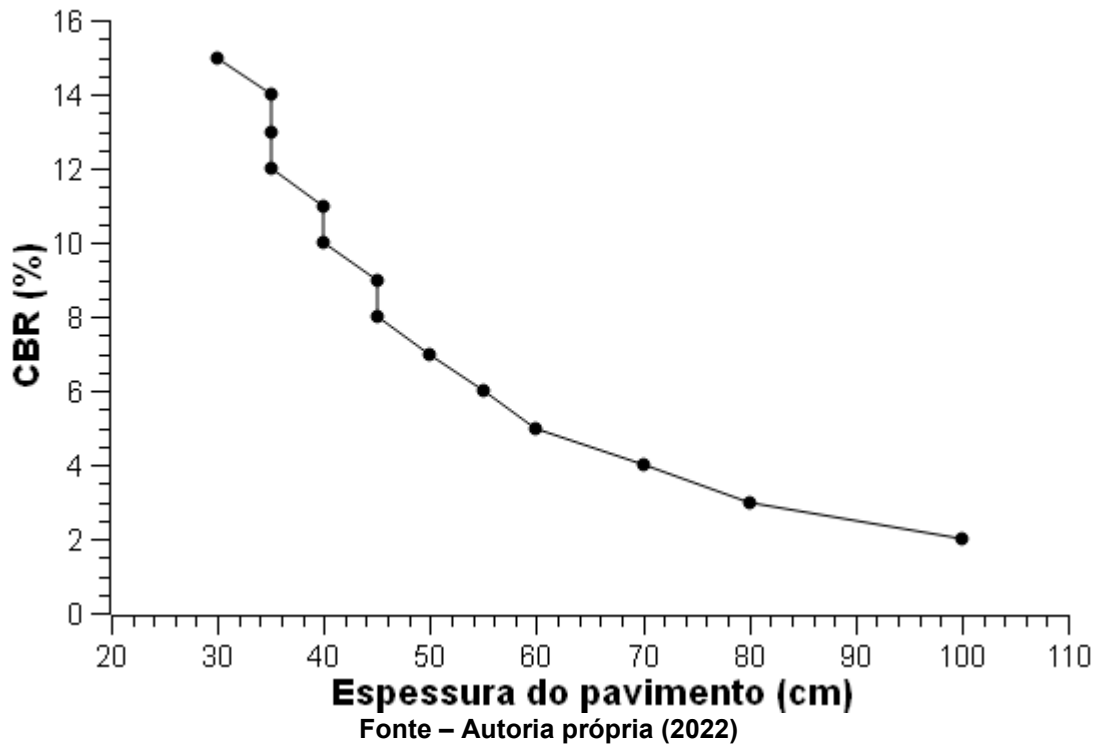
Quadro 9 – Dimensionamento dos pavimentos em todos os CBR'S do solo de Guarapuava

CBR (%)	Espessura de Cálculo	Espessura Definida	Valor de sub-base calculada (preliminar)	Valor de sub-base adotada (preliminar)	Espessura da Base calculada	Base Adotada	Perfil final da sub-base	Espessura final
2	99,87	100	24,53	25	15	15	75	100
3	78,37	80	24,53	25	15	15	55	80
4	65,98	70	24,53	25	15	15	45	70
5	57,74	60	24,53	25	15	15	35	60
6	51,77	55	24,53	25	15	15	30	55
7	47,22	50	24,53	25	15	15	25	50
8	43,59	45	24,53	25	15	15	20	45
9	40,63	45	24,53	25	15	15	20	45
10	38,15	40	24,53	25	15	15	15	40
11	36,03	40	24,53	25	15	15	15	40
12	34,21	35	24,53	25	15	15	10	35
13	32,61	35	24,53	25	15	15	10	35
14	31,19	35	24,53	25	15	15	10	35
15	29,93	30	24,53	25	15	15	5	30

Fonte – Autoria própria (2022)

Realizando os dimensionamentos em todos os CBR's possíveis de 2% até 15%, é possível observar de maneira melhor pelo Gráfico 3 o valor da espessura total do pavimento em relação a cada valor de CBR.

Gráfico 3 – Gráfico da espessura do pavimento em relação aos CBR's estudados
Gráfico CBR x Espessura do pavimento



Após obter todos os valores expressos acima, os seguintes resultados para dimensionamento de pavimento em cada uma das 3 simulações propostas por este trabalho estão expressos no Quadro 10.

Quadro 10 – Valores adotados nas 3 simulações de dimensionamento

Simulação	CBR (%)	Espessura de Cálculo (cm)	Espessura Definida (cm)	Sub-base calculada (cm)	Sub-base adotada (cm)	Base calculada (cm)	Base Adotada (cm)	Sub-base adotada (cm)	Espessura final (cm)
1	2	99,87	100	24,53	25	15	15	75	100
2	Média	51,43	55	24,53	25	15	15	30	55
3	15	29,93	30	24,53	25	15	15	5	30

Fonte – Autoria própria (2022)

5.3 Análise da Deformação do Pavimento com o AEMC

Para realizar a análise da deformação do pavimento, foi necessário fazer a conversão do CBR do material analisado para módulo de resiliência (MR) em MPa. Assim, utilizando o CBR do material reciclado, encontramos o seguinte módulo de resiliência igual à 217,57 MPa.

$$MR(ou E) = 10,4 * 20,92$$

Lembrando que este valor obtido do módulo de resiliência da brita 1 reciclada é apenas uma estimativa, pois o ensaio do módulo de resiliência exige equipamento específico para ser realizado e na falta deste foi utilizado este valor. O comportamento do material adotado foi linear.

Com isso, utilizando o tráfego já conhecido no projeto de pavimentação, utilizando o *software* AEMC do Medina, faremos uma simulação do comportamento estrutural do pavimento com agregados reciclados em comparação com os agregados convencionais, nas 3 situações em questão.

O *software* exige algumas especificações dos materiais que serão utilizados, com isso, os valores do revestimento betuminoso e da brita graduada foram extraídos do banco de dados do *software* MeDiNa v.1.1.5.0.

Para a camada de sub-base utilizando rachão, foi necessário solicitar uma pesquisa de bibliografias afim de se determinar o módulo de resiliência do rachão sendo utilizado como sub-base. Segundo o artigo de Ribas (2014), onde ele realizou um estudo ensaiando 5 tipos diferente de rachão, encontrando uma média de 199,33 MPa de módulo de resiliência para este material, assim, o valor utilizado nas simulações foi de 200 Mpa. Além disso, em uma pesquisa feita entre empresas da região o valor fornecido a massa específica do rachão utilizado foi de 1,585 g/cm³.

Para o revestimento betuminoso, foi-se utilizado o RJ CAP 50/70 #19,1 mm Sepetiba, com Módulo de Resiliência de 9588 MPa, com massa específica de 2,4 g/cm³ (Medina, 2020), uma vez que foi o material similar utilizado para a orçamentação. Para a base de brita graduada, o material de referência foi a Brita Graduada – Gnaisse C7, com Módulo de Resiliência de 350 Mpa, e massa específica de 2,244 g/cm³.

Todos valores dos materiais utilizados com suas respectivas especificações utilizadas no *software* estão expostos na Tabela 9:

Tabela 9 – Materiais e especificações utilizadas no AEMC

Material	MR (MPa)	Massa Específica (g/cm ³)
RJ CAP 50/70 #19,1 mm Sepetiba	9588	2,400
Brita Graduada - Gnaisse C7	350	2,244
Rachão	200	1,585
Brita 1 reciclada	217,57	2,040

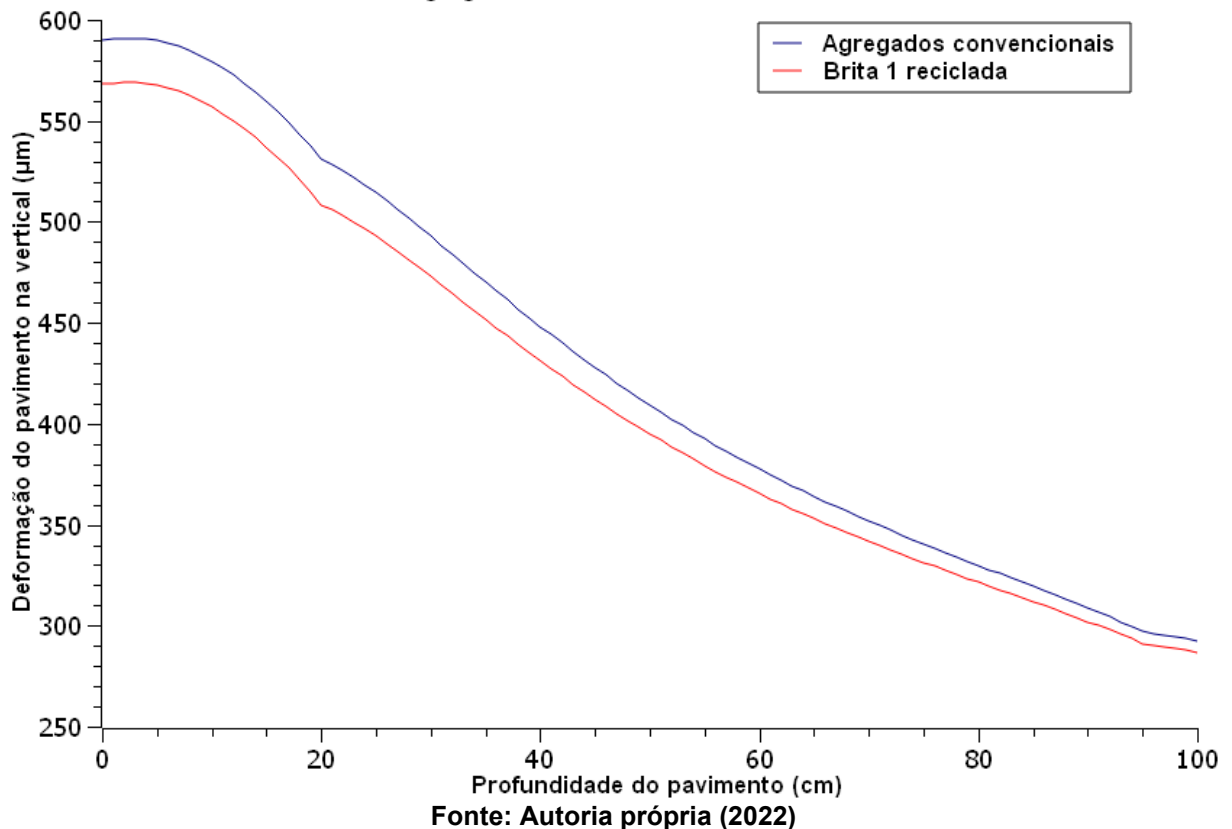
Fonte – Autoria própria (2022).

Após a obtenção de todos os valores necessários para poder analisar a resposta estrutural em deflexão do pavimento, foram executados no *software* as 3 simulações preestabelecidas anteriormente. Salientando que em todas as simulações foram utilizados o eixo padrão rodoviário (8,2 ton) e que todos os valores calculados de entrada se encontram no Apêndice B deste trabalho.

5.3.1 CBR de 2% (Primeira Simulação)

Para a primeira simulação com agregados convencionais, foi utilizado 5 cm do RJ CAP 50/70 # 19,1 mm, 15 cm da Brita Graduada – Gnaisse C7, e 75 cm de rachão e para os agregados reciclados, as mesmas espessuras dimensionadas pelo método empírico. Assim, foi possível obter os seguintes valores que estão expostos no gráfico a seguir na Figura 16.

Gráfico 4 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada simulação 1
Agregados convencionais x Brita 1 reciclada

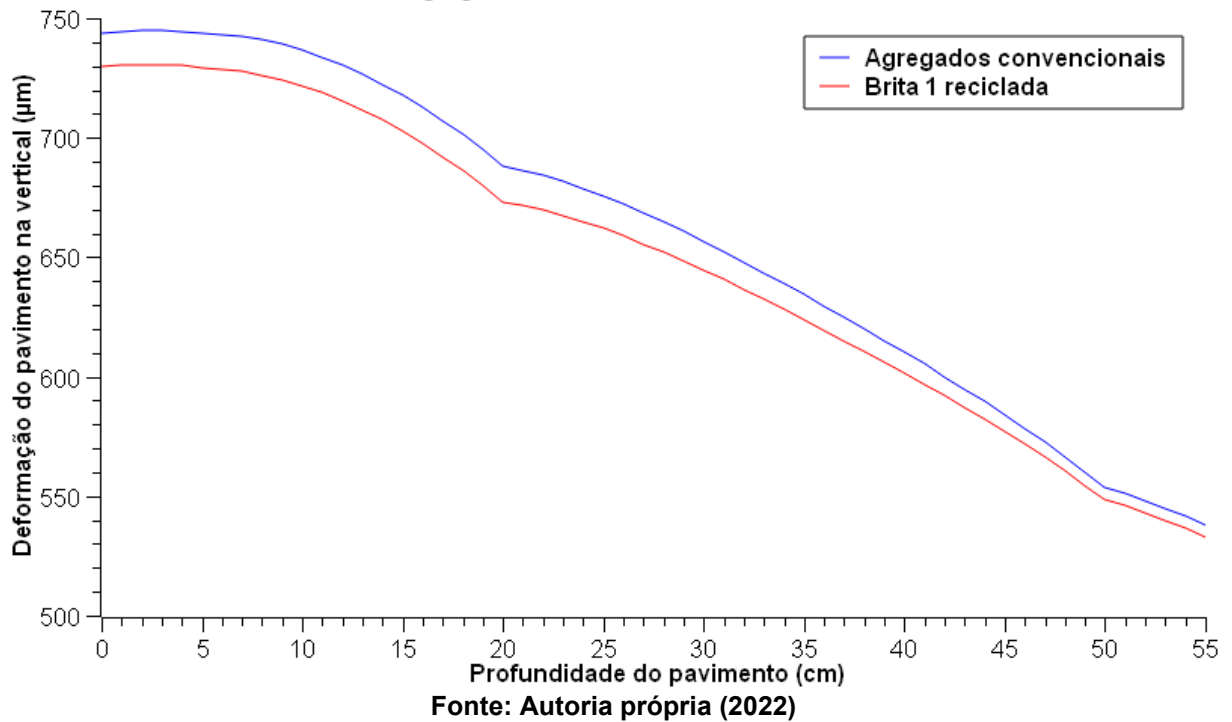


Sendo a linha em vermelha o resultado da deflexão do pavimento com agregado convencional, e em azul a deflexão do pavimento com agregado reciclado. Nota-se que o desempenho do agregado reciclado foi melhor que o do agregado convencional, devido ao seu maior Módulo de Resiliência, do ponto de vista de simulação elástica linear das camadas, ambos os casos foram satisfatórios. Uma vez que a deflexão máxima foi de 589,99 µm. Em ambos os casos obtivemos desempenho satisfatório, haja em vista que a deflexão máxima para esse tipo de situação seria de 900 µm, ou 0,9 mm de acordo com a norma 011/79 do DNER.

5.3.2 Média dos dimensionamentos (Segunda Simulação)

Repetindo-se o processo realizado na primeira simulação, com os mesmos materiais, Módulo de Resiliência e massa específica mudando a espessura da camada da sub-base para ambos os casos de 75 para 30 cm. Assim, foi possível obter os seguintes valores que estão expostos no gráfico a seguir no Gráfico 5.

Gráfico 5 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada simulação 2
 Agregados convencionais x Brita 1 reciclada

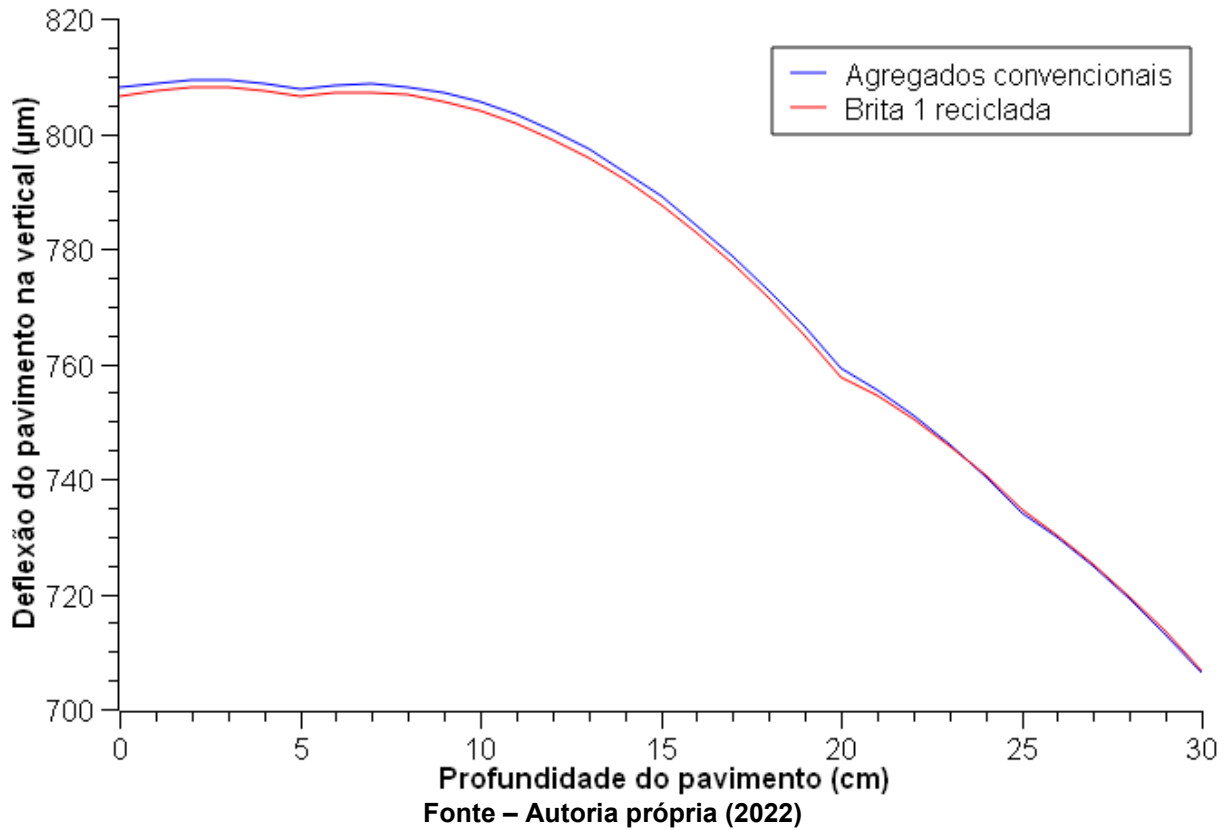


Nota-se que o aumento do CBR do solo natural de 2% para 8,5% gerou uma menor utilização nas camadas de sub-base de 75 cm para 30 cm, esta diminuição gerou um aumento nas deflexões. Assim, do gráfico nota-se o aumento de 589,99 para 743,82 µm na camada de revestimento, mesmo assim os deslocamentos máximos estão dentro dos prescritos no MeDiNa.

5.3.3 CBR de 15% (Terceira Simulação)

Repetindo-se o processo realizado na segunda simulação, com os mesmos materiais, Módulo de Resiliência e massa específica mudando a espessura da camada da sub-base para ambos os casos de 30 para 5 cm. Assim, foi possível obter os seguintes valores que estão expostos no gráfico a seguir, no Gráfico 6.

Gráfico 6 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada
Agregados convencionais x Brita 1 reciclada



É possível notar que com a utilização do CBR do solo em 15% gerou, novamente, uma diminuição da camada de sub-base com uma espessura de 35 para 5 cm apenas. Essa diminuição expressiva gerou um aumento da deflexão do revestimento asfáltico sendo a maior deflexão de 807,96 µm, entretanto, este valor ainda está dentro dos parâmetros prescritos pela norma.

5.4 Análise das Tensões dos Pavimentos com o AEMC

Para se determinar o valor da tensão admissível dos pavimentos, foi utilizado a Equação 12 e realizando o cálculo da tensão admissível para cada uma das camadas com os valores de Módulo de Resiliência e tráfego conhecidos, a Tabela 10 expõe todos os resultados encontrados para cada uma das camadas. Aliado a isso, os valores máximos de tensões solicitadas encontradas em cada uma das camadas em todas as simulações.

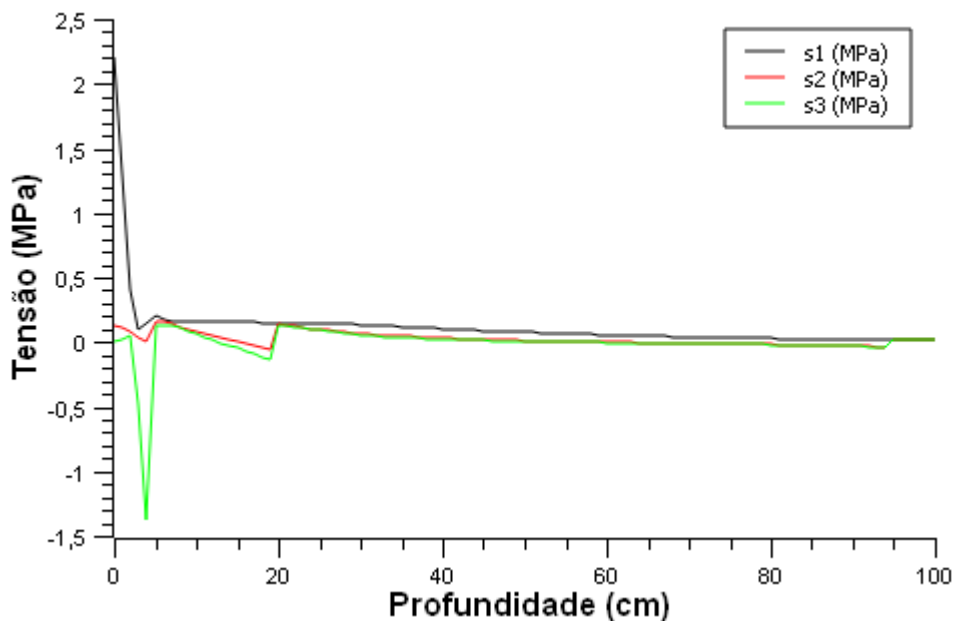
Tabela 10 – Tensões admissíveis das camadas do pavimento

Material	σ_{adm} (MPa)	$\sigma_{solicitante}$ (MPa)
Revestimento Asfáltico	11,0631	3,061
Brita Graduada Simples	0,4038	0,249
Rachão	0,2308	0,115
Brita 1 reciclada	0,2510	0,115

Fonte – Autoria própria (2022)

Assim, conhecendo os valores da tensão solicitante de cada uma das camadas, foi utilizado novamente o *software* AEMC. Os Gráficos 7, 8 e 9 representam as comparações das tensões em cada uma das camadas do pavimento, nas 3 simulações utilizando o agregado convencional e a brita 1 reciclada. Como os valores de Módulo de Resiliência são iguais nas camadas de revestimento asfáltico e base, não houve diferença significativa na tensão do pavimento na camada de sub-base.

Gráfico 7 – Tensão da camada do pavimento x profundidade simulação 1
Tensões solicitantes x Profundidade

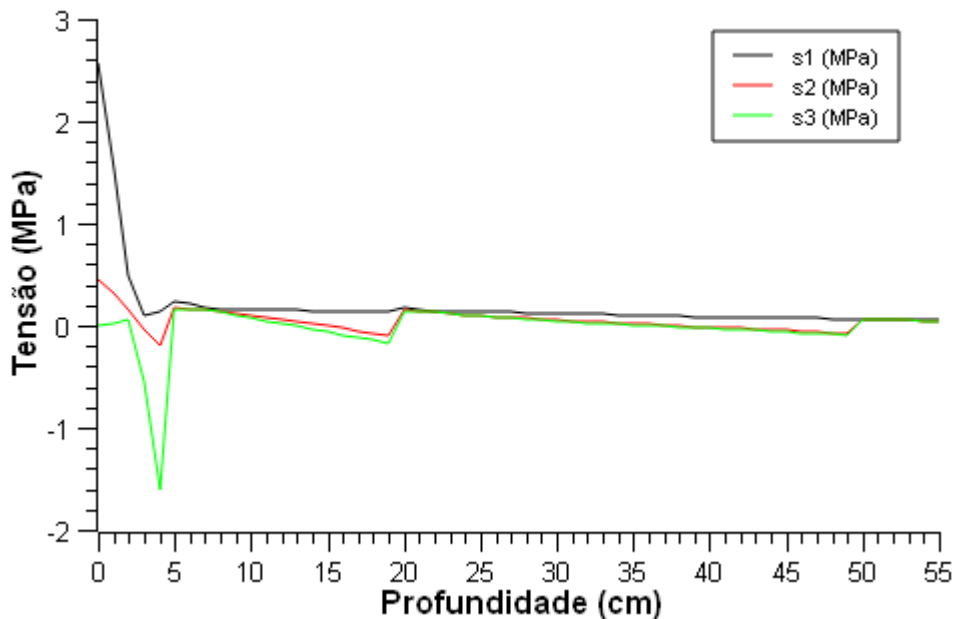


Fonte – Autoria própria (2022)

Nota-se que a tensão máxima solicitada foi de 2,20 MPa na camada de revestimento asfáltico, sendo que a tensão admissível é de 11,06. A maior tensão encontrada na camada de brita graduada simples foi de 0,171 MPa e a tensão admissível é de 0,4038 MPa. Por fim, a tensão admissível na camada de rachão foi de 0,150 MPa e a tensão admissível é de 0,23 MPa. Todos os valores da tensão do pavimento encontram-se no Apêndice B deste trabalho.

Para a simulação 2, os valores de tensão são apresentados no Gráfico 8.

**Gráfico 8 – Tensão da camada do pavimento x profundidade x simulação 2
Tensões solicitantes x Profundidade**

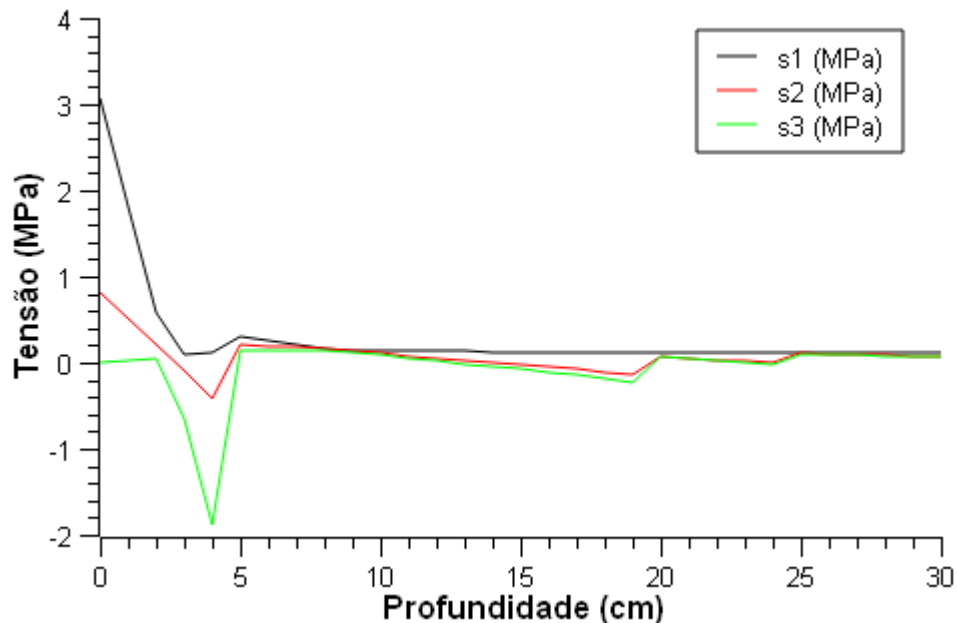


Fonte – Autoria própria (2022)

Neste caso, nota-se que a tensão máxima solicitada foi de 2,58 MPa na camada de revestimento asfáltico, sendo que a tensão admissível é de 11,06. A maior tensão encontrada na camada de brita graduada simples foi de 0,21 MPa e a tensão admissível é de 0,4038 MPa. Por fim, a tensão admissível na camada de rachão foi de 0,150 MPa e a tensão admissível é de 0,23 MPa.

O mesmo procedimento foi realizado na simulação 3 e obtivemos os seguintes valores expressos no Gráfico 9.

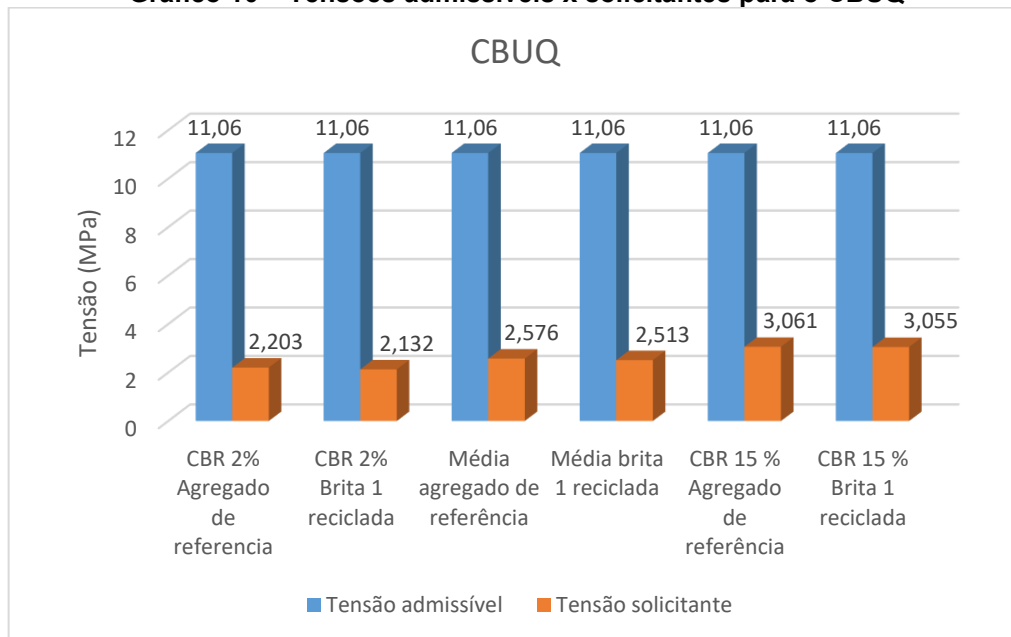
Gráfico 9 – Tensão da camada do pavimento x profundidade simulação 3
Tensões solicitantes x Profundidade



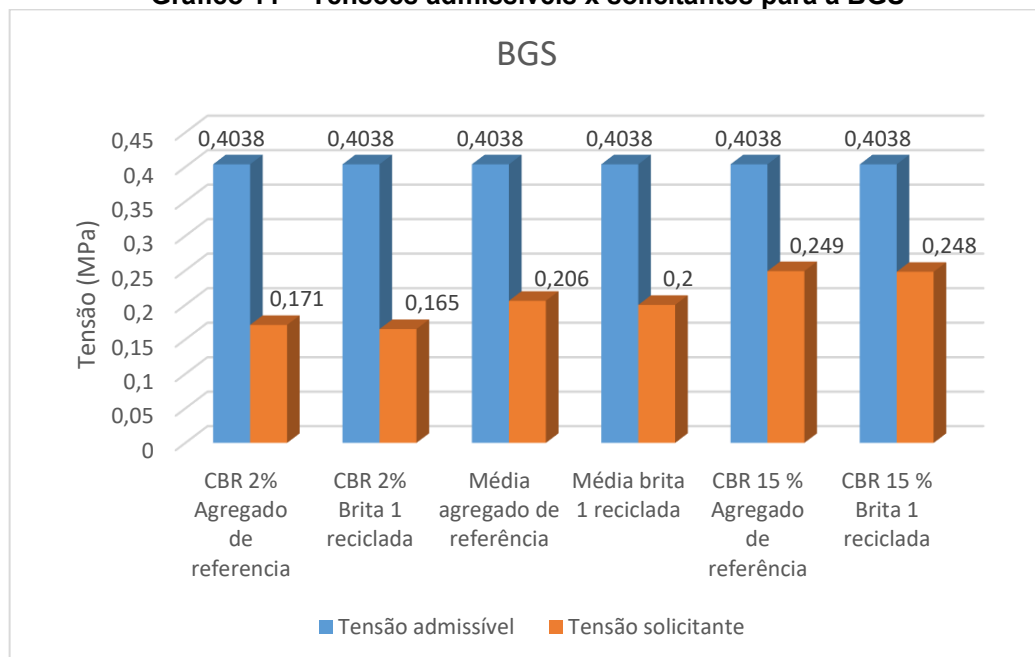
Fonte – Autoria própria (2022)

Nota-se que a tensão máxima solicitada foi de 3,06 MPa na camada de revestimento asfáltico, sendo que a tensão admissível é de 11,06. A maior tensão encontrada na camada de brita graduada simples foi de 0,249 MPa e a tensão admissível é de 0,4038 MPa. Por fim, a tensão admissível na camada de rachão foi de 0,115 MPa e a tensão admissível é de 0,23 MPa. Ou seja, em todas as 3 simulações propostas, a utilização do agregado convencional e da brita 1 reciclada as tensões estiveram abaixo da tensão admissível.

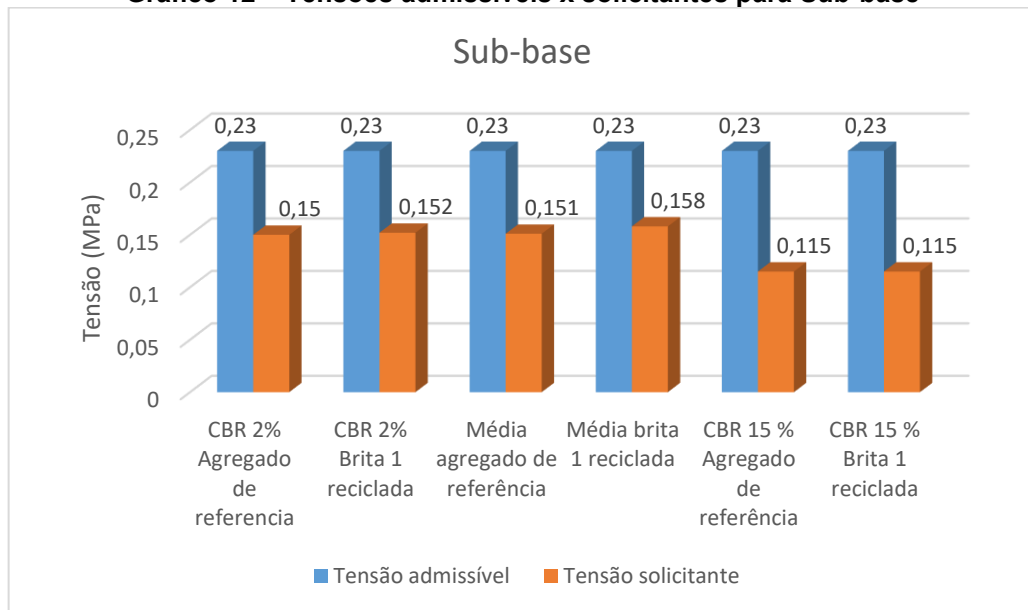
Os Gráficos 10, 11 e 12 representam as tensões máximas x tensões solicitantes nas camadas de revestimento asfáltico, base e sub-base respectivamente em cada uma das 3 simulações, em cada um dos dimensionamentos. Podemos perceber que a maior tensão solicitante para a camada de CBUQ foi com CBR de 15% com o agregado convencional, assim como na camada de base e para a camada de sub-base, a maior tensão solicitante foi para a média dos dimensionamentos com o pavimento utilizando a brita 1 reciclada.

Gráfico 10 – Tensões admissíveis x solicitantes para o CBUQ

Fonte – Autoria própria (2022)

Gráfico 11 – Tensões admissíveis x solicitantes para a BGS

Fonte – Autoria própria (2022)

Gráfico 12 – Tensões admissíveis x solicitantes para Sub-base

Fonte – Autoria própria (2022)

5.5 Discussão baseada no quantitativo de um projeto de pavimentação asfáltica

Conforme exposto na Metodologia, a área pavimentada é de 3.531,52 m², pegando este valor e multiplicando pelas respectivas espessuras das camadas do pavimento obteremos os quantitativos em metros cúbicos de cada uma das camadas. Nos Quadros 11, 12 e 13 está explicitado o quantitativo da obra com suas respectivas composições, nas simulações 1, 2 e 3 de dimensionamento dos pavimentos. Vale salientar que, para todas as simulações, o quantitativo de material da base e do revestimento asfáltico permanecem iguais, pois a espessura das camadas não muda em nenhuma das 3 simulações. Entretanto, o quantitativo da sub-base será diferente em cada um dos dimensionamentos, pelo fato de que possuem espessuras diferentes em cada uma das simulações.

Quadro 11 – Quantitativo de materiais do projeto para simulação 1

Item	Descrição	Quantidade (m ³)
1	Rachão ou brita 1 reciclada	2648,64
2	Base brita graduada	529,73
3	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	176,58

Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 12 – Quantitativo de materiais do projeto para simulação 2

Item	Descrição	Quantidade (m³)
1	Rachão ou brita 1 reciclada	1059,46
2	Base brita graduada	529,73
3	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	176,58

Fonte: Autoria própria (2022)

Quadro 13 – Quantitativo de materiais do projeto para simulação 3

Item	Descrição	Quantidade (m³)
1	Rachão ou brita 1 reciclada	176,58
2	Base ou Sub base brita graduada	529,73
3	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	176,58

Fonte: Autoria própria (2022)

5.5.1 Orçamento do projeto de pavimentação com agregados convencionais

Após fazer a substituição do preço dos agregados, em seus respectivos insumos da TCPO nas composições que os continham, foi realizado o preço para a execução do projeto, com as 3 simulações de dimensionamentos com relação ao quantitativo levantado anteriormente. Com isso, as Tabela 11, 12 e 13 mostram o preço do orçamento utilizando agregados convencionais, com preços cotados na cidade de Guarapuava, com base nos valores da TCPO de 04/2022, além de mostrar a porcentagem que cada uma das etapas da execução representa do valor total.

Tabela 11 – Orçamento do projeto com agregados convencionais simulação 1

Etapas	Preço	Porcentagem
Sub-base de Rachão	R\$ 256.876,97	43,85%
Base brita graduada	R\$ 73.385,66	12,53%
Concreto Betuminoso	R\$ 255.516,85	43,62%
Total	R\$ 585.779,48	100%

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 12 – Orçamento do projeto com agregados convencionais simulação 2

Etapas	Preço	Porcentagem
Sub-base de Rachão	R\$ 102.750,79	23,80%
Base brita graduada	R\$ 73.385,66	17,00%
Concreto Betuminoso	R\$ 255.516,85	59,19%
Total	R\$ 431.653,30	100%

Fonte: Autoria própria (2022)

Tabela 13 – Orçamento do projeto com agregados convencionais simulação 3

Etapas	Preço	Porcentagem
Sub-base de Rachão	R\$ 17.125,13	4,95%
Base brita graduada	R\$ 73.385,66	21,21%
Concreto Betuminoso	R\$ 255.516,85	73,84%
Total	R\$ 346.027,64	100%

Fonte: Autoria própria (2022)

É possível notar uma diferença entre os orçamentos de referência dos casos 1, 2 e 3, sendo justificado pela necessidade de camadas maiores para proteger solos naturais com CBR's menores. Onde na primeira situação tivemos a camada de rachão com 75 cm de espessura, na segunda 30 cm de espessura e na terceira apenas 5 cm de espessura. Para a melhor visualização dos orçamentos e códigos de composição de cada um dos materiais utilizados pode-se consultar o Apêndice C deste trabalho.

5.5.2 Orçamento do projeto de pavimentação com agregados reciclados

Repetindo o processo de orçamentação feito com os agregados de referência utilizando o preço por metro cúbico da brita reciclada no lugar da camada de rachão, determinamos os custos para realizar o projeto de pavimentação com os agregados reciclados. Sendo assim, as Tabela 14, 15 e 16 mostram os valores dos orçamentos do projeto de pavimentação asfáltica nas 3 situações com a utilização da Brita 1 reciclada.

Tabela 14 – Orçamento do projeto com brita 1 reciclada simulação 1

Etapas	Preço	Porcentagem	Espessura (cm)
Sub-base de brita 1 RCC	R\$ 199.401,49	37,74%	75
Base brita graduada	R\$ 73.385,66	13,89%	15
Concreto Betuminoso	R\$ 255.516,85	48,37%	5
Total	R\$ 528.304,00	100%	100

Fonte – Autoria própria (2022)

Tabela 15 – Orçamento do projeto com brita 1 reciclada simulação 2

Etapas	Preço	Porcentagem	Espessura (cm)
Sub-base de brita 1 RCC	R\$ 79.760,59	19,52%	30
Base brita graduada	R\$ 73.385,66	17,96%	15
Concreto Betuminoso	R\$ 255.516,85	62,53%	5
Total	R\$ 408.663,10	100%	55

Fonte – Autoria própria (2022)

Tabela 16 – Orçamento do projeto com brita 1 reciclada simulação 3

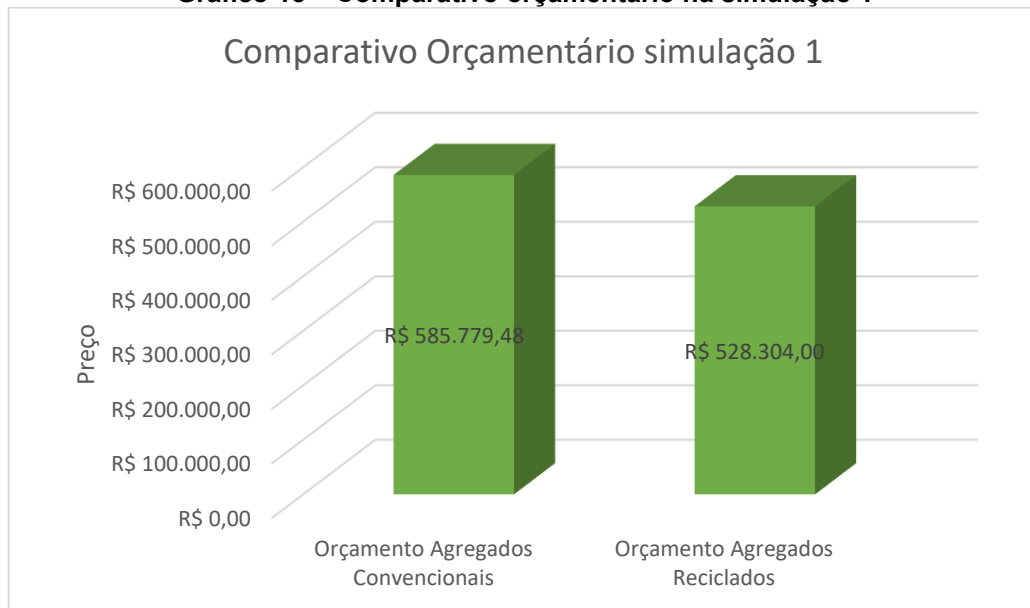
Etapas	Preço	Porcentagem	Espessura (cm)
Sub-base de brita 1 RCC	R\$ 13.293,43	3,88%	5
Base brita graduada	R\$ 73.385,66	21,45%	15
Concreto Betuminoso	R\$ 255.516,85	74,67%	5
Total	R\$ 342.195,94	100%	30

Fonte – Autoria própria (2022)

Conhecendo os valores totais dos projetos de cada uma das 3 simulações, tanto para a utilização de agregados convencionais, quanto para agregados reciclados, será feita uma comparação entre cada um dos orçamentos. Cada uma das simulações será feita a comparação em valores e em porcentagem, com o intuito de se obter a viabilidade econômica da utilização deste material.

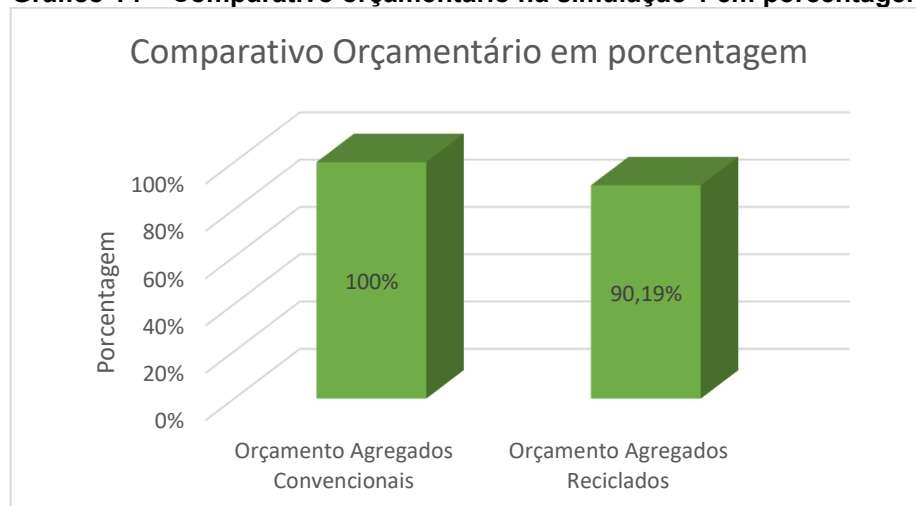
5.5.3 Análise econômica da utilização da brita 1 reciclada em pavimentação

Sendo conhecido os valores para os orçamentos de pavimentação utilizando agregados convencionais e o agregado reciclado, foi feita a comparação em cada uma das simulações de dimensionamento. A seguir o Gráfico 13 representa o comparativo entre os orçamentos na simulação 1, onde o CBR do solo para o dimensionamento do pavimento foi de 2%.

Gráfico 13 – Comparativo orçamentário na simulação 1

Fonte – Autoria própria (2022)

Observando os valores apresentados, percebemos que houve uma economia de R\$ 57.475,49 na execução das 3 camadas que compõe o pavimento flexível, isso significa uma economia e 9,81%, valor que está exposto no Gráfico 14 a seguir. Para este cenário, é possível afirmar que há viabilidade econômica na utilização de brita 1 reciclada para pavimentação do caso estudado.

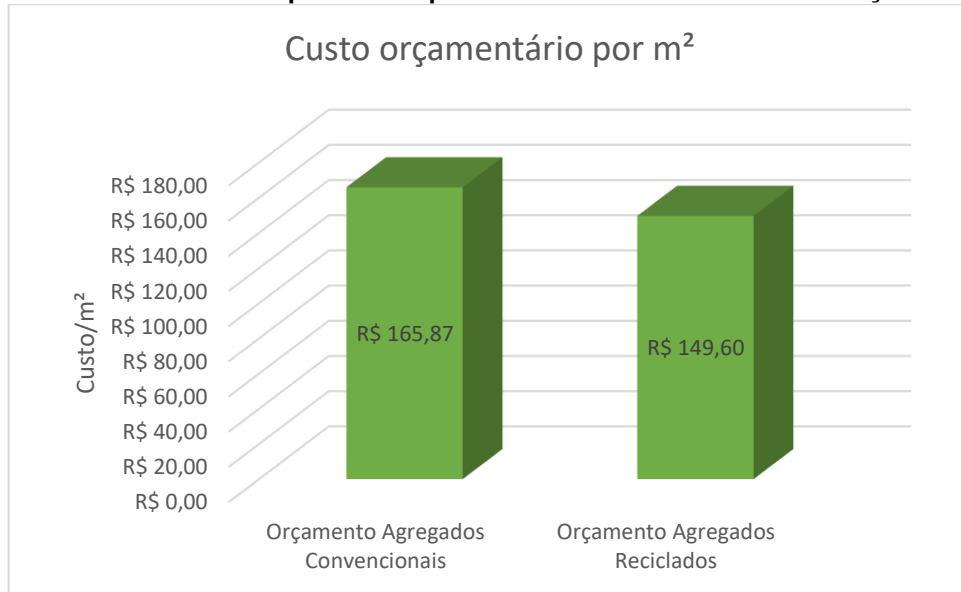
Gráfico 14 – Comparativo orçamentário na simulação 1 em porcentagem

Fonte – Autoria própria (2022)

O Gráfico 15 demonstra o custo por metro quadrado de pavimentação. Deste resultado, observa-se que o custo para o projeto com agregados convencionais é de

R\$ 165,78/m², enquanto que para o RCC o custo foi de R\$ 149,60/m². Portanto, para o caso da simulação 1 foi observado uma economia de R\$ 16,18/m².

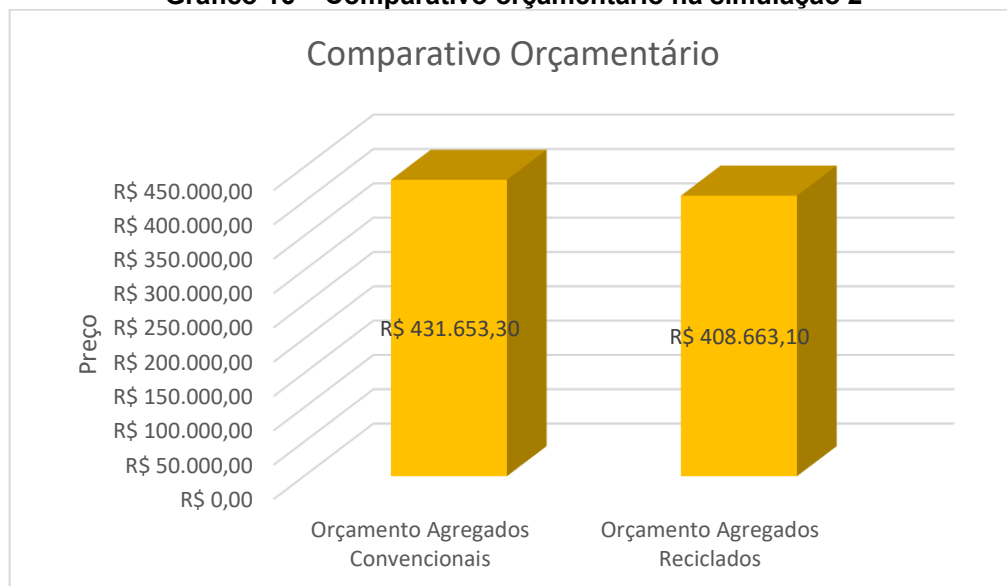
Gráfico 15 – Custo por metro quadrado dos dois métodos simulação 1



Fonte – Autoria própria (2022)

O processo de comparação entre os orçamentos foi repetido na simulação 2 e 3, que será demonstrado nos Gráficos 16, 17, 18, 19, 20 e 21.

Gráfico 16 – Comparativo orçamentário na simulação 2

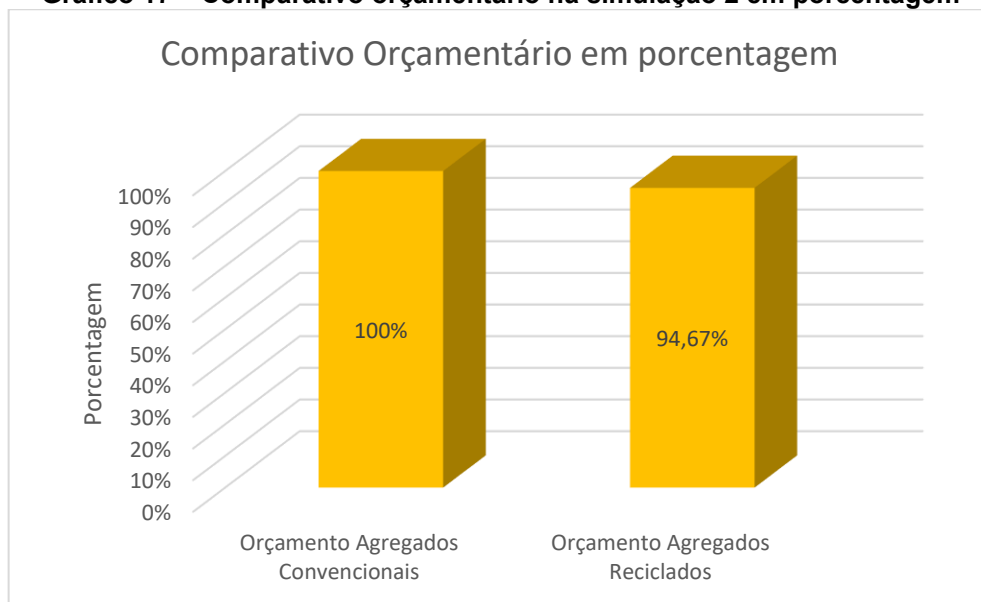


Fonte – Autoria própria (2022)

Observando os valores apresentados no Gráfico 16, houve uma economia de R\$ 22.990,20 na execução das 3 camadas que compõe o pavimento flexível, isso

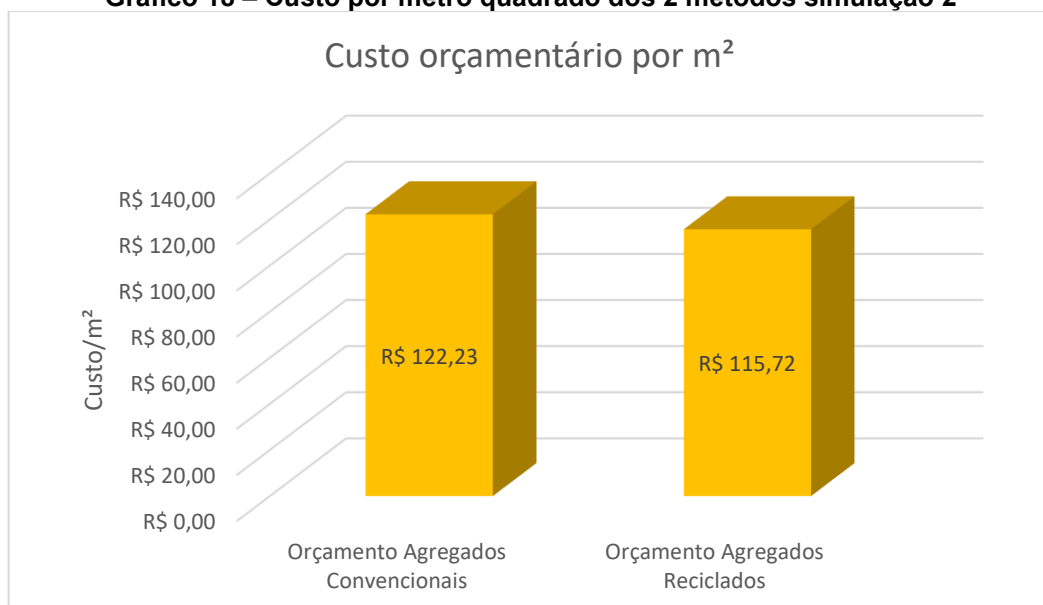
significa uma economia e 5,33%, valor que está exposto no Gráfico 17 a seguir. Além disso, o custo por metro quadrado foi de R\$ 122,23 para o agregado convencional e R\$ 115,72 para a brita 1 reciclada, exposto no Gráfico 18. Portanto, resultando em uma economia de R\$ 6,51/m², para este cenário é possível afirmar que também há viabilidade econômica na utilização de brita 1 reciclada para pavimentação, porém, o CBR maior do solo natural indica uma menor economia, pelo fato de que será necessário utilizar mais material.

Gráfico 17 – Comparativo orçamentário na simulação 2 em porcentagem

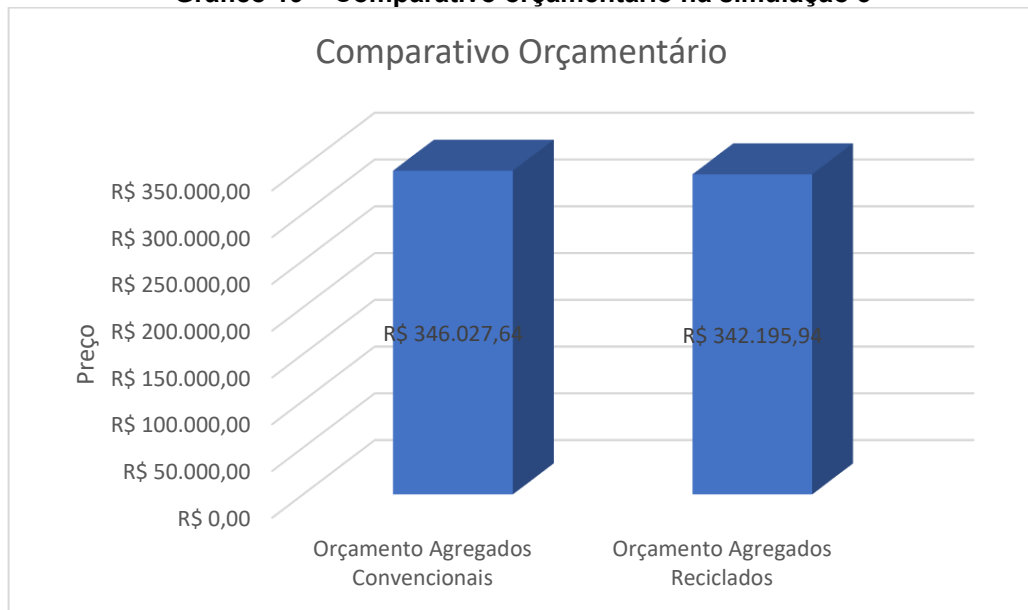


Fonte – Autoria própria (2022)

Gráfico 18 – Custo por metro quadrado dos 2 métodos simulação 2

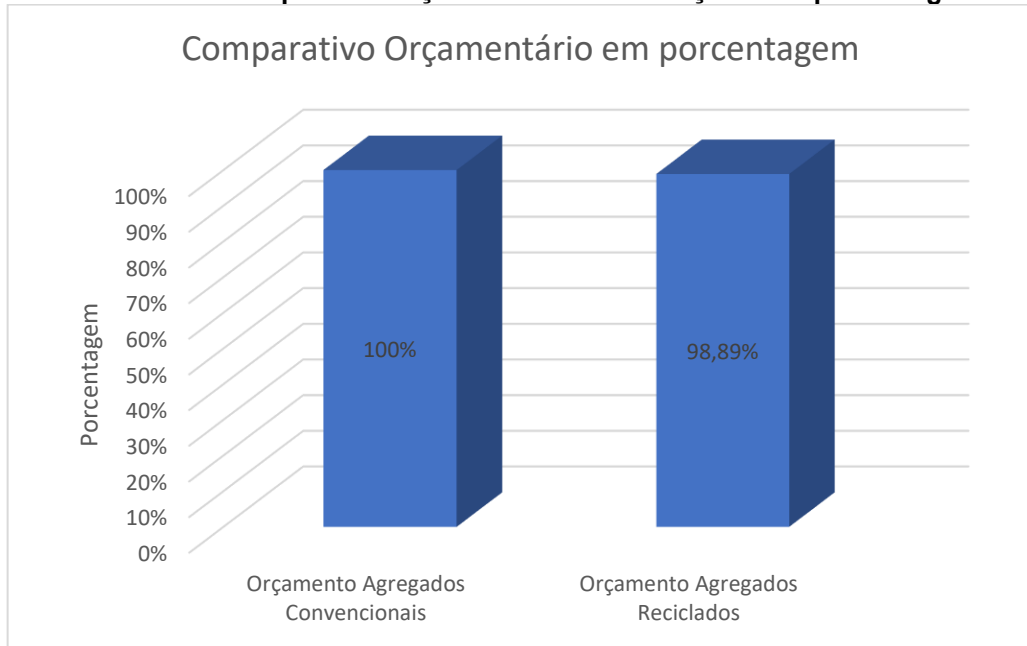


Fonte – Autoria própria (2022)

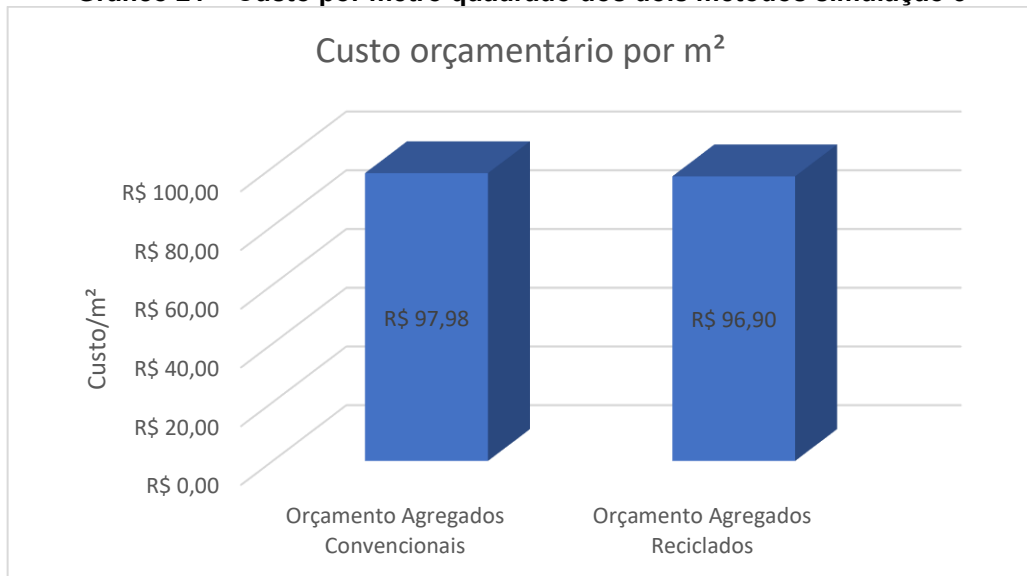
Gráfico 19 – Comparativo orçamentário na simulação 3

Fonte – Autoria própria (2022)

Observando os valores apresentados, percebemos que houve uma economia de R\$ 3.831,70 na execução das 3 camadas que compõe o pavimento flexível, isso significa uma economia de 1,11%, valor que está exposto na Gráfico 20. Para este cenário, é possível afirmar que não há um acentuado ganho econômico na utilização de brita 1 reciclada para pavimentação. Esta afirmação é retificada por meio do Gráfico 21, onde podemos perceber que a economia gerada pela utilização da brita 1 reciclada foi de apenas R\$ 1,08 por metro quadrado do projeto de pavimentação.

Gráfico 20 – Comparativo orçamentário na simulação 3 em porcentagem

Fonte – Autoria própria (2022)

Gráfico 21 – Custo por metro quadrado dos dois métodos simulação 3

Fonte – Autoria própria (2022)

Portanto, fica demonstrado que nem sempre a utilização do RCC vai conduzir a uma grande economia na seção transversal. Portanto, cada estudo da utilização deste material deve ser realizado juntamente com uma análise mecânica.

6 CONCLUSÃO

Conclui-se então que em casos específicos de solo natural com $\text{CBR} \leq 8,5\%$, a brita 1 da Usina de Reciclagem de Entulho de Guarapuava – PR pode ser utilizado como sub-base de pavimentação para esta análise, foi conduzido o ensaio CBR obtendo-se o valor de 20,92% para o material, sendo tecnicamente viável para ser empregado como sub-base. Além disso, foram avaliadas 14 situações diferentes de CBR para realizar a execução de pavimentos, com relação ao solo típico da região. Das 14 simulações, 3 foram avaliadas no *software* de elementos finitos do AEMC MeDiNa onde se obtiveram desempenhos satisfatórios quanto a deflexão elástica e em relação as tensões admissíveis.

Sendo estes valores de 590,84 μm para a maior deflexão do pavimento com rachão e 569,05 μm para a brita 1 reciclada na simulação 1, 744,94 μm para o pavimento com rachão e 730,67 μm para a brita 1 reciclada na simulação 2. E por fim, 809,40 μm para pavimento com rachão e 807,99 μm para pavimento com a brita 1 reciclada, na simulação 3. Sendo assim, foi avaliado o impacto mecânico da utilização do agregado reciclado no pavimento.

Foi observado que a utilização deste material é viável mecanicamente e economicamente para pavimentos com espessuras de sub-base de 75 cm até 30 cm. Entretanto, casos em que se observa um subleito com CBR alto como por exemplo a terceira simulação, com valor de 15%, foram observados que a utilização do agregado reciclado não é economicamente viável, embora ainda seja uma solução sustentável.

Porém, outro critério que é importante salientar na viabilidade econômica da utilização deste material, é com relação a distância de onde será executado o projeto de pavimentação, uma vez que o presente trabalho não focou neste tópico.

Além de ser viável economicamente, utilizando os agregados reciclados da construção civil é notório a preservação do meio ambiente, evitando que esses resíduos sejam descartados de maneira incorreta, como em terrenos baldios e lixões, que acabam causando o assoreamento de rios, que trazendo como consequências o entupimento de bueiros e valas e enchentes pluviais.

Concluimos então que além de ter um menor custo para a execução do projeto a utilização dos agregados reciclados para pavimentação é tecnicamente viável do ponto de vista mecânico e econômico em situações particulares, podendo ser cada vez mais explorado no Brasil, além de ser um grande aliado a sustentabilidade.

Dada a variabilidade apresentada nos estudos supracitados, evidente que os resíduos sólidos apresentam propriedades diversas, e os estudos de caracterização deste tipo de agregados devem ser efetuados com cuidado e precisão.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestão de trabalhos futuros tem-se os estudos de:

- Viabilidade técnica e econômica do concreto betuminoso usinado a quente com agregados reciclados;
- Resistência a compressão do concreto betuminoso usinado a quente com agregados reciclados;
- Ensaio Marshall do concreto betuminoso usinado a quente com agregados reciclados;
- Comparativo operacional do concreto betuminoso usinado a quente com agregados reciclados x agregados convencionais
- Utilização do agregado reciclado como base de pavimento rígido de concreto de cimento Portland.

REFERÊNCIAS

ABRECON (Associação Brasileira para Reciclagem de Construção Civil e Demolição). **Reciclagem de resíduos da construção e demolição no Brasil**. Disponível em <<http://abrecon.org.br/>>. Acesso em 20 ago. 2021.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2020**. Disponível em: <<https://abrelpe.org.br/panorama-2020/>>. Acesso em: 20 ago. 2021.

ARAUJO, D. L.; et al. Influência de agregados reciclados de Resíduos de Construção nas propriedades mecânicas do concreto. **Revista de Engenharia Eletrônica de Engenharia Civil**, Goiânia, v. 11, n 1, p. 16-34, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004**; Classificação dos Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15112**; Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15113**; Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15114**; Resíduos sólidos da construção civil – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15115** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15116**; Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004f.

BERNUCCI, L. B.; Motta, L. M.; Ceratti, J. A.; Soares, J. B. **Pavimentação Asfáltica: Formação básica para engenheiros**. Rio de Janeiro: PETROBRAS: Abeda, 2008.

BILYK, Mateus. **Gerenciamento de resíduos da construção civil no município de Guarapuava – PR: Percepção de gestores de Obras**. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná., UTFPR, Câmpus Guarapuava, 2021.

BONIFÁCIO, Guilherme Alves. Propriedades geotécnicas de um solo residual de basalto na região de Guarapuava – PR. Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná., UTFPR, Câmpus Guarapuava, 2021.

BRASIL, **Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 307: diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Brasília, de 5 de julho de 2002; Publicada no DOU nº 136, de 17/07/2002, págs. 95-96.** Disponível em: https://www.mma.gov.br/estruturas/a3p/_arquivos/36_09102008030504.pdf. Acesso em: 15 jun. 2021.

BRASIL. **Lei n.12305, de 02 de agosto de 2010.** Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm#:~:text=LEI%20N%C2%BA%2012.305%2C%20DE%20%20DE%20AGOSTO%20DE%202010.&text=Institui%20a%20Pol%C3%ADtica%20Nacional%20de,1998%3B%20e%20d%C3%A1%20outras%20provid%C3%AAscias.&text=Art. Acesso em 15 jun. 2021.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção civil na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, n. 358, p. 178-189, 2015.

COHAPAR (Companhia de Habitação do Paraná) **Escritório Regional de Guarapuava**. Disponível em: < <https://www.cohapar.pr.gov.br/Regional/Guarapuava> >. Acesso em: 09 dez. 2021.

COSTA, B. V., ROSADO, L. P., PENTEADO, C. S. G. Geração e caracterização dos resíduos da construção civil no Brasil – Análise do estado da arte. **V Simpósio sobre Resíduos Sólidos (SIRS) – Escola de Engenharia de São Carlos – USP**. p. 1-5, 2017.

DNIT (2006). **Manual de pavimentação**. Publicação IPR – 179. Ministério dos Transportes. Departamento nacional de infra-estrutura de transportes, Instituto de Pesquisas Rodoviárias.

DNER (1979). **Avaliação estrutural dos pavimentos flexíveis**. DNER-PRO 011/79 procedimento B. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem

FRANCO, F. A. C. P.; MOTTA, L. M. G. **Guia para utilização de Método MecanísticoEmpírico - MeDiNa**. Convênio UFRJ/DNIT. Rio de Janeiro. 2018.

GUARAPUAVA. **Edital de Tomada de Preços nº 07/2019**. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Guarapuava/PR. Disponível em: https://www.guarapuava.pr.gov.br/wp-content/uploads/2020/12/PRODUTO-04_VERSAO_PRELIMINAR_PMGIRS_REVISADO-2.pdf. Acesso em: 15 jun. 2021.

IPEA (Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada). **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil**: relatório de pesquisa. Brasília, 2012.

J. C. Marques Neto, **Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição na Bacia Hidrográfica do Turvo Grande**, Tese Dr., Escola de Engenharia de S. Carlos, SP (2009) 629p

LA SERNA, H. A.; REZENDE, M. M. **Agregados Para a Construção Civil**. Departamento Nacional de Produção Mineral, 2009.

LIMMER, C. V. **Planejamento, Orçamentação de Controle de Projetos e Obras**. 1. ed. Rio de Janeiro: LTC, 1996.

MACENA, C. L.; LEME, M. A. G. Reciclagem de resíduos sólidos na construção civil. **Foco: Caderno de Estudos e Pesquisas**, v. 1, p. 38-53, 2017.

MANFRINATO, J. W. S.; et al. Implantação de usina para reciclagem de resíduos da construção civil (RCC) como ação para o desenvolvimento sustentável – Estudo de caso. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO. 28., 2008, Rio de Janeiro. **Anais...**

MARQUES NETO, J. C. **Estudo da gestão municipal dos resíduos de construção e demolição na Bacia Hidrográfica do Turvo Grande**, Tese Dr., Escola de Engenharia de S. Carlos, SP (2009) 629p.

MATEUS, V. A. C. B. **Otimização da gestão de resíduos na construção civil por meio de modelagem matemática aplicando a tecnologia BIM**. 2019. 102f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2019.

MATTOS, A. D. **Como Preparar Orçamento de Obras**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2006.

MENEGAKI, M.; DAMIGOS, D. A review on current situation and challenge of construction and demolition waste management. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 13, p. 8-15, 2018.

MEDINA, J.; MOTTA, L. M. G. **Mecânica dos Pavimentos**, Editora UFRJ, Rio de Janeiro, Brasil, 2015.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Ministério do Meio Ambiente. **Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volúmosos**: Orientação para o seu licenciamento e aplicação da resolução Conama 307/2002. 2005.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE e ICLEI – BRASIL. **Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação**. Apoiando a implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos: do Nacional ao Local. Brasília, 2012.

MIRANDA, L.; ANGULO, S.C.; CARELI, E.D. **A reciclagem de resíduos de construção civil no Brasil: 1986-2008**. Ambiente Construído (Online), v.9, n.1, P. 57-71, 2009.

MOTTER, Janaína Setin. **Propriedades de concretos betuminosos usinados a quente com o uso de agregado graúdo reciclado de concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2013.

PEREIRA, Letícia Azevedo de Farias. **Análise comparativa de estruturas de pavimentos utilizando RCD e dimensionadas a partir de parâmetros distintos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2021.

RIBAS, Jeancarlo. **Parâmetros elásticos típicos de materiais de pavimentos flexíveis do Rio Grande do Sul e a sua aplicação em uma análise de custo/benefício**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2014.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. v.1 2. ed. São Paulo: Pini, 2007.

SUDA, Guilherme Henrique. **Aplicação de agregados de resíduos de construção e demolição na produção de concreto.** Trabalho de Conclusão de Curso – Coordenação de Engenharia Civil, Universidade Tecnológica Federal do Paraná., UTFPR, Câmpus Guarapuava, 2021.

TCPO: **Tabelas de composição de preços para orçamentos.** 14. ed. São Paulo: PINI, 2012.

APÊNDICE A - Resultados dos ensaios CBR's

Temp o min (1)	Penetração		Pressã o Padrão kgf/cm ² (3)	Molde nº 1				Molde nº 2				Molde nº 3			
	mm	pol.		Leituras no extensô metro mm (4)	Pressão		ISC (%) 7	Leituras no extensô metro mm (4)	Pressão		ISC (%) 7	Leituras no extensô metro mm (4)	Pressão		ISC (%) 7
					Calculada kgf/cm ² (5)	Corrigida kgf/cm ² (6)			Calculada kgf/cm ² (5)	Corrigida kgf/cm ² (6)			Calculada kgf/cm ² (5)	Corrigida kgf/cm ² (6)	
0,5	0,63	0,025	-	60	1,854	1,854		53	1,957	1,957		57,00	1,442	1,442	
1	1,27	0,05	-	122	4,326	4,326		137	3,605	3,605		126,00	3,502	3,502	
1,5	1,9	0,075	-	177	7,312	7,312		236	5,356	5,356		196,00	5,768	5,768	
2	2,54	0,1	70,31	235	10,814	10,814	0,154	317	7,518	7,518	0,107	266,00	8,033	8,033	0,114
3	3,81	0,15	-	365	18,950	18,950		500	11,741	11,741		396,00	12,874	12,874	
4	5,08	0,2	105,46	416	27,705	27,705	0,263	675	17,303	17,303	0,164	524,00	17,303	17,303	0,164
6	7,62	0,3	131,58	511	43,462	43,462	0,330	919	23,379	23,379	0,178	725,00	25,645	25,645	0,195
8	10,16	0,4	161,71					1001	30,073	30,073	0,186	846,00	35,326	35,326	0,218
10	12,7	0,5	182,8					1068	37,695	37,695	0,206				

**APÊNDICE B - Deflexões e tensões do pavimento agregados convencionais e
brita 1 reciclada**

Quadro B1 - Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada simulação 1

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	0	0	0	589,99	2,203	0,125	0,000	0	0	0	0	0	568,25	2,132	0,070	0,000
0	0	1	0	0	590,42	1,306	0,106	0,027	0	0	1	0	0	568,66	1,263	0,073	0,028
0	0	2	0	0	590,86	0,409	0,086	0,055	0	0	2	0	0	569,07	0,394	0,075	0,055
0	0	3	0	0	590,84	0,099	0,036	-0,482	0	0	3	0	0	569,05	0,100	0,047	-0,468
0	0	4	0	0	590,43	0,140	0,000	-1,377	0	0	4	0	0	568,65	0,141	0,033	-1,335
0	0	5	0	0	589,70	0,204	0,157	0,135	0	0	5	0	0	567,95	0,197	0,159	0,129
0	0	6	0	0	588,41	0,171	0,157	0,133	0	0	6	0	0	566,49	0,165	0,159	0,128
0	0	7	0	0	586,76	0,158	0,141	0,126	0	0	7	0	0	564,69	0,160	0,136	0,122
0	0	8	0	0	584,70	0,159	0,116	0,113	0	0	8	0	0	562,51	0,161	0,113	0,109
0	0	9	0	0	582,24	0,160	0,103	0,087	0	0	9	0	0	559,93	0,161	0,100	0,084
0	0	10	0	0	579,50	0,161	0,087	0,063	0	0	10	0	0	557,09	0,163	0,086	0,060
0	0	11	0	0	576,22	0,160	0,072	0,039	0	0	11	0	0	553,72	0,162	0,071	0,038
0	0	12	0	0	572,58	0,159	0,055	0,017	0	0	12	0	0	550,01	0,161	0,056	0,016
0	0	13	0	0	568,59	0,158	0,039	-0,005	0	0	13	0	0	545,96	0,160	0,040	-0,005
0	0	14	0	0	564,26	0,156	0,022	-0,027	0	0	14	0	0	541,58	0,158	0,024	-0,025
0	0	15	0	0	559,59	0,154	0,006	-0,048	0	0	15	0	0	536,89	0,157	0,009	-0,046
0	0	16	0	0	554,59	0,153	-0,010	-0,070	0	0	16	0	0	531,88	0,156	-0,007	-0,066
0	0	17	0	0	549,25	0,152	-0,026	-0,092	0	0	17	0	0	526,54	0,154	-0,021	-0,087
0	0	18	0	0	543,57	0,151	-0,041	-0,115	0	0	18	0	0	520,87	0,153	-0,036	-0,109
0	0	19	0	0	537,53	0,150	-0,055	-0,139	0	0	19	0	0	514,87	0,153	-0,049	-0,132
0	0	20	0	0	531,11	0,150	0,148	0,133	0	0	20	0	0	508,51	0,153	0,153	0,136
0	0	21	0	0	528,36	0,150	0,134	0,125	0	0	21	0	0	505,96	0,152	0,138	0,129
0	0	22	0	0	525,26	0,149	0,121	0,118	0	0	22	0	0	503,08	0,152	0,124	0,121
0	0	23	0	0	521,86	0,148	0,111	0,110	0	0	23	0	0	499,91	0,151	0,114	0,113
0	0	24	0	0	518,20	0,147	0,104	0,099	0	0	24	0	0	496,51	0,149	0,106	0,102
0	0	25	0	0	514,33	0,145	0,097	0,090	0	0	25	0	0	492,90	0,148	0,099	0,092
0	0	26	0	0	510,27	0,143	0,090	0,082	0	0	26	0	0	489,11	0,146	0,093	0,084
0	0	27	0	0	506,07	0,141	0,084	0,074	0	0	27	0	0	485,20	0,144	0,086	0,076
0	0	28	0	0	501,75	0,138	0,078	0,068	0	0	28	0	0	481,17	0,141	0,080	0,069

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μm)	Uy (μm)	Uz (μm)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μm)	Uy (μm)	Uz (μm)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	29	0	0	497,34	0,136	0,073	0,061	0	0	29	0	0	477,05	0,138	0,075	0,063
0	0	30	0	0	492,87	0,133	0,068	0,056	0	0	30	0	0	472,88	0,136	0,069	0,057
0	0	31	0	0	488,36	0,130	0,063	0,051	0	0	31	0	0	468,67	0,133	0,064	0,052
0	0	32	0	0	483,82	0,128	0,058	0,046	0	0	32	0	0	464,43	0,130	0,060	0,047
0	0	33	0	0	479,27	0,125	0,054	0,042	0	0	33	0	0	460,19	0,127	0,055	0,043
0	0	34	0	0	474,73	0,122	0,050	0,038	0	0	34	0	0	455,95	0,124	0,051	0,039
0	0	35	0	0	470,21	0,119	0,046	0,035	0	0	35	0	0	451,73	0,121	0,047	0,036
0	0	36	0	0	465,72	0,116	0,043	0,032	0	0	36	0	0	447,54	0,118	0,044	0,032
0	0	37	0	0	461,27	0,113	0,039	0,029	0	0	37	0	0	443,39	0,114	0,040	0,029
0	0	38	0	0	456,87	0,110	0,036	0,026	0	0	38	0	0	439,28	0,111	0,037	0,027
0	0	39	0	0	452,52	0,107	0,033	0,024	0	0	39	0	0	435,23	0,108	0,034	0,024
0	0	40	0	0	448,23	0,104	0,031	0,021	0	0	40	0	0	431,23	0,105	0,032	0,022
0	0	41	0	0	444,01	0,101	0,028	0,019	0	0	41	0	0	427,30	0,102	0,029	0,020
0	0	42	0	0	439,85	0,098	0,026	0,017	0	0	42	0	0	423,43	0,099	0,027	0,018
0	0	43	0	0	435,76	0,095	0,024	0,015	0	0	43	0	0	419,62	0,096	0,024	0,016
0	0	44	0	0	431,74	0,092	0,022	0,014	0	0	44	0	0	415,87	0,093	0,022	0,014
0	0	45	0	0	427,79	0,089	0,020	0,012	0	0	45	0	0	412,20	0,091	0,020	0,012
0	0	46	0	0	423,93	0,087	0,018	0,011	0	0	46	0	0	408,60	0,088	0,018	0,011
0	0	47	0	0	420,13	0,084	0,016	0,009	0	0	47	0	0	405,07	0,085	0,016	0,009
0	0	48	0	0	416,41	0,081	0,014	0,008	0	0	48	0	0	401,62	0,082	0,015	0,008
0	0	49	0	0	412,77	0,079	0,013	0,007	0	0	49	0	0	398,23	0,080	0,013	0,007
0	0	50	0	0	409,21	0,077	0,011	0,006	0	0	50	0	0	394,92	0,077	0,012	0,006
0	0	51	0	0	405,72	0,074	0,010	0,004	0	0	51	0	0	391,68	0,075	0,010	0,004
0	0	52	0	0	402,30	0,072	0,009	0,003	0	0	52	0	0	388,51	0,073	0,009	0,003
0	0	53	0	0	398,96	0,070	0,007	0,002	0	0	53	0	0	385,41	0,070	0,008	0,002
0	0	54	0	0	395,70	0,067	0,006	0,001	0	0	54	0	0	382,38	0,068	0,006	0,001
0	0	55	0	0	392,50	0,065	0,005	0,000	0	0	55	0	0	379,41	0,066	0,005	0,000
0	0	56	0	0	389,37	0,063	0,004	0,000	0	0	56	0	0	376,51	0,064	0,004	-0,001
0	0	57	0	0	386,31	0,061	0,003	-0,001	0	0	57	0	0	373,67	0,061	0,003	-0,002
0	0	58	0	0	383,32	0,059	0,002	-0,002	0	0	58	0	0	370,90	0,059	0,002	-0,002

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	59	0	0	380,39	0,057	0,001	-0,003	0	0	59	0	0	368,19	0,057	0,001	-0,003
0	0	60	0	0	377,52	0,055	0,000	-0,004	0	0	60	0	0	365,53	0,056	0,000	-0,004
0	0	61	0	0	374,71	0,053	-0,001	-0,005	0	0	61	0	0	362,94	0,054	-0,001	-0,005
0	0	62	0	0	371,97	0,052	-0,002	-0,005	0	0	62	0	0	360,39	0,052	-0,002	-0,006
0	0	63	0	0	369,28	0,050	-0,003	-0,006	0	0	63	0	0	357,90	0,050	-0,003	-0,007
0	0	64	0	0	366,64	0,048	-0,004	-0,007	0	0	64	0	0	355,47	0,048	-0,004	-0,007
0	0	65	0	0	364,05	0,047	-0,005	-0,008	0	0	65	0	0	353,08	0,047	-0,005	-0,008
0	0	66	0	0	361,52	0,045	-0,006	-0,009	0	0	66	0	0	350,73	0,045	-0,006	-0,009
0	0	67	0	0	359,03	0,044	-0,007	-0,009	0	0	67	0	0	348,43	0,044	-0,007	-0,010
0	0	68	0	0	356,59	0,042	-0,008	-0,010	0	0	68	0	0	346,18	0,042	-0,008	-0,010
0	0	69	0	0	354,19	0,041	-0,008	-0,011	0	0	69	0	0	343,96	0,041	-0,009	-0,011
0	0	70	0	0	351,83	0,039	-0,009	-0,012	0	0	70	0	0	341,78	0,039	-0,010	-0,012
0	0	71	0	0	349,50	0,038	-0,010	-0,012	0	0	71	0	0	339,64	0,038	-0,011	-0,013
0	0	72	0	0	347,22	0,037	-0,011	-0,013	0	0	72	0	0	337,53	0,037	-0,012	-0,014
0	0	73	0	0	344,96	0,036	-0,012	-0,014	0	0	73	0	0	335,45	0,035	-0,013	-0,015
0	0	74	0	0	342,74	0,034	-0,013	-0,015	0	0	74	0	0	333,40	0,034	-0,013	-0,015
0	0	75	0	0	340,54	0,033	-0,014	-0,016	0	0	75	0	0	331,37	0,033	-0,014	-0,016
0	0	76	0	0	338,37	0,032	-0,015	-0,017	0	0	76	0	0	329,37	0,032	-0,015	-0,017
0	0	77	0	0	336,22	0,031	-0,016	-0,017	0	0	77	0	0	327,39	0,031	-0,016	-0,018
0	0	78	0	0	334,08	0,030	-0,017	-0,018	0	0	78	0	0	325,42	0,030	-0,017	-0,019
0	0	79	0	0	331,97	0,029	-0,018	-0,019	0	0	79	0	0	323,47	0,029	-0,018	-0,020
0	0	80	0	0	329,86	0,028	-0,019	-0,020	0	0	80	0	0	321,53	0,028	-0,019	-0,021
0	0	81	0	0	327,77	0,027	-0,020	-0,021	0	0	81	0	0	319,59	0,027	-0,020	-0,022
0	0	82	0	0	325,68	0,027	-0,021	-0,022	0	0	82	0	0	317,66	0,026	-0,022	-0,023
0	0	83	0	0	323,58	0,026	-0,022	-0,023	0	0	83	0	0	315,73	0,025	-0,023	-0,024
0	0	84	0	0	321,49	0,025	-0,023	-0,024	0	0	84	0	0	313,80	0,025	-0,024	-0,026
0	0	85	0	0	319,40	0,024	-0,024	-0,026	0	0	85	0	0	311,86	0,024	-0,025	-0,027
0	0	86	0	0	317,28	0,024	-0,025	-0,027	0	0	86	0	0	309,92	0,023	-0,026	-0,028
0	0	87	0	0	315,15	0,023	-0,026	-0,028	0	0	87	0	0	307,95	0,023	-0,028	-0,029
0	0	88	0	0	313,00	0,023	-0,028	-0,029	0	0	88	0	0	305,96	0,022	-0,029	-0,031

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μm)	Uy (μm)	Uz (μm)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μm)	Uy (μm)	Uz (μm)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	89	0	0	310,87	0,022	-0,029	-0,031	0	0	89	0	0	303,97	0,022	-0,030	-0,032
0	0	90	0	0	308,69	0,022	-0,030	-0,032	0	0	90	0	0	301,97	0,021	-0,032	-0,034
0	0	91	0	0	306,50	0,022	-0,032	-0,034	0	0	91	0	0	299,93	0,021	-0,033	-0,035
0	0	92	0	0	304,25	0,021	-0,033	-0,035	0	0	92	0	0	297,85	0,021	-0,035	-0,037
0	0	93	0	0	301,97	0,021	-0,035	-0,037	0	0	93	0	0	295,74	0,021	-0,036	-0,038
0	0	94	0	0	299,64	0,021	-0,036	-0,038	0	0	94	0	0	293,57	0,020	-0,038	-0,040
0	0	95	0	0	297,01	0,021	0,019	0,019	0	0	95	0	0	291,11	0,020	0,018	0,018
0	0	96	0	0	296,24	0,021	0,018	0,018	0	0	96	0	0	290,37	0,020	0,018	0,017
0	0	97	0	0	295,40	0,021	0,017	0,017	0	0	97	0	0	289,53	0,020	0,017	0,017
0	0	98	0	0	294,47	0,021	0,017	0,017	0	0	98	0	0	288,66	0,020	0,016	0,016
0	0	99	0	0	293,51	0,021	0,016	0,016	0	0	99	0	0	287,73	0,020	0,016	0,016
0	0	100	0	0	292,50	0,021	0,016	0,016	0	0	100	0	0	286,73	0,020	0,015	0,015

Quadro B2 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada simulação 2

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μm)	Uy (μm)	Uz (μm)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μm)	Uy (μm)	Uz (μm)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	0	0	0	743,82	2,576	0,460	0,000	0	0	0	0	0	729,59	2,513	0,413	0,000
0	0	1	0	0	744,38	1,529	0,306	0,026	0	0	1	0	0	730,13	1,492	0,278	0,027
0	0	2	0	0	744,94	0,483	0,152	0,053	0	0	2	0	0	730,67	0,470	0,143	0,053
0	0	3	0	0	744,94	0,095	-0,031	-0,557	0	0	3	0	0	730,67	0,096	-0,022	-0,545
0	0	4	0	0	744,45	0,135	-0,201	-1,601	0	0	4	0	0	730,19	0,136	-0,173	-1,564
0	0	5	0	0	743,55	0,245	0,171	0,152	0	0	5	0	0	729,31	0,238	0,167	0,153
0	0	6	0	0	743,12	0,206	0,164	0,152	0	0	6	0	0	728,74	0,200	0,160	0,153
0	0	7	0	0	742,24	0,170	0,153	0,152	0	0	7	0	0	727,73	0,165	0,154	0,149
0	0	8	0	0	740,85	0,153	0,137	0,136	0	0	8	0	0	726,22	0,155	0,134	0,133
0	0	9	0	0	738,95	0,153	0,118	0,105	0	0	9	0	0	724,22	0,155	0,116	0,102
0	0	10	0	0	736,68	0,154	0,098	0,075	0	0	10	0	0	721,87	0,156	0,097	0,073

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	11	0	0	733,79	0,153	0,078	0,046	0	0	11	0	0	718,89	0,155	0,077	0,045
0	0	12	0	0	730,45	0,151	0,056	0,019	0	0	12	0	0	715,48	0,153	0,057	0,018
0	0	13	0	0	726,66	0,149	0,035	-0,009	0	0	13	0	0	711,65	0,151	0,036	-0,008
0	0	14	0	0	722,45	0,147	0,013	-0,036	0	0	14	0	0	707,39	0,149	0,015	-0,034
0	0	15	0	0	717,82	0,145	-0,008	-0,062	0	0	15	0	0	702,73	0,147	-0,006	-0,060
0	0	16	0	0	712,75	0,143	-0,029	-0,090	0	0	16	0	0	697,65	0,146	-0,026	-0,087
0	0	17	0	0	707,26	0,141	-0,050	-0,118	0	0	17	0	0	692,15	0,144	-0,046	-0,114
0	0	18	0	0	701,32	0,140	-0,070	-0,146	0	0	18	0	0	686,22	0,143	-0,066	-0,141
0	0	19	0	0	694,91	0,139	-0,090	-0,177	0	0	19	0	0	679,84	0,142	-0,085	-0,171
0	0	20	0	0	688,02	0,168	0,149	0,139	0	0	20	0	0	673,00	0,177	0,156	0,142
0	0	21	0	0	686,38	0,151	0,139	0,138	0	0	21	0	0	671,59	0,158	0,145	0,141
0	0	22	0	0	684,28	0,138	0,134	0,128	0	0	22	0	0	669,75	0,141	0,141	0,134
0	0	23	0	0	681,77	0,137	0,119	0,117	0	0	23	0	0	667,52	0,139	0,125	0,123
0	0	24	0	0	678,92	0,135	0,107	0,106	0	0	24	0	0	664,95	0,138	0,112	0,111
0	0	25	0	0	675,75	0,133	0,098	0,093	0	0	25	0	0	662,08	0,135	0,102	0,098
0	0	26	0	0	672,32	0,131	0,088	0,082	0	0	26	0	0	658,95	0,133	0,092	0,086
0	0	27	0	0	668,67	0,128	0,079	0,071	0	0	27	0	0	655,60	0,130	0,083	0,075
0	0	28	0	0	664,81	0,125	0,070	0,061	0	0	28	0	0	652,07	0,127	0,074	0,064
0	0	29	0	0	660,79	0,122	0,062	0,052	0	0	29	0	0	648,37	0,124	0,065	0,055
0	0	30	0	0	656,62	0,119	0,054	0,043	0	0	30	0	0	644,53	0,120	0,056	0,045
0	0	31	0	0	652,34	0,115	0,046	0,035	0	0	31	0	0	640,58	0,117	0,048	0,037
0	0	32	0	0	647,95	0,112	0,038	0,027	0	0	32	0	0	636,53	0,113	0,040	0,028
0	0	33	0	0	643,48	0,108	0,031	0,020	0	0	33	0	0	632,38	0,110	0,032	0,021
0	0	34	0	0	638,92	0,105	0,024	0,013	0	0	34	0	0	628,17	0,106	0,025	0,013
0	0	35	0	0	634,30	0,101	0,017	0,006	0	0	35	0	0	623,88	0,102	0,017	0,006
0	0	36	0	0	629,60	0,098	0,010	-0,001	0	0	36	0	0	619,53	0,099	0,010	-0,002
0	0	37	0	0	624,85	0,094	0,004	-0,008	0	0	37	0	0	615,11	0,095	0,003	-0,009
0	0	38	0	0	620,03	0,091	-0,003	-0,014	0	0	38	0	0	610,64	0,091	-0,004	-0,016
0	0	39	0	0	615,15	0,088	-0,010	-0,021	0	0	39	0	0	606,09	0,088	-0,011	-0,023
0	0	40	0	0	610,20	0,085	-0,016	-0,027	0	0	40	0	0	601,49	0,085	-0,018	-0,030

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	41	0	0	605,17	0,082	-0,023	-0,034	0	0	41	0	0	596,80	0,082	-0,025	-0,037
0	0	42	0	0	600,04	0,079	-0,029	-0,041	0	0	42	0	0	592,01	0,079	-0,032	-0,044
0	0	43	0	0	594,80	0,077	-0,036	-0,048	0	0	43	0	0	587,12	0,076	-0,039	-0,051
0	0	44	0	0	589,45	0,074	-0,043	-0,055	0	0	44	0	0	582,12	0,074	-0,046	-0,059
0	0	45	0	0	583,96	0,072	-0,049	-0,062	0	0	45	0	0	576,98	0,072	-0,053	-0,067
0	0	46	0	0	578,31	0,071	-0,056	-0,070	0	0	46	0	0	571,69	0,070	-0,061	-0,075
0	0	47	0	0	572,48	0,069	-0,064	-0,078	0	0	47	0	0	566,21	0,068	-0,068	-0,083
0	0	48	0	0	566,43	0,068	-0,071	-0,086	0	0	48	0	0	560,51	0,067	-0,076	-0,092
0	0	49	0	0	560,14	0,067	-0,079	-0,095	0	0	49	0	0	554,59	0,066	-0,084	-0,102
0	0	50	0	0	553,61	0,067	0,061	0,060	0	0	50	0	0	548,43	0,066	0,060	0,059
0	0	51	0	0	551,05	0,067	0,057	0,056	0	0	51	0	0	545,91	0,066	0,056	0,056
0	0	52	0	0	548,18	0,067	0,054	0,053	0	0	52	0	0	543,07	0,066	0,053	0,052
0	0	53	0	0	544,99	0,067	0,050	0,050	0	0	53	0	0	539,94	0,066	0,049	0,049
0	0	54	0	0	541,55	0,066	0,047	0,047	0	0	54	0	0	536,56	0,065	0,047	0,046
0	0	55	0	0	537,87	0,066	0,045	0,044	0	0	55	0	0	532,94	0,065	0,044	0,043

Quadro B3 – Deflexão do pavimento agregados convencionais x brita 1 reciclada simulação 3

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	0	0	0	807,96	3,061	0,806	0,000	0	0	0	0	0	806,55	3,055	0,802	0,000
0	0	1	0	0	808,67	1,820	0,513	0,024	0	0	1	0	0	807,26	1,816	0,510	0,024
0	0	2	0	0	809,38	0,579	0,220	0,048	0	0	2	0	0	807,97	0,578	0,219	0,048
0	0	3	0	0	809,40	0,087	-0,102	-0,654	0	0	3	0	0	807,99	0,087	-0,101	-0,652
0	0	4	0	0	808,81	0,123	-0,411	-1,891	0	0	4	0	0	807,40	0,123	-0,408	-1,888
0	0	5	0	0	807,71	0,295	0,205	0,139	0	0	5	0	0	806,31	0,295	0,205	0,139
0	0	6	0	0	808,44	0,249	0,192	0,139	0	0	6	0	0	807,02	0,248	0,192	0,139

Agregados convencionais									Brita 1 reciclada								
Coordenadas			Deflexões			Tensões			Coordenadas			Deflexões			Tensões		
x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)	x (cm)	y (cm)	z (cm)	Ux (μ m)	Uy (μ m)	Uz (μ m)	s1 (MPa)	s2 (MPa)	s3 (MPa)
0	0	7	0	0	808,59	0,206	0,175	0,139	0	0	7	0	0	807,16	0,206	0,175	0,139
0	0	8	0	0	808,13	0,166	0,154	0,139	0	0	8	0	0	806,68	0,165	0,154	0,139
0	0	9	0	0	807,06	0,138	0,131	0,127	0	0	9	0	0	805,61	0,138	0,130	0,127
0	0	10	0	0	805,53	0,138	0,105	0,091	0	0	10	0	0	804,06	0,138	0,105	0,091
0	0	11	0	0	803,28	0,136	0,080	0,056	0	0	11	0	0	801,81	0,136	0,080	0,056
0	0	12	0	0	800,50	0,133	0,053	0,022	0	0	12	0	0	799,03	0,133	0,053	0,022
0	0	13	0	0	797,20	0,130	0,027	-0,012	0	0	13	0	0	795,72	0,130	0,027	-0,012
0	0	14	0	0	793,38	0,127	0,000	-0,045	0	0	14	0	0	791,90	0,127	0,000	-0,045
0	0	15	0	0	789,06	0,124	-0,026	-0,079	0	0	15	0	0	787,57	0,124	-0,026	-0,079
0	0	16	0	0	784,21	0,121	-0,053	-0,113	0	0	16	0	0	782,72	0,121	-0,053	-0,113
0	0	17	0	0	778,83	0,118	-0,079	-0,149	0	0	17	0	0	777,34	0,118	-0,079	-0,148
0	0	18	0	0	772,89	0,116	-0,105	-0,185	0	0	18	0	0	771,41	0,117	-0,104	-0,185
0	0	19	0	0	766,37	0,115	-0,130	-0,224	0	0	19	0	0	764,89	0,115	-0,129	-0,224
0	0	20	0	0	759,22	0,115	0,073	0,060	0	0	20	0	0	757,75	0,115	0,078	0,063
0	0	21	0	0	755,49	0,115	0,049	0,046	0	0	21	0	0	754,41	0,115	0,052	0,048
0	0	22	0	0	751,10	0,115	0,032	0,026	0	0	22	0	0	750,42	0,115	0,033	0,027
0	0	23	0	0	746,08	0,114	0,018	0,003	0	0	23	0	0	745,80	0,115	0,018	0,002
0	0	24	0	0	740,42	0,114	0,004	-0,019	0	0	24	0	0	740,54	0,114	0,003	-0,022
0	0	25	0	0	734,16	0,114	0,105	0,100	0	0	25	0	0	734,67	0,114	0,106	0,100
0	0	26	0	0	729,80	0,114	0,096	0,094	0	0	26	0	0	730,30	0,114	0,096	0,094
0	0	27	0	0	724,74	0,114	0,088	0,088	0	0	27	0	0	725,24	0,114	0,088	0,088
0	0	28	0	0	719,09	0,113	0,083	0,081	0	0	28	0	0	719,57	0,113	0,083	0,081
0	0	29	0	0	712,91	0,112	0,078	0,074	0	0	29	0	0	713,39	0,112	0,078	0,074
0	0	30	0	0	706,29	0,111	0,073	0,068	0	0	30	0	0	706,76	0,111	0,073	0,068

**APÊNDICE C - Orçamento de pavimentação com agregados convencionais e brita
1 reciclada**

Quadro C1 – Orçamento do projeto de pavimentação utilizando agregados convencionais simulação 1

Item	Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário				Custo total			
					Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total	Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total
1	30.135.000083.SER	Sub-base de rachão	m³	2648,64	R\$ 93,62	R\$ 2,92	R\$ 0,44	R\$ 96,98	R\$ 247.965,68	R\$ 7.734,03	R\$ 1.177,27	R\$ 256.876,97
2	3R 32 12 00 00 00 00 05 07	Base brita graduada	m³	529,73	R\$ 129,18	R\$ 7,41	R\$ 1,94	R\$ 138,53	R\$ 68.430,26	R\$ 3.925,28	R\$ 1.030,11	R\$ 73.385,66
3	3R 32 13 17 00 00 00 00 35	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	m³	176,58	R\$ 1.343,01	R\$ 89,97	R\$ 14,08	R\$ 1.447,06	R\$ 237.143,33	R\$ 15.886,54	R\$ 2.486,98	R\$ 255.516,85
											Total	R\$ 585.779,48

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quadro C2 – Orçamento do projeto de pavimentação utilizando agregados convencionais simulação 2

Item	Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário				Custo total			
					Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total	Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total
1	30.135.000083.SER	Sub-base de rachão	m³	1059,46	R\$ 93,62	R\$ 2,92	R\$ 0,44	R\$ 96,98	R\$ 99.186,27	R\$ 3.093,61	R\$ 470,91	R\$ 102.750,79
2	3R 32 12 00 00 00 00 05 07	Base brita graduada	m³	529,73	R\$ 129,18	R\$ 7,41	R\$ 1,94	R\$ 138,53	R\$ 68.430,26	R\$ 3.925,28	R\$ 1.030,11	R\$ 73.385,66
3	3R 32 13 17 00 00 00 00 35	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	m³	176,58	R\$ 1.343,01	R\$ 89,97	R\$ 14,08	R\$ 1.447,06	R\$ 237.143,33	R\$ 15.886,54	R\$ 2.486,98	R\$ 255.516,85
											Total	R\$ 431.653,30

Fonte: Autoria Própria (2022)

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quadro C3 – Orçamento do projeto de pavimentação utilizando agregados convencionais simulação 3

Item	Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário				Custo total			
					Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total	Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total
1	30.135.000083.SER	Sub-base de rachão	m³	176,58	R\$ 93,62	R\$ 2,92	R\$ 0,44	R\$ 96,98	R\$ 16.531,05	R\$ 515,60	R\$ 78,48	R\$ 17.125,13
2	3R 32 12 00 00 00 00 05 07	Base brita graduada	m³	529,73	R\$ 129,18	R\$ 7,41	R\$ 1,94	R\$ 138,53	R\$ 68.430,26	R\$ 3.925,28	R\$ 1.030,11	R\$ 73.385,66
3	3R 32 13 17 00 00 00 00 35	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	m³	176,58	R\$ 1.343,01	R\$ 89,97	R\$ 14,08	R\$ 1.447,06	R\$ 237.143,33	R\$ 15.886,54	R\$ 2.486,98	R\$ 255.516,85
											Total	R\$ 346.027,64

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quadro C4 – Orçamento do projeto de pavimentação utilizando brita 1 reciclada simulação 1

Item	Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário				Custo total			
					Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total	Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total
1	30.135.000083.SER	Sub-base de brita 1 reciclada	m³	2648,64	R\$ 71,92	R\$ 2,92	R\$ 0,44	R\$ 75,28	R\$ 190.490,19	R\$ 7.734,03	R\$ 1.177,27	R\$ 199.401,49
2	3R 32 12 00 00 00 00 05 07	Base brita graduada	m³	529,73	R\$ 129,18	R\$ 7,41	R\$ 1,94	R\$ 138,53	R\$ 68.430,26	R\$ 3.925,28	R\$ 1.030,11	R\$ 73.385,66
3	3R 32 13 17 00 00 00 00 35	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	m³	176,58	R\$ 1.343,01	R\$ 89,97	R\$ 14,08	R\$ 1.447,06	R\$ 237.143,33	R\$ 15.886,54	R\$ 2.486,98	R\$ 255.516,85
											Total	R\$ 528.304,00

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quadro C5 – Orçamento do projeto de pavimentação utilizando brita 1 reciclada simulação 2

Item	Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário				Custo total			
					Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total	Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total
1	30.135.000083.SER	Sub-base de brita 1 reciclada	m³	1059,46	R\$ 71,92	R\$ 2,92	R\$ 0,44	R\$ 75,28	R\$ 76.196,08	R\$ 3.093,61	R\$ 470,91	R\$ 79.760,59
2	3R 32 12 00 00 00 00 05 07	Base brita graduada	m³	529,73	R\$ 129,18	R\$ 7,41	R\$ 1,94	R\$ 138,53	R\$ 68.430,26	R\$ 3.925,28	R\$ 1.030,11	R\$ 73.385,66
3	3R 32 13 17 00 00 00 00 35	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	m³	176,58	R\$ 1.343,01	R\$ 89,97	R\$ 14,08	R\$ 1.447,06	R\$ 237.143,33	R\$ 15.886,54	R\$ 2.486,98	R\$ 255.516,85
											Total	R\$ 408.663,10

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quadro C6 – Orçamento do projeto de pavimentação utilizando brita 1 reciclada simulação 3

Item	Código	Descrição	Unidade	Quantidade	Custo unitário				Custo total			
					Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total	Material	Equipamento	Mão-de-obra	Total
1	30.135.000083.SER	Sub-base de brita 1 reciclada	m³	1059,46	R\$ 71,92	R\$ 2,92	R\$ 0,44	R\$ 75,28	R\$ 76.196,08	R\$ 3.093,61	R\$ 470,91	R\$ 79.760,59
2	3R 32 12 00 00 00 00 05 07	Base brita graduada	m³	529,73	R\$ 129,18	R\$ 7,41	R\$ 1,94	R\$ 138,53	R\$ 68.430,26	R\$ 3.925,28	R\$ 1.030,11	R\$ 73.385,66
3	3R 32 13 17 00 00 00 00 35	Concreto betuminoso usinado a quente - CBUQ - capa de rolamento	m³	176,58	R\$ 1.343,01	R\$ 89,97	R\$ 14,08	R\$ 1.447,06	R\$ 237.143,33	R\$ 15.886,54	R\$ 2.486,98	R\$ 255.516,85
											Total	R\$ 408.663,10

Fonte: Autoria Própria (2022)

Quadro C7 – Preço agregados convencionais em Guarapuava dia 09/12/2021

Preço Material de Construção						
Loja	Preço					
	Areia Média	Brita 1	Pó de Pedra	Pedrisco	Rachão	Rachãozinho
Empresa 1	R\$ 149,99	R\$ 73,99	R\$ 66,99	R\$ 61,99		
Empresa 2	R\$ 165,90	R\$ 79,90	R\$ 100,73	-	-	-
Empresa 3	R\$ 150,00	R\$ 69,90	R\$ 79,90	-	-	-
Empresa 4	R\$ 174,90	R\$ 81,00	R\$ 85,90	R\$ 89,00	-	-
Empresa 5	R\$ 169,00	R\$ 74,00	R\$ 79,00	R\$ 77,00	-	-
Empresa 6	R\$ 180,00	R\$ 95,00	R\$ 88,00	R\$ 95,00	-	-
Empresa 7	R\$ 195,00	R\$ 96,00	R\$ 99,00	R\$ 96,00	-	-
Empresa 8	R\$ 145,00	R\$ 80,00	R\$ 85,00	R\$ 80,00	-	-
Empresa 9	R\$ 178,00	R\$ 82,00	R\$ 92,90	R\$ 88,90	-	-
Empresa 10	R\$ 168,00	R\$ 95,00	R\$ 108,00	-		
Empresa 11	-	R\$ 68,00	R\$ 71,00	R\$ 65,00	R\$ 88,50	R\$ 65,00
Empresa 12	-	R\$ 66,00	R\$ 66,00	R\$ 66,00	R\$ 77,00	R\$ 66,00
Média dos Preços	R\$ 167,58	R\$ 80,07	R\$ 85,20	R\$ 79,88	R\$ 82,75	R\$ 65,50

Fonte: Autoria Própria (2022)

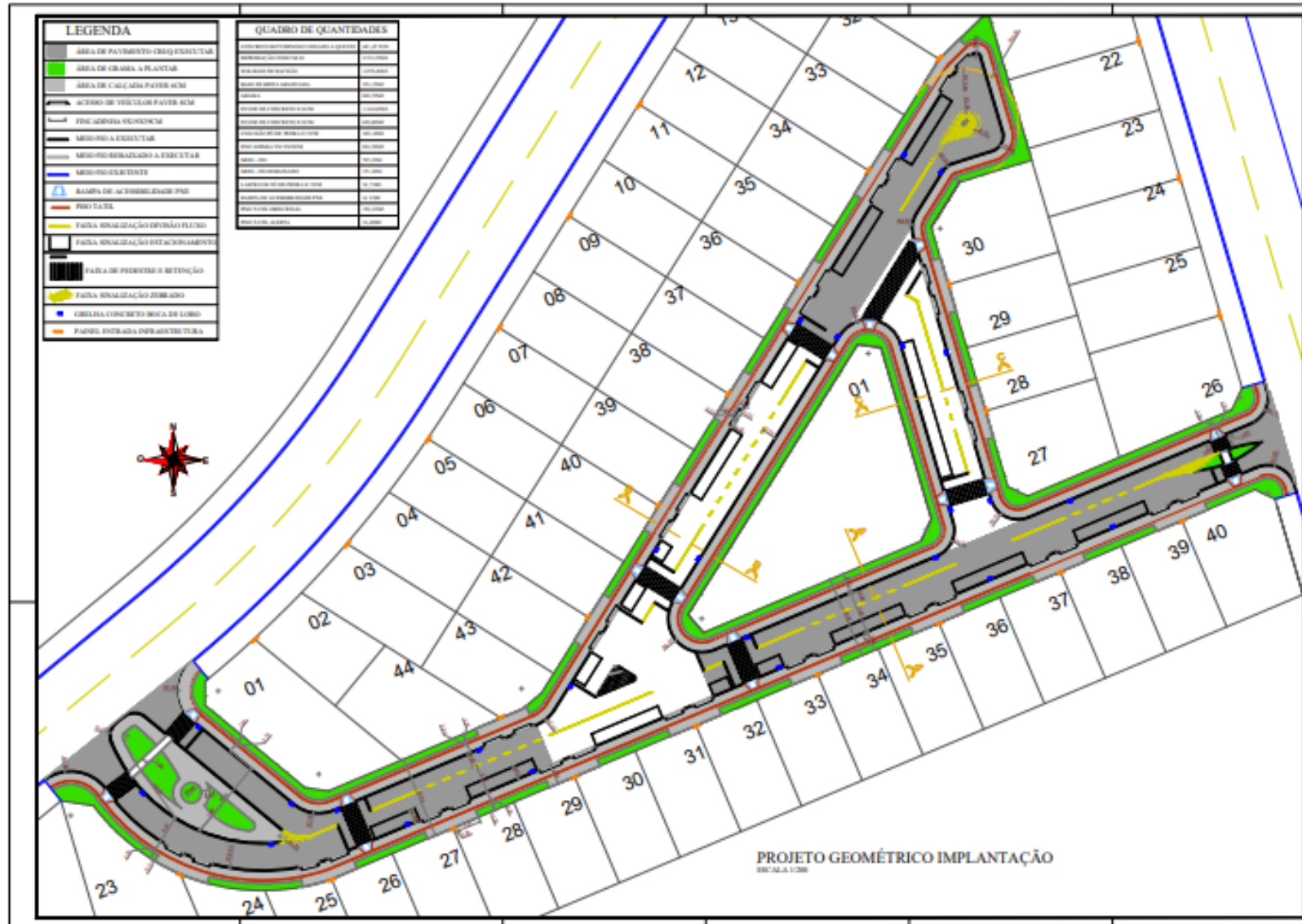
Quadro C8 – Preço agregados convencionais em Guarapuava cotados em dólar comercial a 4,79 no dia 03/06/2022

Preço Material de Construção						
Loja	Preço					
	Areia Média	Brita 1	Pó de Pedra	Pedrisco	Rachão	Rachãozinho
Empresa 1	US\$ 31,31	US\$ 15,45	US\$ 13,99	US\$ 12,94	-	-
Empresa 2	US\$ 34,63	US\$ 16,68	US\$ 21,03	-	-	-
Empresa 3	US\$ 31,32	US\$ 14,59	US\$ 16,68	-	-	-
Empresa 4	US\$ 36,51	US\$ 16,91	US\$ 17,93	US\$ 18,58	-	-
Empresa 5	US\$ 35,28	US\$ 15,45	US\$ 16,49	US\$ 16,08	-	-
Empresa 6	US\$ 37,58	US\$ 19,83	US\$ 18,37	US\$ 19,83	-	-
Empresa 7	US\$ 40,71	US\$ 20,04	US\$ 20,67	US\$ 20,04	-	-
Empresa 8	US\$ 30,27	US\$ 16,70	US\$ 17,75	US\$ 16,70	-	-
Empresa 9	US\$ 37,16	US\$ 17,12	US\$ 19,39	US\$ 18,56	-	-
Empresa 10	US\$ 35,07	US\$ 19,83	US\$ 22,55	-	-	-
Empresa 11	-	US\$ 14,20	US\$ 14,82	US\$ 13,57	US\$ 18,48	US\$ 13,57
Empresa 12	-	US\$ 13,78	US\$ 13,78	US\$ 13,78	US\$ 16,08	US\$ 13,78
Média dos Preços	US\$ 29,15	US\$ 16,72	US\$ 17,79	US\$ 16,68	US\$ 11,52	US\$ 6,84

Fonte: Autoria Própria (2022)

ANEXO A - Planta Baixa do projeto de pavimentação

Figura A1 – Planta baixa do projeto de pavimentação utilizado



Fonte – Adaptado de empresa X (2022).

**ANEXO B - Tabela de encargos sociais (Folha de Salários) – Sem
desoneração**

TABELA DE ENCARGOS SOCIAIS (FOLHA DE SALÁRIOS) – Sem desoneração	
Grupo I	
INSS	20,00%
FGTS	8,00%
Salário Educação	2,50%
SESI	1,50%
SENAI	1,00%
SEBRAE	0,60%
INCRA	0,20%
Seguro Acidente	3,00%
SECONCI	1,00%
Total Grupo I	37,80%
Grupo II – Encargos com incidência do Grupo I	
Repouso Semanal Remunerado	17,75%
Férias + Bonificação de 1/3	14,79%
Feriados	4,07%
Auxílio enfermidade e faltas justificadas	1,85%
Acidente de trabalho	0,13%
Licença Paternidade	0,02%
13º Salário	11,09%
Adicional noturno	0,41%
Total Grupo II	50,10%
Incidência do GRUPO I sobre o GRUPO II	18,94%
GRUPO III	
Aviso prévio	18,15%
Demissão sem justa causa	5,06%
Indenização adicional	1,44%
Incidência do Grupo I no aviso prévio (sem FGTS e SECONCI)	5,23%
Total Grupo III	29,87%
Grupo IV	
EPI – Equipamento de Proteção Individual	2,60%
Seguro de vida	0,90%
Vale transporte	6,56%
Vale compras	25,02%
Café da manhã	6,02%
Total Grupo IV	41,09%
SUBTOTAL	177,80%

Fonte: Sinduscon PR (2022)