

FACULDADE MAIS DE ITUIUTABA-MG
ENGENHARIA CIVIL

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO COMO AGREGADO PARA MISTURA ASFÁLTICA

Carlos Rogério Pessoa de Melo

Geverson Pontes

Jaime Pierasso Neto

RESUMO

A pesquisa tem como tema resíduo de construção para mistura asfáltica que foi motivada pelo alto consumo de recursos naturais pelo setor da construção civil. Visto que, as misturas asfálticas a quente, utilizando como agregado a brita ou o seixo geram um agravante passivo ambiental devido a todo o processo de extração mineral. Somado a isso tem o fato de apresentar carência de material pétreo devido às condições geológicas impostas num processo de anos de deposição. O objetivo geral foi avaliar o aproveitamento parcial de resíduos de construção e demolição (entulhos) como agregado para substituir parte do agregado da massa asfáltica. O método utilizado consiste em um estudo experimental sobre a substituição total de agregados naturais por agregados reciclados em pavimentos asfálticos. Foi analisado a Caracterização do Agregado, a Determinação das Densidades, Moldagem dos Corpos de Prova, Temperatura da Mistura e de Compactação, Preparação da Mistura, Determinação da Massa Seca e Submersa em Água, da Estabilidade, da Fluência, do Teor Ótimo de Projeto de Ligante Asfáltico e determinação da Resistência à Tração por Componente Diametral. Os resultados mostram que apesar da mistura com resíduos recicláveis apresentar elevada absorção, ao se analisar o teor de projeto final, em relação às misturas com resíduos convencionais, os valores de Resistência à Tração, nas condições analisadas, foram superiores ao valor mínimo exigido pelas normas que preconizam toda a sistemática a ser empregada na execução de pavimentos flexíveis.

Palavras-Chave: Mistura Asfáltica, Agregados Reciclados, Pavimentação.

ABSTRACT

The research focuses on construction waste for asphalt mixture, which was motivated by the high consumption of natural resources by the construction sector. Since, hot asphalt mixtures, using crushed stone or pebbles as aggregate, generate an aggravating environmental liability due to the entire mineral extraction process. Added to this is the fact that it lacks stone material due to the geological conditions imposed in a years-long process of deposition. The general objective was to evaluate the partial use of construction and demolition waste (rubble) as aggregate to replace part of the aggregate and part of the asphalt mass. The method used was experimental, which consists of an experimental study on the total replacement of aggregates natural by recycled aggregates in asphalt pavements. Aggregate Characterization, Density Determination, Test Specimen Molding, Mixture and Compaction Temperature,

Mixture Preparation, Determination of Dry Mass and Submerged in Water, Stability, Fluency, Optimum Design Content were analyzed. Asphalt Binder and determination of Tensile Strength by Diametral Component. The results show that although the mixture with recyclable waste presents high absorption, when analyzing the final project content, in relation to mixtures with conventional waste, the Tensile Strength values, under the analyzed conditions, were higher than the minimum value required by the standards that recommend the entire system to be used in the execution of flexible floors.

Keywords: Asphalt Mix, Recycled Aggregates, Paving.

1 INTRODUÇÃO

A construção civil é um dos setores que mais impulsionam a economia nacional e mundial. O seu acelerado avanço nos últimos anos gerou um incontroleado uso dos recursos naturais, reproduzindo no meio ambiente graves consequências (Fonseca; Maintinguer, 2019). Fonseca e Maintinguer (2019) afirmam que, além de consumir cerca de 75% dos recursos, o setor da construção civil é o que mais gera resíduos. Desta forma, utilizar materiais alternativos implicaria em grandes benefícios sociais, ambientais e econômicos.

No Brasil, a produção de asfalto teve início em 1944, na Refinaria Ipiranga, com petróleo importado da Venezuela. Antes disso, o asfalto utilizado na construção de pavimentos era importado de Trinidad (Senço, 1997). A primeira rodovia construída com asfalto no Brasil foi no ano de 1938. O Brasil possui atualmente uma rede de estradas com 211.678 km pavimentados, para os seus 8,5 milhões de km², sendo a maior parte com revestimentos asfálticos (Resende, 2010).

Materiais asfálticos têm sido empregados na construção da camada de revestimento de pavimentos nos Estados Unidos desde 1876 (Roberts *et al.*, 1998), sendo que a primeira aplicação foi feita em Washington, na Avenida Pennsylvania que passa em frente à Casa Branca (Prego, 2001).

Tendo em vista o grande potencial de crescimento nos setores de estradas e rodovias e as peculiaridades da geodiversidade do Brasil, se faz necessário a iniciação de estudos de materiais alternativos, como os agregados reciclados substituindo os agregados naturais para adentrar como nova possibilidade no meio da construção civil. Esse trabalho apresenta um estudo experimental da caracterização física e mecânica das misturas asfálticas com adição de resíduos da construção e demolição na forma de agregado.

O revestimento asfáltico é a camada final do pavimento, composta por agregados e ligantes asfálticos, que tem como objetivo receber as tensões do tráfego e dissipá-las nas

camadas de base servindo também como agente impermeabilizante do solo, fornecendo maior segurança e conforto para a pista de rolamento (Pereira, 2014). Em contrapartida o resíduo de construção e demolição é um rico material com grande potencial de reaproveitamento para pavimentação, pois, não apresenta em sua composição materiais orgânicos ou nocivos (Vieira, 2003).

Portanto, a natureza deste trabalho foi de avaliar o uso de agregados reciclados provenientes da construção civil na preparação do revestimento asfáltico, tendo como metas específicas, caracterizar granulometricamente o resíduo de construção e demolição para viabilizar a confecção da dosagem e análise das propriedades físicas e mecânicas da mistura, utilizando como parâmetro metodológico as normas vigentes de dosagem preconizadas pelos órgãos brasileiros de pavimentação, no qual determinam os procedimentos, especificações e métodos para a realização dos ensaios necessários e resultados obtidos.

1 OBJETIVOS

1.1 Objetivo geral

Em busca de novas alternativas e mitigar os impactos ambientais causados por extração de agregados naturais para misturas asfálticas, o objetivo geral foi avaliar o aproveitamento parcial de resíduos de construção e demolição (entulhos) como agregado, para substituir parte do agregado da massa asfáltica.

1.2 Objetivos específicos

- a) Analisar as características dos materiais e comportamentos mecânicos de resíduo de construção e demolição (entulhos);
- b) Descrever adaptações de material convencional por resíduos de construção e demolição (entulhos) para a massa asfáltica;
- c) Determinar o teor ótimo de projeto da mistura;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Pavimentos

Um pavimento é um conjunto de camadas, subdividido em subleito, reforço do subleito, sub-base, base e revestimento. Este conjunto forma uma estrutura que construída sobre a superfície final do terraplenagem, tem a finalidade de propiciar maior conforto na camada de rolamento, resistir aos esforços verticais e horizontais, oriundos do tráfego, distribuindo-os

nas subcamadas da estrutura do pavimento, tornando a superfície mais durável, atendendo aos requisitos de segurança para o tráfego nas velocidades operacionais das vias e mantendo as características acima de limites admissíveis (Senço, 2007).

Há relatos de que os pavimentos têm origem desde antes de Cristo (2600-2400 a.C.), a base da informação consiste na análise da história, onde uma das mais antigas estradas implantadas não se destinou a veículos com rodas, mas a trenós para o transporte de cargas utilizadas para construção de pirâmides no Egito. Foram construídas vias com lajões justapostos em base com boa capacidade de suporte, o atrito era amenizado com um umedecimento constante por meio de água, azeite ou musgo molhado (Saunier apud Bernucci *et al.*, 2007).

De acordo com Bernucci *et al.* (2007), foi em 1560, na administração do Governador Mem de Sá que a primeira estrada brasileira foi construída. Tratava-se do caminho para ligar São Vicente ao Planalto Piratinga. Em 1661, o governo da Capitania, recuperou este caminho, transformando na chamada Estrada do Mar, possibilitando assim, o tráfego de veículos. Hoje a estrada é conhecida como Velha Mar e em 1789, foi recuperada sendo a pavimentação feita em lajes de granito, conhecida também como Calçada de Lorena, ainda hoje preservada.

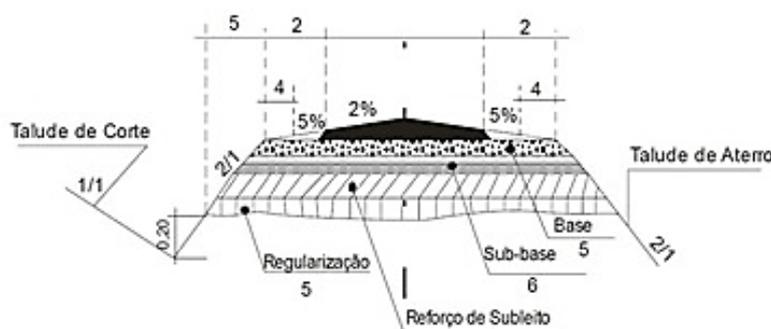
No início do século XX, havia no país 500 km de estradas com revestimento de macadame hidráulico, sendo o tráfego delimitado a veículos de tração animal. Em 1896 chegou da Europa o primeiro veículo de carga que em 1903 foram os primeiros veículos licenciados. Em 1906 foi criado o Ministério da Viação e Obras Públicas. Em 1909 o automóvel Ford modelo T foi lançado nos Estados Unidos por Henry Ford, sendo a Ford Motor Company a primeira indústria automotiva instalada no Brasil em 1919. (Prego apud Bernucci *et al.*, 2007).

Em 1985, ainda segundo o autor, o Brasil contava aproximadamente com 110.000 km de rodovias pavimentadas, evoluindo para 133.000 km em 1993. Em 2005, os indicadores apontavam 196.000 km. Estes números representavam cerca de 10% de rodovias pavimentadas no país, muito aquém da média dos Estados Unidos que apresentava indicador de mais de 50% de rodovias pavimentadas.

No Brasil, é comum na pavimentação o uso do concreto asfáltico (CA), trata-se do produto da mistura dosada de agregados e cimento asfáltico que forma o revestimento do pavimento (Boeira, 2014). É importante ressaltar que a abertura de estradas pavimentadas possui o poder de impulsionar a economia local, a partir desta constatação impulsiona a necessidade de se estudar materiais fora do ciclo convencional para viabilizar a construção destas, que por sua vez, exigem insumos e equipamentos de alto custo (Fearnside, 2009).

De acordo com o manual de pavimentação do DNIT, tem-se como definição das diversas camadas constituintes de um pavimento, em seção transversal: Pavimento: É a estrutura construída após o terraplenagem; Subleito: É o terreno de fundação do pavimento; Leito: É a superfície obtida pelo terraplenagem ajustado ao seu greide; Greide do leito: É o perfil do eixo longitudinal do leito; Regularização: É a camada trabalhada e posta sobre o leito; Sub-base: É a camada complementar à base; Base: É a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento; 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.

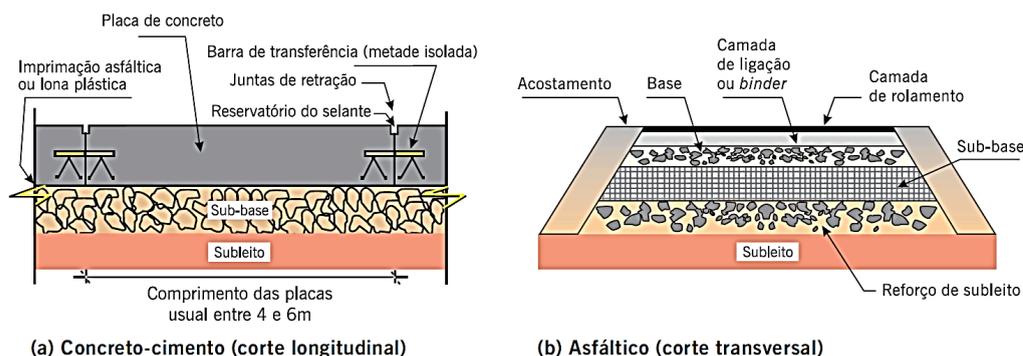
Figura 1: Esquema de seção transversal do pavimento.



Fonte: Manual de pavimentação do DNIT, 2006.

O pavimento rodoviário pode ser classificado em duas categorias básicas: flexíveis, mais conhecidos como pavimentos asfálticos, onde é caracterizado pelo tipo de revestimento, e pavimentos rígidos, usualmente denominados pavimentos de concreto de cimento (Bernucci *et al.*, 2007).

Figura 2: Estrutura das duas categorias básicas do pavimento.



Fonte: Bernucci *et al.*, 2007.

Todos os revestimentos asfálticos compõem da união de agregados e ligantes. Essas associações, quando executadas corretamente, resultam em estruturas mais duráveis (Pereira, 2014). A camada de revestimento asfáltico possui as seguintes funções: Impermeabilizar o pavimento; Dissipar de maneira uniforme, nas camadas de base as tensões e deformações induzidas pelas cargas de tráfego; Limitar as tensões e deformações na estrutura do pavimento; Conceder uma superfície resistente à derrapagem; Aumentar o conforto na relação pneu e pista de rolamento (Balbo, 2015; Santos; Assis, 2019).

Os agregados é um termo coletivo para pedregulhos, areias, pedras, lascas de pedras, pedriscos e rochas minerais em seu estado natural, artificial ou britadas (Ceratti, 2011). Conceitua que em revestimento asfáltico, o agregado mineral, também denominado agregado convencional, forma o esqueleto que suporta e transmite as cargas aplicadas. Podem ser classificados em três grandes grupos, segundo sua natureza, tamanho e distribuição dos grãos (Bernucci *et al.*, 2007).

Quanto à sua natureza em pavimentação, são classificados como agregado natural, artificial e reciclado. O agregado natural inclui todas as fontes de ascendência natural e são obtidos por processos convencionais como desmonte, escavação e dragagem em depósitos continentais, marinhos, estuários e rios. Podem ser dados como exemplos seguintes minérios: pedregulhos, britas, seixos e areias (Almeida; Luz, 2012, p. 111).

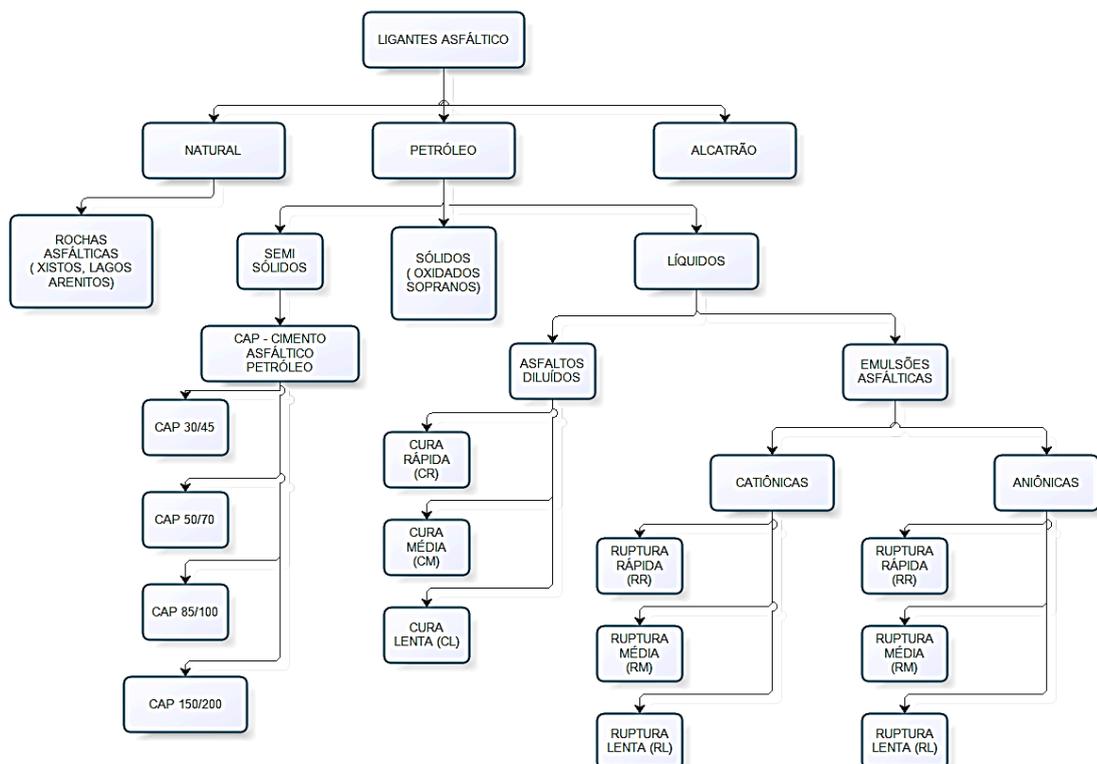
Agregado artificial, são resíduos de processos industriais como a escória de alto forno ou fabricados especificamente com o objetivo de alto desempenho, como a argila calcinada e a argila expandida. Atualmente, o tipo de agregado artificial mais utilizado são os vários tipos de escória, subprodutos da indústria do aço. Já o reciclado, são oriundos de materiais diversos. Em alguns países, a reciclagem de revestimentos asfálticos já é a fonte principal de agregados. Os resíduos de construção civil em locais com ausência de agregados pétreos é uma alternativa a ser utilizada para locais com jazidas escassas (Deus *et al.*, 2019, p. 02).

Quanto ao seu tamanho, são classificados conforme a norma DNIT031/2006–ES, em graúdo, miúdo e material de enchimento ou filer. O tamanho graúdo é o material retido na peneira nº10, ou seja, com dimensões maiores do que 2,0 mm como britas, seixos, cascalhos e etc. O miúdo é o material retido na peneira nº 200, mas que passa na de abertura nº 10, ou seja, com dimensões maiores que 0,075 mm e menores que 2,0 mm como areias, pó de pedra etc. Material de enchimento (filer) é o material onde pelo menos 65% das partículas é menor que 0,075 mm, correspondente à peneira nº 200, como cal hidratada, cimento Portland etc.

Quanto à distribuição dos grãos em pavimentação, é uma das principais e mais importantes características que intervém no comportamento mecânico do revestimento asfáltico. Influência em quase todas as propriedades importantes incluindo rigidez, estabilidade, durabilidade, permeabilidade, trabalhabilidade, resistência à fadiga e à deformação permanente (Deus *et al.*, 2019, p. 10).

Ligante asfáltico é o agente cimentante que une as partículas dos agregados e as mantém em posição adequada para receber as tensões impostas no pavimento. De acordo com (Ceratti, 2011), em pavimentação, o asfalto utilizado é um ligante betuminoso derivado da destilação do petróleo. Sua constituição é uma mistura química de hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos não voláteis de elevada massa molecular e uma pequena quantidade de estruturas heterocíclicas contendo enxofre, nitrogênio e oxigênio. A variação de sua composição química é em função da origem do petróleo, do processamento empregado em seu refinamento, do efeito do calor e do ar durante a produção da mistura asfáltica.

Figura 3: Fluxograma da classificação dos Cimentos Asfálticos.



Fonte: Souza (2012).

Os Cimentos Asfálticos possuem três grandes divisões: Cimento Asfáltico Natural (asfalto natural), Cimento Asfáltico de Petróleo (CAP) e os de origem do Alcatrão. Na Figura

3, observa-se as divisões e subdivisões destes aglutinantes (Souza, 2012).

Segundo Senço (2007), é estabelecido como Cimento Asfáltico de Petróleo – CAP: “o asfalto obtido especialmente para apresentar as qualidades e consistências próprias para o uso direto na construção de pavimentos, tendo uma penetração a 25° C entre 5 e 300 mm sob uma carga de 100 g, aplicada durante 5 segundos”. Em outra designação, são ligantes semi sólidos a temperaturas baixas, visco elásticos a temperatura ambiente, líquidos a alta temperatura e consistentes a determinadas temperaturas, diferenciando-os dos asfaltos utilizados na construção civil. Atualmente, quatro tipos de CAP são conhecidos através de classificação quanto a sua penetração: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100 e CAP 150/200 (Ceratti, 2011).

Para se especificar um determinado asfalto como adequado para pavimentação, a maioria dos países utiliza medidas simples de características físicas do ligante, pela facilidade de execução nos laboratórios de obras. As duas principais características utilizadas são: Ensaio de Penetração e Viscosímetro Rotacional (Brookfield)

Segundo a Norma do DNIT 155/2010 – ME, define-se penetração na profundidade, em décimos de milímetro, uma agulha padrão penetra verticalmente na amostra de material sob condições prefixadas de carga, tempo e temperatura.

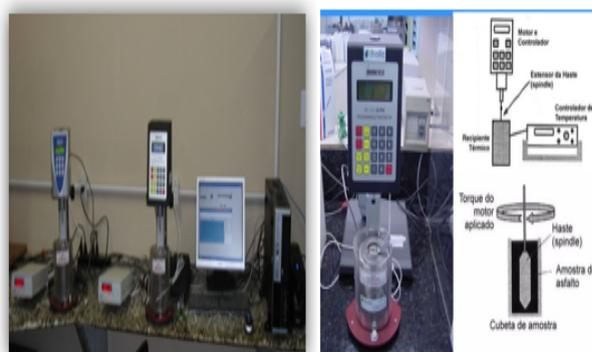
Figura 4: Penetração.



Fonte: Bernucci *et al.* (2007).

O ensaio foi executado dentro das condições exigidas e é mostrado na Figura 4, em um penetrômetro, nas condições de tempo de 5s, 100g à 25°C. O banho de água, para conter o recipiente com amostra, deve ter capacidade mínima de 10 litros, tendo uma prateleira perfurada situada, pelo menos, a 50 mm do fundo, devendo a lâmina de água sobre a amostra ter mais do que 100 mm e ser capaz de manter a temperatura de ensaio com precisão de $\pm 0,1$ °C (Souza, 2012).

Figura 5: Viscosidade.



Fonte: Bernucci *et al.* (2007).

O ensaio foi realizado seguindo a norma D 4402 da ASTM– *Viscosity Determination of Asphalt at Elevated Temperatures Using a Rotational Viscometer*. Caracteriza as propriedades reológicas dos ligantes convencionais e modificados durante manuseio do asfalto, nas temperaturas de 135, 155 e 170°C, a partir do torque necessário para rotacionar um *spline* imerso na amostra de aproximadamente **8 gramas** de asfalto à velocidade de 20 rpm, presente nas especificações atuais dos ligantes brasileiros desde 2005. Na Figura 5, é apresentado o equipamento do laboratório de engenharia de pavimentos/UFCG (Souza, 2012).

Este ensaio foi essencial para o desenvolvimento desta pesquisa; a partir de seus resultados partiu-se para a determinação das temperaturas de usinagem e compactação, tanto para o CAP convencional como para o modificado com óleo de Mamona. Diante dos acervos de dados, foram determinados, assim, os parâmetros para a escolha de quatro (04) teores óleo vegetal (Mamona), na dosagem Superpave, com o objetivo de determinar e avaliar as características mecânicas das misturas com este ligante modificado, como apresenta Souza (2012).

Para o autor, a relevância dos movimentos voltados para o meio ambiente e a busca pela sustentabilidade, combinada com o avanço de tecnologias que visam aprimorar a eficiência energética e a segurança dos usuários, está impulsionando a criação de novos produtos e

métodos que possibilitam a redução da temperatura de usinagem e compactação (Souza, 2012, p. 21). Como resultados, o óleo de mamona diminuiu a viscosidade do CAP nas temperaturas de usinagem e compactação, resultando em uma melhor manipulação das misturas asfálticas. Isso assegura a manutenção de uma quantidade especificada desse óleo nas propriedades mecânicas das misturas asfálticas (Souza, 2012, p. 114).

Este método, ponto de amolecimento, prescreve o modo pelo qual deve ser determinado o Ponto de Amolecimento dos materiais asfálticos na faixa de 30°C a 157°C, utilizando a aparelhagem Anel e Bola. Para a realização deste ensaio, tomou-se a norma do DNIT 131/2010 – ME, e foram seguidas todas as etapas, desde a preparação da amostra, à razão de temperatura de controle de aquecimento da água para a realização do ensaio. Na Figura 6, a seguir, são apresentados os equipamentos utilizados (Souza, 2012).

Figura 6: Ponto de Amolecimento.



Fonte: Bernucci *et al.* (2007).

2.2 Misturas usinadas

As misturas usinadas são realizadas através de usina estacionária, a mistura de agregados e ligantes, compondo a massa asfáltica, transportada por caminhão até o local de destino e posteriormente lançada por um equipamento apropriado, denominado Vibro acabadora. Em seguida é compactada até atingir um grau de compressão que resulte em uma estrutura estável e resistente (BERNUCCI *et al.*, 2007).

□ Misturas à Quente

As misturas asfálticas a quente são subdivididas pela graduação dos agregados, onde são destacados três tipos mais usuais:

- a) Graduação densa: curva granulométrica contínua e bem graduada, com poucos vazios. Exemplo: concreto asfáltico (CA);
- b) Graduação aberta: curva granulométrica uniforme com agregados quase do mesmo tamanho. Exemplo: mistura asfáltica drenante ou camada porosa de atrito (CPA);
- c) Graduação descontínua: curva granulométrica com maiores quantidades de grãos maiores em relação aos grãos intermediários. Exemplo: matriz pétreo asfáltica (SMA).

2.3 Agregados reciclados

Em relação os agregados reciclados, a Resolução nº 307, de 5 de junho de 2002, Art. 2º, Inciso IV, define agregado reciclado sendo: “[...] material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção que apresentem características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia”.

Segundo norma técnica NBR 15115/2004, o agregado reciclado é obtido através de britagem ou processamento mecânico manual, de resíduos de construção, demolição, reforma ou reparo oriundos dos serviços executados na construção civil. São classificados como resíduo de construção “Classe A”, que de acordo com a resolução CONAMA nº 307/2002, são resíduos reutilizáveis, tais como tijolos, argamassa, cerâmicas, telhas, placas de revestimento, pré-moldados, blocos e concretos gerais.

A primeira Resolução de gerenciamento de reciclagem dos resíduos da construção civil pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA entrou em vigor em janeiro de 2003. Trata-se da Resolução nº 307 de 2002 que possui como objetivo o estabelecimento de diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de reciclagem dos resíduos, visando minimizar os impactos ambientais.

Em conformidade com a NBR 15115/2004, agregados reciclados sólidos da construção civil em execução de camadas de pavimentação, a reciclagem consiste no processo de aproveitamento de resíduos com destinação final. Segundo a resolução CONAMA nº 307/2002, a reciclagem do RCD terá de trazer benefícios em ordem social, econômica e ambiental. Onde, sem transformação do mesmo é processado e aplicado.

De acordo com a Resolução CONAMA 307/2002, os resíduos de classe “A” de construção e demolição deverão ser destinados na forma de agregados quando reutilizados ou reciclados ou encaminhados para aterros de resíduos para estoque de uso futuro.

Em obras de pavimentação, os agregados reciclados, neste trabalho definidos como Resíduos de Construção e Demolição (RCD) podem ser aplicados segundo a NBR

15115/2004, em execução de camadas de reforço do subleito, sub-base, base, bem como na massa de revestimento asfáltico. No entanto, este material deve atender os seguintes requisitos: Devem ser evitados quaisquer materiais classificados como classe “B”, “C” e “D” pela Resolução CONAMA nº307; Apresentar curva granulométrica bem graduada, não uniforme de acordo com o ensaio da ABNT NBR7181; Apresentar retenção entre 10% e 40% na peneira nº40 (0,42mm); Não apresentar materiais orgânicos e nocivos ao meio ambiente.

2.4 Emprego de RCD em pavimentação

A indústria da construção civil é um dos maiores pólos econômicos do Brasil e do mundo. Entretanto, sua cadeia produtiva consome de 20% a 50% dos recursos naturais do planeta (JOHN, 2001). No Brasil, cerca de 95% das rodovias pavimentadas são de concreto asfáltico, informação que nos leva ao seguinte questionamento: - “Quando os agregados naturais se tornarão escassos?” Já que, para se produzir massa asfáltica, utilizamos agregados na composição. Sendo que, 80% das rodovias do país, ainda não foram pavimentadas (SNV, 2014). Ou seja, ainda fabricaremos milhões e milhões de toneladas de massa asfáltica.

No ano de 2011, segundo a ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), os serviços privados de coleta do Brasil chegaram a coletar cerca de 33 milhões de toneladas de RCD, executados somente pelos órgãos públicos. Este volume com certeza seria no mínimo dobrado, caso quantificasse todos os resíduos de entulho descartados no país.

Brasileiro (2013) realizou um estudo para avaliar a condição da utilização de agregados reciclados provenientes de RCD em substituição ao agregado natural no concreto asfáltico, buscando analisar uma solução técnica e economicamente viável para a construção de pavimentos.

Tabela 1: Valores limites adotados para concreto asfáltico.

Características	Método de ensaio	Camada de Rolamento
Porcentagem de vazios %	DNER-ME 043/95	3 a 5
Relação betume/vazios	DNER-ME 043/95	75 a 82

Estabilidade, mínima, (kgf) (75 golpes)	DNER-ME 043/95	500
Resistência à Tração por Compressão Diametral estática a 25°C, mínima (MP)	DNIT-ME 136/2010	0,65

Fonte: DNIT ES – 031, 2006.

Pós-análise decomposição do material constituído basicamente de resíduos de concreto e argamassa, foi realizado o ensaio de granulometria do mesmo, onde os comparando ao ensaio granulométrico dos agregados convencionais, verificou-se que o percentual passante dos agregados naturais se mostrou superior aos do agregado reciclado. O RCD mostrou 84% mais poroso, ou seja, com maior poder de armazenamento de fluidos em seus espaços interiores. As misturas foram realizadas utilizando a faixa “C” da norma DNIT 031/2006, onde se determina os valores limites para os parâmetros volumétricos.

Confeccionaram-se 05 composições de projeto, com 05 teores de CAP para cada. Desta maneira, foram confeccionadas 25 trações de mistura. Sendo que a primeira composição de projeto tinha 0% de peso agregado RCD e a última composição 100% de material RCD. Os traços obedeceram a um volume de vazios de 6,3%, 3,3%, 1,4%, 0,7% e 0,2%, para os teores de 4,0%;4,5%; 5,0%; 5,5% e 6,0% de ligante na massa asfáltica convencional (Mistura 1) e 6,5%, 4,9%,3,7%, 3,0% e 2,8% de vazios, para os teores de 10,0%; 10,5%; 11,0%; 11,5%; e 12,0% na massa asfáltica com 100% de RCD (Mistura 5).

Baseada na norma DNIT 031/2006, onde se determina os valores limites para os parâmetros de volume, a mistura 1 é composta por 25% de brita 19,1mm; 30% brita 9,5 mm; 30% pó de brita; 12% de areia lavada; 3% fíler; 0% RCD. A mistura 5 é composta por 13% de resíduo reciclado 19,1mm; 30% de resíduo reciclado 9,5 mm; 45% de pó de resíduo; 10% de areia de resíduo; 2% de fíler de resíduo, desta forma, 100% reciclado.

O resultado obtido foi o maior consumo de ligantes nos materiais com agregados reciclados de construção e demolição, provenientes da construção civil. Observou-se também que para todas as misturas a estabilidade decresce com o aumento do teor de ligante. Porém, as estruturas com maior Volume de Vazios (Vv) apresentam maior estabilidade. Este fato pode ser devido à formação do seixo, existente nas estruturas de concreto, ter sua forma arredondada e lisa.

A busca por melhorias sustentáveis, tecnológicas e novas alternativas, é cada vez maior em todos os setores da construção civil. Em pavimentação, por exemplo, devido ao alto custo

de fabricação da massa asfáltica, incorporada por agregados minerais e ligantes asfálticos, faz-se necessário à realização de estudos de materiais alternativos mais baratos e sustentáveis, que garantam a resistência e longevidade do produto, diminuindo ainda o custo final de fabricação. Os estudos já realizados geram resultados há anos, entre eles, a nova alternativa que vem sendo explorada é a substituição parcial ou total do agregado mineral natural por agregado reciclado da construção civil (Souza, 2012, p. 21).

Periodicamente, observamos que uma grande quantidade de entulho é gerada pelos serviços da construção civil, viabilizar a reciclagem destes resíduos, não é somente dar uma destinação final sustentável a uma grande quantidade de matéria que ocuparia espaço nos aterros sanitários, é também e principalmente poupar materiais naturais, que hoje estão ameaçados por uma possível escassez futura.

Suprir a carência deste material granular resultaria em maiores quantidades de vias pavimentadas, analisando a possibilidade de maior produção com os mesmos orçamentos disponíveis para construção. Este, já seria um ganho altamente conquistado, e quando aliado à uma destinação sustentável ao entulho gerado pelas demolições de obras civis, nos deparamos com um potencial de resultado extraordinariamente positivo. Ou seja, uma solução técnica e economicamente viável para o Brasil e para o mundo.

Em suma, com a reciclagem do RCD, temos benefícios em ordem social, pois a sociedade só ganharia com maiores quantidades de vias pavimentadas, gerando conforto, mais segurança e acessos a locais isolados; Benefícios em ordem econômica, pois um novo potencial de fonte de renda seria disponibilizado, hoje não temos fortes referências de empresas que trabalhe com a britagem dos resíduos de concreto provenientes da construção, essa alternativa afetaria a economia, gerando empregos para toda a população, onde, o RCD sem transformação é processado e reaplicado; Por último e não menos importante, ressaltamos os benefícios em ordem ambiental, levando em conta que todo trabalho resume-se em dar uma destinação final a um material reciclado e poupar a extração natural de outro.

3 METODOLOGIA

3.1 Programa experimental

Nesta seção do trabalho, foi demonstrados os tipos de materiais e metodologias aplicadas para a fabricação do revestimento asfáltico 100% com agregado reciclado. Bem como, a busca e a verificação da disponibilidade do Resíduo de Construção e Demolição.

3.2 Materiais

A fim de demonstrar os tipos de materiais e metodologias aplicadas para a fabricação do revestimento asfáltico 100% com agregado reciclado, bem como a busca e a verificação da disponibilidade do Resíduo de Construção e Demolição, foram utilizados Resíduos de Construção e Demolição reciclados da construção civil, oriundos de demolição de casas em Ituiutaba-MG e ligante asfáltico CAP 50/70, material convencional para composição de massa asfáltica.

3.3 Agregados

O RCD utilizado neste trabalho foi coletado em demolição de casa no perímetro urbano do município de Ituiutaba. O mesmo foi coletado manualmente e separadamente de acordo com os 4 tipos de granulação disponíveis no britador, em sacos de nylon de 50 kg, resultando em 4 sacos e totalizando 200 Kg. Como a Região não apresenta usina de reciclagem específica de entulho, o mesmo foi britado em um britador de mandíbula com alimentador vibratório desenvolvido por uma fornecedora de agregados. Antes da britagem é possível ajustar a malha do britador, possibilitando o controle do diâmetro do material denominado de Agregado Reciclado de RCD.

Para análise granulométrica do RCD foram necessárias as etapas abaixo descritas:

a) Seleção do Material

O material escolhido (figura 07), para o estudo trata-se da reciclagem de resíduos de construção e demolição de obras civis de perímetro urbano do município de Ituiutaba-MG, que, de acordo com a NBR 15112/2004, é classificado como Classe A: classe mais nobre dos reciclados. Neste caso, proveniente da britagem de peças de concreto armado, especificamente, vigas e pilares onde sua composição básica é constituída de aglomerantes, agregados e aço, ou seja, cimento Portland, brita e armação de diversas bitolas.

Figura 07: a) Área a ser demolida. b) Área demolida. c) Composição da estrutura.

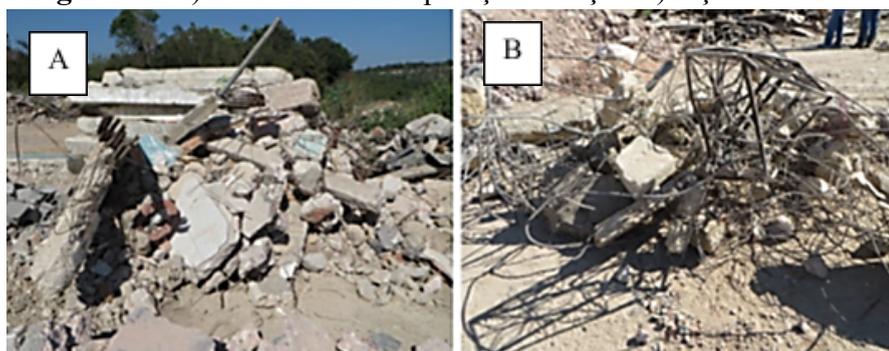


Fonte: Os autores, 2023.

b) Britagem

A britagem do material inicia após a separação do aço da estrutura de concreto (figura 08), serviço manual executado por meio de martetele apropriado, com auxílio de uma pá carregadeira pneumática o transporte do material é feito até um britador de quatro malhas diferentes, em que é iniciado o processo de britagem, transformando as placas de concreto em agregados reciclados.

Figura 08: a) RCD antes da separação do aço. b) Aço extraído.



Fonte: Os autores, 2023.

c) Análise e Coleta do Material Britado

Foram coletados para análise quatro resultados de agregados provenientes da britagem (Figura 09) com objetivo de substituir respectivamente a brita 1, brita 0, areia e pó de brita, usualmente utilizadas em pavimentação.

Figura 09: Material coletado – RCD.



Fonte: Os autores, 2023.

Tabela 2: Classificação quanto ao tamanho dos agregados RCD.

AGREGADO	ENSAIO REAL		ESPECIFICAÇÃO POR NORMA (DNIT 031/2006-ES)	
	Classificação	Dimensão Real	Max. (mm)	Substituição ao Convencional
RCD 1	Graúdo	4,81 mm	> 2,00	Brita 1
RCD 2	Graúdo	2,45 mm	> 2,00	Brita 0
RCD 3	Miúdo	1,60 mm	$0,075 > x < 2,00$	Areia
RCD 4	Pó	-	65% < 0,075	Pó de Brita

Fonte: DNIT 031, 2006 e organizado pelos autores, 2023.

3.4 Ligante

O ligante utilizado foi o CAP 50/70 – Cimento Asfáltico de Petróleo, material proveniente da destilação de petróleo, semissólido a baixas temperaturas, visco elástico à temperatura ambiente e líquido a altas temperaturas. Na realização do corpo de prova da mistura asfáltica, é recebido a frio, aquecido até atingir a temperatura de mistura de 160°C no fogareiro, tendo seu calor medido através do aparelho termômetro infravermelho.

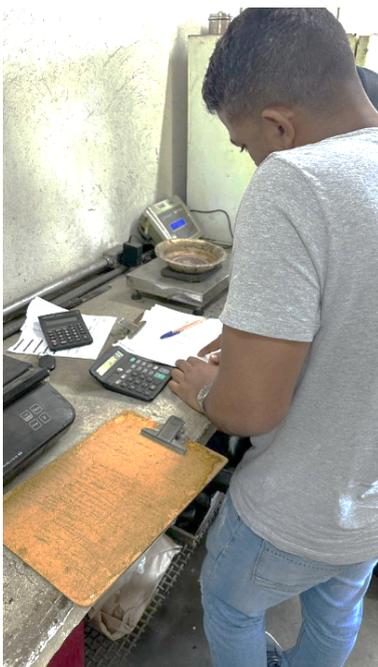
4 RESULTADOS

4.1 Caracterização do Agregado – Quarteamento e Composição Granulométrica

O primeiro passo dado para iniciar a caracterização granulométrica do agregado foi realizar o aquartelamento das amostras, com objetivo de evitar a segregação do material coletado, o quarteamento pode ser feito manualmente, com uma pá, formando uma pilha em formato cônico ou com um separador mecânico de amostras, procedimento utilizado neste

trabalho (Figura 10), onde coloca-se uma amostra original em uma bandeja e distribui-se uniformemente sobre as calhas do separador, tantas vezes quantas forem necessárias, até reduzir a amostra inicial na quantidade necessária para o ensaio (Figura 10) (DNER-PRO 199/96).

Figura 10: Amostra do agregado RCD e separador mecânico.



Fonte: Os autores, 2023.

Figura 11: Conjunto de peneiras e Peneiramento do material.



Fonte: Os autores, 2023.

Após secadas em estufa a uma temperatura de 105 a 110°C e pesadas em seu estado seco para determinar a massa inicial, foram preparados o conjunto de peneiras e agrupados com suas dimensões da maior a menor, fundo e tampa, de acordo com a faixa especificada, para realização do peneiramento manual (Figuras 11 e 12), pesando a massa retida de cada peneira (Figuras 13 e 14) inclusive o fundo para proceder com os cálculos.

Figura 12: Material retido.



Fonte: Os autores, 2023.

Figura 13: Pesagem do material retido.



Fonte: Os autores, 2023.

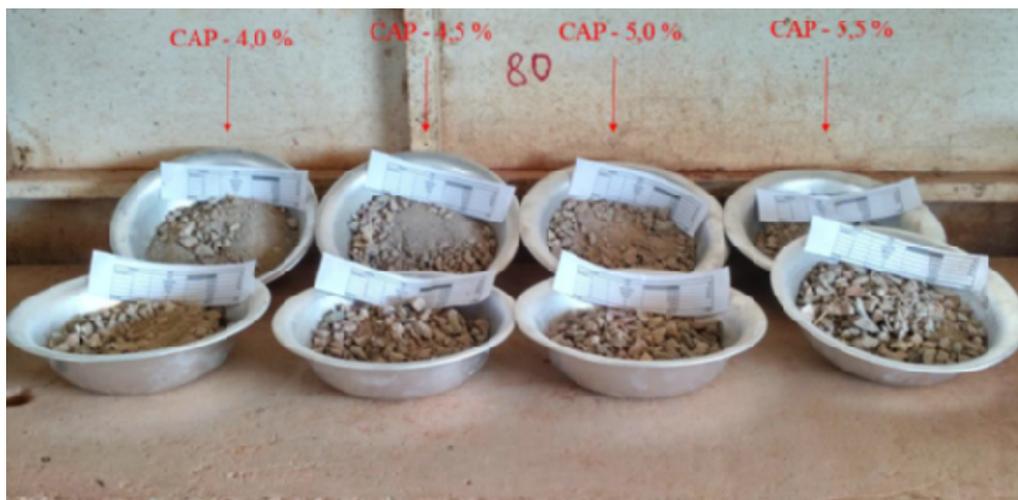
Terminadas as pesagens, calculou-se o percentual de material passante em cada peneira em relação à massa inicial. O ensaio é repetido três vezes para cada tipo de agregado (Fino, Médio e Graúdo). Obtendo os resultados da composição granulométrica enquadraram-se as misturas na “Faixa C” e obteve-se o percentual de composição para cada tipo de agregado, ou seja, a quantidade de cada tipo de material (Graúdo, Miúdo e Fino) (Figura 14) necessário para a mistura da massa asfáltica em função de cada teor de CAP determinado (Figura 19).

Figura 14: Determinação do teor de agregados para moldagem do CP.



Fonte: Os autores, 2023.

Figura 15: Composição de agregados para cada teor de CAP.



Fonte: Os autores, 2023.

4.2 Determinação das Densidades

Os ensaios de densidade real e dosagem foram realizados com o objetivo de conhecer a densidade máxima possível para garantir a estabilidade da mistura com agregados 100% reciclado, determinar a fluência entre certos limites, para garantir a flexibilidade, encontrar certos limites de volume de vazios para garantir que não ocorra oxidação da massa asfáltica pela ação da água e/ou ar e que também não ocorra exsudação e por fim encontrar a relação betume vazios entre certos limites, para garantir que exista betume suficiente e que não ocorra exsudação.

Foram utilizados os métodos de determinação das massas específicas dos agregados de acordo a metodologia especificada pela norma do DNER-ME 081/98 para determinação da densidade de agregados graúdos e da norma DNER-ME 084/95 para determinação da densidade real de agregados miúdos.

Figura 16: Ensaios de densidade para agregados graúdos e miúdos.



Fonte: Os autores, 2023.

4.3 Moldagem dos Corpos de Prova

Para determinar a quantidade correta de ligante asfáltico, foi utilizado o ensaio Marshall de misturas betuminosas a quentes. Todos os corpos de prova foram moldados obedecendo à metodologia recomendada pelo DNER ME 43/95 adotando-se as seguintes definições como descrito na tabela 3:

Tabela 3: Definições de temperatura, energia e teores ligantes para Moldagem dos Corpos de Prova

Temperatura da Mistura	Energia de Compactação 75 golpes/face	Os teores de ligante foram variados da seguinte maneira
Agregado....117° a 177°C Ligante.....107° a 177°C Compactação.....140 ±15 SSF	Rompimento 60°C....30'	CAP 50/70 com RCD: 4,00%, 4,50%, 5,00%, 5,50%,6,00%

Fonte: Os autores, 2023.

Após as determinações das massas específicas reais e aparentes dos materiais disponíveis, seleção da faixa granulométrica e escolha da composição dos agregados, dar-se início ao processo de mistura para a moldagem do corpo de prova.

4.4 Temperatura da Mistura e de Compactação

Os agregados foram aquecidos (secos) em tacho, sendo misturados até atingir a temperatura de 160°C (Figura 17). Por meio de um aparelho medidor de calor, foi possível aferir a temperatura do aquecimento do ligante de acordo com a curva de viscosidade (Saybolt-Furol), material este que saiu do estado sólido ao líquido (Figura 23). Aquecidos os agregados e ligantes, pode-se iniciar a mistura da massa asfáltica.

Figura 17: Aquecimento do agregado.

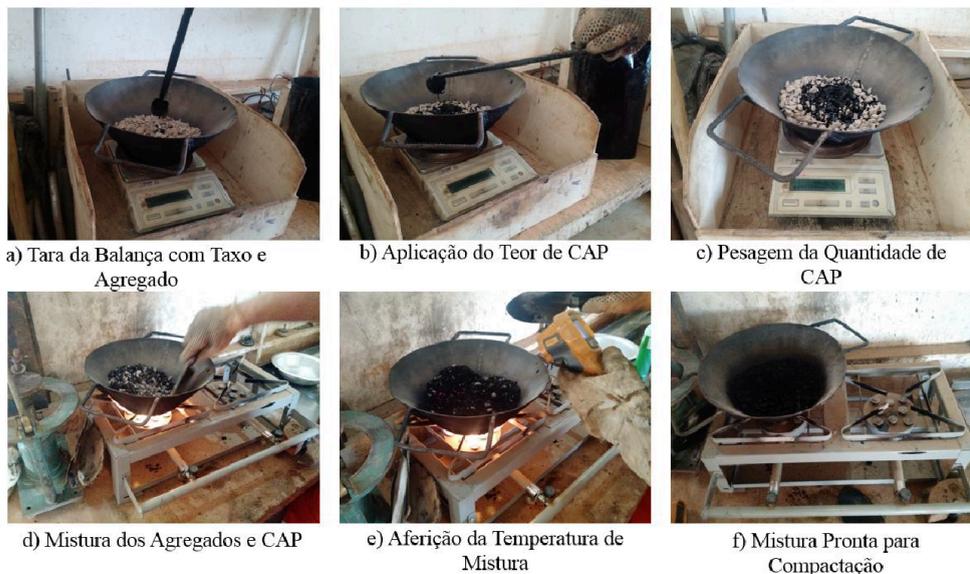


Fonte: Os autores, 2023.

4.4 Preparação da Mistura

Foram preparados dois corpos de prova para cada dosagem de mistura betuminosa, ou seja, para cada teor de asfalto fixado. Conhecida as porcentagens, em massa, em que os agregados e o ligante betuminoso foram misturados, deu-se início à formação dos corpos de prova. A mistura dos agregados e CAP foram efetuadas rapidamente, de 2 a 3 minutos, até a completa cobertura dos agregados, como preconiza a norma DNER-ME 043/95.

Figura 18: Mistura do agregado mais CAP.



Fonte: Os autores, 2023.

4.5 Compactação dos Corpos de Prova

A massa asfáltica recém elaborada foi imediatamente colocada em um molde cilíndrico de compactação dentro dos limites de temperatura fixados na norma. O molde foi posicionado no suporte de compactação, introduzindo nele uma folha de papel filtro, cortado conforme seção do molde. A mistura quente foi acomodada com 15 (quinze) golpes vigorosos de espátula no interior e ao redor do molde, com mais 10 (dez) golpes no centro da massa. O anel superior do molde foi removido com o objetivo de alisar e eliminar o excesso de mistura com a espátula ligeiramente aquecida.

Recolocado o anel superior, foram aplicados com o soquete (Figura 19) 75 (setenta e cinco) golpes em cada face do corpo de prova, com uma altura em queda livre de 45,72 cm. Após compactação, o corpo de prova é retirado do anel inferior e colado em uma superfície lisa e plana para o resfriamento.

Figura 19: Moldagem do corpo de prova.



Fonte: Os autores, 2023.

4.6 Determinação da Massa Seca e Submersa em Água

Após o resfriamento e desmoldagem dos corpos de prova (Figura 20), foram medidas as dimensões do diâmetro e altura do mesmo (Figura 21). Determinou-se para cada corpo de prova sua massa seca (M_s) (Figura 22) e sua massa submersa em água (M_{sub}). Estes valores foram necessários para calcular a massa específica aparente (G_{mb}) e massa específica teórica (DMT), possibilitando obter as relações volumétricas típicas da dosagem.

Figura 20: Desmoldagem do corpo de prova após resfriamento.



Fonte: Os autores, 2023.

Figura 21: Dimensões de diâmetro e altura do corpo de prova.



A) Diâmetro do CP

B) Altura do CP

Fonte: Os autores, 2023.

Figura 22: Determinação da Massa Seca (M_s) e Determinação da Massa Submersa (M_{sub}).



Fonte: Os autores, 2023.

4.7 Determinação da Estabilidade

Como o trabalho trata-se de mistura com concreto asfáltico, cinco amostras de corpos de prova, uma para cada teor (4,0%, 4,5%, 5,0%, 5,5%, 6,0%) de CAP foram submersos em banho-maria a 60°C. Em seguida, o corpo de prova foi enxugado e colocado no molde de compressão (Figura 30), onde é posicionado na prensa e segundo a geratriz e o medidor de fluência é colocado e ajustado na posição de ensaio.

A prensa foi operada de tal modo que seu êmbolo se elevasse a uma velocidade de 5 cm por minuto, até o rompimento do corpo de prova, o que é observado no defletômetro pela indicação de um máximo. A leitura deste máximo foi anotada e convertida em N (kgf), pelo gráfico de calibração do anel dinamômetro.

A carga em N (Kgf), que produziu o rompimento do corpo de prova (Figura 26) é

anotada como “estabilidade lida”. Este valor deverá ser corrigido para a espessura do corpo de prova ensaiado, multiplicando-se o valor lido por um fator de correção em função da espessura do corpo de prova. O resultado obtido é o valor da estabilidade Marshall.

Figura 23: Determinação da estabilidade – Carga máxima de resistência antes da ruptura do agregado.



Fonte: Os autores, 2023.

4.8 Determinação da Fluência

A fluência foi determinada simultaneamente a estabilidade. Foi medido o deslocamento vertical em milímetros apresentado pelo corpo de prova correspondente à aplicação da carga máxima que gerou a ruptura (Figura 24).

Figura 24: Leitura da fluência – Deslocamento em milímetros da deformação vertical do corpo de prova.



Fonte: Os autores, 2023.

4.9 Determinação do Teor Ótimo de Projeto de Ligante Asfáltico

O teor ótimo de ligante da mistura asfáltica foi baseado no uso de dois parâmetros volumétricos, V_v e RBV, onde, com os cinco valores médios de V_v e RBV obtidos nos grupos de corpos de prova, foi traçado um gráfico do teor de asfalto (no eixo “x”) versus V_v (no eixo “y1”) e RBV (no eixo “y2”). Adicionando-se então linhas de tendências para os valores encontrados dos dois parâmetros. A partir da interseção das linhas de tendência com os limites respectivos de cada parâmetro, foram determinados quatro teores de CAP (X_1 , X_2 , X_3 e X_4). O teor ótimo foi selecionado tomando a média dos dois teores centrais, ou seja, teor ótimo foi igual a $(X_2 + X_3) / 2$.

9.10 Determinação da Resistência à Tração por Componente Diametral

A determinação da RT foi realizada de acordo com o que recomenda a norma NR 15140/2004 que define um valor mínimo para este parâmetro, ainda associado à presença do parâmetro estabilidade (E). A configuração deste ensaio considera a aplicação de duas forças concentradas e diametralmente opostas de compressão em um cilindro que geram, ao longo do diâmetro solicitado, tensões de tração uniformes perpendiculares a esse diâmetro. A aplicação das forças é feita através de frisos metálicos (12,7 mm) de carga no corpo de prova cilindro Marshall convencional.

Figura 25: Ensaio de compressão diametral.

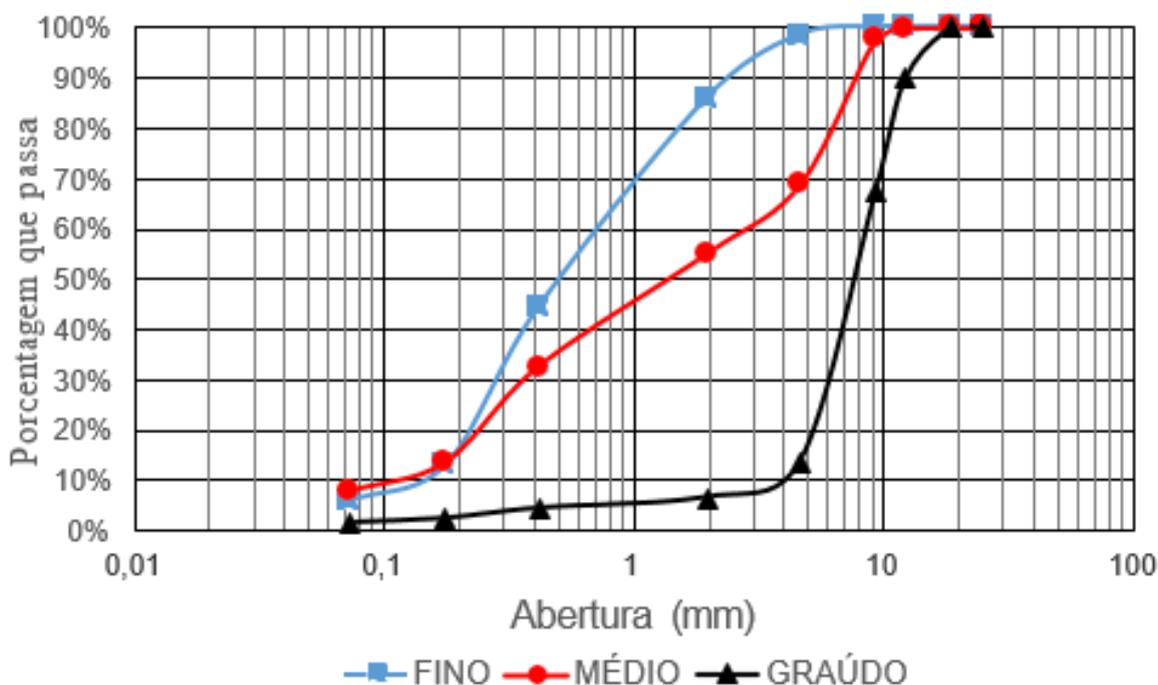


Fonte: Os autores, 2023.

4.11 Caracterização física do RCD

Os resultados da composição granulométrica do RCD estão apresentados na Tabela 5 e com base nessa foi confeccionado o gráfico 1, onde podemos visualizar a diferença entre as três graduações. Podemos observar também que o RCD GRAÚDO se apresenta mais uniforme, comparado aos outros dois.

Gráfico1: Resultados da composição granulométrica.



Fonte: Os autores, 2023.

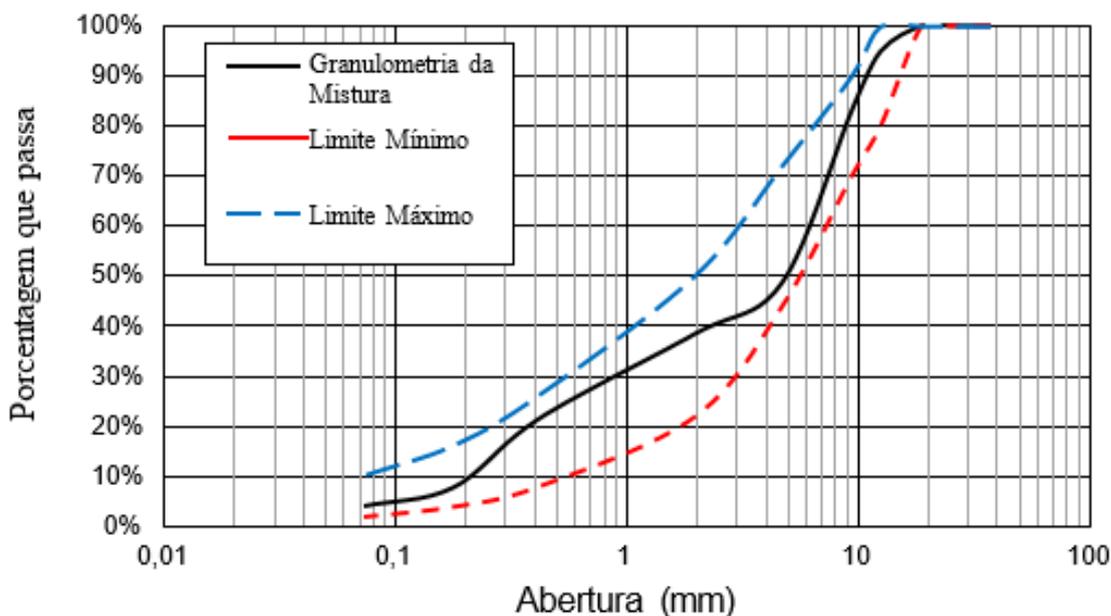
Tabela 4: Composição granulométrica do agregado RCD.

Peneira de malha quadrada		% em massa, passando		
Série ASTM	Abertura (mm)	FINO	MÉDIO	GRAÚDO
2"	50,8	100,00%	100,00%	100,00%
1 ½"	38,1	100,00%	100,00%	100,00%
1"	25,4	100,00%	100,00%	100,00%
¾"	19,1	100,00%	100,00%	100,00%
½"	12,7	100,00%	99,81%	89,91%
⅜"	9,5	100,00%	97,68%	67,28%
Nº 4	4,8	98,54%	68,78%	13,70%
Nº 10	2,0	85,93%	54,97%	6,54%
Nº 40	0,42	44,53%	32,58%	4,31%
Nº 80	0,18	12,92%	13,47%	2,31%
Nº 200	0,075	5,69%	7,72%	1,37%

Fonte: Os autores, 2023.

Com os valores da Tabela 5 confeccionamos o gráfico 2, onde podemos observamos a granulometria da mistura enquadrada dentro dos limites de aceitação da a Faixa C do DNIT para Concreto Asfáltico.

Gráfico1: Composição granulométrica do RCD.



Fonte: Os autores, 2023.

4.12 Ensaios Ligantes Asfálticos

4.12.1 Ensaio de penetração

A penetração é a profundidade, em décimos de milímetro, que uma agulha de massa padronizada (100g) penetra numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico, por 5 segundos, à temperatura de 25°C. Em cada ensaio, três medidas individuais de penetração são realizadas. A média dos três valores é anotada e aceita, se a diferença entre as três medidas não exceder um limite especificado em norma. A consistência do CAP é tanto maior quanto menor for a penetração da agulha. A norma brasileira para este ensaio é a ABNT NBR 6576/98. (BERNUCCI *et al.*, 2007).

4.12.2 Ensaio de ponto de amolecimento/Anel e Bola

O ponto de amolecimento é uma medida empírica que correlaciona a temperatura na qual o asfalto amolece quando aquecido sob certas condições particulares e atinge uma

determinada condição de escoamento. Uma bola de aço de dimensões e peso especificados é colocada no centro de uma amostra de asfalto que está confinada dentro de um anel metálico padronizado. Todo o conjunto é colocado dentro de um banho de água num béquer. O banho é aquecido a uma taxa controlada de 5°C/minuto. Quando o asfalto amolece o suficiente para não mais suportar o peso da bola, a bola e o asfalto deslocam-se em direção ao fundo do béquer. A temperatura é marcada no instante em que a mistura amolecida toca a placa do fundo do conjunto padrão de ensaio. O teste é conduzido com duas amostras do mesmo material. Se a diferença de temperatura entre as duas amostras exceder 2°C, o ensaio deve ser refeito. Devido às condições descritas, esse ensaio é também referenciado como ensaio do anel e bola (ABNT NBR 6560/2000). Esse ensaio é classificatório em especificações brasileira e europeia, e é empregado para estimativa de suscetibilidade térmica, além de também estar presente em especificações de asfaltos modificados e asfaltos soprados. (BERNUCCI *et al.*, 2007).

4.12.3 Ensaio de ponto de fulgor

O ponto de fulgor é um ensaio ligado à segurança de manuseio do asfalto durante o transporte, estocagem e usinagem. Representa a menor temperatura na qual os vapores emanados durante o aquecimento do material asfáltico se inflamam por contato com uma chama padronizada. Valores de pontos de fulgor de CAP são normalmente superiores a 230°C (ABNT NBR 11341/2004 apud BERNUCCI *et al.*, 2007).

Tabela 5: Controle Tecnológico do CAP 50 – 70.

ENSAIOS	MÉTODO	ESPECIFICAÇÃO	RESULTADOS		MÉDIA
			1º	2º	
Penetração (100g. 5 segundos, 25°C), 0,01 mm	D 5 ABNT NBR 6576	50 a 70	58	59	59
Ponto de Amolecimento	D 36 ABNT NBR 6560	46 Min.	60	62	61
Ponto de Fulgor, °C	D 92 ABNT NBR 11341	235 Min.	328	335	332
Viscosidade Saybolt-Furol a 135 °C,	ABNT NBR 15184	141 minimo	220	227	224
Viscosidade Saybolt-Furol a 150 °C,	ABNT NBR 15184	50 minimo	92	95	94
Viscosidade Saybolt-Furol a 177 °C,	ABNT NBR 15184		44	48	46

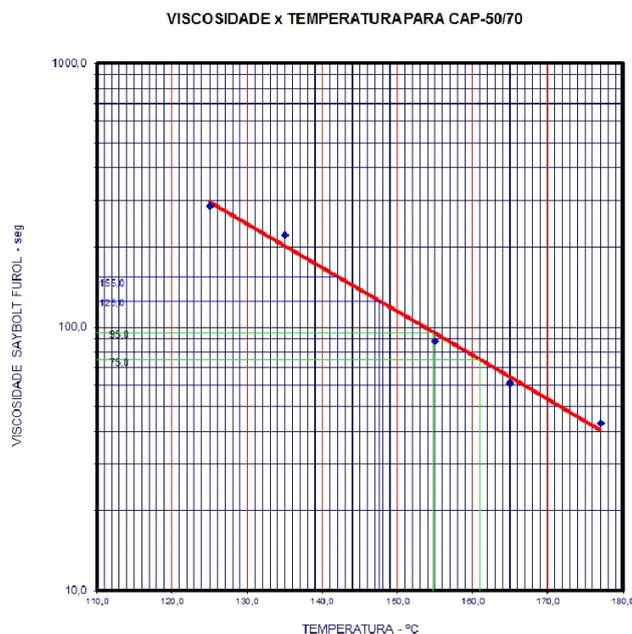
Fonte: Os autores, 2023.

Tabela 6: Resultados Complementares CAP 50-70.

NBR-11341 PONTO DE FULGOR, °C			DNER-ME 078/94 PONTO DE AMOLECIMENTO, %			NBR- 6576 PENETRAÇÃO 0,1mm			Observações					
Média: 292			Média: 49			Média: 65			ESPUMA A 177°C (AUSENTE)					
TEMPERATURA °C	TEMPO seg		TEMPERATURA °C	TEMPO seg		TEMPERATURA °C	TEMPO seg		TEMPERATURA °C	TEMPO seg		TEMPERATURA °C	TEMPO seg	
125	LEIT. 1	LEIT. 2	135	LEIT. 1	LEIT. 2	155	LEIT. 1	LEIT. 2	165	LEIT. 1	LEIT. 2	177	LEIT. 1	LEIT. 2
	282,0	290,0		220,0	227,0		79,0	97,0		58,0	64,0		43,0	43,0
	MÉDIA 286,0			MÉDIA 223,5			MÉDIA 88,0			MÉDIA 61,0			MÉDIA 43,0	

Fonte: Os autores, 2023.

Gráfico 3: Resultados Complementares CAP 50-70.



	MÁXIMA	MINIMA		MÁXIMA	MINIMA
TEMPERATURA DE COMPACTAÇÃO (°C)	147,6	142,0	TEMPERATURA DO LIGANTE (°C)	160,9	154,8

Fonte: Os autores, 2023.

A partir dos resultados das porcentagens com que cada graduação do RCD iria compor a mistura, bem como dos valores das densidades, foram definidas as porcentagens de cada grupo de amostra. A Tabela 7 mostra um resumo do experimento para Dosagem Marshall. Os valores relativos aos teores de ligante foram atribuídos com base na experiência do laboratorista.

Tabela 7: Variação experimental do teor de ligante e seus respectivos percentuais de RCD.

Componente	Porcentagem de participação na mistura			
CAP 50/70	4,50%	5,00%	5,50%	6,00%
RCD GRAUDO	47,75%	47,50%	47,25%	47,00%
RCD MÉDIO	23,87%	23,75%	23,63%	23,50%
RCD FINO	23,88%	23,75%	23,62%	23,50%

Fonte: Os autores, 2023.

Após a definição das porcentagens de cada componente na mistura, procedeu-se ao ensaio de Dosagem Marshall, propriamente dito, em que cada grupo de corpo de prova teve seus parâmetros volumétricos, físicos e mecânicos determinados.

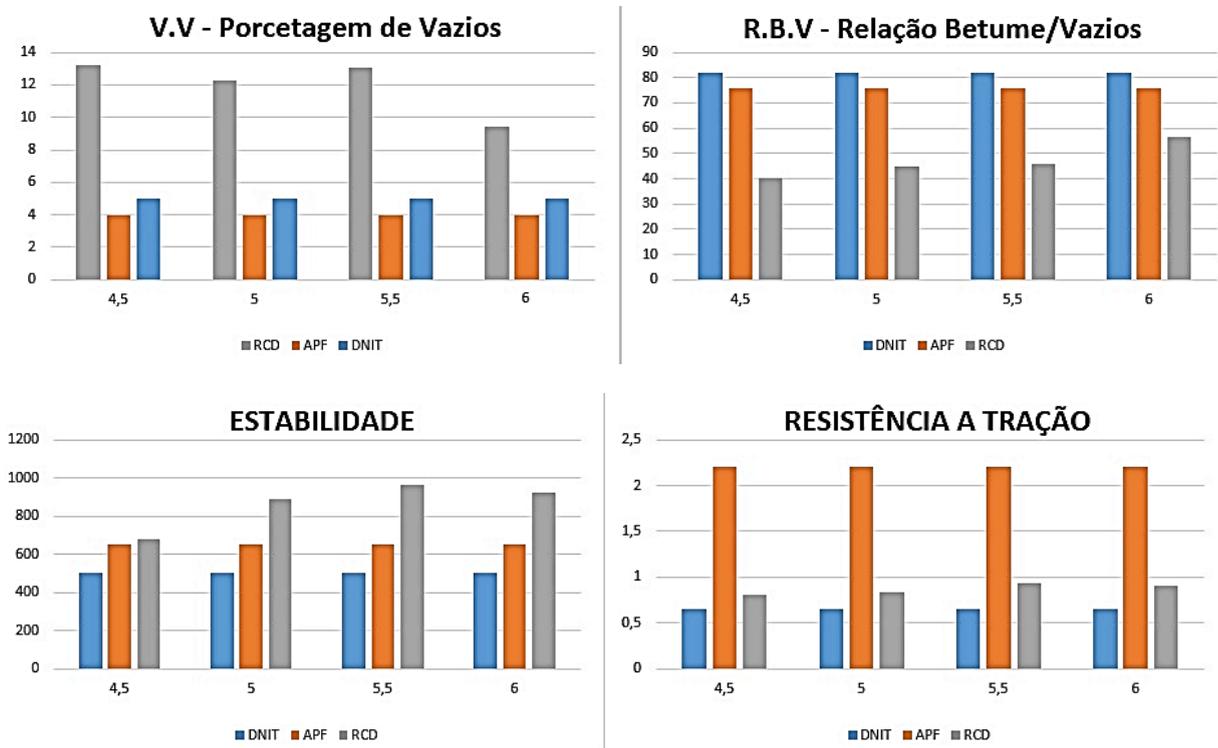
Tabela 8: Resumo dos resultados da Dosagem Marshall e resistência à tração por compressão diametral.

Porcentagem de Ligante (%)	4,500	5,000	5,500	6,000
Massa Específica aparente (g/cm ³)	2,056	2,064	2,091	2,105
Relação Betume Vazios –RBV (%)	40,43	44,88	45,94	56,73
Volume de Vazios (%)	13,20	12,30	13,10	9,40
Resistência à tração por compressão diametral a 25°C (MPa)	0,806	0,833	0,930	0,912
Estabilidade Marshall (N)	680,24	888,29	964,67	920,16

Fonte: Os autores, 2023.

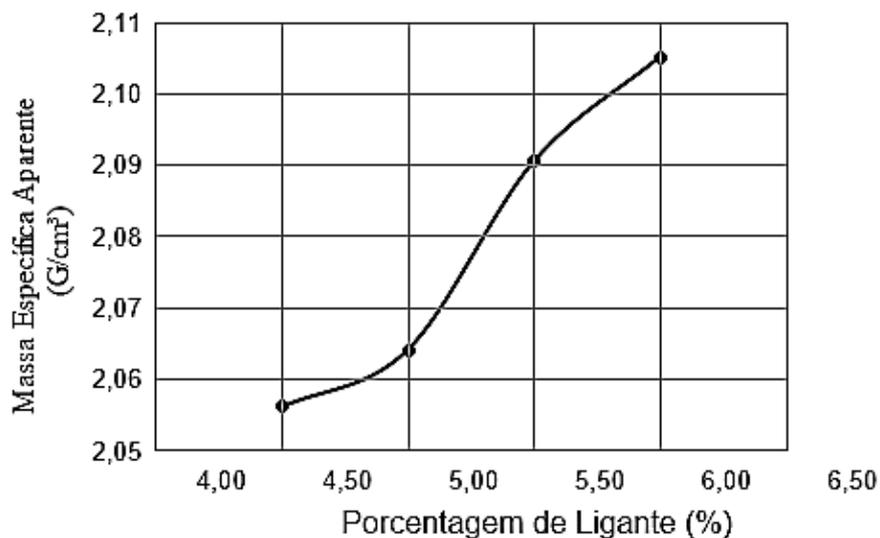
No gráfico 4 podemos observar o como se comporta a Massa Específica Aparente quando se varia a porcentagem de ligante na mistura asfáltica. Como mostra o gráfico, há um aumento no valor do parâmetro em pauta devido ao fato de estar sendo incorporado aos vazios da mistura o ligante asfáltico, material esse que apresenta massa específica maior do que a do ar, chegando ao valor máximo para um teor de ligante de seis por cento.

Figura 25: Comparativos dos Resultados de Dosagem Marshall.



Fonte: Os autores, 2023.

Gráfico 3: Comportamento da Massa Específica Aparente em função da Porcentagem de Ligante.

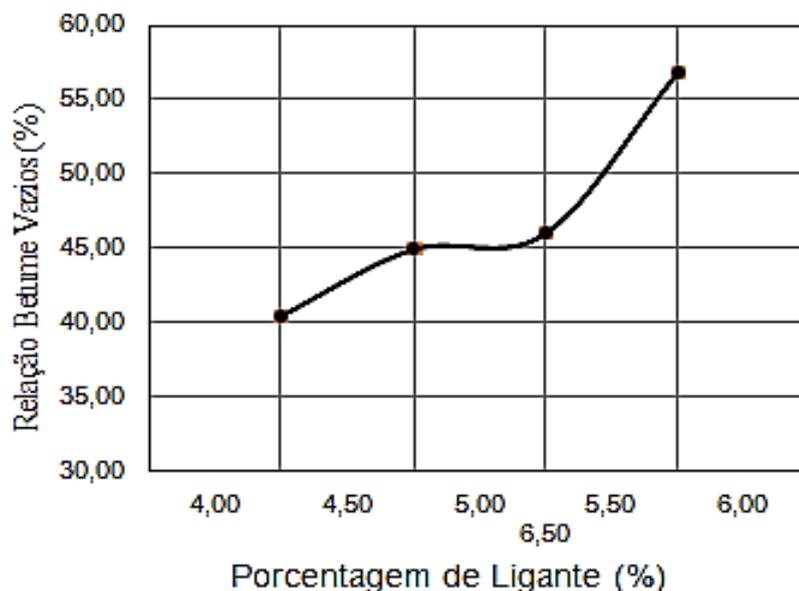


Fonte: Os autores, 2023.

O gráfico 4, mostra o comportamento do parâmetro Vv (Volume de Vazios). Podemos observar um comportamento característico para esse tipo de fenômeno físico, a saber, volume

de vazios decrescente com o aumento no teor de ligante. Para mistura asfáltica do tipo Concreto Asfáltico, enquadrado na Faixa C do DNIT, espera-se que o teor de ligante de projeto seja tal que gere um volume de vazios de no máximo 5% e no mínimo de 3% (DNIT, 2004).

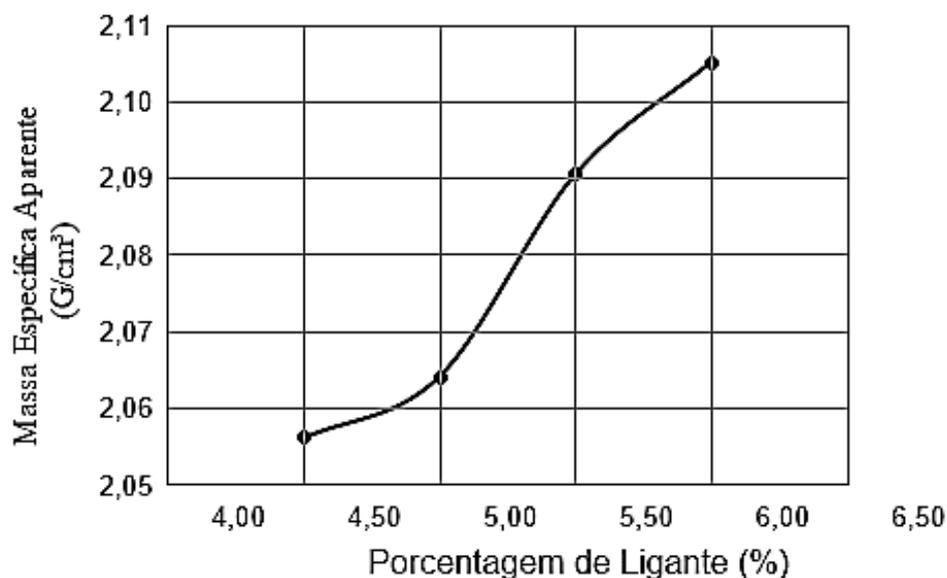
Gráfico 4: Comportamento do Volume de Vazios em função da Porcentagem de Ligante.



Fonte: Os autores, 2023.

O intervalo de variação do ligante escolhido para ensaio gerou valores de Vv muito acima do máximo. Sugerindo que os teores adotados estão aquém da faixa de ensaio ideal para misturas com esse tipo de agregado, não descartando uma base para determinação do teor de projeto.

Gráfico 5: Comportamento da Relação Betume/Vazios em função da Porcentagem de Ligante.



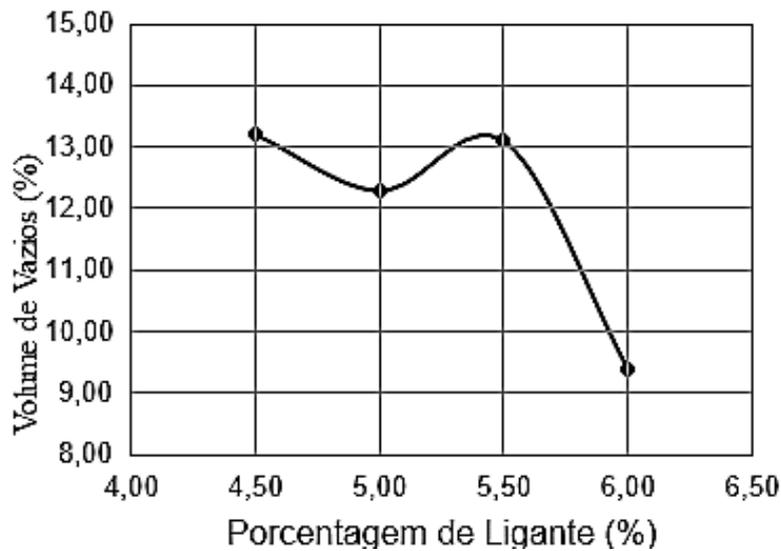
Fonte: Os autores, 2023.

No gráfico 5, podemos observar como varia o indicador Relação Betume/Vazios em função do acréscimo de ligante asfáltico. Assim como no Volume de Vazios, também observamos um comportamento característico para o fenômeno físico em pauta: RBV crescente com o aumento no teor de ligante.

Espera-se que o teor de ligante de projeto seja tal que gere valor esperado RBV de no máximo 82 % e no mínimo 72 % (DNIT, 2004). Como era de se esperar, comportamento análogo ao do parâmetro V_v é observado, uma vez que, para o intervalo de variação do ligante escolhido, os valores de RBV ficaram aquém da mínima.

A gráfico 6, apresenta avaliação da Estabilidade Marshall em função do acréscimo no teor de ligante. Observa-se um máximo próximo ao teor de 5,5 %. Almeja-se um teor de ligante de projeto tal que gere, para mistura asfáltica, uma Estabilidade mínima de 500 kgf ou 5 kN. Conforme observamos, o máximo obtido está abaixo do valor mínimo especificado para esse parâmetro, indicando 5,5 % não ser o teor de ligante de projeto para a mistura.

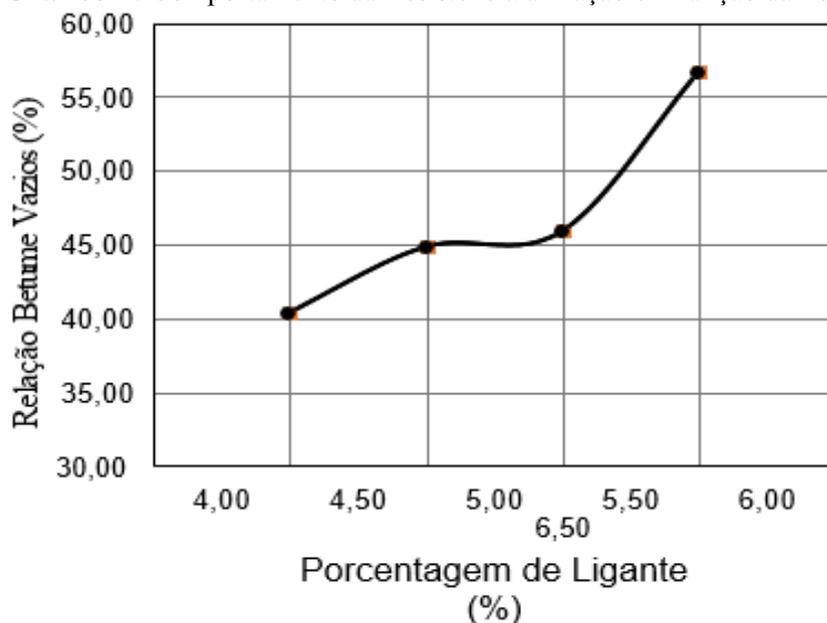
Gráfico 6: Comportamento da Estabilidade Marshall em função da Porcentagem de Ligante.



Fonte: Os autores, 2023.

Observamos no gráfico 7, o comportamento da Resistência à Tração, quando variamos o teor de ligante. Destaca-se um máximo, também, próximo ao teor de ligante igual a 5,5 %, porém, no caso desse parâmetro encontramos um valor acima do mínimo exigido em norma, igual a 0,93 MPa, uma vez que, para Concreto Asfáltico, esse valor deve ser superior a 0,65 MPa (DNIT, 2004). Podemos visualizar também que para todas as condições de ruptura, em termos de teor ligante, os valores de RT ficaram acima do mínimo exigido na norma do DNIT, amplamente empregada em obras rodoviárias no Brasil.

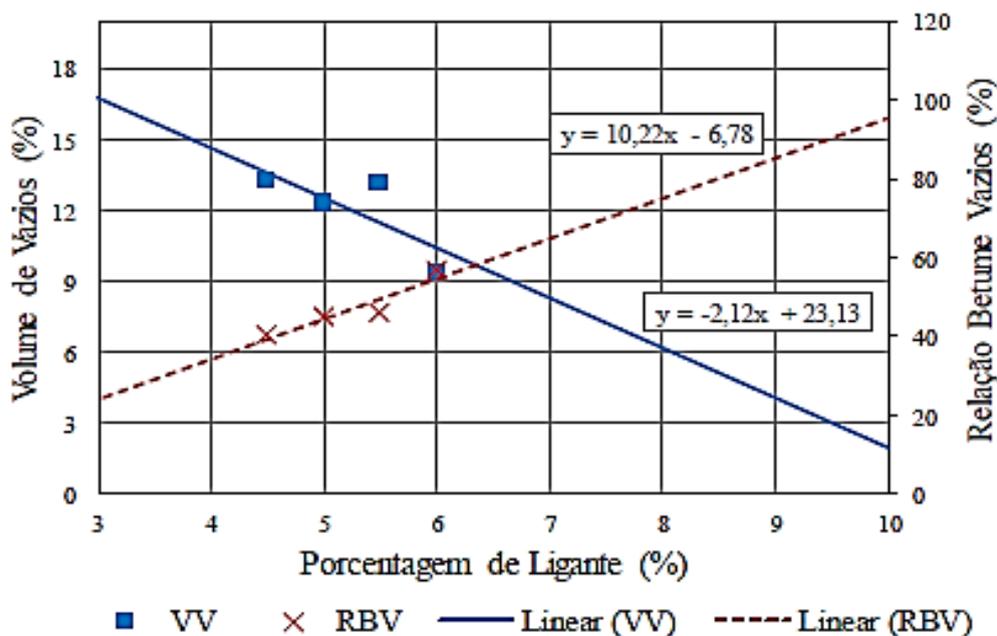
Gráfico 7: Comportamento da Resistência à Tração em função da Porcentagem de ligante.



Fonte: Os autores, 2023.

Com os valores do Volume de Vazios e Relação Betume/Vazio sem função do aumento de ligante asfáltico, pode-se encontrar o Teor de Ligante de Projeto para a dosagem apresentada, utilizando o método do terceiro distrito rodoviário (3º DRF).

Gráfico 8: Comportamento da Resistência à Tração em função da Porcentagem de Ligante.



Fonte: Os autores, 2023.

Com auxílio do software Excel e dos dados dos ensaios, para cada parâmetro, foi executada uma regressão linear a fim de se obter uma função que correlacionasse tanto Vv quanto RBV com o teor de ligante, para assim encontrar os teores de cimento asfáltico reativo aos limites de cada parâmetro volumétrico. Os teores de ligante relativos ao Volume de Vazios máximo e mínimo são, respectivamente, $TV_{v\text{máx}} = 8,55 \%$ e $TV_{v\text{min}} = 9,50 \%$. Concernente à Relação Betume Vazios, chegamos aos Valores $TRBV_{\text{máx}} = 8,69 \%$ e $TRBV_{\text{min}} = 8,00 \%$. O método do 3º DRF define o teor de projeto como sendo a média aritmética dos teores centrais, sendo assim então definido como $8,34 \%$ o teor de projeto para a mistura.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Quando iniciou-se a pesquisa, sobre resíduo de construção para mistura asfáltica, levantamos a problemática do alto consumo de recursos naturais pelo setor da construção civil. Visto que, as misturas asfálticas utilizadas como agregado a brita ou o seixo geram um agravante passivo ambiental devido a todo o processo de extração mineral. A partir dessa explanação foi definido o objetivo geral da pesquisa, no qual foi avaliar o aproveitamento parcial de resíduos de construção e demolição (entulhos) como agregado para substituir parte do agregado da massa asfáltica.

Foi verificado que o objetivo geral do estudo foi atingido. Em relação à caracterização física do RCD, analisamos que das três granulções estudadas, o RCD denominado graúdo apresenta-se mais uniforme. Os outros dois agregados apresentam-se bem graduados dentro da faixa de tamanho. Os valores das densidades reais indicam a existência de material com densidade próximo à da areia de quartzo, seixo rolado e brita granítica, confirmando assim que tais agregados são oriundos de peças executadas com concreto de cimento Portland.

Sobre a caracterização física da mistura, foi verificado que em relação à granulometria da mistura, a composição dos agregados resultou numa graduação densa, características dos concretos asfáltico, o que facilitou o enquadramento na faixa C do DNIT. O aumento da Massa Específica Aparente, com o aumento no teor de ligante deve-se ao fato de estar sendo incorporado aos vazios da mistura, o ligante asfáltico, material esse que apresenta massa específica maior do que a do ar, chegando ao valor máximo para um teor de ligante de seis por cento.

O intervalo de variação do ligante, escolhida para ensaio, gerou valores de Volume de Vazios acima do máximo estabelecido em norma, permitindo-nos concluir que os teores adotados estão aquém da faixa de ensaio ideal para misturas com esse tipo de agregado. O intervalo de variação do ligante, escolhida para o ensaio, gerou valores da Relação Betume/Vazios abaixo do mínimo estabelecido em norma, permitindo-nos concluir que os teores adotados estão aquém da faixa de ensaio ideal para misturas com esse tipo de agregado.

A caracterização mecânica da mistura, em relação à Estabilidade Marshall, podemos definir que os corpos de prova apresentaram valores abaixo do estabelecido como mínimo na norma que serviu de diretriz metodológica para execução do presente estudo, o que não desclassifica a mistura asfáltica, uma vez que os corpos de prova não foram rompidos no teor de ligante de projeto.

Concernente à Resistência à Tração, podemos concluir, com base na metodologia aplicada, que os valores são satisfatórios, pois, em todas as condições analisadas, estes

ficaram acima do mínimo exigido, o que nos permite concluir que tal parâmetro ainda pode se apresentar melhor, quando analisado nas condições ótimas, em relação ao teor de ligante.

Já o Teor de ligante de projeto (“teor ótimo”), foi obtido a partir da metodologia aplicada, a mistura RCD apresentou valor acima do convencional, se comparar aos obtidos com agregados como a brita granítica e o seixo rolado. Com isso, podemos concluir que esses agregados absorvem mais ligante, o que pode ser explicado pela porosidade destes.

Vale salientar que, o método utilizado pela pesquisa, no qual, consiste em um estudo experimental, foi o mais adequado para obtermos tais resultados acima, porém, observa-se que para melhor desenvolvimento de pesquisas futuras, sobre a temática, sugerimos incluir na caracterização física do RCD graúdo o ensaio de Abrasão Los Angeles, parâmetro importante na indicação da qualidade de um agregado, bem como o ensaio de absorção, o que nos dará suporte quantitativo à explicação do relativamente alto teor de ligante de projeto.

Outro aspecto importante para complemento da metodologia é ensaiar, segundo a Resistência à Tração, corpos de prova da mistura no teor de ligante de projeto, para assim poder tirar mais conclusões sobre a viabilidade da mistura analisada no presente estudo. Ensaia, segundo o Módulo de Resiliência, corpos de prova da mistura no teor de ligante de projeto. As condições de carregamento cíclico irão permitir quantificar a resiliência do material, característica importante para um dimensionamento adequado.

Ensaia, segundo a Vida de Fadiga, corpos de prova da mistura no teor de ligante de projeto. Com isso teríamos uma ideia da resposta ao carregamento do tráfego, determinando assim uma vida útil mais precisa, através do dimensionamento ideal.

Executar e monitorar um trecho experimental no intuito de analisar, de modo fidedigno, o comportamento da mistura asfáltica com RCD em campo, o que nos permitiria montar um banco de dados que contribuíssem para a validação desse material como agregado a ser empregado na pavimentação. Para que o projeto seja utilizável com segurança e qualidade é necessário outros ensaios e melhorias, pois o alto teor de cap pode trazer problemas futuros.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, S. L. M., LUZ, A. B. (Eds.). **Manual de agregados para a construção civil**. 2.ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2012. 432p. Disponível em: <<http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2043>>. Acesso em: 24 out. 2023.

BALBO, José Tadeu. **Pavimentação asfáltica: materiais, projeto, e restauração**. Oficina de Textos, 2015.

BERNUCCI, Liedi Légi Bariani *et al.* **Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros**. 2008. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/001735737>. Acesso em: 25 set. 2023.

Boeira, Fernando Dekeper. **Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales**. 148 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia), Universidade Federal de Santa Maria, 2010.

CERATTI, Jorge Augusto Pereira; DE REIS, Rafael Marçal Martins. **Manual de dosagem de concreto asfáltico**. Oficina de Textos, 2011.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT – IPR 719. **Manual de Pavimentação. 3ª Edição. Rio de Janeiro, 2006**. Disponível em: https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-manuais/vigentes/ipr_719_manual_de_pavimentacao_versao_corrigda_errata_1.pdf. Acesso em: 25 set. 2023.

DEUS, Thiago Vargas de *et al.* **Estudo do comportamento mecânico de mistura de agregado reciclado para uso como revestimento primário em vias de baixo volume de tráfego**. 2019. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/244761>. Acesso em: 24 out. 2023.

FEARNSIDE, Philip Martin *et al.* Modelagem de desmatamento e emissões de gases de efeito estufa na região sob influência da Rodovia Manaus-Porto Velho (BR-319). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 24, p. 208-233, 2009.

FONSECA, Maria Julia M.; MAINTINGUER, Sandra I. Aplicação da logística reversa na construção civil como mecanismo ambiental sustentável em políticas públicas. **Brazilian Journal of Development**, v. 5, n. 1, p. 140-149, 2019.

PEREIRA, Mirian Carvalho. **Revestimentos asfálticos: tipos e propriedades**. 89f. Trabalho de Conclusão de Curso, (Curso de Engenharia Civil), Centro Universitário de Formiga, 2014.

PREGO, Atahualpa Schmitz da Silva. A memória da pavimentação no Brasil. **Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Pavimentação**, 2001.

RESENDE, Marcos Ribeiro. **Investigação do uso de imagens de sensor de sensoriamento remoto hiperespectral e com alta resolução espacial no monitoramento da condição de uso de pavimentos rodoviários**. 130 p. Dissertação de mestrado (Programa de Pós-graduação em Engenharia), Universidade de São Paulo, 2010.

ROBERTS, Freddy L. *et al.* **Hot mix asphalt materials, mixture design and construction**. 1991.

SANTOS, Anthony Gomes; DE ASSIS, Rosuel Krum Mathias; JÚNIOR, José Leomar Fernandes. Efeito da aderência entre camadas na previsão de desempenho de pavimentos asfálticos. **TRANSPORTES**, v. 27, n. 2, p. 89-101, 2019.

SENÇO, Wlastermiller de. **Manual de técnicas de pavimentação**. 1997.

SOUZA, L. J. S., **Estudo das Propriedades Mecânicas de Mistura Asfáltica com Cimento Asfáltico de Petróleo modificado com Óleo de Mamona**. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Civil), Campina Grande-PB, Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, 2012. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/handle/riufcg/2826>. Acesso em: 25 set. 2023.

VIEIRA, Geilma Lima. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. 151f. Dissertação de mestrado (Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.