

**PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE SÃO PAULO
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

**JOSIANE SANTOS DE OLIVEIRA
JULYANA ROSA MOURA**

**PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO NÃO ESPUMADO COMO ALTERNATIVA
À BRITA GRADUADA SIMPLES PARA REPOSIÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO**

**SÃO PAULO
2023**

JOSIANE SANTOS DE OLIVEIRA

JULYANA ROSA MOURA

**PAVIMENTO ASFÁLTICO RECICLADO NÃO ESPUMADO COMO ALTERNATIVA
À BRITA GRADUADA SIMPLES PARA REPOSIÇÃO DE PAVIMENTO ASFÁLTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao Curso de Engenharia Civil da Universidade
Católica de São Paulo, como requisito parcial
para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientadora: Profa. Dra Karen Niccoli Ramirez

Aprovado em: ____/____/____

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dra. Karen Niccoli Ramirez – PUC-SP

Prof. Dr Diego Lourenço Cartacho – PUC-SP

Prof. Dra. Roberta Vieira Raggi – PUC-SP

RESUMO

Os resíduos de construção e demolição - RCD - têm causado impactos ambientais e se tornaram uma preocupação global. No entanto, o agregado reciclado proveniente dos resíduos da construção civil, apresenta aplicações viáveis, tais como a substituição de materiais convencionais em projetos de pavimentação. Esta pesquisa consiste em analisar a viabilidade técnica da utilização de RAP não espumado - Reciclagem de Pavimento Asfáltico não espumado - em substituição da brita graduada simples - BGS - na camada de base da reposição de pavimento das valas em via de baixo tráfego. Para isso, foi realizado um estudo de caso, no qual é aplicado o RAP em duas valas de via local e o BGS em outras duas valas na mesma via, nas quais foram analisadas as propriedades físicas e mecânicas do agregado reciclado por meio dos resultados obtidos nos ensaios de grau de compactação, resistência à penetração e índice de expansibilidade, em comparação aos materiais convencionalmente utilizados. O material reciclado atendeu aos parâmetros exigidos por norma para pavimentação e pode ser utilizado como material de base no fechamento de valas em vias de baixo volume de tráfego.

Palavras-chave: Pavimento asfáltico reciclado não espumado; Brita graduada simples; Pavimentação.

ABSTRACT

Construction and demolition waste - RCD - has caused environmental impacts and has become a global concern. However, recycled aggregate from construction waste has viable applications, such as replacing conventional materials in paving projects. This research consists of analyzing the technical feasibility of using non-foamed RAP - Non-foamed Asphalt Pavement Recycling - replacing simple graded crushed stone - BGS - in the base layer of pavement replacement in ditches on low-traffic roads. For this, a case study was carried out, in which RAP was applied in two local road ditches and BGS in two other ditches on the same road, in which the physical and mechanical properties of the recycled aggregate were analyzed using the results obtained. in tests on the degree of compaction, resistance to penetration and expansion index, in comparison to conventionally used materials. The recycled material met the parameters required by standards for paving and can be used as a base material for closing ditches on roads with low traffic volume.

Keywords: Non-foamed recycled asphalt pavement; Graded crushed stone simple; Paving.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Categoria de vias.....	19
Figura 2 – Camadas do Pavimento Flexível	19
Figura 3 – Brita Graduada Simples.....	22
Figura 4 – Processo de obtenção do RAP Espumado.....	24
Figura 5 – Processo de obtenção do RAP Não Espumado	24
Figura 6 – Triturador de Solo Portátil.....	24
Figura 7 – Macrofluxo do Ensaio de Granulometria.....	28
Figura 8 – Peneiras com material separado	28
Figura 9 – Macrofluxo do Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	30
Figura 10 – Prensa CBR Manual	31
Figura 11 – Macrofluxo do Ensaio de Determinação do Índice de Forma	31
Figura 12 – Uso do paquímetro para definição do índice de forma	33
Figura 13 – Pontos de localização das valas na Rua das Crianças.....	35
Figura 14 – Triturador de Entulho TE2 utilizado em 27 de março de 2023.....	36
Figura 15 – Funil de entrada dos agregados do Triturador de Entulho TE2	36
Figura 16 – Processo de usinagem realizado em 27 de março de 2023	37
Figura 17 – Material triturado.....	37
Figura 18 – Fachada do imóvel em frente a vala 9	39
Figura 19 – Fachada do imóvel em frente a vala 9B.....	39
Figura 20 – Escavação da vala 9.....	40
Figura 21 – Envoltória de areia executada na vala 9	40
Figura 22 – Vala 9 com a reposição de RAP não espumado executada	41
Figura 23 – Vala 9B após a escavação	41
Figura 24 – Envoltória de areia executada na vala 9B.....	42
Figura 25 – Vala 9B com a reposição de RAP não espumado executada.....	42
Figura 26 – Imóvel em frente a vala 208.....	43
Figura 27 – Imóvel em frente a vala 210.....	43
Figura 28 – Detalhe da vala 208	44
Figura 29 – Envoltória de areia executada na vala 208	44
Figura 30 – Vala 208 após a reposição de BGS executada	45

Figura 31 – Detalhe da vala 210	45
Figura 32 – Envoltória de areia executada na vala 210	46
Figura 33 – Vala 210 com a reposição de BGS executada	46
Figura 34 – Vala 9.....	47
Figura 35 – Vala 9B	48
Figura 36 – Vala 208.....	48
Figura 37 – Vala 210.....	49
Figura 38 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 9.....	50
Figura 39 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 9B	50
Figura 40 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 208.....	51
Figura 41 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 210.....	51
Figura 42 – Trecho da vala 9 com o recapeamento asfáltico concluído	52
Figura 43 – Trecho da vala 9B com o recapeamento asfáltico concluído	52
Figura 44 – Trecho da vala 208 com o recapeamento asfáltico concluído	53
Figura 45 – Trecho da vala 210 com o recapeamento asfáltico concluído	53
Figura 46 – Trecho da vala 9 após 30 dias	54
Figura 47 – Trecho da vala 9B após 30 dias	55
Figura 48 – Trecho da vala 208 após 30 dias	55
Figura 49 – Trecho da vala 210 após 30 dias.....	56
Figura 50 – Curva da Massa Específica Seca	59
Figura 51 – Curva do CBR.....	60
Figura 52 – Curva de Expansão	60
Figura 53 – Gráfico de Determinação da Composição Granulométrica em Agregado para Pavimentação	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Faixas Granulométricas	22
Tabela 2 – Quantidade mínima de material para ensaio	32
Tabela 3 – Resultados individuais dos corpos de prova	58
Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos	61
Tabela 5 – Determinação da Composição Granulométrica em Agregado para Pavimentação.....	62

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Pública e Resíduos Especiais

BGS – Brita Graduada Simples

CAP – Cimento Asfáltico de Petróleo

CNT – Confederação Nacional do Transporte

CSM - Componentes, Sistemas e Máquinas para Construção

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

PMSP – Prefeitura Municipal de São Paulo

RAP – *Reclaimed Asphalt Pavement*

RCD – Resíduos de Construção e Demolição

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	11
1.1	Objetivos	13
1.1.1	Objetivo Geral	13
1.1.2	Objetivos Específicos	13
1.2	Justificativa	13
1.3	Metodologia	14
1.4	Estrutura da pesquisa.....	15
2	FUNDAMENTOS DA PESQUISA	16
2.1	Gestão de Resíduos	16
2.2	Sustentabilidade	17
2.3	Pavimentação	18
2.4	Brita Graduada Simples	22
2.5	Reciclagem de pavimento asfáltico espumado e não espumado	23
2.6	Diretrizes para o Agregado Reciclado	25
2.7	Procedimento experimental.....	25
2.7.1	Ensaio de Análise Granulométrica	27
2.7.2	Ensaio CBR - Índice de Suporte Califórnia	29
2.7.3	Ensaio de Determinação do Índice de Forma	31
3	ESTUDO DE CASO.....	34
3.1	Descrição da Obra	34
3.2	Traço utilizado	35
3.3	Processo de usinagem.....	35
3.4	Procedimentos.....	38
3.5	Aplicação do material produzido em campo.....	38
3.5.1	Valas 9 e 9B.....	38
3.5.2	Valas 208 e 210	42
3.6	Reposição Asfáltica das Valas	46
3.7	Serviço de fresa e recapeamento asfáltico	49
3.8	Monitoramento após 30 dias de execução dos serviços	54
3.9	Especificação técnica de serviço.....	56
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	58

4.1	Ensaio de Caracterização	58
4.2	Ensaio de Índice de Suporte Califórnia	58
4.3	Ensaio de granulometria por peneiramento.....	62
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	64
6	REFERÊNCIAS	65

1 INTRODUÇÃO

O crescimento e desenvolvimento dos centros urbanos são responsáveis pela concentração das atividades na construção civil. De acordo com um estudo realizado pelo IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística em 2020, a região Sudeste do país foi responsável por 48,5% das incorporações e obras, empregando 49,7% da força de trabalho no setor (IBGE, 2020). Além disso, essa região também abriga os maiores centros urbanos.

Os grandes centros urbanos, devido à sua concentração populacional, exigem recursos naturais, saneamento básico e políticas públicas para atender às necessidades da sociedade. Na região metropolitana, especialmente na parte leste, a SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo é a empresa responsável por obras de infraestrutura urbana, com o objetivo de realizar a manutenção e expansão de toda a rede de distribuição de água, além da coleta de esgoto. A SABESP atende a uma demanda de 3,7 milhões de pessoas e abrange sete municípios: Ferraz de Vasconcelos, Arujá, Itaquaquecetuba, Biritiba Mirim, Salesópolis, Poá e Suzano. Além disso, a empresa detém a concessão parcial dos serviços de saneamento no Distrito Industrial, oito bairros do município de Mogi das Cruzes, bem como 18 distritos do município de São Paulo (SABESP, 2018).

Assim como a SABESP, as companhias de saneamento seguem um procedimento operacional próprio para realizar a reposição de valas e estabelecem os materiais permitidos, bem como critérios para aceitar a reposição. Um dos principais materiais utilizados em obras de pavimentação é a rocha britada. Conforme mencionado por ALMEIDA (2012), em 2010, aproximadamente 30% de todos os materiais utilizados no país foram destinados à mistura com asfalto para pavimentar ruas, construir bases e sub-bases de rodovias e vias urbanas. Para a construção de um quilômetro de via urbana com largura de dez metros, pode ser necessário o consumo de aproximadamente 3250 toneladas de agregados.

Segundo JOHN (2000), a disposição desordenada desses agregados resulta em uma série de problemas ambientais, tais como enchentes, propagação de vetores patogênicos, interrupção parcial de vias e degradação do meio ambiente de maneira geral. Além disso, a exploração dos recursos naturais para a construção de

pavimentos tem gerado vários transtornos, uma vez que as leis ambientais estão se tornando mais rigorosas e o custo da matéria-prima está cada vez mais elevado.

A construção de pavimentos demanda uma considerável quantidade de recursos naturais. Conforme mencionado por HILL et al. (2001), a fim de manter os níveis de desenvolvimento e construção, e ao mesmo tempo reduzir a utilização de agregados naturais, existem duas opções: otimizar o uso desses recursos ou utilizar materiais alternativos.

No Brasil, mais de 99% dos trechos pavimentados são feitos com asfalto, de acordo com a CNT – Confederação Nacional do Transporte (2019). Essa forma de pavimentação acarreta custos significativos, aumentando os gastos com a construção e a manutenção das estradas. Além disso, calçadas deformadas e danificadas têm impacto negativo no desgaste dos veículos, resultando em maior consumo de combustível e tempo de deslocamento. Isso acarreta prejuízos tanto para os usuários das rodovias quanto para a economia do país.

Ao considerar a perspectiva econômica, o uso de RCD – Resíduos de Construção e Demolição, traz benefícios em termos de qualidade e segurança das vias urbanas, além de reduzir os custos de manutenção, reabilitação e reconstrução, ao diminuir a necessidade de explorar novos recursos naturais. Conforme mencionado por RICCI (2007), vias em condições precárias resultam em aumento de 57% no consumo de combustível, 37% nos custos operacionais e 50% nos acidentes.

Analisando-se o aspecto técnico, diversos estudos têm comprovado que o uso de agregados provenientes de reciclagem pode ser tão satisfatório quanto o uso de agregados naturais. De acordo com LEITE et al. (2011), ensaios de resiliência, que são testes realizados para indicar e avaliar a capacidade de um material ou sistema em resistir e se recuperar de condições adversas ou estressantes, indicaram uma similaridade no comportamento dos dois tipos de agregados. Herrador et al. (2012) constataram que a capacidade de suporte dos agregados também foi semelhante, o que reforça a conclusão de que esses materiais possuem propriedades satisfatórias.

Com o objetivo de promover o desenvolvimento sustentável, surgem alternativas para o reaproveitamento dos resíduos da construção civil. Diante da importância e responsabilidade dos serviços prestados pelas companhias de saneamento à população, assim como da crescente demanda por recursos naturais, torna-se uma prioridade encontrar processos mais sustentáveis que atendam às necessidades do setor de obras. Nesse contexto, esta pesquisa, acompanhando um estudo pioneiro

realizado por uma companhia de saneamento, busca explorar o uso de RAP não espumado como uma alternativa para a reposição de bases de pavimentos urbanos, em conformidade com as normas vigentes.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica da utilização de RAP não espumado - Reciclagem de Pavimento Asfáltico não espumado - em substituição da BGS - Brita Graduada Simples - na camada de base da reposição de pavimento das valas em via de baixo tráfego em um estudo interno realizado por uma companhia de saneamento.

1.1.2 Objetivos Específicos

Analisar os resultados dos ensaios de grau de compactação, resistência à penetração e índice de expansibilidade a fim de se obter as características físicas e mecânicas básicas do material em estudo, assim como sua composição granulométrica e seu índice de forma.

Comparar os resultados dos ensaios mencionados do agregado reciclado com os da base granular simples – BGS – utilizada tradicionalmente em pavimentação.

Estudar e apresentar a viabilidade técnica da aplicação do RAP não espumado em reposição de valas.

1.2 Justificativa

A construção civil desempenha um papel crucial no desenvolvimento de qualquer país (UCL, 2023). No entanto, tem ocorrido uma crescente preocupação com os problemas ambientais decorrentes do descarte inadequado dos resíduos sólidos gerados por essa indústria. No Brasil, estima-se que cerca de 84 milhões de metros cúbicos de resíduos de construção civil e demolição sejam produzidos anualmente,

de acordo com a ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Segundo o Panorama da ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza e Pública e Resíduos Especiais (2020), os municípios coletaram aproximadamente 45 milhões de toneladas de resíduos de construção civil em 2019, com destaque para a região Sudeste, responsável por quase 50% desse total (PMSP, 2020).

Nesse contexto, o uso de materiais reciclados provenientes dos resíduos de construção e demolição pode ser uma alternativa interessante para a pavimentação, especialmente em vias de baixo volume de tráfego, conforme indicado pelo estudo de Carneiro et al. (2001). Essa prática traz benefícios como uma solução sustentável para a grande quantidade de entulhos gerados pelo setor, além de ser mais econômica em comparação com os materiais convencionais. Os materiais reciclados também apresentam maior estabilidade, com baixa ou nenhuma expansão das camadas compactadas. Além disso, o uso desses materiais contribui para a preservação das jazidas minerais naturais, reduzindo a velocidade de exploração e minimizando o impacto ambiental.

1.3 Metodologia

Esta pesquisa é de caráter exploratório e fundamentou-se por meio da realização de pesquisas bibliográficas, que consistiram em pesquisas da literatura existente sobre o uso do RAP, buscando compreender o comportamento mecânico do material reciclado por meio da coleta de dados de artigos científicos, teses, dissertações no Google Escolar e acervo fotográfico com a implementação do material.

Esta pesquisa fundamenta-se também em estudo de caso que foi desenvolvido em três etapas pela companhia de saneamento. A primeira etapa consistiu na análise laboratorial do RAP não espumado coletado no campo, bem como sua aplicação no processo de reposição de pavimentos, comparando-o com a utilização da BGS no método convencional. A segunda etapa envolveu o monitoramento do desempenho do pavimento construído, enquanto a terceira etapa se concentrou na análise do desempenho em campo do agregado reciclado como camada de base do pavimento,

em comparação com o método atualmente aplicado para valas específicas deste estudo.

Para o estudo experimental, foram coletados os dados dos seguintes ensaios fornecidos pela companhia de saneamento, que são eles: Análise Granulométrica, Índice de Suporte Califórnia com o objetivo de determinar a resistência do solo a penetração de um cilindro padronizado com relação a penetração em uma brita padrão e Determinação do Índice de Forma a fim de definir a média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pela quantidade de grãos de cada fração granulométrica que o compõe.

1.4 Estrutura da pesquisa

No Capítulo 1, é apresentada a introdução da pesquisa com contextualização, o objetivo geral e específicos, justificativa, metodologia e procedimento experimental realizado para a COMPANHIA DE SANEAMENTO, assim como a própria estrutura da pesquisa.

No Capítulo 2, são apresentados os conceitos que trazem o tema do trabalho desenvolvido, que é a gestão de resíduos, sustentabilidade, BGS,

No Capítulo 3, é apresentado o estudo de caso realizado, assim como os procedimentos adotados conforme a metodologia definida.

No Capítulo 4, é apresentada a análise dos resultados obtidos através dos ensaios realizados.

No Capítulo 5, são apresentadas as considerações finais e as sugestões para futuras pesquisas com o tema.

No Capítulo 6, são apresentadas as referências utilizadas no desenvolvimento da pesquisa.

2 FUNDAMENTOS DA PESQUISA

2.1 Gestão de Resíduos

O crescimento das áreas urbanas está diretamente ligado ao aumento na geração de resíduos provenientes da indústria da construção civil. As atividades desse setor consomem grandes quantidades de recursos naturais, o que resulta em sobras e desperdícios. Esses resíduos, conhecidos como resíduos da construção e demolição - RCD, são gerados durante obras de construção, reforma ou demolição e englobam uma ampla gama de materiais, como tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, madeira, compensados, argamassa, gesso e outros materiais semelhantes (CONAMA, 2002; ÂNGULO, 2005). Infelizmente, muitos desses resíduos são descartados de forma inadequada em aterros, quando poderiam ser reciclados para reduzir o impacto ambiental.

No Brasil, em 2002, foi aprovada a Resolução nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA –, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Essa resolução determina que os responsáveis pelas atividades de construção, reforma, reparos e demolições de estruturas e estradas também são responsáveis pelos resíduos gerados. De acordo com essa resolução, os geradores devem priorizar ações para evitar a geração de resíduos, seguidas pela redução, reutilização, reciclagem e destinação adequada dos mesmos (CONAMA, 2002).

Em relação a sua classificação, a Resolução CONAMA Nº 307 (2002) traz a seguinte classificação:

Classe A: refere-se a resíduos reutilizáveis ou recicláveis, como agregados. Isso inclui resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e outras obras de infraestrutura, além de solos provenientes de terraplanagem. Também abrange resíduos de construção, demolição, reformas e reparos de edificações, como componentes cerâmicos - tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento -, argamassa e concreto. Os resíduos provenientes do processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto - blocos, tubos, meio-fios produzidos nos canteiros de obras também se enquadram nessa classe.

Classe B: são os resíduos recicláveis, mas destinados a outras finalidades. Isso inclui plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros materiais que possam ser reciclados.

Classe C: refere-se a resíduos para os quais não existem tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam sua reciclagem ou recuperação. Um exemplo são os produtos à base de gesso.

Classe D: são resíduos perigosos provenientes do processo de construção, como tintas, solventes, óleos, ou aqueles que são contaminados ou prejudiciais à saúde, originados de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, bem como telhas e outros materiais que contenham amianto ou outras substâncias nocivas à saúde.

2.2 Sustentabilidade

Os resíduos classificados como Classe A possuem um potencial significativo para reutilização e reciclagem como agregados, encontrando aplicações diversas na construção. Esses resíduos podem ser utilizados na produção de tijolos, blocos pré-moldados, meio-fio, calçadas e argamassa de revestimento, principalmente em pavimentos, nas camadas de base e sub-base (BRASILEIRO et al., 2015). Essa abordagem oferece uma alternativa viável para mitigar os problemas associados a esses resíduos, buscando a sustentabilidade da indústria da construção.

A prática de reutilização de resíduos de construção remonta a tempos antigos, com os romanos já utilizando tijolos, telhas e cerâmica moída como pozolanas (SANTOS, 1975). No entanto, foram as grandes catástrofes ocorridas neste século, como terremotos e guerras, que impulsionaram o uso de materiais reciclados (LIMA, 1999).

Segundo o relatório final do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) de 2007, elaborado pela Organização das Nações Unidas (ONU), os resíduos sólidos e líquidos são responsáveis por aproximadamente 2,8% das emissões de CO₂, um gás de efeito estufa que contribui para o aquecimento global. O relatório destaca a necessidade de implementar políticas de gestão de resíduos para reduzir a sua geração e promover a reciclagem, por meio do desenvolvimento e disseminação de novas tecnologias (IPCC, 2007).

2.3 Pavimentação

Um pavimento é uma estrutura construída sobre o terreno preparado, composta por diversas camadas de espessuras definidas, com o objetivo técnico e econômico de suportar as cargas do tráfego de veículos e as condições climáticas. Existem diferentes configurações de pavimentos, que são selecionadas de acordo com as necessidades do projeto. Essas configurações podem ser classificadas de forma geral como flexíveis, semirrígidos e rígidos (SENÇO, 2007), e seu propósito é proporcionar aos usuários uma superfície de rolagem que seja confortável, eficiente e segura (BERNUCCI et al., 2010).

A IP-02/2004 – Classificação das Vias apresenta a classificação das vias de acordo com sua tipologia e função. São definidas as seguintes categorias: vias locais - destinadas principalmente ao acesso às propriedades, desencorajando o tráfego direto; vias coletoras - divididas em primárias (I) e secundárias (II), com a função de coletar e distribuir o tráfego local dos núcleos dos bairros (I), e também coletar e distribuir o tráfego local e de passagem entre bairros (II); vias arteriais - subdivididas em expressas (I) e arteriais (II), têm como função principal interligar diferentes regiões do município, promovendo conexões intraurbanas de média distância. Elas se conectam com vias expressas e outras vias de categoria inferior, e devem obrigatoriamente possuir faixas segregadas para transporte coletivo, que têm prioridade sobre qualquer outro uso planejado ou existente na área destinada à sua implantação (I).

A via arterial I tem a mesma função, diferindo apenas em suas características geométricas, devido à impossibilidade de implantação de uma via marginal. Sempre que possível, essas vias devem contar com faixas exclusivas ou preferenciais para transporte coletivo (II), conforme esquematiza a Figura 1.

Figura 1 – Categoria de vias

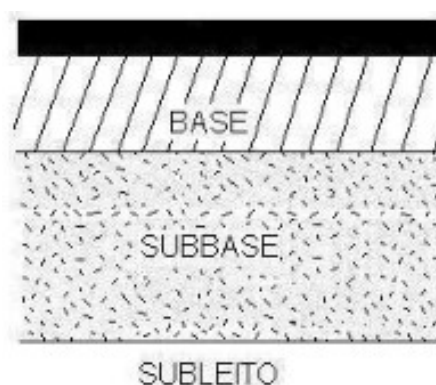


Fonte: WATANABE, 2014

De acordo com o DNIT (2006), os pavimentos são classificados quanto ao tipo, sendo: pavimentos flexíveis, pavimento semirrígido e pavimento rígido.

Os pavimentos flexíveis são aqueles em que todas as camadas sofrem deformação elástica significativa sob as cargas aplicadas, resultando na distribuição de pressão entre as camadas (DNIT, 2006). É caracterizado pela presença de uma camada de revestimento asfáltico – CA -, uma base composta por material granular – BG - e uma sub-base feita de material granular ou solo (SILVA, 2008), conforme mostrado na Figura 2.

Figura 2 – Camadas do Pavimento Flexível



Fonte: SILVA, 2008, p.48.

Segundo o DNIT (2006), os pavimentos semirrígidos são definidos pela presença de uma base cimentada que utiliza um aglutinante com propriedades cimentícias, como o solo-cimento, e é revestida por uma camada asfáltica. Um exemplo comum de pavimento semirrígido é a utilização de uma camada de solo-cimento como base, seguida de uma camada asfáltica.

Por contraste, os pavimentos rígidos são caracterizados por apresentarem uma rigidez significativamente maior em comparação com as camadas inferiores, assumindo a responsabilidade por quase todas as tensões geradas pelas cargas aplicadas (DNIT, 2006). Um exemplo comum de pavimento rígido é aquele construído com placas de concreto de cimento Portland.

Ao realizar a pavimentação de uma via, é essencial caracterizar o tráfego e as cargas que serão exercidas sobre ela, a fim de determinar os métodos adequados a serem empregados. Um parâmetro fundamental nesse processo é representado pelo valor N, que reflete os esforços finais transmitidos à estrutura na interface entre o pneu e o pavimento. Esse valor indica o número estimado de solicitações ao longo do período operacional do pavimento, levando em consideração um eixo traseiro simples, com rodagem dupla e uma carga de 80 kN, conforme indicado pelo Método do Corpo de Engenheiros do Exército dos Estados Unidos (IP-02/2004).

A previsão do valor final de N deve ser baseada em contagens classificatórias, levando em consideração os diferentes tipos de tráfego relacionados. Quando houver disponibilidade de dados de pesagem de eixos, juntamente com a caracterização correspondente por tipo, o cálculo do valor final de N deve seguir integralmente as recomendações e instruções do método de dimensionamento de pavimentos flexíveis do DNIT-1996.

Segundo DNIT (2006), para efeitos de dimensionamento de pavimento, as vias urbanas a serem pavimentadas serão classificadas de acordo com as condições de tráfego previstas, conforme as seguintes categorias:

- Tráfego Leve: refere-se a ruas de caráter principalmente residencial, onde não é esperado o tráfego regular de ônibus, e a presença ocasional de caminhões e ônibus não ultrapassa 20 veículos por dia, por faixa de tráfego.
- Tráfego Médio: engloba ruas e avenidas por onde é prevista a passagem de caminhões e ônibus em número de 21 a 100 veículos por dia, por faixa de tráfego.

- Tráfego Meio Pesado: abrange ruas e avenidas em que se espera o trânsito de caminhões e ônibus em quantidade variando de 101 a 300 veículos por dia, por faixa de tráfego.
- Tráfego Pesado: inclui ruas e avenidas projetadas para suportar o tráfego de caminhões e ônibus em quantidade de 301 a 1.000 veículos por dia, por faixa de tráfego.
- Tráfego Muito Pesado: refere-se a ruas e avenidas em que é prevista a passagem de caminhões e ônibus em número de 1.001 a 2.000 veículos por dia.

Visando obter o conhecimento da capacidade estrutural de pavimento, A DNER-ME – 024/1994 trata da determinação de deflexões em pavimento rodoviário com aplicação da viga Benkelman, onde prescreve como medir e calcular as deflexões, apresenta esquema da viga, da carga aplicada e o posicionamento dos equipamentos para as medições (DNER-ME – 024/1994).

As deformações reversíveis estão vinculadas ao comportamento elástico do pavimento, o qual se define pela habilidade da estrutura em absorver energia de deformação e dissipá-la quando as cargas externas são removidas. Nesse contexto, a deformação é chamada de "deformação elástica", e a energia de deformação retida no pavimento durante a fase elástica é referida como "resiliência". É importante observar que toda deformação elástica carrega consigo uma pequena porção de microdeformações plásticas (BALBO, 2007).

Tanto o FWD quanto a Viga Benkelman podem ser empregados para monitorar a capacidade de suporte das camadas do pavimento desde o momento de sua construção, uma prática que tem ganhado crescente aceitação no país devido a suas numerosas vantagens (SOARES et al., 2000). Inicialmente, a Viga Benkelman era exclusivamente empregada para determinar a deformação reversível máxima. No entanto, ao longo do tempo, passou-se a utilizar esse equipamento também para estabelecer a bacia de deformação.

A precisão na medição da bacia deflectométrica do pavimento oferece a vantagem de empregá-la na estimativa dos módulos de elasticidade das camadas. Isso possibilita uma avaliação estrutural mais precisa de cada segmento e a realização do cálculo do reforço estrutural, se necessário, de acordo com os princípios da mecânica dos pavimentos.

2.4 Brita Graduada Simples

A Brita Graduada Simples – BGS - é composta por diferentes faixas granulométricas de agregados, que são misturadas de acordo com as especificações dos órgãos responsáveis pela construção de rodovias. O material é sedimentado e é mostrado na Figura 3.

Figura 3 – Brita Graduada Simples



Fonte: Própria, 2023.

Quando utilizada como base ou sub-base de pavimentos, a BGS deve atender a uma faixa granulométrica específica, classificada de A a D pelo DER-SP, conforme Tabela 1.

Tabela 1 – Faixas Granulométricas

Peneira de Malha Quadrada		% em Massa, Passando				Tolerância
ASTM	mm	A	B	C	D	
2"	50,0	100	100	-	-	± 7
1 ½"	37,5	90 - 100	-	-	-	± 7
1"	25,0	-	82 - 90	100	100	± 7
¾"	19,0	50 - 68	-	-	-	± 7
3/8"	9,5	30 - 46	60 - 75	50 - 85	60 - 100	± 7
Nº 4	4,8	20 - 34	45 - 60	35 - 65	50 - 85	± 5
Nº 10	2,0	-	32 - 45	25 - 50	40 - 70	± 5
Nº 40	0,42	4 - 12	22 - 30	15 - 30	25 - 45	± 5
Nº 200	0,075	1 - 4	10 - 15	5 - 15	5 - 20	± 2
Espessura da camada acabada em cm		10 - 17	10 - 17	10 - 13	10 - 13	

Fonte: DERSP, 2005, p.4.

Quando a BGS é adequadamente graduada e compactada, ela exibe uma resistência satisfatória, formando um esqueleto mineral intertravado que suporta cargas de compressão. Sua rigidez intrínseca varia de acordo com o nível de confinamento (ANPET, 2015).

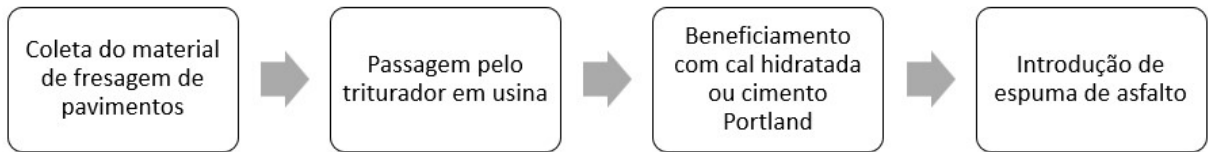
A sub-base, localizada entre a camada de base e o reforço ou subleito, tem a função de complementar a estrutura do pavimento e fornecer suporte aos esforços aplicados (DNIT 139/10 - ES). A PMSP - Prefeitura Municipal de São Paulo possui uma especificação para reparação de pavimentos flexíveis danificados por abertura de valas - 1R-001/2018 -, que estabelece critérios para reposição do perfil do pavimento nas áreas urbanas da cidade de São Paulo.

2.5 Reciclagem de pavimento asfáltico espumado e não espumado

Asfalto reciclado, ou pavimento asfáltico reciclado (RAP), é pavimento reprocessado contendo asfalto e agregados de concreto provenientes de resíduos da construção civil. O processo para obtenção do RAP espumado necessita de uma usina móvel a frio instalada o mais próximo possível da área onde o material será aplicado. Nesse processo, o material fresado existente é reaproveitado, muitas vezes incorporando parte ou toda a base existente. Além disso, são adicionados cimento Portland ou cal hidratada, cimento asfáltico na forma de espuma, água e, quando necessário, agregados. A mistura resultante é espalhada e compactada, resultando em uma nova base para o pavimento, conhecida como base reciclada (DERSP, 2020). Esse processo é mostrado na Figura 4.

A espuma de asfalto é uma variante temporária do CAP - Cimento Asfáltico de Petróleo. Ela é produzida por meio da injeção de ar sob pressão e pequenas quantidades de água na temperatura ambiente sobre o CAP, que é aquecido a uma temperatura apropriada para seu tipo. Essa injeção ocorre dentro das câmaras de expansão, resultando no aumento da área superficial e na redução da viscosidade do asfalto. Como consequência, ocorre uma expansão volumétrica significativa do material (DERSP, 2020). Esse processo resulta na formação de uma mistura aerada e leve, conhecida como espuma de asfalto, que pode ser utilizada em diversas aplicações na construção e manutenção de estradas.

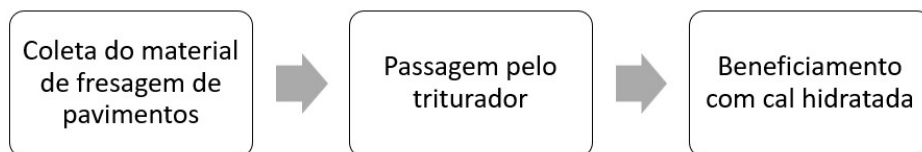
Figura 4 – Processo de obtenção do RAP Espumado



Fonte: Adaptado de DERSP, 2020, p.5

A diferença entre o material citado e o reciclado criado no canteiro - RAP não espumado - é a não aplicação da espuma de asfalto, ou seja, por não ter essa propriedade o material reciclado deve ser analisado como um material proveniente apenas de agregados a frio, como seria a BGS, altamente empregado para essa finalidade de preparo de base para rodovias em todo o país. O processo para obtenção do RAP não espumado é mostrado na Figura 5.

Figura 5 – Processo de obtenção do RAP Não Espumado



Fonte: Própria, 2023.

O triturador de solo, por ser pequeno e móvel, pode ser utilizado em canteiros de obra e os próprios técnicos de pavimentação podem manusear e fabricar o RAP, conforme vê-se na Figura 6:

Figura 6 – Triturador de Solo Portátil



Fonte: Lova Máquinas, 2023.

2.6 Diretrizes para o Agregado Reciclado

Em 2004, surgiram as primeiras normas para agregados reciclados no Brasil, então a ABNT publicou quatro normas que tratam desde o recebimento do RCD até sua utilização na pavimentação. São as normas: ABNT NBR 15113:2004 - Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Aterros – Diretrizes para projeto, implantação e operação; ABNT NBR 15114:2004 - Resíduos sólidos da construção civil – Área de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação; ABNT NBR 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos e; ABNT NBR 15116:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

A ABNT NBR 15116:2004 foi cancelada em 2021 e substituída por ABNT NBR 15116:2021 - Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios.

2.7 Procedimento experimental

Segundo a companhia de saneamento, para esta aplicação experimental, foram abertas quatro valas no mesmo logradouro, considerando um trecho com as mesmas condições de solo. Em duas destas valas, foi realizado o procedimento de reposição de pavimentação padrão utilizando BGS e nas demais, utilizou-se material de fresa trazido do canteiro para fabricação do RAP não espumado *in loco* com um triturador manual.

Seguindo a Especificação Técnica de Serviço 02/2009 – Base de material fresado com espuma de asfalto, da Prefeitura Municipal de São Paulo, mas excluindo-se a adição da espuma de asfalto, o traço do material empregado para as valas que foram executadas para o estudo de caso, foi definido em

- Pedrisco (5%), Agregados Concreto (5%), Pó de pedra (10%) e RAP (80%).

Após mistura homogênea, adicionaram-se de 1% a 2% do volume total de cal Hidratada CH-III com objetivo de elevar a compactidade através da melhor distribuição granulométrica das partículas e misturou-se novamente.

De forma que foram verificados se os parâmetros do material reciclado atendem as características físicas e resistência mecânica estabelecidas na norma ABNT 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação -, foram realizados os ensaios listados a seguir, para que sejam avaliadas a granulometria, grau de compactação e índice de forma.

O ensaio de granulometria segue a norma à ABNT NBR 7181:2018 - Solo Análise Granulométrica - que tem como objetivo estabelecer o método para analisar a granulometria de solos, realizada por peneiramento ou por uma combinação de sedimentação e peneiramento. Os resultados deste ensaio permitem a construção da curva de distribuição granulométrica, que desempenha um papel importante na classificação dos solos e na estimativa de parâmetros para bases estabilizadas, filtros, permeabilidade, capilaridade, por exemplo.

O ensaio CBR ou ISC segue a norma ABNT NBR 9895:2017 – Solo - Índice de Suporte Califórnia - ISC e tem como objetivo de integrar no dimensionamento de pavimentos rodoviários, determinando a capacidade de suporte de um solo compactado e para determinação do valor A expansão do solo refere-se à sua tendência de aumentar de volume quando exposto à umidade. Esse fenômeno pode causar danos significativos a estruturas e pavimentos. O ensaio é realizado em laboratório, utilizando amostras deformadas, não reusadas, de material que passa na peneira de 19 mm, com o mínimo de cinco corpos de prova. O agregado é classificado de acordo com o tipo de emprego, segundo parâmetros do ISC e conforme compactação conforme ABNT NBR 7182:2020 - Solo - Ensaio de Compactação e ABNT NBR 6457:2016 - Amostras de solo - Preparação para ensaios de compactação. Esse ensaio é baseado na comparação da pressão necessária para a penetração de um pistão cilíndrico padronizado em uma amostra de solo específica com a pressão necessária para a penetração do mesmo pistão em uma brita graduada padrão:

- Material para execução de subleito: $\text{CBR} \geq 12\%$, expansão $\leq 1,0\%$ - energia de compactação normal;
- Material para execução de sub-base: $\text{CBR} \geq 20\%$, expansão $\leq 1,0\%$ - energia de compactação intermediária;

- Material para execução de base - para vias de tráfego com $N \leq 10^6$ repetições de pavimento: CBR $\geq 60\%$, expansão $\leq 0,5\%$ - energia de compactação intermediária.

A determinação do índice de forma é realizada conforme a ABNT NBR 7809:2019 - Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro, que estabelece a porcentagem máxima admissível, em massa, de grãos com forma lamelar em 30%. Essa norma define o método para determinar a variação dos eixos multidirecionais das partículas que compõem o agregado, sendo quantificada pelo índice de forma.

2.7.1 Ensaio de Análise Granulométrica

O ensaio de análise granulométrica, conforme especificado pela ABNT NBR 7181:2018, é empregado para obter o perfil da curva granulométrica de um solo específico, a fim de determinar as dimensões das partículas presentes e suas proporções relativas de ocorrência.

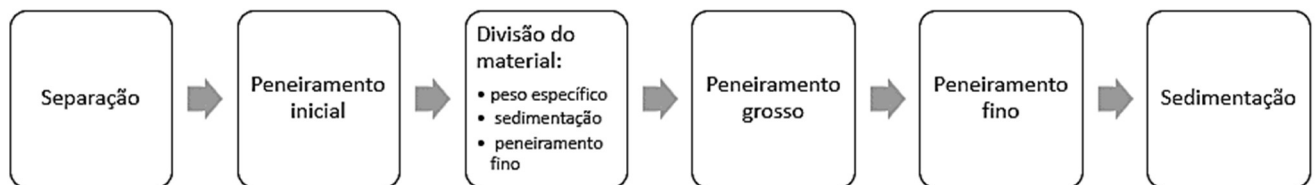
A curva granulométrica desempenha um papel fundamental na classificação da textura do solo, pois representa os intervalos de variação do tamanho das partículas presentes em cada amostra. Além disso, essa curva permite obter os diâmetros necessários para o cálculo de parâmetros importantes, como os coeficientes de uniformidade e curvatura do solo. Essas informações são essenciais para caracterizar as propriedades físicas do solo e auxiliar no planejamento de projetos geotécnicos e de engenharia.

Existem duas técnicas principais para determinar a granulometria dos solos. Uma delas é o método de peneiramento, que envolve a separação das partículas em frações grossas e finas, sendo realizado até uma dimensão de 0,075 mm. O outro método é a sedimentação em água destilada, utilizado para as partículas de tamanho menor que 0,075 mm (ABNT NBR 7181:2018, item 5.5, p.9).

A análise granulométrica pode ser realizada de três maneiras diferentes: peneiramento, sedimentação e análise granulométrica conjunta. O método de peneiramento é adequado para materiais granulares, enquanto a sedimentação é empregada para solos finos. Já a análise granulométrica conjunta engloba tanto o

peneiramento quanto a sedimentação, sendo aplicada em solos que possuem partículas de diferentes tamanhos, sejam elas grossas ou finas. O processo de análise granulométrica é ilustrado no fluxograma apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Macrofluxo do Ensaio de Granulometria



Fonte: Própria, 2023.

Para realizar o ensaio, é necessário seguir algumas etapas na preparação da amostra. O processo consiste nas seguintes etapas:

- A) Selecionar uma quantidade representativa de material, denominada P1, que pode estar seco ao ar ou úmido. A quantidade de material varia de acordo com a composição do solo:
 - 10,0 kg para materiais com presença de pedregulho grosso;
 - 2,0 kg para materiais com presença de pedregulho fino;
 - 1,0 kg para materiais arenosos;
 - 0,5 kg para materiais siltsosos/argilosos.
- B) Passar a massa P1 na peneira #10 (2,0 mm) para separar as partículas maiores, conforme Figura 8.

Figura 8 – Peneiras com material separado



Fonte: Minas JR Consultoria Mineral, 2019.

- C) Do material que passar pela peneira, separar três quantidades distintas:
- P2 = 20 g para a determinação do peso específico real das partículas;
 - P3 = 50 a 100 g para o ensaio de sedimentação;
 - P4 = 200 a 600 g para o peneiramento fino.

A seguir, no procedimento experimental realiza-se o peneiramento, sendo:

A) Peneiramento Grosso (material retido na peneira #10):

- Lavar o material na peneira #10 (2,0 mm) e em seguida colocá-lo na estufa para secagem;
- Realizar o peneiramento do material seco, utilizando métodos manuais ou mecânicos, até atingir a peneira #10;
- Pesar a fração retida em cada peneira e registrar os valores.

B) Peneiramento Fino (material que passa na peneira #10):

- Lavar o material na peneira #200 (0,075 mm) e em seguida colocá-lo na estufa para secagem;
- Passar o material seco nas peneiras com aberturas menores que a peneira #10;
- Pesar a fração retida em cada peneira e registrar os valores.

C) Sedimentação:

- Colocar a massa P3 em um recipiente com água e defloculante (solução de hexametáfosfato de sódio) e deixar em repouso por um período de 6 a 24 horas;
- Agitar a mistura utilizando um dispersor elétrico por 5 a 15 minutos;
- Transferir a mistura para uma proveta graduada, completando com água destilada até atingir 1000 ml e realizar o balanceamento;
- Realizar leituras do densímetro em intervalos de tempo pré-determinados, como 30 segundos, 1 minuto, 2 minutos, 4 minutos, 8 minutos, 15 minutos, 30 minutos, 1 hora, 2 horas, 4 horas, 8 horas e 25 horas.

2.7.2 Ensaio CBR - Índice de Suporte Califórnia

Conforme estabelecido na norma NBR 9895/2017, o ensaio de CBR - *California Bearing Ratio* - tem como objetivo determinar a relação entre a pressão requerida para penetrar um pistão cilíndrico padronizado em um corpo de prova de solo específico e

a pressão necessária para penetrar o mesmo pistão em uma brita graduada também padronizada. Essa relação é expressa como um valor percentual. Ao obter um resultado de CBR igual a 10%, por exemplo, significa que o solo em análise apresenta uma resistência à penetração equivalente a 10% da resistência da brita padrão.

O ensaio tem como objetivo principal avaliar a resistência do solo em relação a uma brita padronizada. Essa medida de resistência desempenha um papel fundamental no projeto e construção de pavimentos, especialmente em estradas e rodovias.

O ensaio é realizado em três fases principais, conforme abaixo e ilustrado pela Figura 9:

Figura 9 – Macrofluxo do Ensaio de Índice de Suporte Califórnia



Fonte: Própria, 2023.

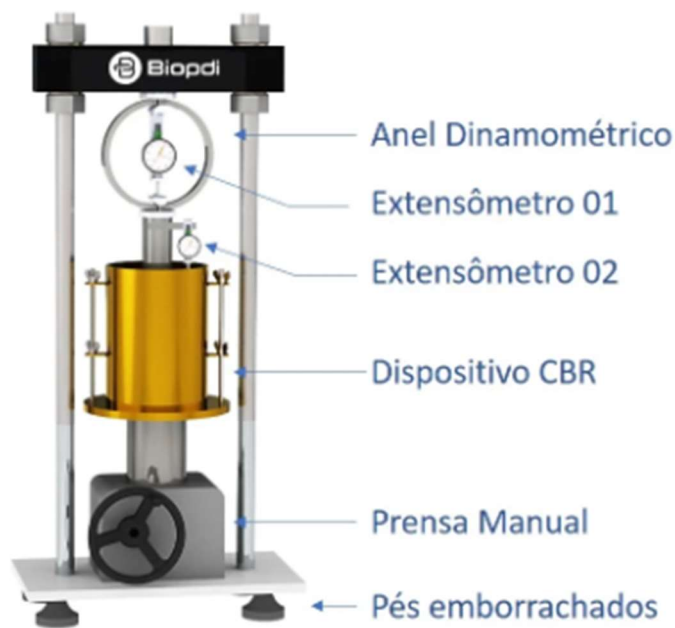
Etapa 1 - Compactação dos corpos de prova: Os corpos de prova, geralmente em número mínimo de cinco, são compactados utilizando energia padrão de compactação - método Proctor. É importante seguir o procedimento adequado, realizando o número correto de golpes e camadas, de acordo com a energia desejada para a compactação. Essa energia pode ser a energia normal - 12 golpes por camada -, energia intermediária - 26 golpes por camada - ou energia modificada - 55 golpes por camada, sendo necessárias cinco camadas de compactação. Durante essa etapa, é possível variar o teor de umidade do solo para obter diferentes condições e caracterizar a curva do CBR.

Etapa 2 - Expansão: após a conclusão do processo de compactação, as amostras são imersas em água por pelo menos quatro dias. Um dispositivo de medição de deslocamento, como um extensômetro ou reflectômetro, é posicionado sobre as amostras, e leituras são realizadas a cada 24 horas. Essas leituras são registradas em um gráfico de expansão em relação à umidade (%).

Etapa 3 - Resistência à penetração: após o processo de expansão, os corpos de prova são drenados por 15 minutos. Em seguida, são levados para a prensa de ensaio CBR, exemplo na Figura 10, onde serão submetidos à penetração de um pistão

cilíndrico a uma velocidade de 1,27 mm/min durante 10 minutos. Durante esse processo, são realizadas as medidas de resistência à penetração do cilindro. Os dados obtidos são registrados em termos de penetração (mm) por carga (N) ou pressão (MPa), permitindo avaliar a capacidade de suporte do solo e obter informações sobre sua resistência.

Figura 10 – Prensa CBR Manual

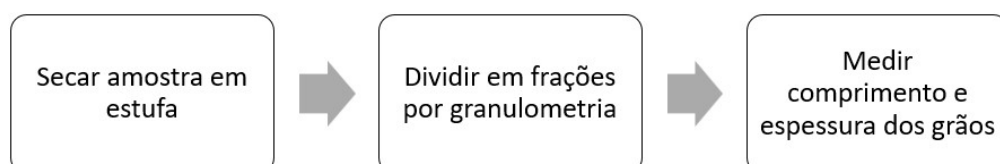


Fonte: BIOPDI, 2023.

2.7.3 Ensaio de Determinação do Índice de Forma

A norma ABNT NBR 7809:2019 define como agregados graúdos aqueles com tamanho superior a 9,5 mm. Durante o ensaio, é importante considerar a maior dimensão mensurável em qualquer direção do grão, bem como a menor distância entre os planos paralelos entre si. Para seguir o procedimento adequado, é recomendado seguir o macrofluxo apresentado na Figura 11.

Figura 11 – Macrofluxo do Ensaio de Determinação do Índice de Forma



Fonte: Própria, 2023.

A partir da análise da relação entre o comprimento médio, largura e espessura dos grãos, é possível determinar o índice de forma dos agregados. Esse índice permite identificar se os agregados são cúbicos, alongados, lamelares e/ou alongados-lamelares. Para realizar essa classificação, é necessário seguir o processo descrito a seguir e respeitar a quantidade de material em relação à dimensão máxima, conforme especificado na Tabela 2:

Tabela 2 – Quantidade mínima de material para ensaio

Fração granulométrica (abertura da peneira)	Massa mínima da amostra inicial kg
≤ 19 mm	5
> 19 mm e ≤ 25 mm	10
> 25 mm e ≤ 37,5 mm	15
> 37,5 mm	20

Fonte: ABNT NBR 7809:2019, p.2.

1. Realizar a secagem da amostra em uma estufa a uma temperatura constante de $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ até que sua massa se torne constante.
2. Realizar a análise granulométrica da amostra, dividindo-a em frações por meio das séries normal e intermediária.
3. Descartar as frações que passam pela peneira com abertura de malha de 9,5 mm e aquelas que apresentam uma porcentagem retida individual, em massa, igual ou inferior a 5%.
4. Para cada fração obtida de acordo com os passos anteriores, realizar o quarteamento até obter o número de grãos conforme a equação a seguir:

$$Ni = \frac{200}{\sum_{i=1}^n Fi}$$

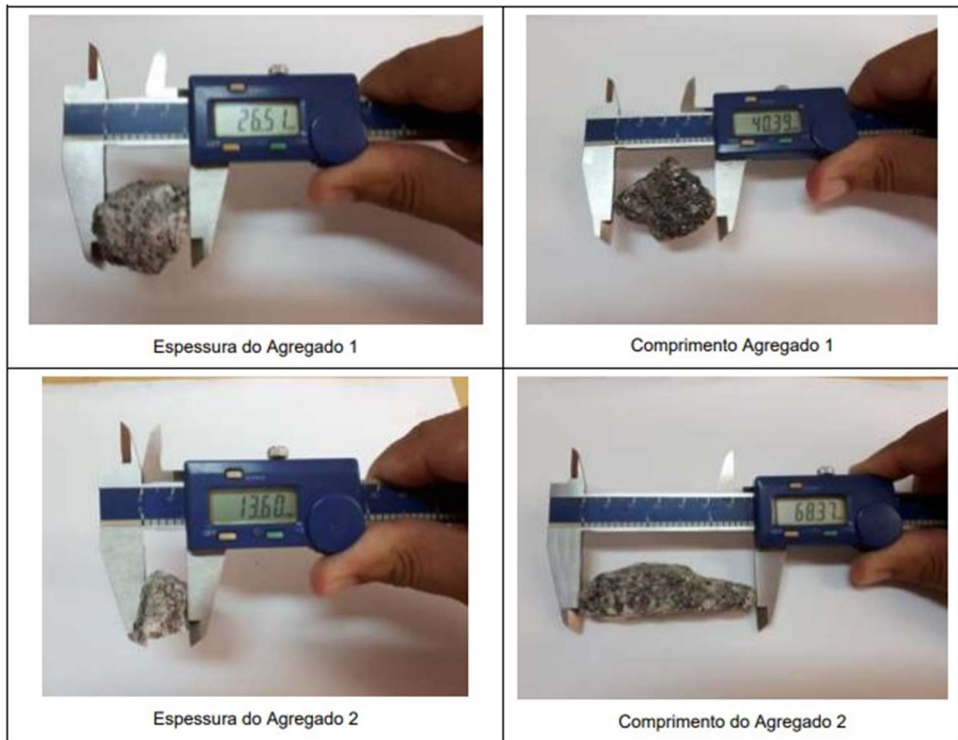
Onde, 200 é o número de grãos necessários para a realização do ensaio;

Ni é o número de grãos a serem medidos na fração i (quando for fracionário, arredondar ao inteiro mais próximo);

Fi é a porcentagem de massa retida individual da fração i .

5. Realizar a medição do comprimento e da espessura de cada um dos grãos obtidos utilizando um paquímetro, conforme exemplo da Figura 12.

Figura 12 – Uso do paquímetro para definição do índice de forma



Fonte: DNIT 425/2020, p.5. 2020.

3 ESTUDO DE CASO

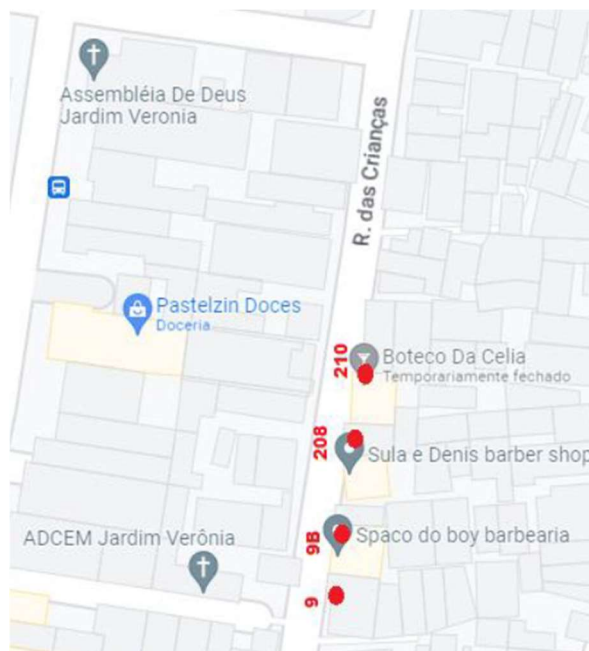
3.1 Descrição da Obra

Foi realizado como estudo de caso, a reposição de pavimento asfáltico na Rua das Crianças, números 9, 9B, 208 e 210, onde foram executadas 4 valas, sendo organizadas em pares, cada par utilizado um tipo de material para efeito de comparação. O par de valas recompostas por RAP tem as respectivas dimensões: 1,35 m de comprimento x 1,00 m de largura x 0,80 m de profundidade e 0,85 m de largura x 1,00 m de comprimento x 0,65 m de profundidade e o par de valas repostas por BGS tem as respectivas dimensões: 0,75 m de largura x 1,20 m de comprimento x 0,70m de profundidade e 1,60 m de comprimento x 1,15 m de largura x 0,70 m de profundidade. O local inspecionado permite o trânsito de veículos em mão dupla. As valas foram abertas para passagem de novo ramal de água.

A composição dos materiais para aplicação nas valas embasa-se nos procedimentos e normas vigentes na capital de São Paulo, aliados às diretrizes técnicas da COMPANHIA DE SANEAMENTO para reposição de valas, com os critérios a serem aplicados durante a escolha do material de reposição, o processo de execução e a metodologia de controle e aceitação da obra.

A via Rua das Crianças é classificada pela Companhia de Engenharia de Tráfego - CET classificada como local, uma via de baixo tráfego e não possui demanda diária de veículos pesados não superior a 20 veículos/dia. O trecho inspecionado pode ser observado na Figura 13, bem como a disposição das 4 valas do estudo de caso.

Figura 13 – Pontos de localização das valas na Rua das Crianças



Fonte: Google Maps adaptado, 2023.

3.2 Traço utilizado

Segundo a companhia de saneamento, para esse estudo, o RAP veio do concreto retirado das obras e fragmentos de concreto asfáltico, melhorado com cal e pó de pedra para melhorar a compacidade por meio da distribuição mais eficiente das partículas granulométricas, com o objetivo de reduzir o uso de agregados extraídos de fontes naturais e redução do entulho direcionado para descarte.

Para produzir o RAP foram utilizados 50 kg de concreto britado; 50 kg de capa asfáltica britada; 50 kg de pó de pedra; kg 10 de cal e; 50 kg de BGS. A partir destes, estabeleceu-se o seguinte traço: 80% RAP (fresa asfáltica); 10% agregados de concreto (brita 1, brita 2 e pedrisco); 10% pó de pedra e; +1% do volume total de cal (após mistura homogeneizada).

3.3 Processo de usinagem

Para a obtenção dos RAP não espumado, foi utilizado o triturador de entulho TE2 da CSM - Componentes, Sistemas e Máquinas para Construção, apresentado na Figura 14.

Figura 14 – Triturador de Entulho TE2 utilizado em 27 de março de 2023



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

O processo de usinagem foi iniciado com a execução do rompimento da capa asfáltica e do concreto britado com martelo hidráulico, para que os materiais ficassem com o diâmetro menor que 20 cm x 20 cm, que é a dimensão do funil de entrada dos agregados, mostrado na Figura 15.

Figura 15 – Funil de entrada dos agregados do Triturador de Entulho TE2



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

Para que o material fosse reduzido, foi necessária a repetição desse processo de usinagem dentro do triturador por duas vezes, conforme Figura 15.

Figura 16 – Processo de usinagem realizado em 27 de março de 2023



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

A capacidade produtiva apresentada por esse processo foi de 0,5 m³ por dia. Após a trituração, o material fica com a dimensão adequada e pronto para a utilização em reposição das valas. O material triturado é apresentado na Figura 17.

Figura 17 – Material triturado



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

3.4 Procedimentos

Os critérios para avaliação, inspeção e acompanhamento técnico, utilizados para o estudo de caso, estão baseados nas seguintes normas e procedimentos de referência:

- Especificações Técnicas, Regulamentação de Preços e Critérios de Medição - ETRPCM – Caderno de Especificações Técnicas da SABESP PO-SO0088 – 2014 – Reaterro compactado e reposição de pavimento.
- Departamento de estradas de Rodagem - DER Especificação Técnica - ET-DE-P00/049 - 06/2020 – Reciclagem de pavimento asfáltico em usina com adição de espuma de asfáltico.
- Norma Técnica SABESP - NTS 327 – 11/2019. Controle de compactação em reaterros de valas com o uso do Dynamic Cone Penetrometer (DCP).
- Prefeitura Do Município de São Paulo - PMSP – Diretrizes Executivas de Serviços de Pavimentação Especificação Técnica de Serviço - ETS - 01/2003 – Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil.

3.5 Aplicação do material produzido em campo

A verificação técnica foi realizada pares, em que os materiais foram aplicados em valas no campo, sendo um par de valas recomposto com o RAP e o outro para de valas recomposto com a BGS, que posteriormente foram monitoradas e o processo de reposição seguiu os mesmos padrões executivos.

As valas foram abertas para a passagem de ramais para rede nova de água da concessionária. As nomenclaturas que foram dadas às valas, referem-se à numeração dos imóveis onde elas estão localizadas.

3.5.1 Valas 9 e 9B

As valas foram nomeadas com o número das residências onde foram locadas, conforme mostram as Figuras 18 e 19.

Figura 18 – Fachada do imóvel em frente a vala 9



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

Figura 19 – Fachada do imóvel em frente a vala 9B



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

A vala 9 foi escavada em 28 de março de 2023, com a dimensão de 1,00 m de largura x 1,35 m de comprimento x 0,80 m de profundidade, conforme Figura 20.

Figura 20 – Escavação da vala 9



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

Após a escavação da vala, foi executada uma envoltória de areia, antes da reposição com o RAP, conforme Figura 21.

Figura 21 – Envoltória de areia executada na vala 9



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

A reposição, foi posteriormente executada com o método proposto, utilizando o RAP não espumado, com uma espessura de 15 cm de camada, conforme Figura 22.

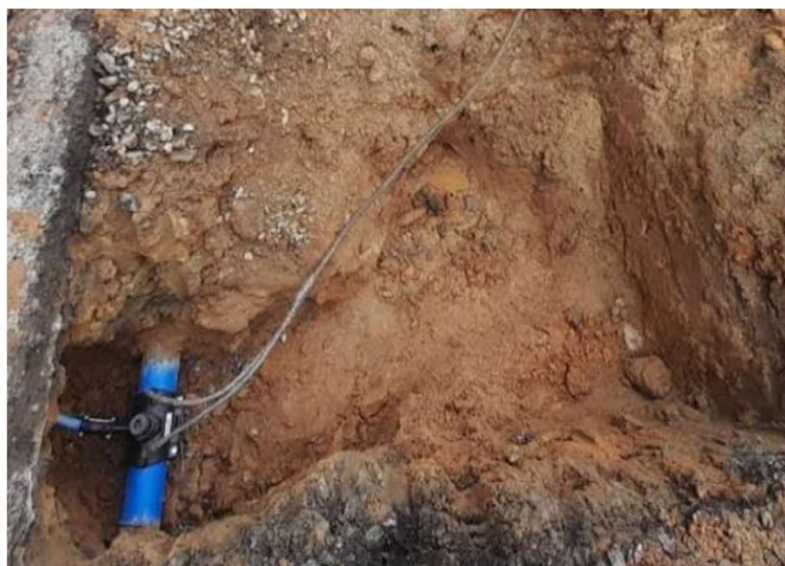
Figura 22 – Vala 9 com a reposição de RAP não espumado executada



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

A vala 9B foi executada em 28 de março de 2023, com a dimensão de 0,85 m de largura x 1,00 m de comprimento x 0,65 m de profundidade, apresentada na Figura 23.

Figura 23 – Vala 9B após a escavação



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

Após a escavação da vala 9B, assim como a vala 9, antes da reposição com o RAP, foi executada uma envoltória de areia para proteger o ramal de água e os componentes hidráulicos contra as vibrações da compactação da reposição e do movimento dos veículos posteriormente, conforme Figura 24.

Figura 24 – Envoltória de areia executada na vala 9B



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

A reposição, bem como a vala 9B, foi realizada posteriormente com o método proposto, utilizando o RAP não espumado com uma espessura de 15 cm de camada, conforme apresentado na Figura 25.

Figura 25 – Vala 9B com a reposição de RAP não espumado executada



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

3.5.2 Valas 208 e 210

As valas foram nomeadas com o número das residências onde foram locadas, conforme mostram as Figuras 26 e 27.

Figura 26 – Imóvel em frente a vala 208



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

Figura 27 – Imóvel em frente a vala 210



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

A vala 208 foi escavada em 28 de março de 2023, com a dimensão de 0,75 m de largura x 1,20m de comprimento x 0,70m de profundidade, conforme Figura 28.

Figura 28 – Detalhe da vala 208



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

Após a escavação da vala 208, antes da reposição com a BGS, foi executada uma envoltória de areia para proteger o ramal de água e os componentes hidráulicos contra as vibrações da compactação da reposição e do movimento dos veículos posteriormente, conforme Figura 29.

Figura 29 – Envoltória de areia executada na vala 208



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

A reposição foi posteriormente executada com o método convencional, utilizado a BGS, com uma espessura de 15 cm de camada desse material, conforme Figura 30.

Figura 30 – Vala 208 após a reposição de BGS executada



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

A vala 210 foi escavada em 28 de março de 2023, com a dimensão de 1,60 m de comprimento x 1,15 m de largura x 0,70 m de profundidade, apresentado Figura 31.

Figura 31 – Detalhe da vala 210



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

Após a escavação da vala 210, assim como a vala 208, antes da reposição com a BGS, foi executada uma envoltória de areia para proteger o ramal de água e os componentes hidráulicos contra as vibrações da compactação da reposição e do movimento dos veículos posteriormente, conforme Figura 32.

Figura 32 – Envoltória de areia executada na vala 210



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

A reposição da vala 210 foi posteriormente executada com o método convencional, bem como a vala 208, utilizando a BGS, com uma espessura de 15 cm de camada desse material, conforme Figura 33.

Figura 33 – Vala 210 com a reposição de BGS executada



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

3.6 Reposição Asfáltica das Valas

Após a realização da reposição nas valas, tanto com o BGS, quanto com o RAP não espumado, os dois pares de valas, em 27 de abril de 2023, foram provisoriamente repostas com asfalto frio. selamento em asfalto frio" se refere a uma técnica de reparo

em que o asfalto é aplicado em temperatura ambiente ou ligeiramente aquecido, sem a necessidade de aquecimento intenso. O asfalto frio geralmente é utilizado para selar pequenas rachaduras ou buracos superficiais no pavimento. É uma solução rápida e prática para reparos menores, proporcionando uma camada protetora sobre áreas danificadas do pavimento. Foi feito o monitoramento das valas, onde foi verificado que não houve nenhuma manifestação patológica. Como visto na Figura 34, a vala 09 com a reposição executada.

Figura 34 – Vala 9



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

A reposição da vala 9B com o RAP não espumado e finalizado com o asfalto a frio é apresentado na Figura 35.

Figura 35 – Vala 9B



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

A reposição da vala 208 com a BGS e finalizada com o asfalto a frio é mostrada na Figura 36.

Figura 36 – Vala 208



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

Na Figura 37, é evidenciada a vala 210 com o asfalto a frio finalizado após a reposição com a BGS.

Figura 37 – Vala 210



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

3.7 Serviço de fresa e recapeamento asfáltico

As intervenções geradas pela passagem de ramais para rede hidráulica nova, culminaram na necessidade da reposição de toda a faixa do pavimento afetado. A abertura de valas pode comprometer a estrutura do pavimento, criando desníveis, fissuras ou danos superficiais. O recapeamento asfáltico ajuda a restaurar a integridade estrutural e a uniformidade da superfície e assegura que a via permaneça funcional, sem interrupções significativas para o tráfego, evitando transtornos prolongados aos usuários. O serviço de fresagem e recapeamento asfáltico na Rua das Crianças, foi efetuado em 24 de abril de 2023, totalizando 27 dias entre a abertura das valas e o fechamento com selamento em asfalto frio e o recapeamento dos trechos de intervenção e estudo.

Na Figura 38, é vista a fresagem asfáltica executada no trecho correspondente a vala 9.

Figura 38 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 9



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

A fresagem asfáltica executada no trecho da vala 9B, é notada na Figura 39.

Figura 39 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 9B



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

Assim como os trechos das valas 9 e 9B, no trecho correspondente à vala 208 também foi necessária a execução de fresagem asfáltica, como mostra a Figura 40.

Figura 40 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 208



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

No trecho da vala 210, também foi executada a fresagem asfáltica, conforme a Figura 41.

Figura 41 – Execução de fresagem asfáltica no trecho da vala 210



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

Após a execução da fresagem asfáltica, foi realizado o recapeamento dos trechos das valas, assim como mostra a Figura 42, o recapeamento no trecho da vala 9.

Figura 42 – Trecho da vala 9 com o recapeamento asfáltico concluído



Fonte: Companhia de saneamento, 2023

Assim como o trecho da vala 9, o recapeamento asfáltico também foi executado no trecho da vala 9B, conforme Figura 43.

Figura 43 – Trecho da vala 9B com o recapeamento asfáltico concluído



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

No trecho da vala 208, foi executado o recapeamento asfáltico, apresentado na Figura 44.

Figura 44 – Trecho da vala 208 com o recapeamento asfáltico concluído



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

No trecho da vala 210, também foi executado o recapeamento asfáltico, em toda extensão necessária, exibido na Figura 45.

Figura 45 – Trecho da vala 210 com o recapeamento asfáltico concluído

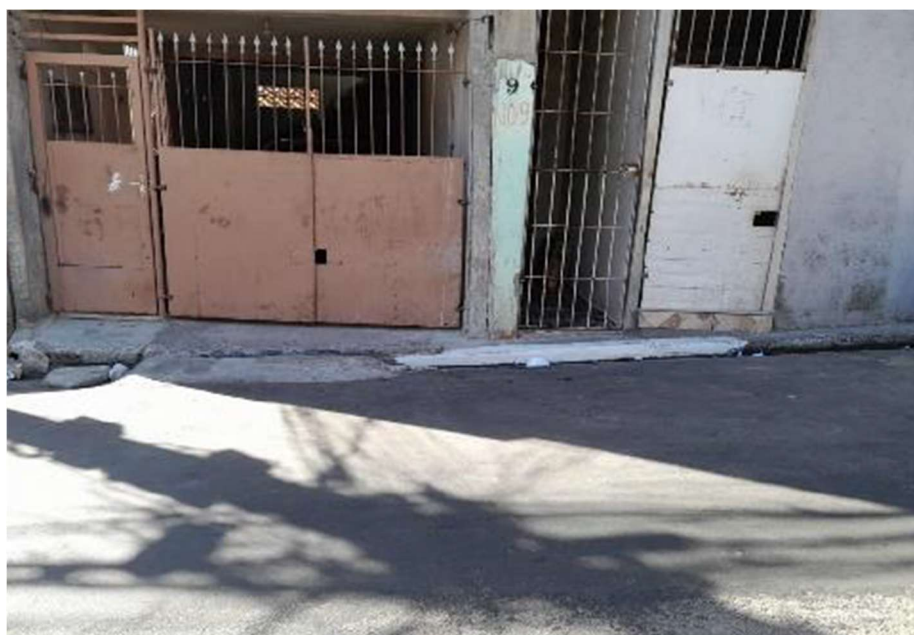


Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

3.8 Monitoramento após 30 dias de execução dos serviços

Em 23 de maio de 2023, foi realizado um novo monitoramento do desempenho das valas executadas, verificando-se que não houve manifestações patológicas nas valas do estudo - BGS e RAP não espumado -, que se encontram com o asfaltamento definitivo. Conforme Figura 46, nota-se o bom desempenho do asfalto no trecho da vala 9, após 30 dias da execução dos trabalhos.

Figura 46 – Trecho da vala 9 após 30 dias



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

No trecho da vala 9B, após os 30 dias de execução dos trabalhos, não foi encontrada nenhuma patologia, conforme apresentado na Figura 47. Dessa forma, evidencia o bom desempenho do RAP não espumado, ao 30º dia, nas duas valas onde o material foi aplicado conforme método proposto.

Figura 47 – Trecho da vala 9B após 30 dias



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

No trecho da vala 208, que foi recomposto com a BGS, não houve nenhuma patologia após o 30º dia de execução dos trabalhos, conforme exibido na Figura 48.

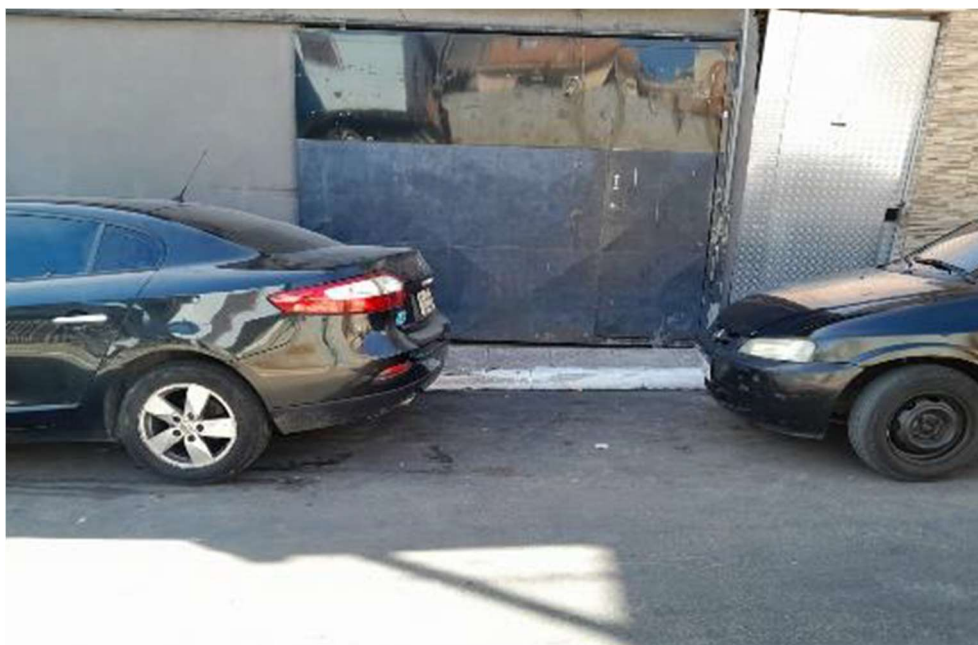
Figura 48 – Trecho da vala 208 após 30 dias



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

Bem como no trecho da vala 208, o trecho da vala 210 que também foi recomposta pela BGS, não possuiu nenhuma patologia após 30 dias de trabalho e o resultado é visualmente igual ao dos trechos com as valas recomposta com o RAP não espumado, como é visto na Figura 49.

Figura 49 – Trecho da vala 210 após 30 dias



Fonte: Companhia de saneamento, 2023.

3.9 Especificação técnica de serviço

A Especificação Técnica de Serviço – ETS 001/2003 da Prefeitura de São Paulo determina as características que agregados reciclados de resíduos da construção civil devem possuir para serem aplicados como material de base, sub-base ou reforço do subleito do pavimento.

A norma estabelece os limites da composição dos agregados e suas características mínimas. O item 2 da ETS 001/2003 determina os parâmetros de granulometria, coeficiente de curvatura, coeficiente de forma, a capacidade de suporte da camada, índice de expansão máximo aceitável e as proporções de agregados reciclados, indicando que a origem dos mesmos deve ser composta predominantemente de agregados de resíduos cerâmicos, cimentícios ou pétreos em 70% de sua composição.

A graduação do material indica um coeficiente de uniformidade bem graduado e um coeficiente de curvatura conforme, já que a composição possui 6% do material passante na peneira nº 40, indicando a falta de finos.

Coeficiente de uniformidade

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{19}{0,65} = 29,23$$

Onde C_u é Coeficiente de uniformidade;

D_{10} é o Diâmetro efetivo (corresponde a 10% do material passante);

D_{60} é o Diâmetro que corresponde a 60% do material passante.

Coeficiente de curvatura

$$C_c = \frac{D_{30}^2}{D_{10} * D_{60}} = \frac{6,22}{0,65 * 19} = 3,11$$

Onde C_c é o Coeficiente de curvatura;

D_{10} é o Diâmetro efetivo (corresponde a 10% do material passante);

D_{30} é o Diâmetro que corresponde a 30% do material passante;

D_{60} é o Diâmetro que corresponde a 60% do material passante.

A capacidade de suporte do material RAP e o limite de expansão atenderam ao especificado em norma, para aplicação em base de pavimento, atingindo também o índice exigido para a BGS.

4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

O RAP não espumado foi analisado e os resultados foram obtidos através dos ensaios de granulometria, Índice de Suporte Califórnia e Índice de forma.

Os ensaios foram realizados com o material que foi coletado na usina no dia 27 de março de 2023.

4.1 Ensaio de Caracterização

O ensaio de caracterização foi realizado para obter informações sobre as propriedades do material, como composição, textura e resistência a compressão. Os resultados desse ensaio fornecem uma base para a compreensão das características do material e sua adequação para determinadas aplicações.

4.2 Ensaio de Índice de Suporte Califórnia

Em 05 de maio de 2023, o ensaio foi realizado, conforme a ABNT NBR 9895:2017- Solo - Índice de suporte Califórnia (ISC) - Método de ensaio utilizando a energia de compactação intermediária, conforme indicação na ABNT NBR 15115:2004 - Agregados reciclados de resíduos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Foram utilizados cinco corpos de prova para a realização do ensaio e obtenção da curva do ISC, cada corpo de prova foi submetido a uma quantidade de água para obtenção da densidade máxima e umidade ótima.

Os resultados demonstraram que a amostra apresenta boa estabilidade e resistência à expansão, indicando sua adequação para aplicações em vias.

A Tabela 3 apresenta os resultados individuais dos corpos de prova ensaiados.

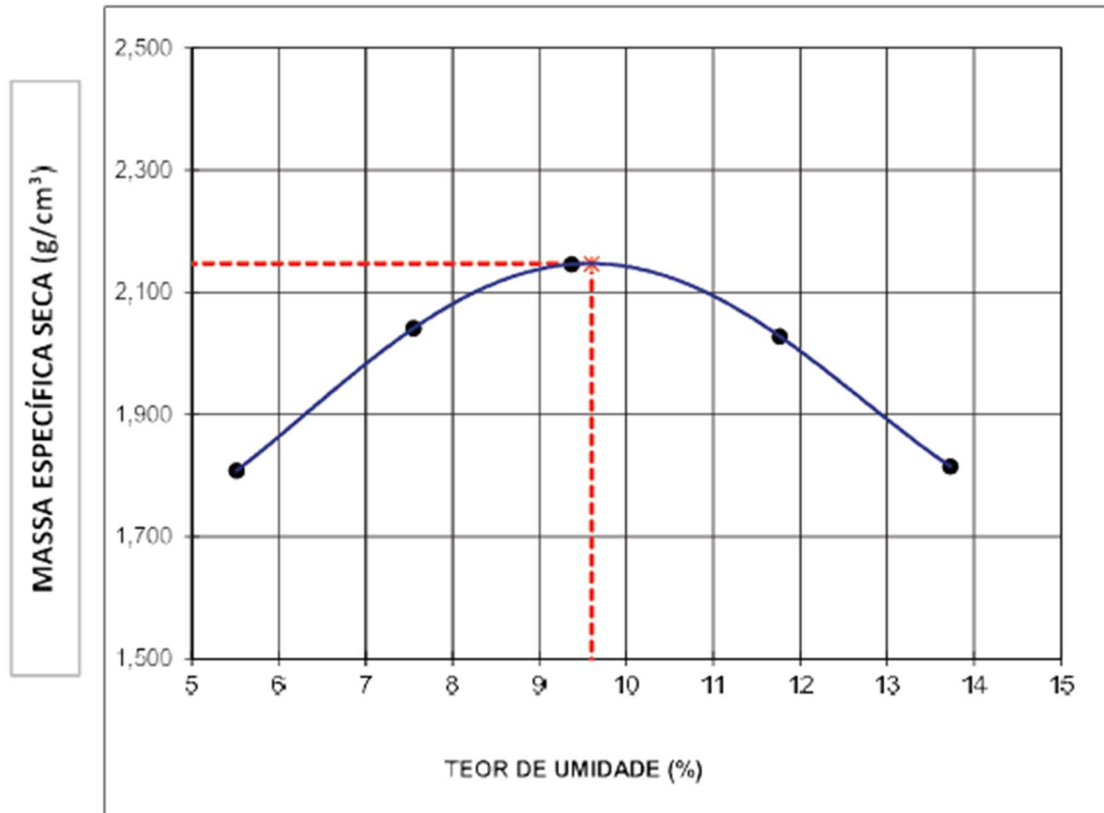
Tabela 3 – Resultados individuais dos corpos de prova

CORPO DE PROVA		1	2	3	4	5
TEOR DE UMIDADE	%	5,5	7,6	9,4	11,8	13,7
MASSA ESP. SECA	g/cm³	1,808	2,041	2,146	2,028	1,815
EXPANSÃO	%	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
CBR	%	40,6	72,4	89,1	75,6	37,1

Fonte: Laboratório credenciado, 2023.

Na Figura 50, é evidenciada a obtenção do teor de umidade ótimo de 9,6% e massa específica seca máxima de 2,147 g/cm³, do material ensaiado do ponto máximo da curva. Esses valores representam as condições ideais para a compactação e desempenho do material em questão.

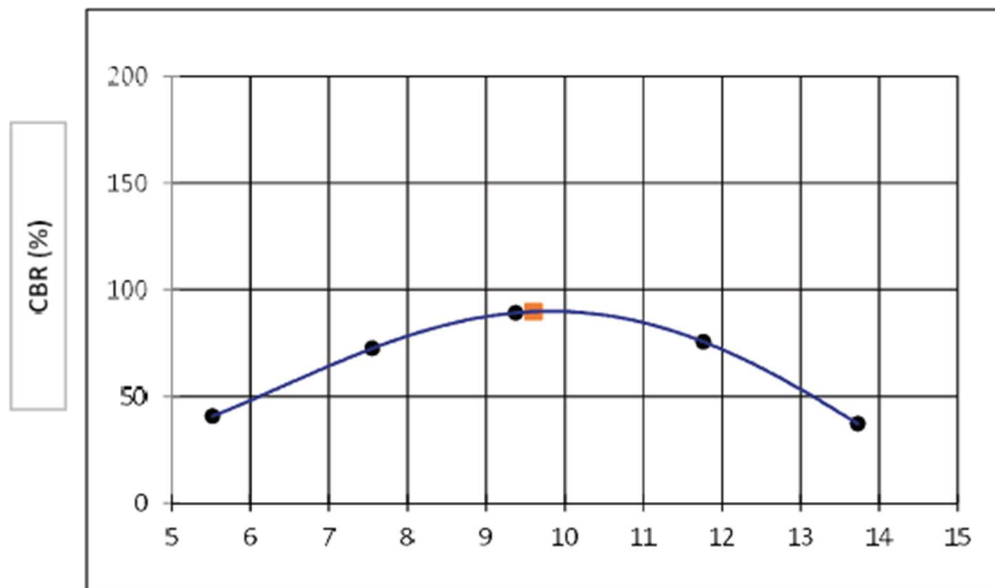
Figura 50 – Curva da Massa Específica Seca



Fonte: RE 1109/23 - Laboratório credenciado, 2023.

A Figura 51 demonstra a relação entre o índice de suporte e o teor de umidade ótimo da amostra que atinge 89,7%. Isso indica que, nesse teor de umidade específico, o material possui a melhor capacidade de suporte e desempenho.

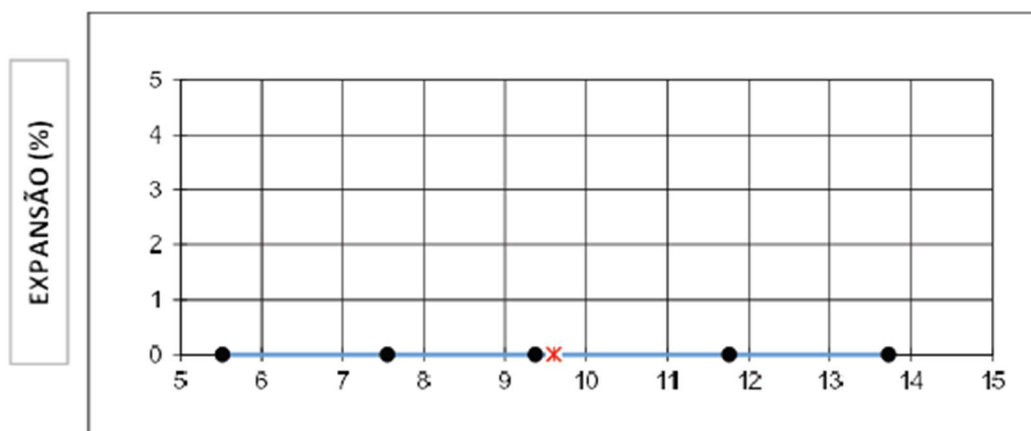
Figura 51 – Curva do CBR



Fonte: RE 1109/23 - Laboratório credenciado, 2023.

Com base na Figura 52, pode-se observar que não houve ocorrência de expansão em nenhuma das amostras analisadas. Isso indica que o material possui uma boa estabilidade e resistência à expansão, o que é um aspecto positivo em termos de qualidade e adequação para aplicação em vias, pois o material com baixa expansão evita abertura de fissuras.

Figura 52 – Curva de Expansão



Fonte: RE 1109/23 - Laboratório credenciado, 2023.

O resumo dos resultados, apresentado na Tabela 4, consolidou as principais descobertas, destacando a umidade ótima, massa específica máxima, expansão nula e ISC, indicando excelente capacidade de suporte para o material analisado e o comparativo com a BGS.

A BGS já é um material homologado e altamente utilizado para reposição de base de valas, com isso a companhia de saneamento não solicitou repetição dos ensaios, deste modo, utilizamos como referência para o comparativo com o RAP Não espumado os resultados mais recentes dos ensaios de BGS realizados para a mesma companhia de saneamento, através do trabalho de conclusão de curso de SANCHEZ, B., NUNES, D., ALVES, P., SHIMADA, W (2022).

Tabela 4 – Resumo dos resultados obtidos

	RAP Não Espumado	BGS
UMIDADE ÓTIMA (%)	9,6	7,3
MASSA ESP. MÁXIMA (g/cm³)	2,147	2,132
EXPANSÃO (%)	0	0
CBR (%)	89,7	50,8

Fonte: RE 1109/23 - Laboratório credenciado, 2023.

Os valores apresentados na Tabela 4, indicam respectivamente que:

- Umidade ótima: é o teor de umidade em que o material apresenta a melhor capacidade de compactação e desempenho. Nesse caso, o valor de 9,6% indica a umidade ideal para obter as propriedades desejadas no material.
- Massa específica máxima: refere-se à densidade máxima que o material pode atingir quando compactado. O valor de 2,147 g/cm³ indica a máxima densidade que o material pode alcançar, o que é importante para garantir sua estabilidade e resistência a compressão.
- Expansão: o valor de 0,00 indica que não houve expansão no material durante o ensaio. Isso é positivo, pois indica que o material possui boa estabilidade e resistência à expansão, o que é desejável em muitas aplicações.
- CBR - Índice de Suporte Califórnia: o valor de 89,7% representa a capacidade do material em suportar cargas e deformações. Quanto maior o valor do CBR, maior a capacidade de suporte do material. Portanto, um

valor de 89,7% indica uma excelente capacidade de suporte para o material analisado.

4.3 Ensaio de granulometria por peneiramento

O ensaio de granulometria por peneiramento foi realizado para determinar a distribuição dos tamanhos de partículas na mistura. Esse ensaio envolve a passagem do material por diferentes peneiras de aberturas graduadas, permitindo a classificação das partículas em diferentes faixas granulométricas. Os resultados desse ensaio são importantes para avaliar a capacidade de compactação e permeabilidade do material, além de auxiliar no dimensionamento adequado da mistura para sua respectiva aplicação.

A Tabela 5 apresenta os resultados da determinação granulométrica através do peneiramento.

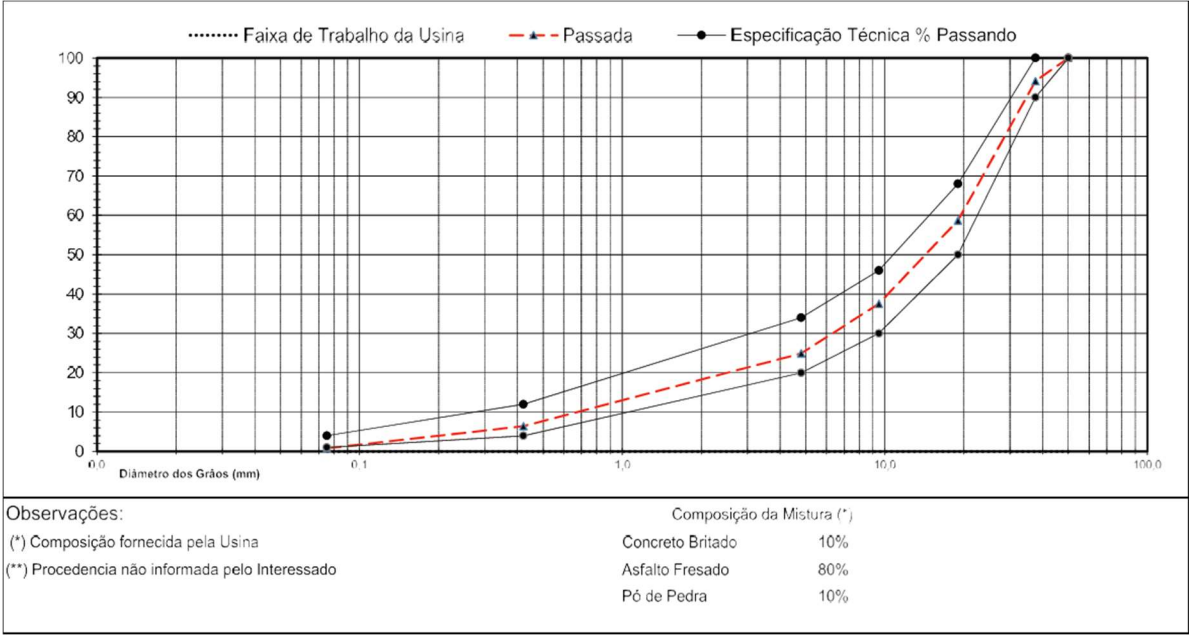
Tabela 5 – Determinação da Composição Granulométrica em Agregado para Pavimentação

DETERMINAÇÃO DA COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA EM AGREGADO PARA PAVIMENTAÇÃO							
Peneiras (mm)	Massa Retida (g)	% Acumulada		Faixa de Trabalho da Usina		Especificação Técnica % Passar do	
		Retida	Passada				
50,0	0,0	0,0	100,0	(*)	(*)	100,0	100,0
37,5	586,5	5,9	94,1	(*)	(*)	90,0	100,0
19,0	4121,6	41,3	58,7	(*)	(*)	50,0	68,0
9,5	6226,1	62,5	37,5	(*)	(*)	30,0	46,0
4,8	7486,7	75,1	24,9	(*)	(*)	20,0	34,0
0,42	9331,1	93,6	6,4	(*)	(*)	4,0	12,0
0,075	9893,8	99,2	0,8	(*)	(*)	1,0	4,0
Total	9972,8	---	---	---	---	---	---

Fonte: RE 1109/23 - Laboratório credenciado, 2023.

A Figura 53 mostra o gráfico do peneiramento do RAP não espumado.

Figura 53 – Gráfico de Determinação da Composição Granulométrica em Agregado para Pavimentação



Fonte: RE 1109/23 - Laboratório credenciado, 2023.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A comparação dos resultados laboratoriais, entre o RAP não espumado e a BGS, destacou a eficácia do RAP, evidenciando sua capacidade de suporte, estabilidade e resistência à expansão. Esses dados positivos, sugerem que o RAP pode desempenhar um papel equivalente, se não superior, em comparação com a BGS, favorecendo a sua utilização em reposição de valas em pavimentos asfálticos.

No estudo de caso realizado, a comparação entre a utilização do RAP e a BGS, abrangeu os aspectos técnicos e físicos dos materiais. Os resultados favoráveis do RAP, aliados à sua aplicação eficiente no campo, indicam que essa alternativa pode tecnicamente viável. Se tratando de uma reciclagem de RCD, o RAP é uma solução sustentável para o setor de pavimentação, porém vale ressaltar que o canteiro precisaria ter um local apropriado para fabricação do RAP não espumado e possuir um processo logístico desde o recebimento do material fresado, moagem do material até o estoque, obtendo assim um material reciclado disponível para aplicação quando necessário.

Em suma, os resultados obtidos mostram que o RAP não espumado é uma alternativa viável à BGS na camada de base para reposição de pavimento em valas de vias de baixo tráfego. Essa conclusão respalda a consideração do RAP não espumado como uma solução promissora na busca por práticas mais sustentáveis e eficientes em projetos de pavimentação.

Para estudos futuros, a pesquisa pode ser expandida para incluir outras propriedades mecânicas relevantes, como módulo de elasticidade através dos ensaios de viga Benkelman ou FWT, resistência à fadiga e comportamento em situações de carga cíclica, análise comparativa com outros materiais reciclados para uso na pavimentação, além de um estudo econômico mais detalhado para essa aplicação, considerando uma média do volume de material consumido em um período. Destacamos também a importância da aplicação em valas de tamanhos maiores e em outros tipos de solo, com o objetivo de analisar seu suporte e resistência à compressão. Dessa forma, futuras pesquisas podem contribuir para uma implementação mais ampla e eficaz da utilização do RAP não espumado em projetos de pavimentação.

6 REFERÊNCIAS

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento de concretos**. Tese (Doutorado). Escola Politécnica, universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

ANPET. Congresso Nacional de Pesquisa em Transporte. **Comportamento em Camadas de Base Granular, 2015**. Disponível em <https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/69423/1/2015_eve_isbessa.pdf> Acesso em: 28 mai. 2023.

ALMEIDA, Salvador L. M. LUZ, Adão Benvindo da. **Manual de Agregados para Construção Civil**. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 7185**: Solo - Determinação da massa específica aparente, *in situ*, com emprego do frasco de areia. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9895**: Solo - Índice de suporte Califórnia. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15114**: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes – Áreas de reciclagem – Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15115**: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, projeto e restauração**. São Paulo, Oficina de textos, 2007.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil (Literature review: reuse of construction and demolition waste in the construction industry); **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. B.. **Pavimentação Asfáltica: formação básica para engenheiros**. 3 ed. Rio de Janeiro: Imprinta, 2010.

BIOPDI. **Ensaio CBR ou Índice de Suporte Califórnia**. Disponível em: <<https://biopdi.com.br/artigos/ensaio-cbr-indice-suporte-california/>>. Acesso em: 29 nov. 2023.

CARNEIRO, A. P., BURGOS, P. C., & ALBERTE, E. P. V. (2001). **Uso do agregado reciclado em camadas de base e sub-base de pavimentos**. Projeto Entulho Bom. Salvador: EDUFBA/Caixa Econômica Federal, p.190-227.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Impactos da qualidade do asfalto sobre o transporte rodoviário** (2019). Brasília, 75p. Disponível em: <<https://cnt.org.br/impactos-qualidade-asfalto-transporte-rodoviario>>. Acesso em: 17 abr. 2023.

COMPANHIA DE SANEAMENTO BÁSICO DO ESTADO DE SÃO PAULO - SABESP. Procedimento Operacional Serviços Operacionais **PO-SO0088 – V.2** – Reaterro compactado e reposição asfáltica, São Paulo, abr. 2019.

DEPARTAMENTO DE ESTRADAS E RODAGEM DO ESTADO DE SÃO PAULO. DER/SP. ESPECIFICAÇÃO TÉCNICA. **Sub-base ou base de brita graduada**, [S. l.], jul. 2005. Disponível em: <http://www.der.sp.gov.br/WebSite/Arquivos/normas/ET-DE-P00-008_A.pdf>. Acesso em: 23 abr. 2023.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Manual de pavimentação**. Publicação IPR – 719, 2ª edição, Rio de Janeiro/RJ, 1996.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES – DNIT. **Pavimentação - Sub-base estabilizada granulometricamente - Especificação de serviço**. Norma DNIT 139/2010. Rio de Janeiro/RJ, nov. 2010.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (Brasil). S. Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. **Manual de Pavimentação**. 3. ed. Rio de Janeiro: [s. n.], 2006. 274 p. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/719_manual_de_pavimentacao.pdf>. Acesso em: 27 abr. 2023.

HERRADOR, R.; PÉREZ, O.; GARACH, L.; ORDÓÑEZ, J. Use of Recycled Construction and Demolition Waste Aggregate for Road Course Surfacing. **Journal of Transportation Engineering**, v.138, p.182-190, 2012.

HILL, A. R., DAWSON, A. R., Mundy, M., Utilisation of aggregate materials in road construction and bulk fill, **Journal of Resources, Conservation and Recycling**, 2001.

IBGE (2020). **Pesquisa Anual da Indústria da Construção 2020**. Rio de Janeiro, V. 30, p1-4, 2020.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Summary for polieymakers**. Fourth Assessment Report, Working Group III. Genebra, Suíça, 2007. Disponível em: <http://arch.rivm.nl/env/int/ipcc/docs/FAR/Approved%20SPM%20WGIII_0705rev5.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2023.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição à metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre docência) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, fev 2000.

LEITE, F. DA C.; MOTTA, R. DOS S.; VASCONCELOS, K. L.; VERNUCCI, L. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. **Construction and Building Materials**, v25. N. 6.p. 2972-2979. jun. 2011.

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. 1999. 240p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 1999.

MINAS JR, CONSULTORIA MINERAL. **Análise Granulométrica e sua importância no mercado**. Disponível em: <https://www.minasjr.com.br/analise-granulometrica-e-sua-importancia-no-mercado/> Acesso em: 29 nov. 2023.

MINISTÉRIO PÚBLICO DE SÃO PAULO – MPSP. **Pesquisa Setorial ABRECON 2020**. Disponível em: <http://www.mpsp.mp.br/portal/page/portal/documentacao_e_divulgacao/doc_biblioteca/bibli_servicos_produtos/BibliotecaDigital/BibDigitalLivros/TodosOsLivros/Pesquisa-setorial-ABRECON-2020.pdf>. Acesso em: 20 abr. 2023.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS-001: Camadas de reforço do subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. Secretaria de Infraestrutura Urbana, Especificação Técnica de Serviço, São Paulo, 2003.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **PMSP/SP ETS-02/2009: Base de material fresado com espuma de asfalto**. Secretaria de Infraestrutura Urbana, Especificação Técnica de Serviço, São Paulo, 2009. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SM%20SO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/ESPECIFICACAOES%20TECNICAS%20%20DE%20SERVICO/ets_02_2009_base_de_material_fresado_com_espuma_de_asfalto.pdf. Acesso em 28 maio 2023.

_____. **Instrução De Projetos de Pavimentação – classificação das vias – IP-02/2004**, 2004. Disponível em:

[https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SM SO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUCAO%20DE%20PROJETOS/ip_02_2004_classificacao_das_vias.pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/infraestrutura/arquivos/SM%20SO%202018/NORMAS%20TECNICAS%20DE%20PAVIMENTACAO/INSTRUCAO%20DE%20PROJETOS/ip_02_2004_classificacao_das_vias.pdf). Acesso em: 23 mar. 2022.

RICCI, G.. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição para pavimentação**. Dissertação. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 27 de julho de 2007.

SANCHEZ, B., NUNES, D., ALVES, P., SHIMADA, W. **Análise Comparativa Mecanicista de Pavimento Flexível com Base em Brita Graduada Simples e Material Reciclado**. Orientador: Diego Lourenço Cartacho. p.121. 2022. Trabalho de conclusão de Curso – Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, São Paulo, 2022.

SANTOS, P. S. **Tecnologia de argilas: Aplicações**. v.2. São Paulo: Edgard Blucher, 1975.

SENÇO, W.. **Manual de técnicas de pavimentação**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2007.

SILVA, P. F. A.. **Manual de patologia e manutenção de pavimentos**. 2 ed. São Paulo: Pini, 2008.

SOARES, J. B.; L. M. G. MOTTA; R. F. SOARES (2000) Análise de Bacias Deflectométricas para o Controle de Construção de Pavimentos Asfálticos. ANPET, XIV Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, ANPET, Gramado.

UCL. **O mercado da construção civil: Tendências e oportunidades, 2023**. Disponível em <<https://www.ucl.br/o-mercado-da-construcao-civil-tendencias-e-oportunidades/>> Acesso em: 20 abr. 2023.