

**INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
GOIÁS - CÂMPUS GOIÂNIA
DEPARTAMENTO DAS ÁREAS ACADÊMICAS III
BACHARELADO EM ENGENHARIA CIVIL**

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM UM CONCRETO
ASFÁLTICO**

ISABELLA DE OLIVEIRA SOUZA

**GOIÂNIA
2022**

ISABELLA DE OLIVEIRA SOUZA

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE
RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM UM CONCRETO
ASFÁLTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Coordenação de Engenharia Civil, do Instituto
Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
– Campus Goiânia, como parte dos requisitos
necessários para obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Civil

Orientador: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira

GOIÂNIA
2022

S729i Souza, Isabella de Oliveira.

Influência da adição de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em um concreto asfáltico / Isabella de Oliveira Souza. – Goiânia : Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, 2022.
76f. ; il.

Orientação: Prof. Dr. João Carlos de Oliveira.

TCC (Trabalho de Conclusão de Curso) – Curso de Bacharelado em Engenharia Civil, Departamento de Áreas Acadêmicas III, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

1. Concreto asfáltico. 2. Construção civil. I. Oliveira, João Carlos de (orientação). II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás. III. Título.

CDD 620.136

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Lana Cristina Dias Oliveira CRB1/ 2.631
Biblioteca Professor Jorge Félix de Souza,
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Câmpus Goiânia.



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
SISTEMA INTEGRADO DE BIBLIOTECAS

**TERMO DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAÇÃO
NO REPOSITÓRIO DIGITAL DO IFG - ReDi IFG**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Digital (ReDi IFG), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IFG.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Isabella de Oliveira Souza

Matrícula: 20161011050192

Título do Trabalho: INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM UM CONCRETO ASFÁLTICO

Autorização - Marque uma das opções

1. ☒ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso aberto);
2. ☐ Autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG somente após a data ____/____/____ (Embargo);
3. ☐ Não autorizo disponibilizar meu trabalho no Repositório Digital do IFG (acesso restrito).

Ao indicar a opção **2 ou 3**, marque a justificativa:

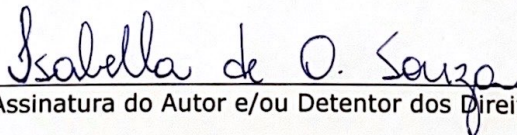
- ☐ O documento está sujeito a registro de patente.
☐ O documento pode vir a ser publicado como livro, capítulo de livro ou artigo.
☐ Outra justificativa: _____

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

- i. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- ii. obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
- iii. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás.

Goiânia, 11/ 03 /2022.



Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais



INSTITUTO FEDERAL
Goiás

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS
CÂMPUS GOIÂNIA

Isabela de Oliveira Souza

**INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM UM CONCRETO
ASFÁLTICO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia Civil, do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás, Campus Goiânia, como parte dos quesitos necessários para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Membros da banca: Dr. João Carlos de Oliveira (orientador), Me. Matilde Batista Melo ; Me. Ricardo Alves Cardoso.

Aprovado em 10 de Fevereiro de 2022.

Documento assinado eletronicamente por:

- Joao Carlos de Oliveira, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 09/03/2022 21:30:45.
- Ricardo Alves Cardoso, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/02/2022 19:21:02.
- Matilde Batista Melo, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/02/2022 19:10:33.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 10/02/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifg.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 245294

Código de Autenticação: 7c114b1c94



Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás
Rua 75, nº 46, Centro, GOIÂNIA / GO, CEP 74055-110
(62) 3227-2736 (ramal: 2736)

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho à minha mãe e à minha avó que são as mulheres que inspiram a ser quem sou.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me sustentado até aqui e pelas oportunidades concedidas.

Ao Professor Doutor João Carlos de Oliveira, pela orientação excepcional deste trabalho e por sua paciência até o tempo de sua conclusão.

Agradeço também aos técnicos dos laboratórios de solos, pavimentação e construção, em especial ao técnico Sandro Borges Vale que me assistiu em toda prática experimental.

Agradeço a aluna Beatriz dos Santos Pereira por seus auxílios com diversos ensaios laboratoriais.

Aos professores do Instituto Federal de Goiás – Campus Goiânia, aos quais devo todo conhecimento transmitido.

Agradeço grandemente às empresas Disbral, RNV Resíduos e também a Prefeitura de Goiânia pela contribuição com matéria prima, sem estas concessões esse trabalho não seria possível.

Aos amigos que fiz no decorrer destes anos de curso, em especial a minha grande amiga Wanessa Elisiario dos Santos pelo apoio, incentivo e principalmente, pelo convívio ao longo desta jornada.

À minha mãe que sempre esteve ao meu lado me apoiando, e aos meus familiares.

Agradeço a todos que contribuíram direta ou indiretamente na minha formação. Obrigada.

“A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo”. (Albert Einstein)

RESUMO

INFLUÊNCIA DA ADIÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL EM UM CONCRETO ASFÁLTICO

O presente trabalho apresenta um estudo sobre a influência da adição de agregados reciclados - AR de resíduos sólidos da construção civil - RSCC, também denominados de resíduos de construção e demolição – RCD em um concreto asfáltico. O concreto asfáltico é o tipo de revestimento asfáltico mais utilizado nos pavimentos brasileiros e, conseqüentemente, o estudo da composição desse concreto é de grande relevância diante do peso do prejuízo social, ambiental e financeiro, decorridos da má gestão dos processos que envolvem sua produção: obtenção da matéria prima e execução das dosagens de mistura asfáltica. A extração de grandes volumes de agregados naturais resulta em impactos ambientais consideráveis e no crescente aumento nos custos do produto em decorrência do esgotamento das jazidas. Em contrapartida, pesquisas realizadas, tendo os RSCC como objeto, apontam para resultados aceitáveis quanto a investigação desses resíduos como materiais alternativos na composição de camadas de pavimento asfáltico. Dessa forma, a fim de colaborar com uma destinação ambientalmente adequada dos RSCC e melhorar o fator custo na produção de concretos asfálticos, foram analisados os efeitos da substituição parcial de agregados naturais, habitualmente empregados na produção de concretos asfálticos, por agregados reciclados. Para verificação da influência da substituição sugerida, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados naturais e reciclados, além de estudos de dosagens de concreto asfáltico utilizando agregados naturais e, com a adição de dois teores de agregados reciclados, com base no método Marshall. Os resultados apontaram para a necessidade de mais estudos para melhor avaliar as propriedades do concreto asfáltico com adição de agregado reciclado.

Palavras-chave: Concretos Asfálticos. Resíduos Sólidos da Construção Civil. Agregados Reciclados. Concretos Asfálticos com RCD.

ABSTRACT

INFLUENCE OF THE ADDITION OF AGGREGATES RECYCLED FROM SOLID WASTE FROM THE CIVIL CONSTRUCTION IN AN ASPHATIC CONCRET

This final paper presents a study on the influence of the addition of recycled aggregates - AR of solid construction waste - RSCC, also called construction and demolition waste - RCD in an asphalt concrete. Asphalt concrete is the most widely used type of asphalt coating in Brazilian pavements and, consequently, the study of the composition of this concrete is of great relevance given the weight of social, environmental and financial damage, resulting from the poor management of the processes that involve its production: obtaining the raw material and execution of asphalt mixture dosages. The extraction of large volumes of natural aggregates results in considerable environmental impacts and an increasing increase in product costs due to the depletion of deposits. On the other hand, research carried out, with the RSCC as its object, points to acceptable results regarding the investigation of these residues as alternative materials in the composition of asphalt pavement layers. Thus, in order to collaborate with an environmentally appropriate destination of RSCC and improve the cost factor in the production of asphalt concrete, the effects of partial replacement of natural aggregates, usually used in the production of asphalt concrete, by recycled aggregates were analyzed. To verify the influence of the suggested substitution, characterization tests of natural and recycled aggregates were performed, as well as studies of asphalt concrete dosages using natural aggregates and, with the addition of two levels of recycled aggregates, based on the Marshall method. The results pointed to the need for more studies to better evaluate the properties of asphalt concrete with the addition of recycled aggregate.

Keywords: Asphalt concretes. Solid waste from construction. Recycled aggregates. Asphalt concretes with RCD.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURAS

Figura 1- Classificação dos resíduos sólidos conforme NBR 10.004	12
Figura 2- Origem dos RCD em alguns municípios brasileiros.	14
Figura 3 - Sucessão das ações no manejo de resíduos sólidos.....	15
Figura 4 - Esferas organizacionais no planejamento de gerenciamento de RSCC. ...	16
Figura 5 - Sequência de operações de um processo de beneficiamento de RCD. ...	19
Figura 6 - Principais causas de dificuldade de venda do agregado reciclado.	20
Figura 7 - Corte transversal da estrutura-tipo de pavimento flexível.	22
Figura 8 - Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica.	25
Figura 9 - Exemplo de corpos-de-prova submersos em banho-maria e molde de compressão.....	28
Figura 10 - Exemplos de compactadores Marshall.	29
Figura 11 – Curva resultante do ensaio Marshall.	29
Figura 12 – Graduação do agregado conforme curva granulométrica.	31
Figura 13 - Curvas granulométricas características.	33
Figura 14 - Estoque de finos em pedreira por processo a seco.	35
Figura 15 - Exemplo de equipamento manual de medida da penetração.	38
Figura 16 - Exemplo de equipamento Saybolt-Furol de ensaio de viscosidade e esquema do interior do equipamento.	39
Figura 17 – Curvas granulométricas dos agregados naturais.	44
Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados.....	46
Figura 19 – Curva de viscosidade do CAP 50/70.....	47
Figura 20 – ensaio de adesividade de CAP 50/70 com agregado natural britado.....	48
Figura 21 – ensaio de adesividade de CAP 50/70 com agregado reciclado.	49
Figura 22 – curva granulométrica das misturas asfálticas com 100% de agregado natural.	50
Figura 23 – Prensa utilizada para execução da compactação dos CP's do ensaio Marshall.....	51
Figura 24 – corpos de prova moldados com 100% de agregado natural britado.	52

Figura 25 – Amostras preparadas para a execução do “ <i>rice test</i> ”.....	54
Figura 26 – Execução do ensaio “ <i>rice test</i> ”.	54
Figura 27 – Gráfico Teor de CAP x Estabilidade Marshall – agregado natural britado.	55
Figura 28 – Gráfico Teor de CAP x Densidade Aparente - agregado natural britado.	56
Figura 29 – Gráfico Teor de CAP x Volume de vazios - agregado natural britado.	56
Figura 30 – curva granulométrica das misturas asfálticas com 20% de agregado reciclado.....	58
Figura 31 – visualização dos CP’s moldados com 20% de agregado reciclado.....	58
Figura 32 – prensa mecânica utilizada no rompimento dos CP’s.....	59
Figura 33 – Gráfico Teor de CAP x Estabilidade Marshall de misturas com 20% de agregado reciclado.	60
Figura 34 – Gráfico Teor de CAP x Densidade Aparente de misturas com 20% de agregado reciclado.....	61
Figura 35 – Gráfico Teor de CAP x Volume de vazios de misturas com 20% de agregado reciclado.....	63
Figura 36 – curva granulométrica das misturas asfálticas com 30% de agregado reciclado.....	64
Figura 37 – CP’s da mistura asfáltica com 30% de agregado reciclado submersos.	65
Figura 38 – Gráfico Teor de CAP x Estabilidade Marshall de misturas com 30% de agregado reciclado.....	67
Figura 39 – Gráfico Teor de CAP x Densidade Aparente de misturas com 30% de agregado reciclado.....	67
Figura 40 – Gráfico Teor de CAP x Volume de vazios de misturas com 30% de agregado reciclado.....	68

TABELAS

Tabela 1 - Requisitos da composição de concreto asfáltico conforme DNIT.	24
Tabela 2 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).	34

Tabela 3 - Critérios para indicação de resultados.	37
Tabela 4 – Distribuição granulométrica dos agregados naturais.....	43
Tabela 5 - Caracterização dos agregados naturais.....	44
Tabela 6 – Distribuição granulométrica dos agregados reciclados.	45
Tabela 7 – Caracterização dos agregados reciclados.....	46
Tabela 8 - composição granulométrica das misturas asfálticas.	50
Tabela 9 – parâmetros volumétricos das misturas asfálticas com agregados totalmente naturais.	51
Tabela 10 – parâmetros volumétricos: estabilidade e fluência das misturas com agregado natural.	52
Tabela 11 - composição granulométrica das misturas asfálticas com 20% de agregado reciclado.....	57
Tabela 12 – parâmetros volumétricos das misturas asfálticas com 20% de agregado reciclado.....	59
Tabela 13 – parâmetros volumétricos: estabilidade e fluência misturas com 20% de agregado reciclado.....	60
Tabela 14 - composição granulométrica das misturas asfálticas com 30% de agregado reciclado.....	64
Tabela 15 – parâmetros volumétricos das misturas asfálticas com 30% de agregado reciclado.....	65
Tabela 16 – parâmetros volumétricos: estabilidade e fluência misturas com 30% de agregado reciclado.....	66

QUADROS

Quadro 1 - Classificação dos resíduos sólidos da construção civil de acordo com o CONAMA.....	11
Quadro 2 – Equipamentos de britagem utilizados na reciclagem de RCD.....	32

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ABRECON	Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C.A.	Concreto Asfáltico
C.A.P.	Cimento Asfáltico de Petróleo
C.A.U.Q.	Concreto Asfáltico Usinado a Quente
C.B.U.Q.	Concreto Betuminoso Usinado a Quente
C.P.	Corpo de prova
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
D.M.T.	Densidade Máxima Teórica
DNER	Departamento Nacional de Estradas de Rodagem
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
E.S.	Especificação de Serviço
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
R.B.V.	Relação betume vazios
RCD	Resíduos De Construção E Demolição
RSCC	Resíduos Sólidos Da Construção Civil
SHRP	<i>Strategic Highway Reaserch Program</i>
V.A.M.	Vazios do Agregado Mineral
V.C.B.	Vazios com betume
V.V.	Volume de vazios

SÍMBOLOS

kgf	quilograma-força
N	Newton
sSF	segundos Saybolt Furol
mm	milímetro

cm	centímetro
t	tempo
ρ	massa específica
g	gramas
cm ³	centímetro cúbico
pol	polegada
μm	micrômetro
m ²	metro quadrado
Pa	Pascal
s	segundos
d_a	densidade aparente
η	viscosidade
°C	graus Celsius
T	Tensão de cisalhamento

ABREVIATURAS

art.	artigo
n. °	número
p.	página

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	6
2.	OBJETIVOS	8
2.1.	OBJETIVOS GERAIS	8
2.2.	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	8
3.	ESTRUTURA DO TRABALHO	9
4.	REFERENCIAL TEÓRICO	10
4.1.	OS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	10
4.2.	CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS	11
4.2.1.	Classificação segundo o CONAMA	11
4.2.2.	Classificação segundo a ABNT NBR 10.004	12
4.3.	RECICLAGEM DE RSCC NO BRASIL	13
4.3.1.	Usinas de reciclagem de RSCC	17
4.3.2.	Aplicação de agregados reciclados em pavimentação	21
4.4.	CONCRETO ASFÁLTICO	21
4.4.1.	Especificações e Métodos de dosagem	21
4.4.2.	Materiais constituintes dos concretos asfálticos	30
4.4.2.1.	<i>Agregados</i>	30
4.4.2.1.1.	Classificação dos agregados quanto à dimensão das partículas	32
4.4.2.1.2.	Classificação dos agregados quanto à origem	34
4.4.2.2.	<i>Material de enchimento (fíler)</i>	35
4.4.2.3.	<i>Ligante Asfáltico</i>	36
5.	MATERIAIS E MÉTODOS	40
6.	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	43
6.1.	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS BRITADOS	43
6.2.	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS	45
6.3.	LIGANTE ASFÁLTICO	47
6.4.	DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS	49
6.4.1.	Misturas compostas totalmente por agregado natural britado	49

6.4.2. Misturas asfálticas compostas com 80% de agregados naturais britados e 20% de agregados reciclados	57
6.4.3. Misturas compostas com 70 % de agregado natural britado e 30% de agregado reciclado	63
7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	69
7.1. CONCLUSÕES	69
7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS	71
REFERÊNCIAS	72

1. INTRODUÇÃO

No Brasil, cerca de 95% das estradas pavimentadas são executadas em concreto asfáltico (BERNUCCI et. al., 2008). Definido como um produto heterogêneo resultante da mistura de cimento asfáltico de petróleo – CAP, materiais geralmente inertes, chamados agregados, e material de enchimento (fíler) o concreto asfáltico é bastante utilizado devido às propriedades conferidas por sua composição, tais como a durabilidade, flexibilidade, impermeabilidade, além da boa resistência aos esforços de tração, compressão, fadiga e de proporcionar boas condições de rolamento. Partindo da citada composição, e por consequência da ampla utilização em pavimentação, nota-se que no Brasil cada vez mais surgem estudos de materiais alternativos para compor esse tipo de concreto como objeto de pesquisas. Isso decorre de vários aspectos, como por exemplo encontrar uma destinação racional para esses materiais e as restrições ambientais que cerceiam as explorações de jazidas, de onde são retirados os materiais naturais que se tornam agregados na produção de concreto asfáltico; além das questões econômicas que muitas vezes ficam prejudicadas devido às grandes distâncias no transporte desses materiais do local de exploração, ao destino.

Paralelamente a isso, a construção civil, apresentada como um setor de extrema relevância para o país, seja pela influência na movimentação da economia, ou pela concessão de melhores condições de vida na execução de obras como as de infraestrutura e moradia, mostra a sua outra face e desponta como uma das grandes geradoras de resíduos sólidos no Brasil. Esses resíduos que habitualmente são provenientes de excessos e/ou sobras de construção, de reparos em obras atingidas por patologias, ou ainda oriundos de demolição na execução de reformas ou reconstrução representam, segundo Marques Neto (2005), cerca de 51% a 70% dos resíduos sólidos urbanos coletados, isto é, mais da metade do lixo coletado no meio urbano é proveniente de material descartado de construção e/ou demolição.

A situação se alarma pelo fato de que grande parte desses resíduos sólidos da construção são dispostos de forma irregular na natureza, ou até mesmo no meio urbano, o que inevitavelmente incorre na contribuição com a poluição, o aumento na

proliferação de agentes patológicos, atentando ainda contra eficiência dos sistemas de drenagem urbana.

Atualmente, existem estudos e normas que aprovam o uso dos RSCC em obras de engenharia. A Norma Brasileira Regulamentadora (NBR) 15115:2004 da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), trata diretamente da regulação e determinação dos critérios para execução de camadas de reforço do subleito, sub-base e base de pavimentos, bem como camada de revestimento primário, com agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil, em obras de pavimentação.

“A utilização em base e sub-base ou revestimento primário para pavimentação é a forma mais simples de aproveitamento do entulho como agregado, por exigir processos de reciclagem menos sofisticados. O entulho processado pode também ser utilizado como agregado para concreto não estrutural, a partir da substituição dos agregados convencionais (areia e brita). A aplicação do agregado reciclado na produção de concreto apresenta algumas vantagens semelhantes às da pavimentação, além de apresentar a possibilidade de melhorias no desempenho do concreto em relação aos agregados convencionais, quando se utiliza baixo consumo de cimento (CARNEIRO; BRUM; SILVA, 2001).”

O grande desafio na tentativa de atender essas premissas sustentáveis e econômicas é a manutenção das propriedades mecânicas que tornam esse tipo de concreto tão utilizável em detrimento da grande variabilidade das características técnicas dos RSCC de região para região.

2. OBJETIVOS

Nesse tópico serão apresentados os objetivos gerais e específicos definidos e referenciados nesse trabalho.

2.1. OBJETIVOS GERAIS

O objetivo geral do presente trabalho é avaliar a influência da adição de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil nas características e propriedades de um concreto asfáltico.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 2.2.1. Amostrar e caracterizar agregados naturais e reciclados de resíduos sólidos da construção civil produzidos na região metropolitana de Goiânia, determinar suas características e propriedades para uso em pavimentação, em especial para a produção de concretos asfálticos;
- 2.2.2. Amostrar e caracterizar um cimento asfáltico de petróleo - CAP comercializado e utilizado na região metropolitana de Goiânia para a produção de concretos asfálticos;
- 2.2.3. Realizar três dosagens de concreto asfáltico: uma somente com os agregados naturais e outras duas com adição de 20 e 30 % de agregados reciclados de RSCC em sua composição, utilizando o método Marshall;
- 2.2.4. Determinar e avaliar a variação das propriedades das misturas asfálticas em função da adição dos agregados reciclados, estabelecendo comparativos com outras pesquisas.

3. ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está estruturado em sete capítulos, conforme descrito a seguir.

O capítulo 1, Introdução, apresenta a delineação do tema.

O capítulo 2, apresenta os objetivos desse trabalho.

Capítulo 3, estrutura do trabalho.

O capítulo 4, Referencial Teórico, apresenta um estudo sobre os resíduos sólidos da construção civil, sobre os concretos asfálticos – materiais constituintes e métodos de dosagem e sobre experiências com o uso de RSCC em pavimentação.

No capítulo 5, Materiais e Métodos, são apresentados os materiais utilizados, os locais e formas de obtenção dos mesmos, os ensaios do programa experimental e toda a metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

No capítulo 6, Apresentação e Análise dos Resultados, são apresentados os resultados e feita uma análise dos dados obtidos com foco nas características e propriedades verificadas nas misturas de concreto asfáltico estudadas, produzidas com o uso de agregados naturais e com a adição de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil.

No capítulo 7, Conclusões e Sugestões para Pesquisas Futuras, são apresentadas as principais conclusões obtidas com a realização do trabalho. Também estão apresentadas sugestões para pesquisas futuras relacionadas com o tema.

4. REFERENCIAL TEÓRICO

Neste capítulo é apresentada uma abordagem geral sobre os resíduos sólidos da construção civil, como por exemplo, sua origem, classificação, legislações e normas técnicas existentes e as formas de reutilização. Também é apresentado um relato sobre algumas experiências de reutilização dos resíduos em pavimentação e um estudo sobre os concretos asfálticos - os materiais que os compõem e método de dosagem.

4.1. OS RESÍDUOS SÓLIDOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Atualmente é possível atribuir vários conceitos aos resíduos sólidos da construção civil. O mais completo e difundido atualmente encontra-se na Resolução n.º 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002), Art. 2º, inciso I, no qual determina que os resíduos sólidos da construção civil:

“(...) são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concretos em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassas, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha”.

Esses rejeitos se originam de forma natural a partir de sobras que ocasionalmente ocorrem nas construções, no entanto também podem ser frutos de vícios de execução, erros de estocagem e transporte, ou até mesmo da ocorrência do material ter se tornado inutilizável para o fim pelo qual foi adquirido.

Desse modo, os RSCC passíveis de processo de beneficiamento (Quadro 1), se assim tratados, tornam-se materiais granulares que apresentam características técnicas para a aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia, e passam a ser denominados agregados reciclados.

4.2. CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

4.2.1. Classificação segundo o CONAMA

Segundo a resolução n.º 307 do CONAMA (2002), os resíduos sólidos da construção civil são classificados de acordo com sua composição nas seguintes classes: A, B, C e D (Quadro 1).

Quadro 1 - Classificação dos resíduos sólidos da construção civil de acordo com o CONAMA.

	CARACTERÍSTICA DO MATERIAL	EMPREENDEDIMENTO (S) QUALIFICADO (S) A RECEBER
CLASSE A	são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fios etc.) produzidas nos canteiros de obras.	Usina de Reciclagem de RCD ABNT 15114/2004 Aterro de Inertes ABNT 15113/2004 Área de Transbordo e Triagem - ATT ABNT 15112/2004
CLASSE B	são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como plásticos, papel, papelão, metais, vidros, madeiras, EMBALAGENS VAZIAS DE TINTAS IMOBILIÁRIAS e gesso; (Redação Resolução n.º 469/15).	Usina de Reciclagem de RCD ABNT 15114/2004 Aterro Sanitário ABNT 15849/2010 Área de Transbordo e Triagem - ATT ABNT 15112/2004
CLASSE C	são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitem a sua reciclagem ou recuperação; (Redação dada pela Resolução n.º 431/11).	Aterro Sanitário ABNT 15849/2010 Área de Resíduos Não Perigosos ABNT 13896/1997
CLASSE D	são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (Redação dada pela Resolução n.º 431/11).	Área de Resíduos Perigosos ABNT 10157/1987
Observação: § 1º No âmbito dessa resolução consideram-se embalagens vazias de tintas imobiliárias, aquelas cujo recipiente apresenta apenas fime seco de tinta em seu revestimento interno, sem acúmulo de resíduo de tinta líquida.		

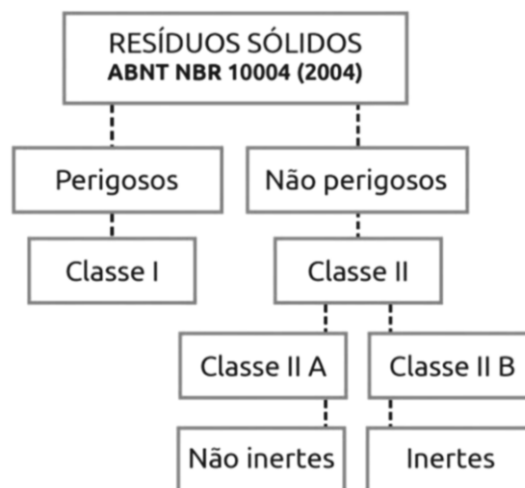
Fonte: ABRECON (2017).

Das quatro classes especificadas na resolução do CONAMA, apenas os resíduos enquadrados na classe A, exceto solos, podem ser submetidos a reciclagem para posterior utilização em pavimentos asfálticos.

4.2.2. Classificação segundo a ABNT NBR 10.004

A ABNT NBR 10004 (ABNT, 2004) adota outro tipo de análise para classificar os resíduos sólidos. A norma utiliza-se dos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública para propor uma classificação e um gerenciamento mais adequado. A classificação dos resíduos sólidos, segundo a NBR 10.004 (ABNT, 2004), é um processo que vai para além da pura identificação dos componentes do resíduo sólido disposto, envolve também a identificação do processo ou atividade que o originou, seus constituintes e características, para em seguida realizar uma comparação destes constituintes com listagens de resíduos e substâncias cujo impacto à saúde e ao meio ambiente é conhecido (Figura 1).

Figura 1- Classificação dos resíduos sólidos conforme NBR 10.004



Fonte: Adaptado de NBR 10.004.

Os resíduos classe I apresentam periculosidade e em função de suas propriedades físicas, químicas ou infectocontagiosas detém potencial de expor ao risco à saúde pública, promovendo doenças e provocando mortalidade, além de

agredirem ao meio ambiente se gerenciados de maneira incorreta. Os resíduos desta classe de uma maneira geral apresentam características como inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Os resíduos classe II são subdivididos em duas classes, a classe II-A composta dos resíduos não inertes que são aqueles resíduos que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I (perigosos) e nem na categoria de resíduos classe II B (inertes) e podem ter propriedades, tais como biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água. E a classe II-B composta dos resíduos inertes que de acordo com a NBR 10.004 (ABNT, 2004) são:

“Quaisquer resíduos que, quando amostrados de uma forma representativa, segundo a ABNT NBR 10007, e submetidos a um contato dinâmico e estático com água destilada ou deionizada, à temperatura ambiente, conforme ABNT NBR 10006, não tiverem nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, excetuando-se aspecto, cor, turbidez, dureza e sabor”.

Os resíduos sólidos da construção passíveis de serem utilizados como agregados reciclados na composição de concretos asfálticos na classificação da NBR 10004 são os desta última classe, ou seja, classe II B.

4.3. RECICLAGEM DE RSCC NO BRASIL

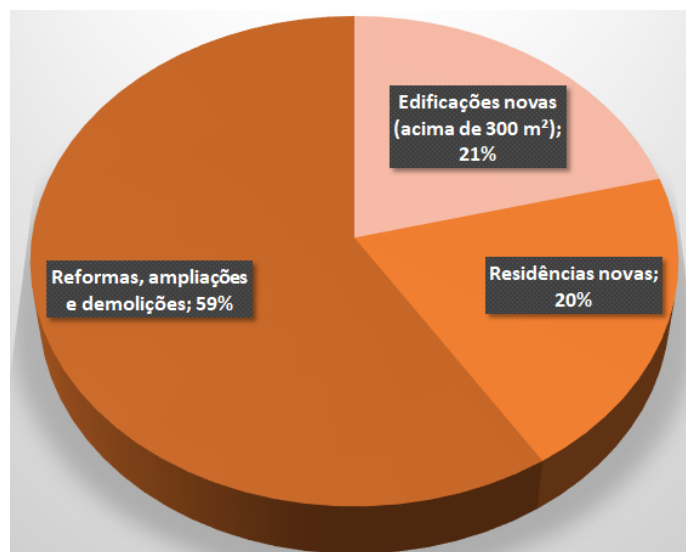
A expansão das cidades abriu margem para uma preocupação recorrente já na década de 1980, segundo Pinto (1999), nessa época já se iniciavam estudos sobre caracterização e quantificação de RSCC devido à alta taxa de descarte desse material com relação aos demais resíduos sólidos coletados no Brasil. Na década de 1990 foram iniciados ensaios envolvendo a reciclagem desses materiais e a resposta positiva aos estudos culminou na regulação do uso de agregado reciclado da construção civil em obras de engenharia e na existência de usinas de reciclagem espalhadas em vários municípios brasileiros.

Segundo dados da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON), associação que conta com mais de 300 empresas de reciclagem de RSCC espalhadas no Brasil, de cerca de 290,5 toneladas de entulho produzidos diariamente no território nacional só 21% são reciclados, ou seja, quase 230 toneladas diárias de entulho não são reaproveitadas, mais da metade,

das 5,5 mil cidades brasileiras, ainda destina esses materiais a lixões ou locais impróprios todos os dias de acordo com a associação (ABRECON, 2015).

Os resíduos sólidos da construção considerados aptos a serem reciclados, resíduos da classe A, objetos deste trabalho, deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados, ou encaminhados para áreas de aterro de resíduos da construção civil, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura. Apesar do apontamento, por diversos estudos, dos resultados positivos do uso de agregados provenientes dos RSCC (classe A) em obras, é fato que falta evolução, conhecimento e um olhar mais interessado, tanto dos descartadores desses resíduos quanto das prefeituras, para a causa. Segundo a resolução 307/2002 do CONAMA, a responsabilidade pela destinação correta do resíduo sólido é do gerador e, de acordo com o estudo da Revista *TECHNE* (2001, p.11 apud OLIVEIRA et al, 2011, p.1) “as construtoras são responsáveis pela geração de aproximadamente 20 a 25% do entulho produzido, sendo que o restante provém de reformas e de obras de autoconstrução”, geralmente, essas últimas, são obras não licenciadas pelo poder público conforme exposto por Coelho et al. (2011, p.4), isso significa que os pequenos geradores representam um problema maior, não só pelo percentual de cerca de 75% na contribuição sobre a geração de resíduos mas também pela dificuldade de mapeá-los e reverter a cultura existente do despejo desses materiais em locais impróprios (Figura 2).

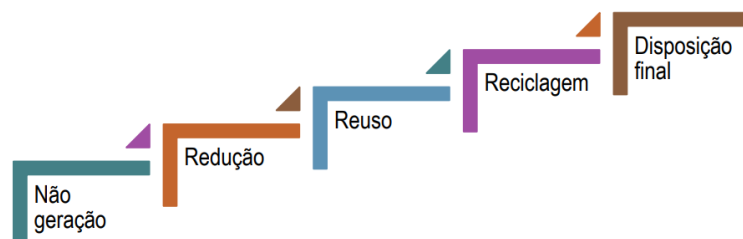
Figura 2- Origem dos RCD em alguns municípios brasileiros.



Fonte: Adaptada de I&T Informações e Técnicas apud Pinto e Gonzáles (2005).

A priori os geradores devem ter como objetivo prioritário a não geração de resíduos; contudo diante da impossibilidade de assim ser, a intenção é que todo o resíduo gerado seja submetido a redução, reutilização, reciclagem e por fim tenham uma destinação final correta, conforme prevê a resolução n. ° 307 do CONAMA (Figura 3).

Figura 3 - Sucessão das ações no manejo de resíduos sólidos.



Fonte: ABRECON (2015).

É dever dos Municípios e do Distrito Federal elaborar o Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil, em consonância com o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos. No Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil deve constar:

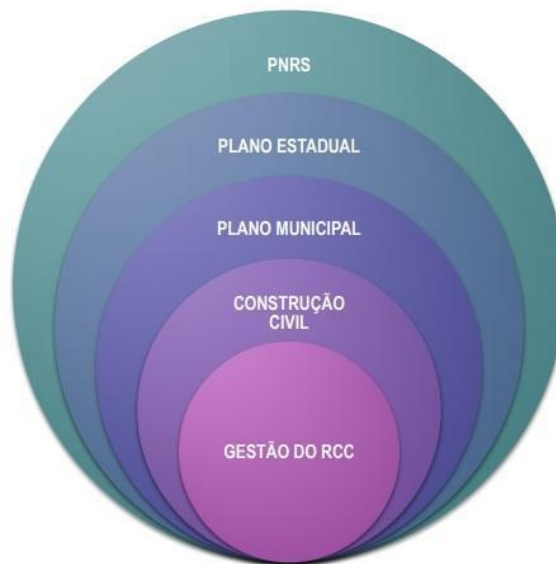
“As diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, em conformidade com os critérios técnicos do sistema de limpeza urbana local e para os Planos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil a serem elaborados pelos grandes geradores, possibilitando o exercício das responsabilidades de todos os geradores.” (CONAMA, 2002)

Os geradores que submeterem à aprovação ou ao licenciamento dos órgãos competentes, excluídos os pequenos geradores que dispõem de outros procedimentos, ficam obrigados a incluir os Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil nos projetos de obras.

De modo geral, no que diz respeito a legislação, geradores e possíveis geradores de resíduos sólidos estão bem assistidos quanto aos seus critérios e proibições para acondicionamento, transporte e disposição final. Atualmente, existe nas esferas estadual e municipal leis que tratam de forma específica a questão dos

resíduos sólidos, além das políticas nacional e estaduais que carregam um panorama mais amplo (Figura 4).

Figura 4 - Esferas organizacionais no planejamento de gerenciamento de RSCC.



Fonte: ABRECON (2015).

Ainda segundo a resolução n.º 307 do CONAMA, os resíduos da construção civil não poderão ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de bota-fora, encostas, corpos d'água, lotes vagos ou áreas protegidas por lei; de maneira sucinta a resolução define ainda, em seu art. 2º, inciso X, que área de transbordo e triagem de resíduos da construção civil e resíduos volumosos são áreas destinadas ao recebimento de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, para triagem, armazenamento temporário dos materiais segregados, eventual transformação, e posterior remoção para destinação adequada, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e a segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

Dessa forma, seria sugestivo que o poder público tomasse iniciativas no sentido de validar e organizar o licenciamento de variados pequenos pontos de recebimento e triagem de RSCC, em volumes reduzidos, em áreas públicas ou privadas, os quais periodicamente deverão ser transferidos para locais apropriados para seu reuso, sua reciclagem ou sua disposição final na intenção de mitigar descartes em locais

inapropriados, ou seja, seriam micro pontos de armazenamento temporário de RSCC podendo ou não ser uma medida que proponha uma parceria entre a iniciativa pública e privada, tanto nas atividades que envolvam o transporte desses resíduos ao destino mais adequado quanto nas atividades de instalação e execução da triagem propriamente dita. No entanto, esses pontos de triagem devem ser de amplo conhecimento populacional além de serem previstos em mais de uma região da capital, visto que a necessidade de percorrer grandes distâncias para destinar os resíduos já segregados acaba por desestimular o potencial de não descarte em áreas clandestinas por parte dos pequenos geradores, que são os principais alvos desse movimento.

Em alguns municípios é possível notar ainda uma movimentação para fomentar a reutilização dos resíduos da construção; a prefeitura da cidade do Rio de Janeiro por exemplo, em seu Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (2012-2016) destaca a obrigatoriedade de uso de artefatos reciclados de resíduos da construção civil em obras da administração pública municipal (PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO, 2012).

O município de Goiânia, atualmente, conta com 4 ecopontos de descarte de resíduos, como sucatas, pneus, resíduos de construção civil, materiais recicláveis e outros. Dada a extensão territorial da cidade, e a conurbação existente, esses pontos ainda são insuficientes em face da demanda. Diante do exposto, ainda são necessárias medidas mais globais e eficientes para estimular o encaminhamento correto dos RSCC, cabe uma avaliação e reflexão quanto ao facilitamento do acesso aos locais de disposição regular, estabelecidos pelas prefeituras.

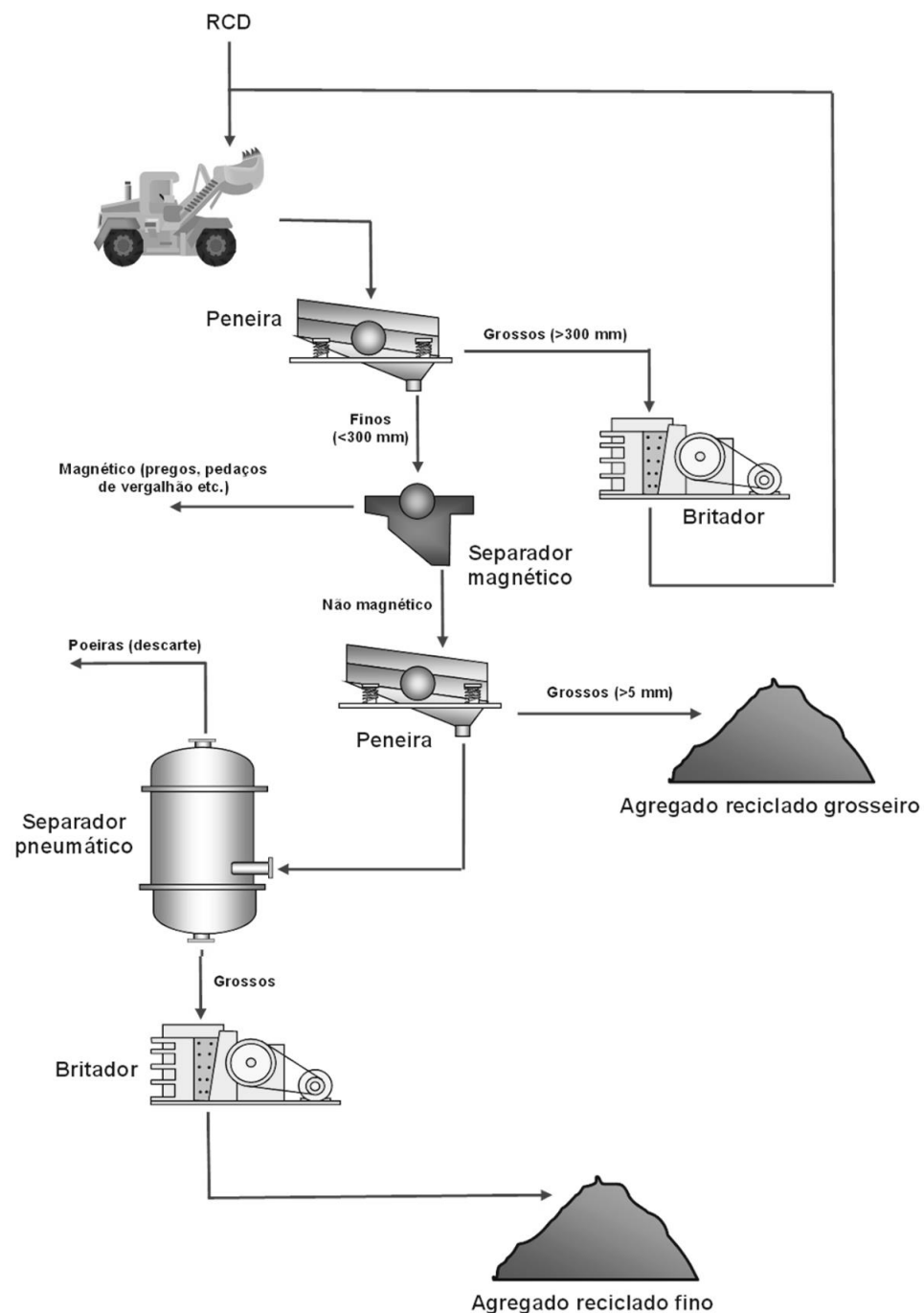
4.3.1. Usinas de reciclagem de RSCC

As usinas de reciclagem são um dos locais ambientalmente adequados para se destinar os resíduos de construção e demolição. As primeiras usinas de materiais recicláveis existentes no Brasil têm registros de operação inicial que datam 1986 (MIRANDA et al., 2009). Ao decorrer da história do crescimento das cidades, e consequentemente em função do crescimento populacional, as atividades do setor construtivo naturalmente tornaram-se mais demandadas. Após o ano de 2002, com a

determinação da resolução n.º 307 do CONAMA, que institui os geradores como responsáveis pelos resíduos gerados, torna-se favorável a criação de empresas especializadas em reciclagem de RCD. No Relatório de Pesquisa Setorial da ABRECON (2014/2015) aponta-se que em 2002 havia apenas 16 usinas de reciclagem de RSCC instaladas. Após 2002, o crescimento máximo que era de três novas usinas por ano, anteriormente a esse ano, chegou a nove usinas por ano (ABRECON, 2015).

Atualmente existem dois tipos de usinas de reciclagem de RSCC, as usinas fixas e os móveis, sendo que "em 2013, 79% das usinas pesquisadas eram fixas" (ABRECON, 2015, p.21). Usinas fixas contam com local definido e estrutura capaz de receber, separar, britar e executar o peneiramento do material fornecendo diferentes granulometrias de agregado reciclado (Figura 5).

Figura 5 - Sequência de operações de um processo de beneficiamento de RCD.



Fonte: Adaptada do site Dom total (2018)¹.

As usinas móveis também são qualificadas a realizarem esses processos, todavia os mesmos são executados no próprio local de remoção do RSCC. A barreira

¹ Disponível em: < <https://domtotal.com/noticia/1262733/2018/06/reaproveitamento-de-residuos-solidos-da-construcao-civil-no-brasil/>>

encontrada na britagem móvel é a transferência do custo de transporte e descarte do resíduo para a usina, que pode ocorrer em consequência do não reaproveitamento do material no local.

Apesar das vantagens da reciclagem dos resíduos da construção civil, o potencial produtivo do segmento encara alguns desafios e não alcança a capacidade esperada. Segundo a pesquisa da Abrecon, apesar da maioria das usinas brasileiras terem capacidade produtiva instalada entre 5.000 m³ e 10.000 m³ por mês, o volume médio produzido é bem inferior, a maioria das usinas do país, em torno de 52%, produzem até 3.000m³/mês (ABRECON, 2015). Outros principais problemas enfrentados pelas usinas, apontados no Relatório de Pesquisa Setorial da ABRECON são relacionados à venda do agregado reciclado que carece de legislação que incentive a compra (31%), sofre com a elevada carga tributária (26%) e a falta de conhecimento do mercado (26%), (Figura 6).

Figura 6 - Principais causas de dificuldade de venda do agregado reciclado.



Fonte: ABRECON (2015).

Apesar de não haver tantos esforços governamentais em favor do segmento, segundo o estudo da ABRECON, houve “crescimento, ainda que pequeno, do mercado e do percentual de resíduo reciclado nos últimos 5 anos, estimando-se um percentual de 21% de reciclagem de RCD (ABRECON, 2015)”.

4.3.2. Aplicação de agregados reciclados em pavimentação

No Brasil, o estudo do uso de agregados reciclados em pavimentação, conserva-se em movimento desde a década 1980, conforme aponta Motta (2005). Sendo assim, é interessante condensar as conclusões, análises e sugestões dessas experiências nesse estudo de modo a verificar desvios de comportamento em relação a pesquisas anteriores.

Oliveira et al. (2009 apud SINISTERRA, 2014), analisaram duas misturas distintas, dosadas com ligante CAP 50/70, sendo que uma era composta 100% de agregado natural, outra apresentava composição de 50% de RCD e 50% de agregado natural e a conclusão obtida foi que a mistura com RCD apresentou resiliência e resistência à tração superiores a mistura com 100% de agregado natural. Todavia, a resistência a fadiga do material se mostrou reduzida em relação a mistura composta de agregado natural.

Uma comparação foi feita por Góngora (2011), utilizando-se pedra britada e resíduos de construção civil como materiais de aterro ou estrada não pavimentada, ele submeteu esses materiais a ensaios de carregamento cíclico. Considerando a resistência, o material composto por RCD apresentou um melhor comportamento atingindo 1710 ciclos de carga; enquanto que a brita apresentou 1630 ciclos de carga.

Segundo Ribeiro (2004), a substituição total de agregado mineral por entulho, da região metropolitana de Goiânia, composto de concreto, argamassa e material cerâmico apresentou resultados insatisfatórios para utilização em concreto asfáltico. Contudo, com a utilização apenas de entulho proveniente de concreto a mistura demonstrou viabilidade para uso em pavimentação.

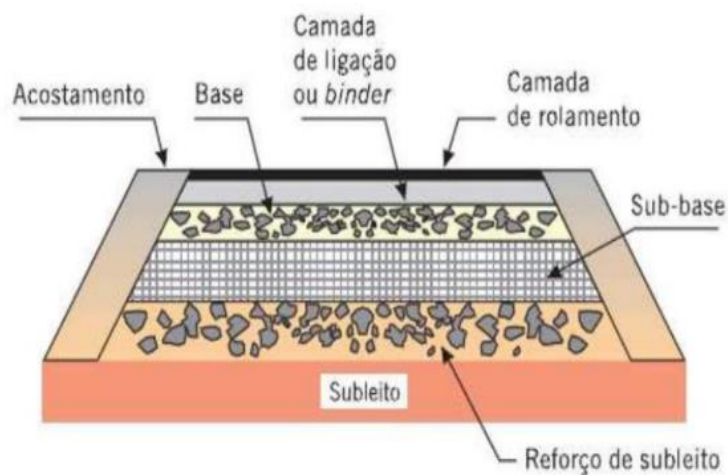
4.4. CONCRETO ASFÁLTICO

4.4.1. Especificações e Métodos de dosagem

O Concreto Asfáltico Usinado a Quente (CA, CAUQ) ou Concreto Betuminoso Usinado a Quente (CBUQ) como também é conhecido, é um material usualmente

utilizado como componente de camadas de pavimentos asfálticos, denominadas camadas de rolamento e ligação; essas camadas são responsáveis por receber e transmitir a carga dos veículos às camadas descendentes, sendo que ao atuar na composição da camada de rolamento recebe ainda a atribuição de proteger as camadas mais inferiores das intempéries, suportar forças abrasivas e proporcionar aos veículos um rolamento mais agradável (Figura 7).

Figura 7 - Corte transversal da estrutura-tipo de pavimento flexível.



Fonte: Bernucci et al., 2008.

O método de dosagem de concretos asfálticos mais usado mundialmente faz uso da compactação por impacto e é denominado método Marshall, em referência ao engenheiro americano Bruce Marshall, que o desenvolveu na década de 1940. Durante a década de 1980, várias rodovias norte americanas de tráfego pesado passaram a evidenciar deformações permanentes prematuras, que foram atribuídas ao excesso de ligante das misturas. Muitos engenheiros acreditavam que a compactação por impacto das misturas durante a dosagem produzia corpos-de-prova (CP) com densidades que não condiziam com as do pavimento em campo. Esse assunto foi abordado no estudo realizado nos Estados Unidos sobre materiais asfálticos, denominado Strategic Highway Research Program (SHRP), que resultou em um novo procedimento de dosagem por amassamento, denominado Superpave. O procedimento SHRP - Superpave ainda não é de uso corrente no Brasil, embora vários trabalhos científicos o tenham utilizado (BERNUCCI et al., 2008).

Segundo a norma do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT 031/2006 – ES – Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico – Especificação de Serviço (DNIT, 2006), concreto asfáltico é definido como “mistura executada a quente, em usina apropriada, com características específicas, composta de agregado graduado, material de enchimento (fíler) se necessário e cimento asfáltico (ligante asfáltico), espalhada e compactada a quente”. Os cimentos asfálticos de petróleo apropriados a serem empregados nessa mistura são: CAP-30/45, CAP-50/70 e CAP-85/100. O agregado graúdo adotado pode ser pedra britada, escória, seixo rolado preferencialmente britado ou outro material habilitado pela norma, devendo apresentar desgaste Los Angeles igual ou inferior a 50%. Para agregados miúdos a norma determina optar por areia, pó-de-pedra ou mistura de ambos ou outro material indicado nas especificações complementares, considerando que suas partículas individuais devem ser resistentes e apresentar equivalentes de areia igual ou superior a 55%. Quanto ao material de enchimento deve ser composto por materiais minerais finamente divididos, tais como cimento Portland, cal hidratada, pós-calcários, cinza volante, etc.

Na ocorrência de não haver boa adesividade entre os agregados e o ligante asfáltico, a norma 031/2006 do DNIT considera ainda a adição de um melhorador de adesividade à mistura. No que diz respeito à granulometria e aos percentuais do ligante asfáltico, a norma 031 determina os requisitos e as respectivas tolerâncias que devem ser atendidas em projeto, ver Tabela 1 (DNIT, 2006).

Tabela 1 - Requisitos da composição de concreto asfáltico conforme DNIT.

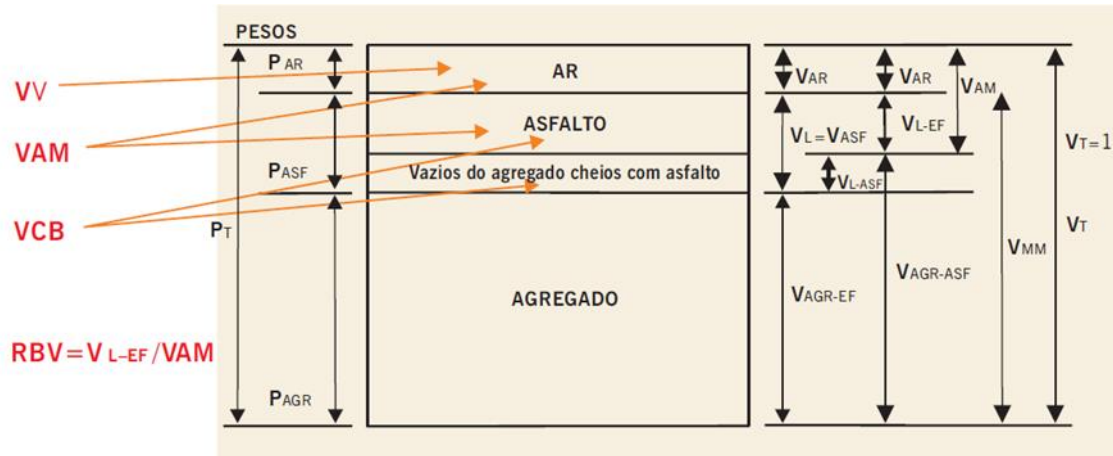
Peneira de malha quadrada		% em massa, passando			
Série ASTM	Abertura (mm)	A	B	C	Tolerâncias
2"	50,8	100	-	-	-
1 ½"	38,1	95 - 100	100	-	± 7%
1"	25,4	75 - 100	95 - 100	-	± 7%
¾"	19,1	60 - 90	80 - 100	100	± 7%
½"	12,7	-	-	80 - 100	± 7%
3/8"	9,5	35 - 65	45 - 80	70 - 90	± 7%
Nº 4	4,8	25 - 50	28 - 60	44 - 72	± 5%
Nº 10	2,0	20 - 40	20 - 45	22 - 50	± 5%
Nº 40	0,42	10 - 30	10 - 32	8 - 26	± 5%
Nº 80	0,18	5 - 20	8 - 20	4 - 16	± 3%
Nº 200	0,075	1 - 8	3 - 8	2 - 10	± 2%
Asfalto solúvel no CS2(+) (%)		4,0 - 7,0 Camada de ligação (Binder)	4,5 - 7,5 Camada de ligação e rolamento	4,5 - 9,0 Camada de rolamento	± 0,3%

Extraído de: DNIT, 2006.

A faixa a ser utilizada é determinada pelo diâmetro máximo dos agregados que é condicionado a ser inferior a fração de 2/3 da espessura da camada. Dessa forma, a faixa C é ideal para camadas de rolamento.

A norma do Departamento Nacional de Estradas de Rodagem – DNER, atual DNIT, número DNER-ME 043/1995 – Misturas Betuminosas a quente – ensaio Marshall, descreve o procedimento utilizado para determinar o teor de ligante de projeto, também denominado de teor ideal ou ótimo, para as misturas asfálticas, com base nos valores obtidos de estabilidade Marshall (75 golpes), volume de vazios, relação betume/vazios e resistência à tração por compressão diametral, determinados pela média aritmética dos três valores obtidos para cada teor de ligante ensaiado. A Figura 8 apresenta uma ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica, com todos os materiais constituintes.

Figura 8 - Ilustração da volumetria em uma mistura asfáltica.



Fonte: Liedt et al., (2008).

A estabilidade Marshal é a resistência máxima à compressão radial, apresentada pelos corpos de prova, quando moldados e ensaiados de acordo com a norma, expressa em quilograma-força (kgf). O volume de vazios (Equação 1) é calculado com base nas massas específicas aparentes dos corpos de prova, obtidas com o uso da balança hidrostática, e as massas específicas ou densidades máximas teóricas, calculadas para cada teor de ligante ensaiado (Equação 2).

$$Vv = \frac{DTM - da}{DTM} \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde,

Vv = Volume de vazios;

DTM = massa específica ou densidade máxima teórica, obtida por cálculo ou Experimentalmente;

da = massa específica aparente dos corpos de prova.

$$DTM = \frac{100}{\frac{\% A_g}{\rho_s A_g} + \frac{\% A_m}{\rho_s A_m} + \frac{\% f}{\rho_s f} + \frac{\% a}{\rho_s a}} \quad (\text{Equação 2})$$

Onde,

$\% A_g, \% A_m, \% f, \% a$ = porcentagens de agregado graúdo, miúdo, fíler e asfalto, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica;

$\rho_s A_g, \rho_s A_m, \rho_s f, \rho_s a$ = massas específicas reais do agregado graúdo, miúdo, filer e asfalto, respectivamente, expressas em relação à massa total da mistura asfáltica.

A relação betume/vazios - RBV (Equação 3), que corresponde à porcentagem de vazios ocupada com o ligante asfáltico, é calculada pela razão entre a porcentagem de vazios com betume - VCB (Equação 4) e porcentagem de vazios do agregado mineral - VAM (Equação 5).

$$RBV = \frac{VCB}{VAM} \quad (\text{Equação 3})$$

Onde,

RBV = relação betume/vazios;

VCB = vazios com betume;

VAM = vazios do agregado mineral.

$$VCB = \frac{da \times \% a}{\rho_s a} \quad (\text{Equação 4})$$

Onde,

da = massa específica aparente dos corpos de prova;

$\% a$ = porcentagem de asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica;

$\rho_s a$ = massa específica real do asfalto, expressa em relação à massa total da mistura asfáltica.

$$VAM = Vv + VCB \quad (\text{Equação 5})$$

Onde,

V_{AM} = vazios do agregado mineral;

V_v = Volume de vazios;

V_{CB} = vazios com betume.

Para a Equação 4, temos ainda que:

$$da = \frac{Ms}{V} \quad (\text{Equação 6})$$

Em que:

da = massa específica aparente da mistura asfáltica (g/cm³);

Ms = massa seca do corpo de prova compactado (g);

V = volume do corpo de prova compactado (cm³).

Para realizar a dosagem de um concreto asfáltico pela metodologia Marshall, são necessárias a realização das seguintes etapas:

- a) Determinação das massas específicas reais dos agregados e do CAP;
- b) Seleção da faixa granulométrica a ser utilizada na mistura que deve ser escolhida de acordo com a sua finalidade, observando-se os limites percentuais estabelecidos para cada faixa pela norma DNIT 031/2006 (Tabela 1);
- c) Escolha do percentual em massa de cada agregado que irá compor a mistura, de modo que esta se enquadre nos limites da faixa granulométrica escolhida;
- d) adotar as temperaturas de mistura e de compactação, a partir da curva viscosidade-temperatura do ligante escolhido. A temperatura do ligante para mistura deve ser tal que ele apresente viscosidade entre 75 e 150 sSF (segundos Saybolt-Furol), já a temperatura de compactação deve ser tal que ele apresente viscosidades na faixa de 125 a 155 sSF. A temperatura dos agregados deve ser de 10 a 15°C acima da temperatura definida para o ligante, não ultrapassando 177°C;
- e) Adoção de teores de asfalto para os diferentes grupos de corpos-de-prova (cinco teores), a serem moldados conforme norma DNER-ME 043/1995, sendo que cada grupo deve ter no mínimo 3 corpos de prova (CP).

h) calcula-se a densidade máxima teórica (DMT) correspondente ao teor de asfalto considerado conforme apresentado na Equação 2;

i) calcula-se a massa específica aparente dos corpos de prova (d_a) conforme a Equação 6;

j) a partir do cálculo da massa específica aparente dos corpos de prova (d_a) calcula-se o volume de vazios (Equação 1) e a relação betume/vazios (Equação 3);

k) seguidamente ao cálculo desses parâmetros, os corpos-de-prova são submetidos à submersão em banho-maria a 60°C por 30 a 40 minutos (Figura 9.a). Após esse período, os corpos-de-prova são retirados e posicionados imediatamente dentro do molde de compressão (Figura 9.b);

Figura 9 - Exemplo de corpos-de-prova submersos em banho-maria e molde de compressão.



Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

l) a partir dessa ação, são determinadas por meio de compactador Marshall, conforme a Figura 10, as propriedades mecânicas verificadas para os CP's, estabilidade Marshall e a fluência.

Figura 10 - Exemplos de compactadores Marshall.



a) Manual

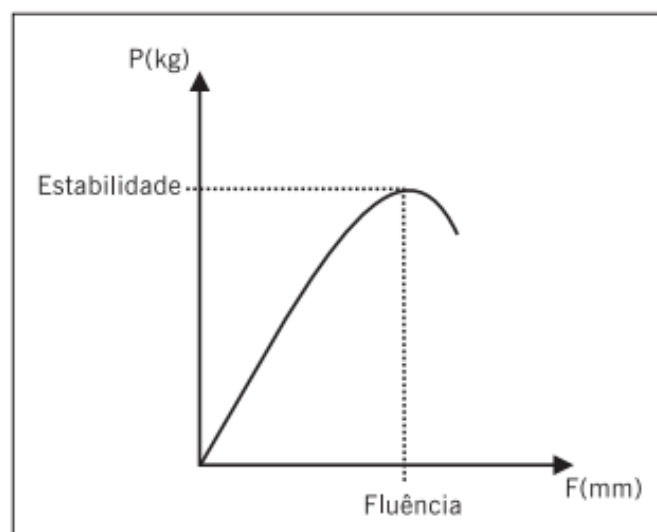


b) Automático

Fonte: DNIT (2018).

Obtidos os dados referentes à estabilidade Marshall e a fluência, é possível plotar seis curvas em função do teor de asfalto, determinantes para a definição do teor de projeto, dito teor ótimo de ligante, conforme ilustradas na Figura 11.

Figura 11 – Curva resultante do ensaio Marshall.



Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

4.4.2. Materiais constituintes dos concretos asfálticos

4.4.2.1. Agregados

Para a construção civil o agregado consiste em um material granular de dimensões diversas cuja função está atrelada ao aumento da resistência mecânica, a redução de custo da mistura a qual será envolvido, e conseqüentemente da obra em que for utilizado, posto que seu custo é relativamente baixo.

Segundo Ambrozewicz (2012) agregado é um material granular sem forma ou volume definido, de atividade química geralmente inerte. Dotado de propriedades adequadas para a produção de misturas tal qual o concreto asfáltico, e para além do seu custo relativamente baixo, os agregados ocupam pelo menos $\frac{3}{4}$ do volume total em uma mistura de concreto, portanto, sua qualidade é de suma importância.

Os agregados contam com dimensões características e propriedades adequadas para a preparação de argamassas e concretos. Para a dosagem de concretos asfálticos, segundo Roberts et al. (1996), citado por (BERNUCCI et. al., 2008), são as propriedades físicas dos agregados que tem maior relevância na adequação para o uso em misturas asfálticas e em menor proporção as propriedades químicas. São consideradas propriedades físicas e mecânicas básicas para análise, a porosidade, a resistência, e a densidade. Quanto às propriedades físico-químicas é de maior interesse analisar-se a adesividade.

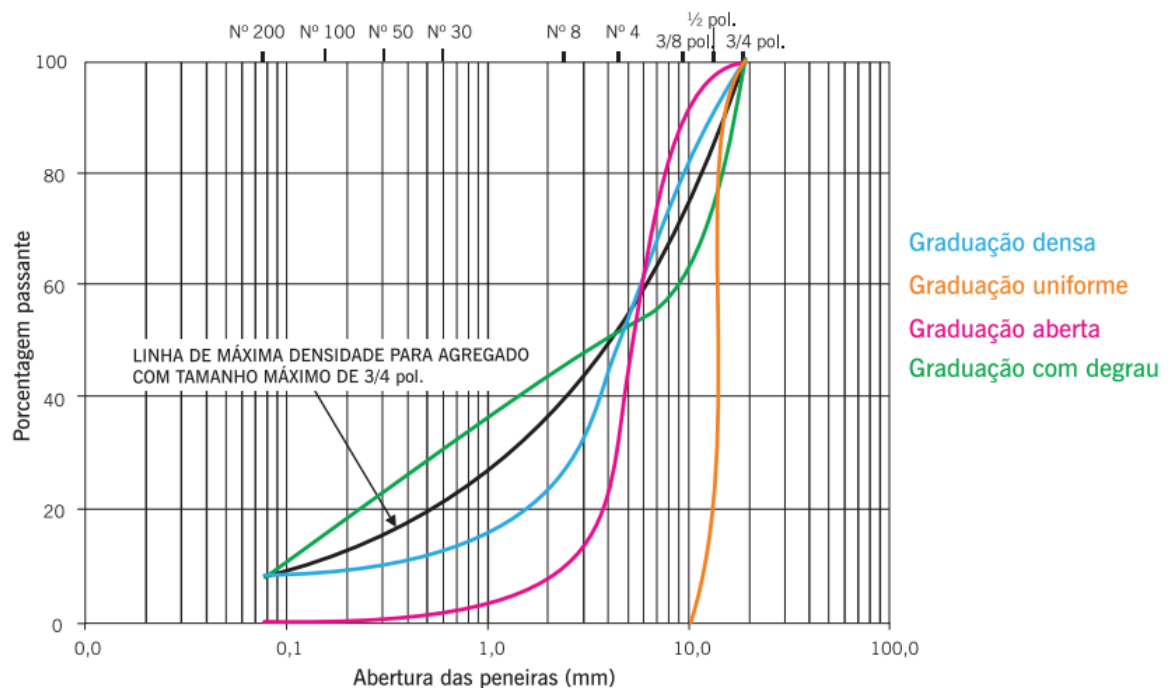
Um ponto importante diz respeito à porosidade, um agregado poroso irá incorporar ligante asfáltico ao seu grânulo, consumindo parte do ligante necessário para dar coesão à mistura asfáltica, dessa forma irá exigir mais material betuminoso na mistura.

A resistência do concreto está ligeiramente ligada à capacidade de compactação da mistura, posto que há uma relação entre a boa graduação dos agregados da mistura asfáltica e a presença de vazios na mesma, quanto mais vazios incorporados, menor a compactação e conseqüentemente a tendência é que menor seja a resistência.

A boa dosagem da mistura asfáltica é obtida tal que não ocorra a predominância de agregados de tamanho máximo excessivamente pequeno, visto que prejudicam a estabilidade do concreto asfáltico conferindo-lhe menor resistência, do mesmo modo a dificuldade na trabalhabilidade e/ou a segregação em misturas asfálticas são provocadas pela presença recorrente, em sua composição, de agregados de tamanho máximo excessivamente grande. A preferência é dada àquele que apresenta distribuição granulométrica contínua, próxima à de densidade máxima, ou seja, é composto por grãos de tamanhos mais diversificados de modo que a relação das partículas pequenas com as pedras maiores do agregado proporcionem o devido preenchimento dos vazios existentes, conferindo assim uma maior aderência e coesão entre as partículas e por consequência maior resistência mecânica.

Na composição de uma mistura que envolva agregados é importante atentar-se para a sua distribuição granulométrica, visto que um agregado de graduação densa ou bem-graduado é o mais desejável (FIGURA 12).

Figura 12 – Graduação do agregado conforme curva granulométrica.



Fonte: BERNUCCI et. al., 2008.

Entre os materiais empregados como agregados naturais, estão a areia, a pedra britada, a escória, o cascalho, argilas e outros; esses dois primeiros são comumente empregados na fabricação de misturas asfálticas e são obtidos em jazidas na natureza, fato que recorrentemente promove prejuízos ambientais.

Para produzir agregados reciclados é necessário submeter os RSCC ao processo de triagem, separação e britagem; desse último processo é possível obter tanto agregado reciclado graúdo quanto agregado reciclado miúdo a depender apenas da escolha do equipamento utilizado no processo de britagem (Quadro 2).

Quadro 2 – Equipamentos de britagem utilizados na reciclagem de RCD.

Britador	Propósito
De Impacto	Possui unidades primárias e secundárias. Fornece agregados com granulometria boa para obras rodoviárias. Pouco sensíveis à presença de barras de aço.
De Mandíbula	Especialmente desenvolvido para britar rochas e materiais similares Produz bons agregados para concretos estruturais.
De Martelo	Reduz pelo impacto partículas maiores em partículas menores. Produz material de granulometria fina.
De Rolos	Reduz a diâmetros de 7,5 a 10,0 cm. No caso do equipamento marca ANVI, pode-se utilizá-lo como betoneira também.

Fonte: PENG et al., 1997 modificado; LEVY, 1997a.

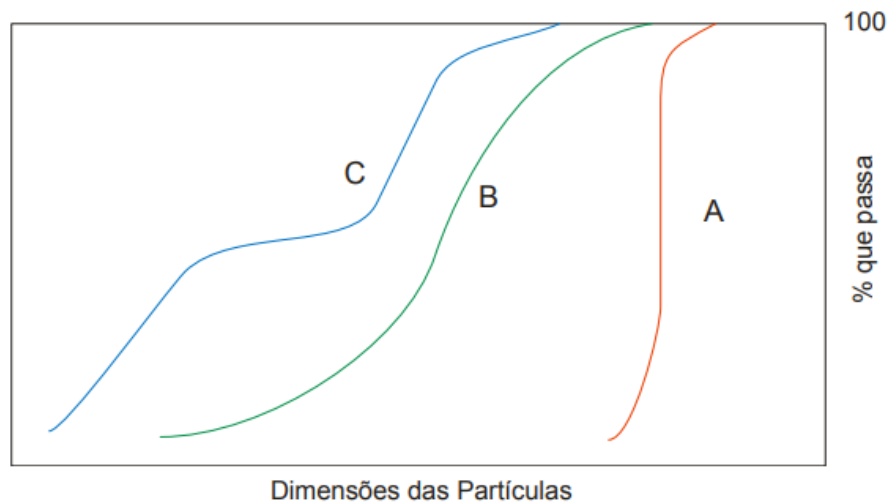
Em razão das tecnologias atuais, é possível obter agregados bem graduados artificialmente. Os britadores de impacto podem ser utilizados desde a britagem primária até a última etapa do processo de britagem, em todos os diferentes estágios de redução de tamanho, fornecendo agregado com boa graduação para obras rodoviárias. Esses equipamentos podem ser utilizados na produção de agregados, operações de mineração e aplicações de reciclagem.

4.4.2.1.1. Classificação dos agregados quanto à dimensão das partículas

O estudo da distribuição das dimensões dos grãos de um agregado é chamado de análise granulométrica ou simplesmente, granulometria. Esse estudo verifica as dimensões das partículas do agregado e de suas respectivas porcentagens de ocorrência, classificando-o por meio de curva granulométrica. Partindo da configuração da curva, conforme pode ser visto na Figura 13, é possível discernir os

seguintes tipos de granulometria: uniforme (curva A), apresentando grãos majoritariamente de mesma graduação; bem graduada (curva B), composta de partículas abrangendo uma extensa faixa de valores dimensionais; e mal graduada (curva C), caracterizada por apresentar predominância de partículas com certo diâmetro.

Figura 13 - Curvas granulométricas características.



Fonte: DNIT, 2006.

Segundo a norma da ABNT, NBR 7211 (ABNT, 2009) agregado miúdo é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 150 μm , em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003), com peneiras definidas conforme ABNT NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2000). E agregado graúdo é o agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, em ensaio realizado de acordo com a ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003), com peneiras definidas pela ABNT NBR NM ISO 3310-1 (ABNT, 2000) de 4,75 mm (TABELA 2).

Tabela 2 - Conjunto de peneiras das séries normal e intermediária (abertura nominal).

SÉRIE NORMAL	SÉRIE INTERMEDIÁRIA
75 mm	-
-	63 mm
-	50 mm
37,5 mm	-
-	31,5 mm
-	25 mm
19 mm	-
-	12,5 mm
9,5 mm	-
-	6,3 mm
4,75 mm	-
2,36 mm	-
1,18 mm	-
600 μ m	-
300 μ m	-
150 μ m	-



Fonte: Adaptada de ABNT NBR 7211, 2009.

4.4.2.1.2. Classificação dos agregados quanto à origem

Agregados naturais são agregados encontrados em forma particulada na natureza na condição de pronta utilização, são exemplos areia de rios, seixos rolados, cascalhos, pedregulhos, e etc. Agregados artificiais, cuja forma granular é obtida pelo britamento de rochas, processo que dá origem ao pedrisco, pedra britada, e outros, são agregados muito utilizados principalmente por concreteiras. Os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil são obtidos por processo artificial, ao serem britados num procedimento similar ao das rochas.

Por fim, os agregados industrializados que são aqueles obtidos por processos industriais, modificados e aperfeiçoados conforme necessidade do material a ser incorporado, nesse caso a matéria prima obtida pode ser rocha, escória de alto forno e argila.

4.4.2.2. *Material de enchimento (fíler)*

Nas misturas asfálticas é usual a adição de um material de enchimento como forma de propor uma melhor interação entre as partículas no preenchimento de vazios, e assim promover o melhoramento das respostas mecânicas dessa mistura, minimizando os impactos do tráfego e do clima no pavimento. O fíler é um material de enchimento obtido através da moagem fina de calcário, basalto, materiais carbonáticos e outros (Figura 14). Esse material possui grânulos muito finos, passante na peneira nº 200 (75 µm ou 0,075 mm) conforme NBR NM-ISO 3310-1 (ABNT, 2000), o que o torna uma relevante opção no beneficiamento de concretos asfálticos ao associá-lo aos outros componentes para aumentar a trabalhabilidade, diminuir a capilaridade e a permeabilidade de argamassas e concretos.

Figura 14 - Estoque de finos em pedreira por processo a seco.



Fonte: SKS Mineração - Grupo SKS, 2017.

Na composição de concretos asfálticos, o fíler integra parte ativa do mástique (combinação de ligante asfáltico, fíler e ar). A qualidade da interação dos componentes do mástique influenciam diretamente as propriedades mecânicas da mistura asfáltica bem como sua trabalhabilidade. Ao ser dosado e adicionado à mistura, o mástique exerce influência sobre os vazios do agregado mineral, as

características de compactação e o teor ótimo do ligante asfáltico” (BARDINI et al, 2009).

Ao contrário do que determina a definição geral do DNER EM 367 (DNER, 1997), o fíler não é apenas um material inerte, agindo efetivamente como material ativo, condição dada pela manifestação do seu potencial modificador de propriedades nas misturas que compõe. O estudo de SANTANA (1995) discute dois pontos de vista da influência do fíler, ou também chamada de influência do mástique. A linha de pensamento de Celestino Ruiz, denominada mástique com fíler total, se traduz no raciocínio de que em um mástique bem dosado todas as partículas do fíler ficam em suspensão no asfalto, suas partículas não se tocando, formando um mástique homogêneo (fíler agregado). A outra linha de pensamento, denominada mástique com o fíler ativo, é de V. P. Puzinauskas segundo ele uma parte do fíler ainda se porta como um agregado muito fino, com suas partículas se tocando, formando um esqueleto mineral, e a outra parte fica em suspensão formando um mástique (Santana, 1995).

4.4.2.3. *Ligante Asfáltico*

O cimento asfáltico de petróleo (CAP), composto da mistura concreto asfáltico, é um ligante utilizado para promover aglutinação entre os agregados de modo a proporcionar coesão e impermeabilidade à mistura, além de contribuir para a segurança da via e o conforto no rolamento do tráfego de automóveis (BOEIRA, 2014). Na execução do Ensaio Marshall, principal ensaio de dosagem de concretos asfálticos, a interação entre agregados e asfalto deve resultar em boa adesividade, sendo que os tipos de cimento asfáltico de petróleo que podem ser empregados são: CAP 30/45, CAP 50/70, CAP 85/100, conforme determina a norma DNIT 031/2006.

É recomendável considerar ainda, a concentração volumétrica do sistema fíler-ligante, que se sugere ser tal qual a rigidez não seja significativa, isto é, não deve ser alta (ROBERT et al., 1996 apud BARDINI et. al., 2009).

Para Bernucci et. al. (2008, p. 26), “o asfalto utilizado em pavimentação é um ligante betuminoso que provém da destilação do petróleo e que tem a propriedade de ser um adesivo termoviscoplastico, impermeável à água e pouco reativo”. A

característica termoviscoplastica do asfalto sujeita o material a submeter-se à influência do tempo, da carga aplicada, do tempo e da velocidade (BERNUCCI et al., 2008).

As propriedades físicas do asfalto estão intimamente ligadas à sua temperatura, isto é, seu comportamento diante de baixas temperaturas é similar à de um material sólido; em temperaturas elevadas se comporta como um líquido. À vista disso, as propriedades físicas dos ligantes asfálticos só são medidas por meio de ensaios a partir de temperaturas especificadas, em alguns ensaios também são definidos o tempo e a velocidade de carregamento devido a viscoplasticidade do material (BERNUCCI et al., 2008).

Para verificar se um ligante asfáltico é adequado para pavimentação, utiliza-se de medidas simples de características físicas do ligante, as duas principais são, segundo Bernucci (2008, p.42), “a “dureza”, medida através da penetração de uma agulha padrão na amostra de ligante, e a resistência ao fluxo, medida através de ensaios de viscosidade”.

A “dureza” do cimento asfáltico é uma característica medida, por meio de ensaio com procedimento fixado pela ABNT NBR 6576/2007, através de uma agulha de massa padronizada (100g) que penetra, décimos de milímetro, numa amostra de volume padronizado de cimento asfáltico por 5 segundos a condições normais de temperatura (25°C) (ABNT, 2007). Chama-se esse ensaio de ensaio de penetração, para executá-lo corretamente são realizadas três medições individuais de penetração, as quais são aceitas após serem submetidas à análise da diferença máxima entre o valor mais alto e o valor mais baixo das determinações (Tabela 3).

Tabela 3 - Critérios para indicação de resultados.

Penetração	0 até 49 0,1 mm	50 até 149 0,1 mm	150 até 249 0,1 mm	≥ 250 0,1 mm
Diferença máxima entre o valor mais alto e valor mais baixo das determinações.	2	4	12	20

Fonte: ABNT, 2007.

A média dos três valores representa a consistência do CAP, logo, quanto menor for a penetração da agulha maior a consistência do ligante. A Figura 15 mostra o equipamento utilizado para realização desse ensaio.

Figura 15 - Exemplo de equipamento manual de medida da penetração.



Fonte: CTR Scientific².

A resistência ao fluxo é avaliada por meio do coeficiente de viscosidade ou apenas viscosidade (η), expressa em $[N/m^2] / [1/s] = Pa.s$, que resulta da relação entre a tensão de cisalhamento aplicada (τ) e a velocidade de deformação ($\Delta\gamma/\Delta t$), sendo função somente da temperatura e dada por (Equação 7):

$$\eta = \tau / [\Delta\gamma / \Delta t] \quad \text{Equação 7}$$

A unidade de medida da viscosidade mais comum é o poise ($g/[cm.s]$). É possível verificar ainda o valor medido do coeficiente de viscosidade do ligante por meio de aparelho, o aparelho que faz a avaliação dessa propriedade, chama-se

² Disponível em: < <https://ctrscientific.com/products/penetrometro-universal-con-cono-para-penetrar-grasas-humboldt>>.

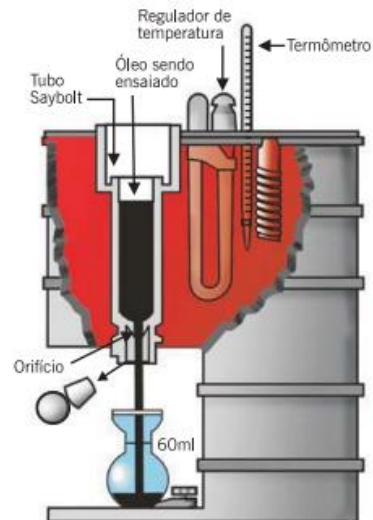
viscosímetro de placas paralelas. O viscosímetro mais utilizado no Brasil para os materiais asfálticos é o de Saybolt-Furol (Figura 16), esse aparelho é basicamente:

“[...] um tubo com formato e dimensões padronizadas, no fundo do qual fica um orifício de diâmetro $3,15 \pm 0,02\text{mm}$. O tubo, cheio de material a ensaiar, é colocado num recipiente com óleo (banho) com o orifício fechado. Quando o material estabiliza na temperatura exigida (25 a 170°C dependendo do material e 135°C para os cimentos asfálticos), abre-se o orifício e inicia-se a contagem do tempo. Desligase o cronômetro quando o líquido alcança, no frasco inferior, a marca de 60ml . O valor da viscosidade é reportado em segundos Saybolt-Furol, abreviado como SSF, a uma dada temperatura de ensaio (BERNUCCI et al., 2008) ”.

Figura 16 - Exemplo de equipamento Saybolt-Furol de ensaio de viscosidade e esquema do interior do equipamento.



a) Equipamento completo



b) Interior do equipamento

Fonte: BERNUCCI et al., 2008.

5. MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo estão apresentadas as etapas seguidas para a realização do trabalho, desde a concepção do tema até a realização do programa experimental.

5.1. Materiais Utilizados na Pesquisa

Neste item são apresentados os materiais utilizados para a realização dos experimentos e os locais onde os mesmos foram obtidos.

5.1.1. Agregados Reciclados

As amostras de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil foram doadas pela empresa RNV Resíduos, recicladora que processa resíduos na região metropolitana de Goiânia. Tratam-se de agregados mistos com granulometrias denominadas de brita 1, brita 0 e areia artificial. As amostras foram coletadas nas pilhas de agregado, seguindo as recomendações do procedimento DNER-PRO 120/97 (DNER, 1997).

5.1.2. Agregados Naturais Britados

Os agregados naturais britados foram obtidos junto à pedreira da Prefeitura Municipal de Goiânia, situada no setor Parque Atheneu, sendo a rocha de origem o micaxisto, rocha metamórfica foliada (foliação bem marcada), com elevado grau de xistosidade, constituída essencialmente por quartzo e mica, em granulometrias classificadas como brita 1, brita 0 e areia artificial. As amostras foram coletadas nas pilhas de agregado, seguindo as recomendações do procedimento DNER-PRO 120/97 (DNER, 1997).

5.1.3. Ligante Asfáltico

O ligante asfáltico, do tipo cimento asfáltico de petróleo – CAP 50/70, classificado pela penetração, foi doado pela Disbral – Distribuidora Brasileira de Asfalto, localizada na região metropolitana de Goiânia.

5.2. Programa Experimental

A seguir, são descritos os ensaios realizados no desenvolvimento do trabalho.

5.2.1. Caracterização dos Agregados

Com todas as amostras de agregados, naturais e reciclados, foram realizados os ensaios descritos a seguir.

- ✓ Análise granulométrica, de acordo com a norma DNER-ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica (DNER, 1998);
- ✓ Massa específica dos grãos dos agregados graúdos, de acordo com a norma DNER-ME 081/98 - Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo (DNER, 1998);
- ✓ Massa específica dos grãos dos agregados miúdos, de acordo com a norma DNER-ME 084/95 - Agregado miúdo - determinação de densidade real (DNER, 1995);
- ✓ Índice de forma, de acordo com a norma DNIT 425/2020-ME - Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro (DNIT, 2020);
- ✓ Abrasão “Los Angeles”, de acordo com a norma DNER-ME 035/98 - Agregados - determinação da abrasão “Los Angeles” (DNER, 1998);
- ✓ Ensaio de adesividade, conforme a norma DNER-ME 078/94 - Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso (DNER, 1994).

5.2.2. Caracterização do Ligante Asfáltico – CAP

- ✓ Ensaios de penetração, de acordo com a norma DNIT 155 - Material asfáltico Determinação da penetração – Método de ensaio (DNIT, 2010).
- ✓ Viscosidade de Saybolt Furol, com três temperaturas, de acordo com a norma NBR 14950 – Materiais betuminosos - Determinação da viscosidade Saybolt Furol (ABNT, 2003).

5.2.3. Dosagem Marshall

Após caracterizar-se todos os materiais foram realizadas as dosagens de concreto asfáltico utilizando a metodologia Marshall, de acordo com a norma DNER-ME 043 - Misturas betuminosas a quente - ensaio Marshall (DNER, 1995). A faixa granulométrica adotada foi a faixa C da norma DNIT 031 - Pavimentos flexíveis - Concreto asfáltico - Especificação de Serviço (DNIT, 2006). Após a adoção da faixa granulométrica, foram realizadas análises para definir o proporcionamento dos agregados, ou seja, os percentuais de cada um na mistura para obter o enquadramento na faixa adotada. Os percentuais de CAP adotados ficaram compreendidos entre os percentuais de 4,5 a 7,0 %, valores que atendem à referências da norma do ES 031 (DNIT, 2006) e estão de acordo com experiências regionais.

A primeira dosagem foi realizada apenas com os agregados naturais britados. A segunda dosagem foi realizada substituindo-se 20% dos agregados naturais britados pelos agregados reciclados. Após a realização dessas duas dosagens optou-se por realizar uma terceira dosagem aumentando-se o percentual dos agregados reciclados para 30%, em substituição aos agregados naturais britados.

Para as duas primeiras dosagens foram utilizados teores de CAP variando de 4,5 a 6,5% e para a terceira, em função da maior porosidade dos agregados reciclados, optou-se por adotar teores de CAP um pouco maiores, variando entre 5,0 e 7,0%.

A fim de melhor determinar e avaliar a variação do volume de vazios das amostras compactadas também foram realizados alguns ensaios para determinação da densidade máxima medida das misturas ou dosagens estudadas, ensaio denominado de *Rice Test*, de acordo com a norma DNIT 427/2020 - ME - Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas (DNIT, 2020).

6. APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Essa etapa consiste na apresentação e análise dos resultados provenientes dos ensaios desenvolvidos em laboratório em face aos materiais utilizados na pesquisa. A partir dos dados obtidos foi possível analisar os resultados de desempenho dos concretos asfálticos produzido com agregados naturais britados e com a adição de agregados reciclados nas proporções de 20 e 30 por cento.

6.1. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS BRITADOS

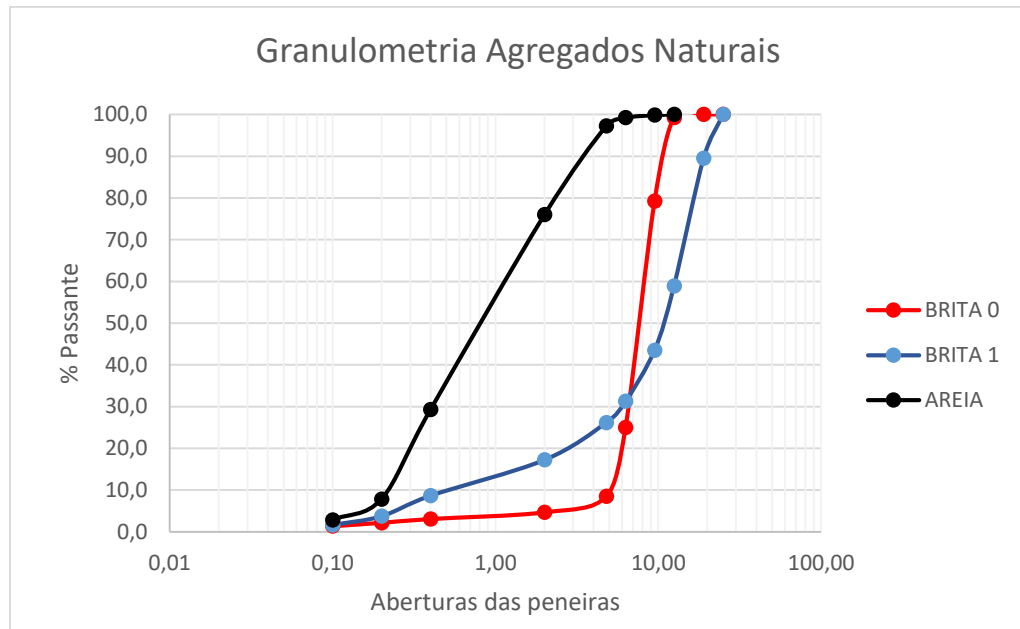
Em laboratório, foram realizados ensaios de caracterização dos agregados, nomeadamente, ensaio de análise granulométrica, ensaios de determinação da massa específica dos grãos, abrasão “Los Angeles” e índice de forma. A partir dos dados obtidos foi possível verificar o atendimento aos requisitos e às respectivas tolerâncias que devem ser atendidas em projeto. Na Tabela 4 estão dispostos os valores referentes a granulometria dos agregados naturais, e na Figura 17 suas respectivas curvas granulométricas.

Tabela 4 – Distribuição granulométrica dos agregados naturais britados.

Peneira	Abertura(mm)	% Passante		
		Brita 1	Brita 0	Areia artificial
1"	25,0	-	-	-
3/4"	19,0	100,0	100,0	-
1/2"	12,5	51,9	99,3	-
3/8"	9,5	4,9	79,3	-
1/4"	6,3	1,0	24,9	-
4	4,8	0,8	8,5	100,0
10	2,0	0,6	4,6	92,6
40	0,4	0,5	3,1	60,4
100	0,2	0,4	2,1	29,1
200	0,1	0,2	1,3	16,4
fundo	-	-	-	-

Fonte: Autoria Própria.

Figura 17 – Curvas granulométricas dos agregados naturais.



Fonte: Autoria Própria

Em relação aos demais dados, a tabela 5 apresenta os resultados de caracterização dos agregados naturais britados:

Tabela 5 - Caracterização dos agregados naturais britados.

Propriedade	Agregado Natural	Resultado
Massa específica(g/cm ³)	Brita 0	2,78
	Brita 1	2,77
	Areia artificial	2,93
Índice de forma (mm)		2,98
Abrasão "Los Angeles"		27%

Fonte: Própria autora.

Para a execução de pavimentos asfálticos com revestimento em concreto asfáltico, os agregados devem apresentar índice de forma com valor não superior a 3,0. Bem como, segundo a ES 031 (DNIT, 2006) o agregado graúdo empregado nos

concretos asfálticos deve apresentar desgaste Los Angeles menor que 50%. Dessa forma os agregados utilizados atendem a esses critérios.

6.2. CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

Em uma análise visual, os agregados reciclados adquiridos para a pesquisa apresentaram-se majoritariamente compostos por grãos cimentícios representando cerca de 83,5% da composição do agregado reciclado coletado, pedra britada equivalente a 12% e uma pequena quantidade de cerâmica cerca de 4%; pôde-se identificar ainda uma quantidade mínima de madeira, plástico e ferro cerca de 0,5%. Os agregados reciclados também apresentaram uma grande quantidade de fração arenosa, passante na peneira N° 10 (# 2,0 mm).

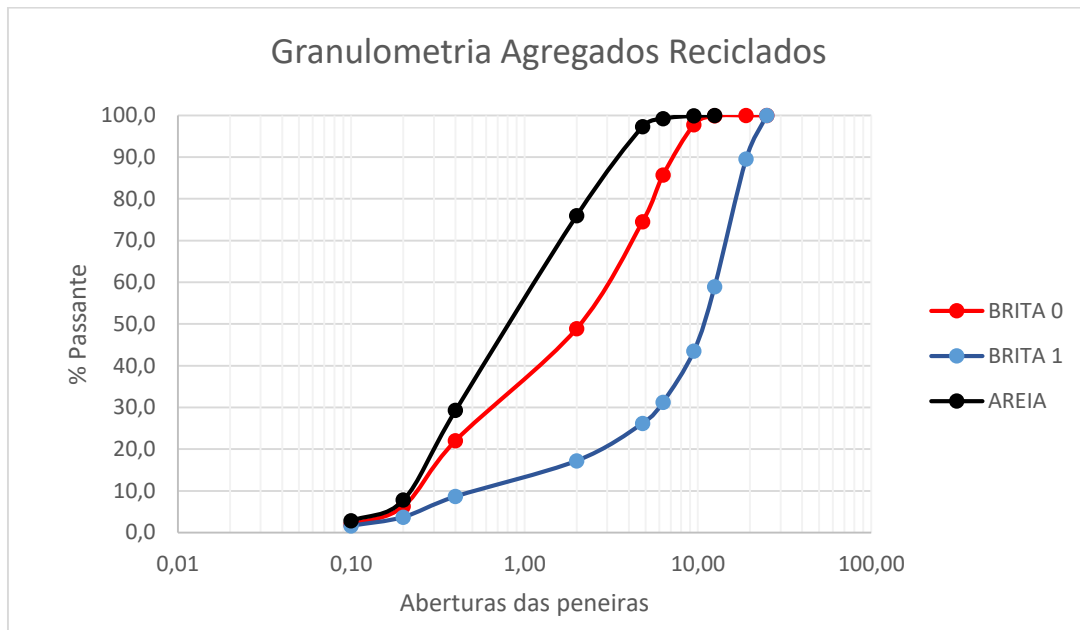
Assim como para os agregados naturais britados, os agregados reciclados também foram analisados por meio dos ensaios de caracterização de análise granulométrica, massa específica dos grãos, abrasão “Los Angeles” e índice de forma. A partir dos dados obtidos foi possível verificar o atendimento aos requisitos e as respectivas tolerâncias que devem ser atendidas em projeto. Na Tabela 6 estão dispostos os valores referentes a granulometria dos agregados, e na Figura 18 suas respectivas curvas granulométricas.

Tabela 6 – Distribuição granulométrica dos agregados reciclados.

Peneira	Abertura(mm)	% Passante		
		Brita 1	Brita 0	Areia artificial
1"	25,0	100,0	-	-
3/4"	19,0	89,5	100,0	-
1/2"	12,5	58,9	99,9	100,0
3/8"	9,5	43,5	97,8	99,9
1/4"	6,3	31,3	85,7	99,2
4	4,8	26,2	74,5	97,3
10	2,0	17,2	48,9	76,0
40	0,4	8,6	22,0	29,3
100	0,2	3,7	6,3	7,8
200	0,1	1,6	1,9	2,8
fundo	-	-	-	-

Fonte: Própria autora.

Figura 18 – Curvas granulométricas dos agregados reciclados.



Fonte: Autoria Própria

No que tange os demais dados, a Tabela 7 apresenta os resultados da caracterização dos agregados reciclados:

Tabela 7 – Caracterização dos agregados reciclados.

Propriedade	Agregado Reciclado	Resultado
Massa específica(g/cm ³)	Brita 0	2,64
	Brita 1	2,67
	Areia artificial	2,82
Índice de forma (mm)		2,10
Abrasão "Los Angeles"		35 %

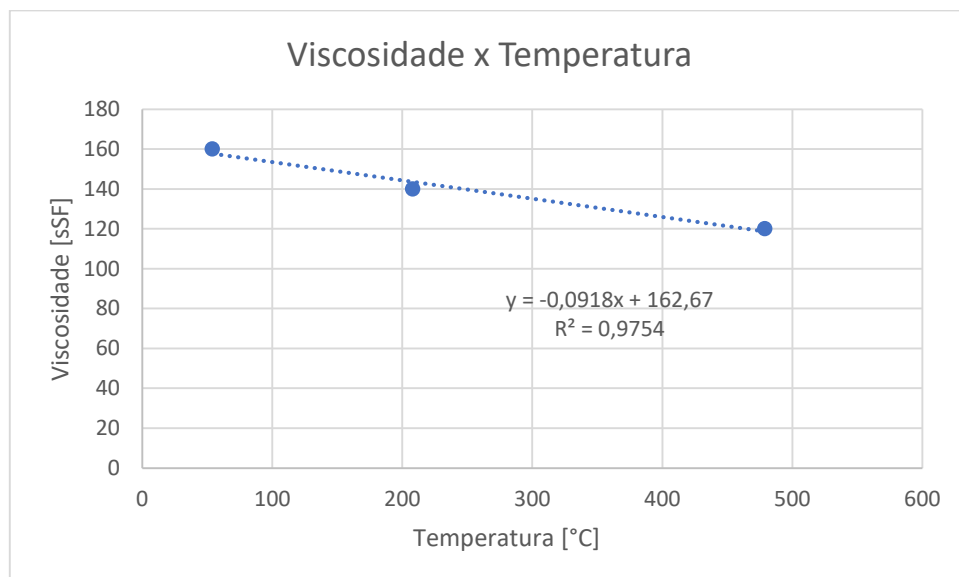
Fonte: Própria autora.

Conforme já citado, recomenda-se que os agregados devem apresentar índice de forma de valor não superior a 3,0 para a execução de pavimentos flexíveis com concreto asfáltico e desgaste Los Angeles inferior a 50%; dessa forma os agregados reciclados utilizados atendem a esses critérios.

6.3. LIGANTE ASFÁLTICO

Para verificar as propriedades do ligante asfáltico, utilizado nos corpos de prova, foram executados ensaios de penetração, viscosidade Saybolt Furol, e adesividade. No ensaio de penetração foi encontrado um valor médio de penetração igual a 62mm, comprovando assim a classificação do CAP como 50/70. Para determinar as temperaturas de aquecimento do CAP e dos agregados, bem como de compactação das misturas asfálticas foram realizados ensaios de viscosidade Saybolt Furol com três temperaturas diferentes. Dos referidos ensaios, realizados conforme NBR 14950 (ABNT, 2003), obteve-se a curva viscosidade versus temperatura conforme apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Curva de viscosidade do CAP 50/70.



Fonte: Própria autora.

Diante da curva de viscosidade versus temperatura (Figura 19) e da norma do ensaio Marshall, DNER ME 043 (DNER, 1995), que estabelece que o CAP utilizado

na mistura deve ser aquecido a uma temperatura que corresponda a uma viscosidade de 85 ± 10 SSF, ao passo que para a compactação a mistura asfáltica deve estar a uma temperatura que corresponda a uma viscosidade de 140 ± 15 SSF, determinou-se, a partir da equação da curva de regressão, as temperaturas de aquecimento e compactação iguais a 155 e 150 graus Celsius, respectivamente.

Para avaliar a capacidade de adesão do material betuminoso aos agregados foram realizados ensaios de adesividade com os agregados graúdos. O resultado do ensaio realizado com o agregado natural britado foi considerado satisfatório, observado que visualmente não houve deslocamento da película betuminosa que recobria o agregado (Figura 20.b) quando comparado com ao início do ensaio (Figura 20.a).

Figura 20 – ensaio de adesividade de CAP 50/70 com agregado natural britado.



a) CAP e agregado natural no início do ensaio



b) CAP e agregado natural no final do ensaio

Fonte: Própria autora.

Contudo, quanto ao ensaio de adesividade realizado com o agregado reciclado foram observadas falhas na superfície do agregado que deveria estar totalmente recoberta pelo material betuminoso, já no início do ensaio (Figura 21.a); essas falhas foram mantidas ao final do procedimento de ensaio (Figura 21.b), nesse caso seria ideal a utilização de um melhorador de adesividade, como a cal hidratada, por

exemplo. Segundo (BERNUCCI, et al., 2008), o descolamento e a não adesividade da película de asfalto são função da composição e da estrutura dos minerais no agregado, entre outros fatores.

Figura 21 – ensaio de adesividade de CAP 50/70 com agregado reciclado.



a) CAP e agregado reciclado no início do ensaio



b) CAP e agregado reciclado no final do ensaio

Fonte: Própria autora.

6.4. DOSAGEM DAS MISTURAS ASFÁLTICAS

6.4.1. Misturas compostas totalmente por agregado natural britado

A composição granulométrica das misturas de concreto asfáltico estudadas, compostas somente por agregado natural britado, está apresentada na Tabela 8. Para que as misturas compostas totalmente de agregados naturais britados se enquadrassem na Faixa C da ES 031 (DNIT, 2006) foram empregados 16% de brita 1, 31% de brita 0 e 53% de areia artificial.

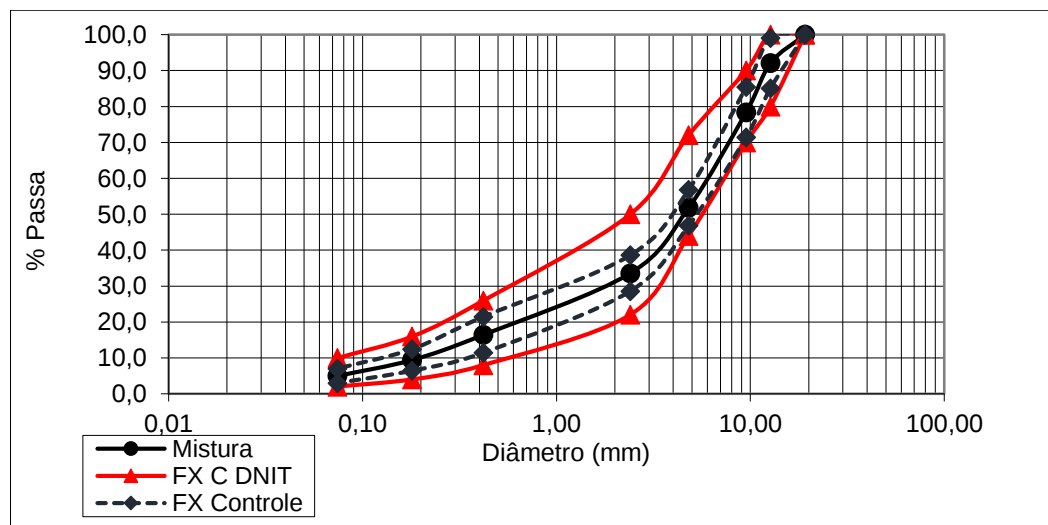
Tabela 8 - composição granulométrica das misturas asfálticas.

Peneiras		Brita 1 (16%)	Brita 0 (31%)	Areia Artificial (53%)	Faixa de Controle		Faixa C - DNIT			
(mm)	N °	% Passa	% Passa	% Passa	% mín	Mistura	% máx	% mín	% máx	Variação
19,10	3/4"	100,0	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100	100	7
12,70	1/2"	51,9	99,3	-	85,1	92,1	99,1	80	100	7
9,5	3/8"	4,9	79,3	100,0	71,4	78,4	85,4	70	90	7
4,8	Nº 4	0,8	8,5	92,6	46,8	51,8	56,8	44	72	5
2,4	Nº 8	0,6	4,6	60,4	28,6	33,6	38,6	22	50	5
0,42	Nº 40	0,5	3,1	29,1	11,5	16,5	21,5	8	26	5
0,18	No 80	0,4	2,1	16,4	6,4	9,4	12,4	4	16	3
0,075	Nº 200	0,2	1,3	8,5	3,0	5,0	7,0	2	10	2

Fonte: Própria autora.

A seguir, a Figura 22 apresenta a curva granulométrica das misturas estudadas, a faixa C do DNIT e as faixas de controle para aplicação.

Figura 22 – curva granulométrica das misturas asfálticas com 100% de agregado natural.



Fonte: Própria autora.

Para execução da dosagem ou mistura, conforme o método Marshal, a temperatura de aquecimento dos agregados deve estar em torno de 10 a 15 °C superior à temperatura do ligante asfáltico, não podendo exceder os 177 °C, como determinado na norma DNER ME 043 (DNER, 1995). Desse modo, os agregados naturais de todas as misturas foram acondicionados em estufa a uma temperatura de

165 °C por um período de 24 horas até serem inseridos na mistura. A execução do ensaio Marshall por compactação automática (Figura 23) foi realizado conforme orientações da norma técnica DNER ME 043 (DNER, 1995).

Figura 23 – Prensa utilizada para execução da compactação dos CP's do ensaio Marshall.



Fonte: Própria autora.

Diante da realização dos ensaios, obtiveram-se os dados necessários para determinação de parâmetros volumétricos tais como massa específica máxima teórica; massa específica aparente; volume de vazios (VV); vazios com betume (VCB); vazios do agregado mineral (VAM); e relação betume/vazios (RBV), dispostos na Tabela 9.

Tabela 9 – parâmetros volumétricos das misturas asfálticas com agregados totalmente naturais.

Parâmetro	Teor de ligante (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Massa específica máxima teórica (g/cm ³)	2,64	2,62	2,60	2,58	2,56
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,38	2,41	2,41	2,41	2,40
Volume de vazios (%)	10,00	8,00	8,00	6,00	5,00

Vazios com betume (%)	10,5	10,50	10,20	10,7	10,8
Vazios do agregado mineral (%)	20,3	19,50	21,00	19,2	15,5
Relação betume/vazios (%)	50,7	54,30	59,80	64,8	69,7

Fonte: Própria autora.

Os corpos de provas obtidos no ensaio (Figura 24), foram rompidos por meio de uma prensa mecânica e assim, a partir da leitura do equipamento obteve-se os dados de estabilidade Marshall — resistência à compressão diametral confinada—, e fluência — deslocamento (Tabela 10).

Figura 24 – corpos de prova moldados com 100% de agregado natural britado.



Fonte: Própria autora.

Tabela 10 – parâmetros volumétricos: estabilidade e fluência das misturas com agregado natural.

Parâmetro	Teor de ligante (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Estabilidade (kgf)	1183,0	1259,0	1292,4	1284,0	1281,3
Fluência (mm)	3,70	3,87	4,50	4,39	4,42

Fonte: Própria autora.

A fluência se relaciona à deformação vertical, ou deslocamento vertical, que se verifica no corpo de prova desde a submissão de carga de compressão até o momento em que começa a perder estabilidade, logo valores altos indicam uma mistura plástica, que pode sofrer exsudação ou trilhas de rodas; valores baixos contribuem para a fadiga do pavimento prejudicando a sua durabilidade (SOUZA et al., 2015).

Observando os dados de volume de vazios apresentados na Tabela 9, verificou-se uma discrepância entre os valores calculados, com base nas densidades máximas teóricas calculadas, e a faixa de valores estabelecida pela norma DNIT 031 (DNIT, 2006) que deve situar-se de 3 a 5%. Os altos valores determinados não condisseram com o esperado e indicam a impossibilidade de obter-se o valor ótimo de teor de ligante correspondente a 4% de volume de vazios, que é um dos critérios adotados. Desse modo, uma solução adotada para buscar corrigir o problema foi realizar ensaio de determinação da densidade máxima de misturas asfálticas com o método denominado de “*rice test*”, método que vem sendo utilizado em substituição ao emprego do cálculo da densidade máxima das misturas asfálticas utilizando as massas específicas reais dos materiais que as compõem. O método “*rice test*” permite determinar a densidade (peso específico) máxima ou real de misturas betuminosas sob condições específicas de vácuo, de forma experimental. O ensaio de “*rice test*” foi realizado experimentalmente para os teores intermediários de CAP, ou seja, 5%, 5,5% e 6% (Figuras 25 e 26), a fim de obter os dados de volume de vazios de forma experimental e estabelecer uma comparação com os valores obtidos por meio do cálculo.

Figura 25 – Amostras preparadas para a execução do “rice test”.



Fonte: Própria autora.

Figura 26 – Execução do ensaio “rice test”.

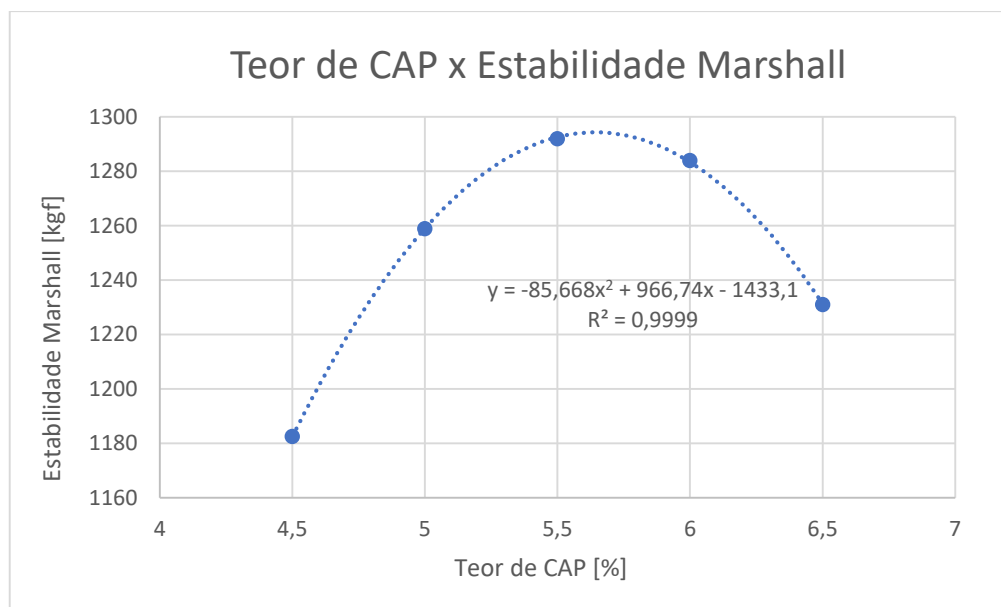


Fonte: Própria autora.

Assim, diante dos dados e dos parâmetros determinados foi possível traçar alguns gráficos e analisar as propriedades das misturas asfálticas obtidas (Figuras 27, 28 e 29).

Após o rompimento dos CP's, os dados obtidos para a estabilidade das misturas asfálticas, compostas apenas por agregados naturais, conferiram ao gráfico (Figura 27) um coeficiente de correlação bastante satisfatório e, portanto, uma linha de tendência coerente com o esperado para esse gráfico, com a forma de uma parábola com a concavidade voltada para baixo. O Teor ótimo de ligante, correspondente à máxima estabilidade Marshall, apresentou um valor de 5,6%.

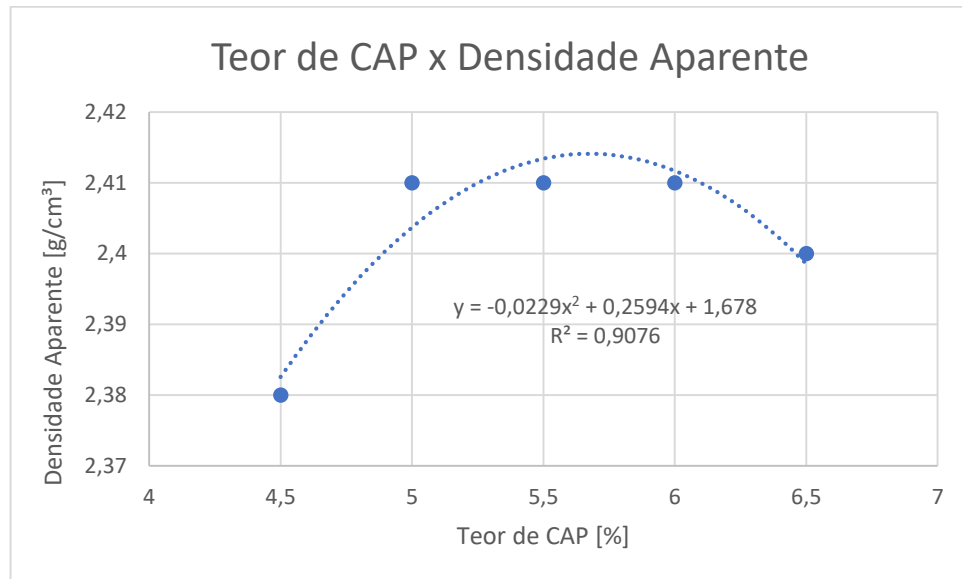
Figura 27 – Gráfico Teor de CAP x Estabilidade Marshall – agregado natural britado.



Fonte: Própria autora.

Da relação entre o percentual de CAP e as densidades aparentes (Figura 28), verifica-se que os valores de densidade aparente para os teores intermediários apresentaram valores semelhantes e, apesar desse fato, o ajuste da linha de tendência apresentou uma boa correlação, sendo que a curva obtida se apresentou dentro dos padrões esperados, com a forma de uma parábola com a concavidade voltada para baixo. O Teor ótimo de ligante, com base na máxima densidade aparente, apresentou um valor igual a 5,7%.

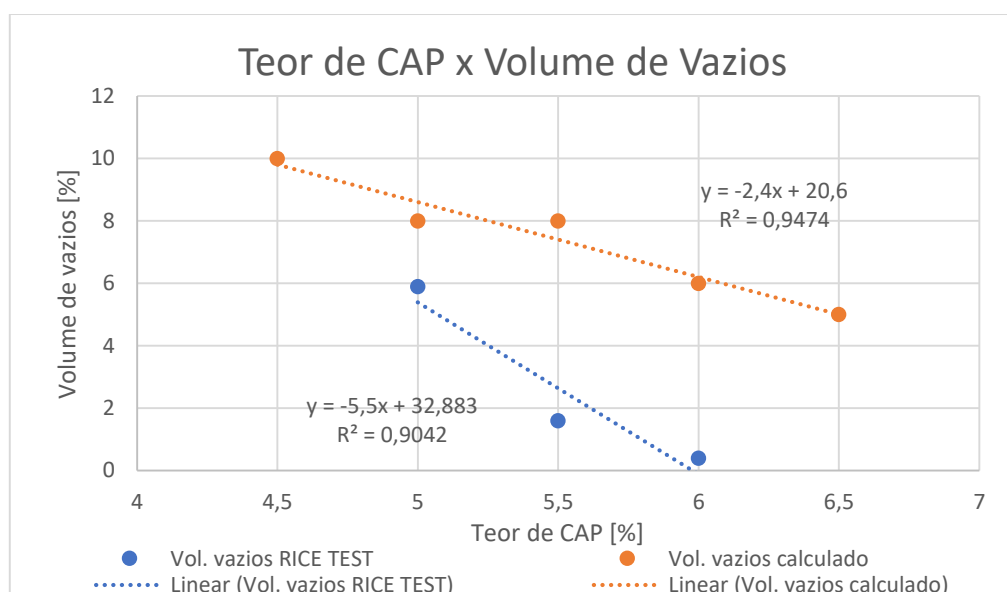
Figura 28 – Gráfico Teor de CAP x Densidade Aparente - agregado natural britado.



Fonte: Própria autora.

Com os valores de volume de vazios calculados com base nas massas específicas dos materiais e com base nos resultados do ensaio de “rice test”, foi possível traçar as curvas apresentadas na Figura 29. Observando a Figura 29 verifica-se uma grande variação nos valores de índices de vazios calculados pelos dois métodos. O teor ótimo de ligante com base no volume de vazios igual a 4% apresentou um valor igual a 5,3 %.

Figura 29 – Gráfico Teor de CAP x Volume de vazios - agregado natural britado.



Fonte: Própria autora.

6.4.2. Misturas asfálticas compostas com 80% de agregados naturais britados e 20% de agregados reciclados

Para compor as misturas asfálticas executadas com adição de 20% de agregados reciclados, foram guardadas as devidas proporções tanto para agregados graúdos quanto para agregados miúdos, e dessa forma, para que se enquadrassem ainda na Faixa C da ES 031 (DNIT, 2006) foram empregados 13% de brita 1 natural, 24% de brita 0 natural, 43% de areia artificial natural, 3% de brita 1 reciclada, 7% de brita 0 reciclada, e 10% de areia reciclada. A composição dos agregados pode ser observada na Tabela 11:

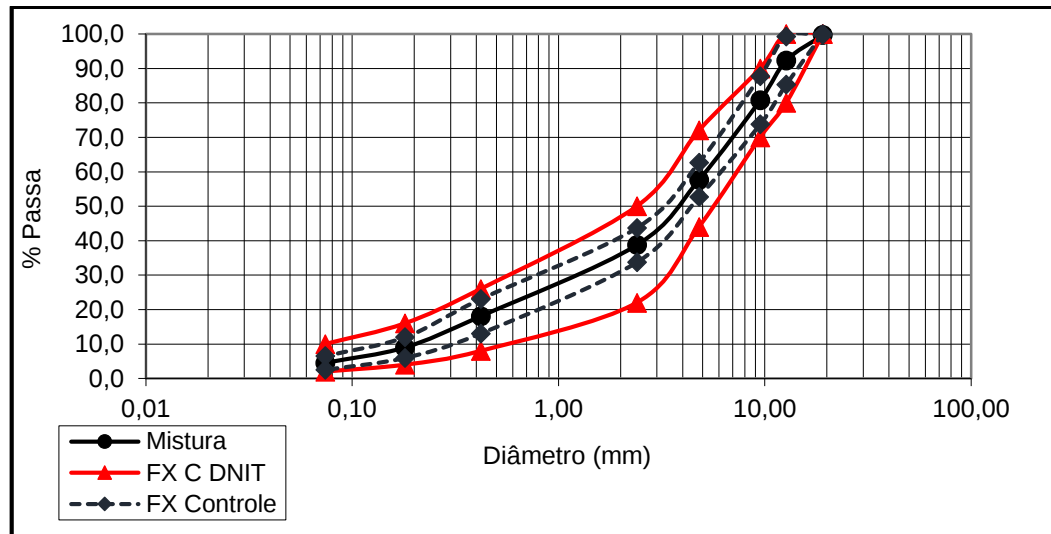
Tabela 11 - composição granulométrica das misturas asfálticas com 20% de agregado reciclado.

Peneiras	Brita 1 - NAT (13%)	Brita 0 - NAT (24%)	Areia Artificial - NAT (43%)	Brita 1 - REC (3%)	Brita 0 - REC (7%)	Areia Artificial - REC (10%)	Faixa de Controle			Faixa C - DNIT		
(mm)	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% mín	Mistura	% máx	% mín	% máx	Variação
19,10	100,0	100,0	-	89,5	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100	100	7
12,70	51,9	99,3	-	58,9	99,9	100,0	85,3	92,3	99,3	80	100	7
9,5	4,9	79,3	100,0	43,5	97,8	99,9	73,8	80,8	87,8	70	90	7
4,8	0,8	8,5	92,6	26,2	74,5	97,3	52,7	57,7	62,7	44	72	5
2,4	0,6	4,6	60,4	17,2	48,9	76,0	33,7	38,7	43,7	22	50	5
0,42	0,5	3,1	29,1	8,6	22,0	29,3	13,1	18,1	23,1	8	26	5
0,18	0,4	2,1	16,4	3,7	6,3	7,8	6,0	9,0	12,0	4	16	3
0,075	0,2	1,3	8,5	1,6	1,9	2,8	2,5	4,5	6,5	2	10	2

Fonte: Própria autora.

A Figura 30 apresenta a curva granulométrica das misturas dosadas com adição de 20% de agregado reciclado, a faixa C do DNIT e as faixas de controle para aplicação.

Figura 30 – curva granulométrica das misturas asfálticas com 20% de agregado reciclado.



Fonte: Própria autora.

Após compactação dos corpos de prova foi possível observar visualmente algumas partículas de agregados reciclados na superfície dos corpos de prova (Figura 31) possivelmente em função da adesividade do agregado reciclado ao ligante betuminoso não ter sido tão satisfatória.

Figura 31 – visualização dos CP's moldados com 20% de agregado reciclado.



Fonte: Própria autora.

A partir da realização dos ensaios foram obtidos os dados necessários para determinação dos parâmetros volumétricos de massa específica máxima teórica;

massa específica aparente; volume de vazios (VV); vazios com betume (VCB); vazios do agregado mineral (VAM); e relação betume/vazios (RBV), conforme apresentado na Tabela 12.

Tabela 12 – parâmetros volumétricos das misturas asfálticas com 20% de agregado reciclado.

Parâmetro	Teor de ligante (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Massa específica máxima teórica (g/cm ³)	2,62	2,60	2,58	2,56	2,54
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,31	2,34	2,36	2,35	2,38
Volume de vazios (%)	13,10	12,50	11,36	10,06	14,05
Vazios com betume (%)	10,00	11,20	12,07	13,50	13,90
Vazios do agregado mineral (%)	23,20	23,60	23,43	24,01	27,95
Relação betume/vazios (%)	43,80	48,10	54,94	58,00	61,76

Fonte: Própria autora.

Após rompimento, e a partir da leitura dos dados da prensa mecânica utilizada nos ensaios (Figura 32), foram determinados os dados de estabilidade Marshall, e fluência (Tabela 13).

Figura 32 – prensa mecânica utilizada no rompimento dos CP's.



Fonte: Própria autora.

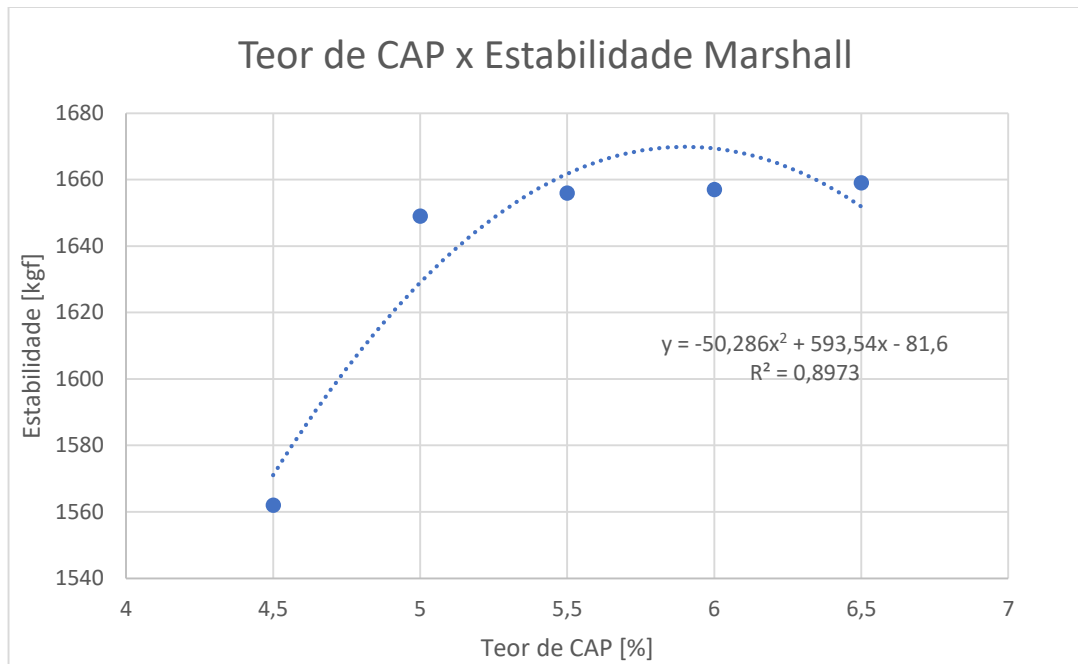
Tabela 13 – Parâmetros volumétricos: estabilidade e fluência misturas com 20% de agregado reciclado.

Parâmetro	Teor de ligante (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Estabilidade (kgf)	1562	1649	1656	1657	1659
Fluência (mm)	4,40	4,30	4,37	4,21	4,81

Fonte: Própria autora.

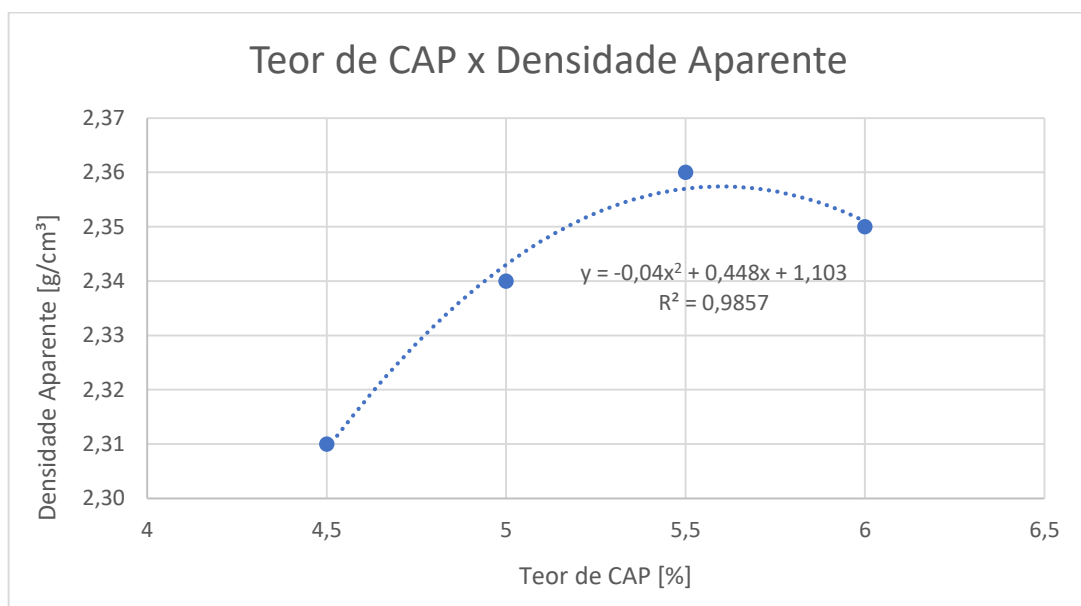
Assim, diante dos dados e dos parâmetros determinados foi possível traçar os gráficos e analisar as propriedades das misturas asfálticas produzidas. Ao analisar-se o gráfico do teor de ligante versus estabilidade Marshall (Figura 33), primeiramente nota-se que com relação aos CP's moldados totalmente com agregados naturais, os corpos de provas com adição de 20% de agregado reciclado tiveram valores de estabilidade superiores em mais de 28% àqueles primeiros e, ainda que os dados não apontem para uma parábola perfeita o coeficiente de correlação da regressão polinomial mostrou-se satisfatório. O teor ótimo de ligante correspondente à máxima estabilidade apresentou um valor igual a 5,9%.

Figura 33 – Gráfico Teor de CAP x Estabilidade Marshall de misturas com 20% de agregado reciclado.



A Figura 34 apresenta a relação entre o teor de CAP e a densidade aparente das misturas asfálticas produzidas com a adição de 20% de agregados reciclados. Observando a mesma verifica-se o formato parabólico da curva e um bom coeficiente de correlação – R^2 . O teor ótimo de ligante, correspondente à máxima densidade aparente, apresentou um valor igual a 5,6%.

Figura 34 – Gráfico Teor de CAP x Densidade Aparente de misturas com 20% de agregado reciclado.

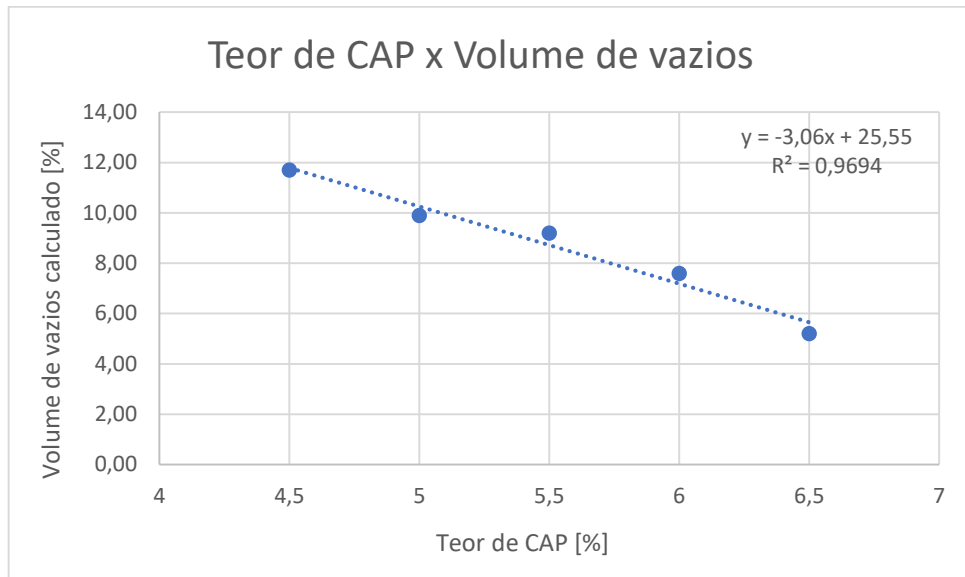


Fonte: Própria autora.

A Figura 35 apresenta a relação obtida entre o percentual de CAP e o volume de vazios obtido com base na densidade máxima teórica calculada da mistura com 20% de agregados reciclados. Assim como os volumes de vazios da mistura com composta somente com agregados naturais britados, os valores apresentaram-se acima dos valores especificados por norma. Entretanto para as dosagens com adição de agregados reciclados, os valores da densidade máxima medida das misturas asfálticas por meio do “*rice test*” não apresentaram resultados satisfatórios, inferiores aos valores de densidade aparente dos corpos de prova, provavelmente em função da formação de grumos nas misturas e incorporação de ar nas amostras, devido ao agregado reciclado apresentar um comportamento distinto em relação ao agregado natural e necessitar de um tratamento diferenciado na execução desse método de ensaio. Desta forma, não foi possível obter valores esperados de volume de vazios para conseguir determinar o teor ótimo de ligante da mistura, ou seja, entre 3 e 5%.

O percentual mais elevado de vazios encontrado implica no entendimento de que a estrutura seja mais porosa, definida por uma maior área de superfície, requisitando assim maior porcentagem de ligante betuminoso. Todavia, em observância dessa análise e das outras propriedades físicas e mecânicas da mistura asfáltica, esse percentual de ligante exigido pela mistura em questão não seria tão mais superior ficando em torno de 5,8 % de teor ótimo de CAP para as misturas com adição de 20% de agregado reciclado, contra 5,7 % de teor ótimo de ligante das misturas totalmente compostas por agregados naturais — percentuais dados pela média dos teores ótimos de CAP, correspondentes à máxima estabilidade Marshall e máxima densidade aparente, determinados pelos gráficos.

Figura 35 – Gráfico Teor de CAP x Volume de vazios de misturas com 20% de agregado reciclado.



Fonte: Própria autora.

6.4.3. Misturas compostas com 70 % de agregado natural britado e 30% de agregado reciclado

Nas misturas asfálticas executadas com a substituição de 30% do total de agregado natural britado por agregado reciclado, mantidas as devidas proporções para todos os agregados, e respeitando o enquadramento na Faixa C da ES 031 (DNIT, 2006) foram empregados 11% de brita 1 natural, 22% de brita 0 natural, 37% de areia artificial natural, 5% de brita 1 reciclada, 9% de brita 0 reciclada, e 16% de areia reciclada. A composição dos agregados pode ser observada na Tabela 14:

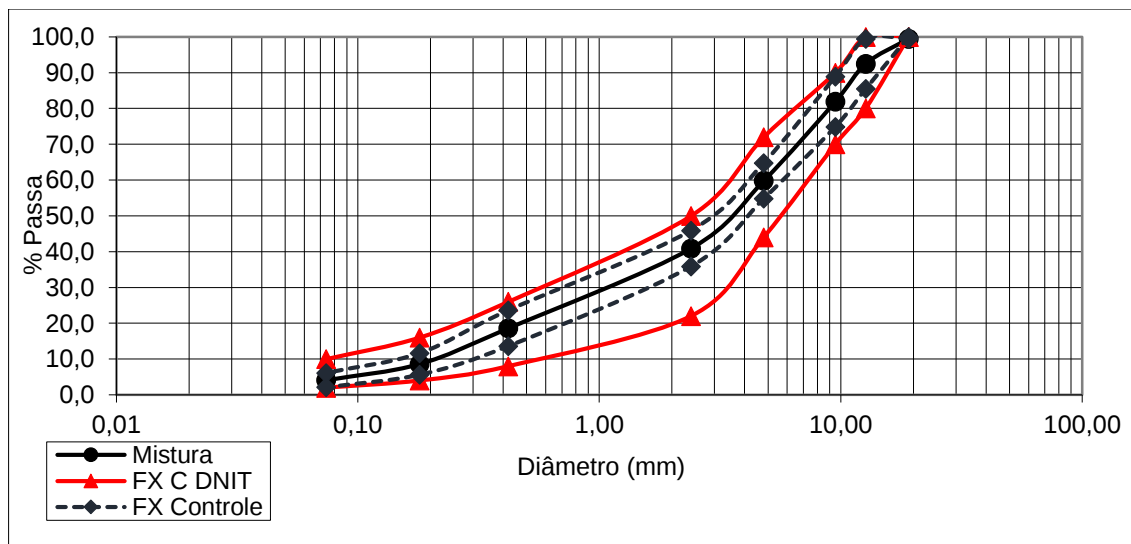
Tabela 14 - composição granulométrica das misturas asfálticas com 30% de agregado reciclado.

Peneiras	Brita 1 - NAT (11%)	Brita 0 - NAT (22%)	Areia Artificial - NAT (37%)	Brita 1 - REC (5%)	Brita 0 - REC (9%)	Areia Artificial - REC (16%)	Faixa de Controle			Faixa C - DNIT			
(mm)	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% Passa	% mín	Mistura	% máx	% mín	% máx		Variação
19,10	100,0	100,0	-	89,5	100,0	-	100,0	100,0	100,0	100	100	✓	7
12,70	51,9	99,3	-	58,9	99,9	100,0	85,5	92,5	99,5	80	100	✓	7
9,5	4,9	79,3	100,0	43,5	97,8	99,9	74,9	81,9	88,9	70	90	✓	7
4,8	0,8	8,5	92,6	26,2	74,5	97,3	54,8	59,8	64,8	44	72	✓	5
2,4	0,6	4,6	60,4	17,2	48,9	76,0	35,9	40,9	45,9	22	50	✓	5
0,42	0,5	3,1	29,1	8,6	22,0	29,3	13,6	18,6	23,6	8	26	✓	5
0,18	0,4	2,1	16,4	3,7	6,3	7,8	5,6	8,6	11,6	4	16	✓	3
0,075	0,2	1,3	8,5	1,6	1,9	2,8	2,1	4,1	6,1	2	10	✓	2

Fonte: Própria autora.

A Figura 36 apresenta a curva granulométrica das misturas analisadas com adição de 30% de agregado reciclado sobre o valor total de agregado, a faixa C do DNIT e as faixas de controle para aplicação.

Figura 36 – curva granulométrica das misturas asfálticas com 30% de agregado reciclado.



Fonte: Própria autora

A partir da realização dos ensaios foram obtidos os dados necessários para determinação de parâmetros volumétricos tais como massa específica máxima teórica; massa específica aparente; volume de vazios (VV); vazios com betume (VCB);

vazios do agregado mineral (VAM); e relação betume/vazios (RBV), dispostos na Tabela 15.

Tabela 15 – parâmetros volumétricos das misturas asfálticas com 30% de agregado reciclado.

Parâmetro	Teor de ligante (%)				
	5,0	5,5	6,0	6,5	7,0
Massa específica máxima teórica (g/cm ³)	2,59	2,57	2,55	2,53	2,51
Massa específica aparente (g/cm ³)	2,28	2,31	2,32	2,32	2,32
Volume de vazios (%)	12,10	10,54	9,40	8,56	7,70
Vazios com betume (%)	11,20	12,40	13,59	14,74	15,90
Vazios do agregado mineral (%)	23,30	22,93	22,99	23,30	23,60
Relação betume/vazios (%)	48,00	54,06	59,16	63,27	67,38

Fonte: Própria autora

Assim como para os corpos de prova moldados apenas por agregado natural e com a adição de 20 %, os CP's moldados com 30% de agregados reciclados foram mantidos em um banho termostático com uma temperatura de 60 °C (Figura 37), por um período de 30 minutos antes da ruptura. A Tabela 16 apresenta os dados obtidos da ruptura dos corpos de prova.

Figura 37 – Corpos de prova da mistura asfáltica com 30% de agregado reciclado submersos.



Fonte: Própria autora.

Os dados de estabilidade e fluência obtidos pela leitura da prensa podem ser observados na tabela abaixo (Tabela 16):

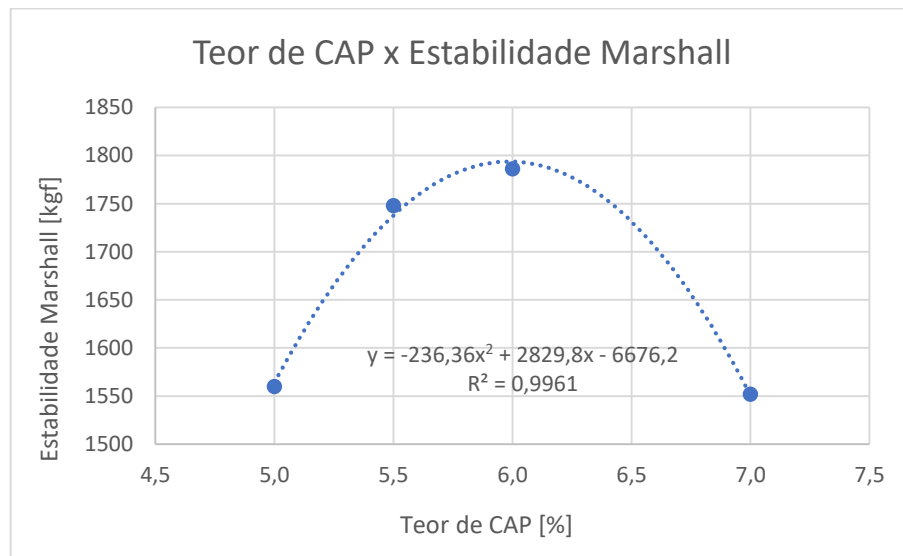
Tabela 16 – parâmetros volumétricos: estabilidade e fluência misturas com 30% de agregado reciclado.

Parâmetro	Teor de ligante (%)				
	4,5	5,0	5,5	6,0	6,5
Estabilidade (kgf)	1560	1748	1786	1599	1552
Fluência (mm)	4,23	4,15	4,34	4,02	4,35

Fonte: Própria autora

A partir dos dados obtidos do ensaio Marshall foram traçadas as curvas a fim de analisar as propriedades mistura asfáltica produzida. Ao analisar-se o gráfico Teor de CAP x Estabilidade Marshall (Figura 38), observa-se que nas dosagens em que houve a substituição de 30% do total de agregado natural por agregado reciclado, os valores de estabilidade foram aumentados em mais de 25% com relação à composição das dosagens feitas apenas com agregado natural. O teor ótimo de ligante correspondente à máxima estabilidade Marshall é igual a 6,0%.

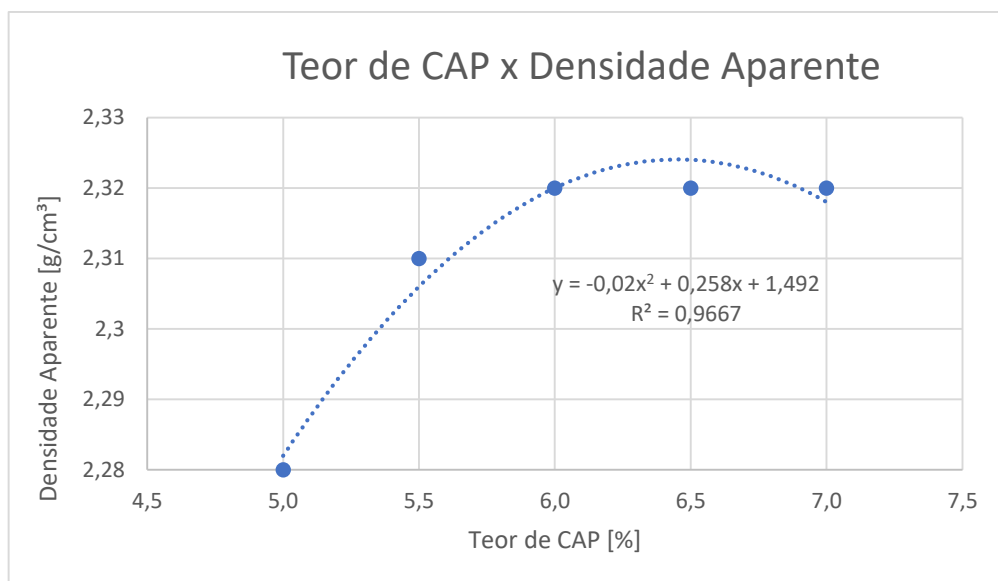
Figura 38 – Gráfico Teor de CAP x Estabilidade Marshall de misturas com 30% de agregado reciclado.



Fonte: Própria autora

A Figura 39 apresenta a curva Teor de CAP x Densidade Aparente. A curva apresentou o formato parabólico típico e uma boa correlação da regressão. O teor ótimo de ligante determinado, correspondente à máxima densidade aparente, foi igual a 6,5%.

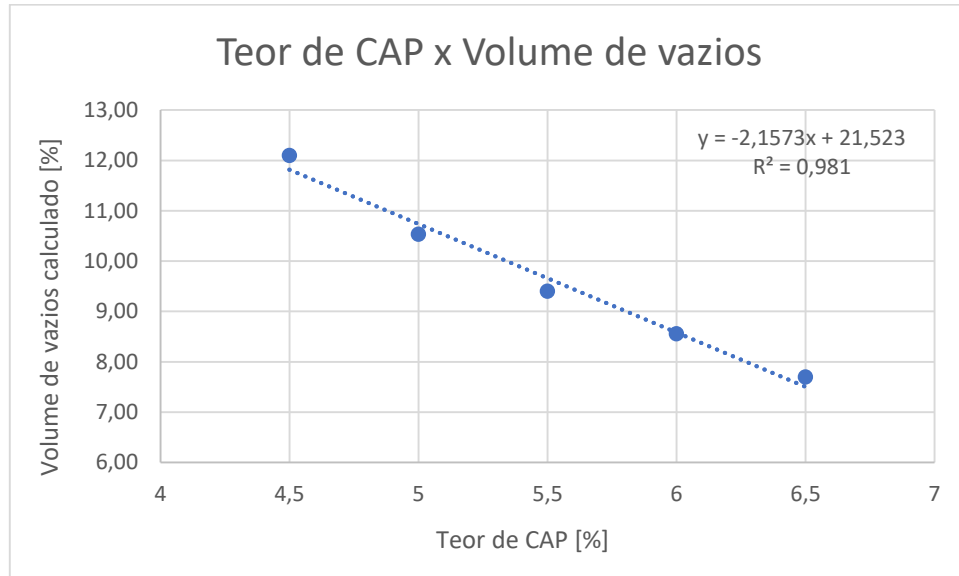
Figura 39 – Gráfico Teor de CAP x Densidade Aparente de misturas com 30% de agregado reciclado.



Fonte: Própria autora

Quanto ao volume de vazios, os valores obtidos com base na densidade máxima teórica calculada não se enquadraram nos limites propostos pela norma DNIT 031 (DNIT, 2006), ou seja, entre 3 e 5%, conforme apresentado na Figura 40.

Figura 40 – Gráfico Teor de CAP x Volume de vazios de misturas com 30% de agregado reciclado.



Fonte: Própria autora

Diante do exposto, e considerando a máxima estabilidade e máxima densidade aparente apresentada pelos gráficos calcula-se que o teor ótimo de CAP médio exigido para as misturas com adição de 30% de agregado reciclado, representa o valor de 6,3% a passo que o teor ótimo de ligante das misturas totalmente compostas por agregados naturais corresponde a 5,7%.

7. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

No presente capítulo estão apresentadas as conclusões obtidas no trabalho e as sugestões para a realização de pesquisas futuras.

7.1. CONCLUSÕES

Os agregados naturais estudados, provenientes da britagem de micaxisto, apresentaram características e propriedades adequadas para o uso em pavimentação. Embora os grãos tenham apresentado lamelaridade elevada, o índice de forma atendeu ao limite estabelecido em norma.

Os agregados reciclados estudados, produzidos na região metropolitana de Goiânia, apresentaram características e propriedades peculiares, um teor de finos elevado nos agregados graúdos e uma adesividade ao ligante betuminoso não satisfatória sem a adição de melhoradores de adesividade (dope). Porém, a pequena proporção desses agregados utilizados nas misturas levou à produção de corpos de prova bastante coesos. Em função da grande variabilidade que os agregados reciclados podem possuir devido à grande variabilidade dos resíduos utilizados para sua produção, seria interessante que nas usinas recicladoras fossem feitas a triagem e separação dos resíduos constituídos essencialmente de concreto, argamassas, cerâmicos e outros tipos e se procurasse estabelecer uma proporção desses resíduos na produção dos agregados, a fim de se criar uma certa padronização dos agregados reciclados produzidos.

O cimento asfáltico de petróleo – CAP, proveniente de uma distribuidora de asfalto situada na região metropolitana de Goiânia, utilizado no presente trabalho, apresentou uma consistência adequada para a classe da qual foi produzido, ou seja, do tipo 50/70 e faixas de viscosidade de trabalho com temperaturas variando entre 150 e 155 °C. O controle de temperatura e consequentemente de viscosidade é fundamental para a garantia das propriedades do ligante e da mistura asfáltica produzida.

O concreto asfáltico produzido com o uso dos agregados naturais atendeu aos valores especificados por norma de resistência ou estabilidade Marshall e volume de

vazios. A relação betume vazios (RBV) apresentou valores fora da faixa especificada por norma, quando determinados com base na densidade máxima teórica calculada. A determinação da densidade máxima medida com o emprego do rice test demonstrou ser uma solução para a adequação desses valores aos estabelecidos por norma.

Os concretos asfálticos produzidos com a adição de 20 e 30% de agregados reciclados apresentaram uma certa variação de trabalhabilidade, uma pequena dificuldade de mistura e homogeneização, bem como pequeno aumento de volume, entretanto, sem prejuízo no processo de compactação dos corpos de prova. Os valores de resistência ou estabilidade Marshall atenderam aos valores especificados por norma, apresentando valores majorados devido aos finos presentes em sua constituição, devido aos finos presentes nos agregados reciclados, uma vez que não foi utilizado o fíler como material ativo no projeto da mistura com agregados naturais.

A determinação do volume de vazios das dosagens com adição de agregados reciclados apresentou valores fora do padrão da norma 031/2006 – ES, devido à dificuldade de adequação do cálculo da densidade máxima teórica e do fato do ensaio de rice test ter indicado a necessidade de um tratamento diferenciado para as misturas asfálticas com a adição de agregados reciclados, em função da porosidade e do maior percentual de finos nestas misturas.

A variação do teor ótimo de CAP para as três misturas ou dosagens estudadas, com base nos valores médios correspondentes à máxima estabilidade Marshal e à máxima densidade aparente, apresentou valores inferiores a 1%, sendo uma variação relativamente baixa, o que indicaria a viabilidade da substituição dos agregados naturais britados pelos reciclados nas proporções de 20 e 30% uma vez que todas exigências da norma 031/2006 – ES sejam atendidas. Isso levando em conta os benefícios que seriam causados ao meio ambiente decorrentes da utilização dos agregados reciclados.

Observa-se a necessidade da realização de mais estudos e ensaios referentes à utilização de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em concretos asfálticos, a fim de corroborar com a viabilidade técnica da sua aplicação e possibilitar a elaboração de normas técnicas aplicadas a esse uso.

7.2. SUGESTÕES PARA PESQUISAS FUTURAS

A seguir serão apresentadas algumas sugestões para pesquisas futuras, com base nos resultados do presente trabalho.

1. Estudar a influência dos métodos de determinação da densidade máxima teórica das misturas asfálticas, por meio de cálculo e por meio do rice test, no valor do volume de vazios e da relação betume vazios, para diversos tipos de misturas.
2. Estudar a influência da adição de diferentes granulometrias de agregados reciclados às misturas asfálticas.
3. Realizar estudos para avaliar o custo benefício da adição de agregados reciclados em concretos asfálticos.

REFERÊNCIAS

AMBROZEWICZ, Paulo H. L. Materiais de Construção. São Paulo: Pini, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 10.004: Resíduos sólidos -Classificação. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <<https://analiticaqmcresiduos.paginas.ufsc.br/files/2014/07/Nbr-10004-2004-Classificacao-De-Residuos-Solidos.pdf>>. Acesso em: 15 de fev de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 14950: materiais betuminosos: determinação da viscosidade Saybolt Furol. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004. Disponível em: <http://www.areiavitoria.com.br/download/NBR%2015115.pdf>>. Acesso em: 10 jun 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 6576: Materiais asfálticos - Determinação da penetração. Rio de Janeiro, 2007. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/65612316/nbr-6576-2007-ensaio-materiais-asfalticos-penetracao>>. Acesso em 05 de mar de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 7211: Agregados para concreto - especificação. Rio de Janeiro, 2009. Disponível em: <<http://areiaovitoria.com.br/download/nbr%207211.pdf>>. Acesso em: 01 de mar de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9776: Agregados: Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987. Disponível em: <<http://www.brascopper.ind.br/dgq/Israel/Colet%C3%A2nea%20de%20Normas/NBR%2009776%20-%201987%20-%20Agregados%20-%20Determina%C3%A7%C3%A3o%20da%20Massa%20Espec%C3%ADfica%20por%20meio%20do%20Frasco%20Chapman.pdf>>. Acesso em 01 de mar de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR NM ISO 3310: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação - Parte "I Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico. Rio de Janeiro, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. Tabela ABRECON - Associação Brasileira

para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição, 2017. Disponível em: <https://abrecon.org.br/wp-content/uploads/abrafati_abrecon.pdf>. Acesso em: 15 de fev de 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. Relatório da Pesquisa Setorial 2014/2015. São Paulo, 2015. Disponível em: <<https://www.passeidireto.com/arquivo/36611356/abrecon-2015>>. Acesso em: 22 mai. 2021.

BARDINI, Vivian S. dos S.; KLINSKY, Luis M. G.; FERNANDES JUNIOR, José L. A importância do fíler para o bom desempenho de misturas asfálticas. Departamento de Transportes, Escola de Engenharia de São Carlos, USP, 2009. Disponível em: <[http://fipai.org.br/Minerva%2007\(01\)%2009.pdf](http://fipai.org.br/Minerva%2007(01)%2009.pdf)>. Acesso em: 05 de mar de 2021.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M.; CERATTI, J. A.; SOARES, J. B. Pavimentação asfáltica: formação básica para engenheiros. 1. ed. Rio de Janeiro: PETROBRAS: ABEDA, 2008. p.25-26. Disponível em: <<https://www.ufjf.br/pavimentacao/files/2018/03/Cap-2-Ligantes-asf%a1ticos.pdf>> Acesso em 17 de fev de 2021.

BOEIRA, Fernando D. Estudo do comportamento de concretos asfálticos com diferentes tipos de agregados e cales. Santa Maria, 2014. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/16796/DIS_PPGEC_2014_BOEIRA_FERNANDO.pdf?sequence=1>. Acesso em: 05 de mar de 2021.

CARNEIRO, Alex P.; BRUM, Irineu A. S. de; Silva, José C. da. Reciclagem de Entulho para a produção de materiais de construção: Projeto Entulho Bom. Salvador: Editora UFBA, 142-186, 2001. Disponível em: <<https://pt.slideshare.net/raphaelcava/livro-entulho-bom>>. Acesso em: 18 de fev de 2021.

COELHO, Johnny, et al. Asfalto ambientalmente correto: Uma nova tendência de mercado. Blumenau, 2011. XXXIX Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Disponível em: <<http://www.abenge.org.br/cobenge/arquivos/8/sexoestec/art1889.pdf>>. Acesso em: 25 de fev de 2021.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Resolução nº 307, de 05 de julho de 2002 - CONAMA. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=307>>. Acesso em: 12 de fev de 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 043/1995 – Misturas Betuminosas a quente – ensaio Marshall. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-EM 367/97 (1997). Material de enchimento para misturas betuminosas. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, 1997. DNER-PRO 120/97 – Coleta de amostras de agregados. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro – RJ, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER, 1998. DNER-ME 083/98 - Agregados - análise granulométrica. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro – RJ, 5p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 081/98. Agregados - determinação da absorção e da densidade de agregado graúdo. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro – RJ, 6p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 084/95. Agregado miúdo - determinação de densidade real. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro – RJ, 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM. DNER-ME 078/94. Agregado graúdo - adesividade a ligante betuminoso. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro – RJ, 3p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 427/2020-ME. Pavimentação – Misturas asfálticas – Determinação da densidade relativa máxima medida e da massa específica máxima medida em amostras não compactadas. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, Brasília – DF, 9p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 425/2020-ME. Pavimentação – Agregado – Determinação do índice de forma com paquímetro. Departamento Nacional de Estradas de Rodagem, Rio de Janeiro – RJ, 7p.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 031/2006 - ES: Pavimentos Flexíveis – Concreto Asfáltico - Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: <http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/DNIT031_2006_ES.pdf>. Acesso em: 28 de fev de 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 155/2010-ME: Material asfáltico – Determinação da penetração – Método de ensaio. Rio de Janeiro: DNIT, 2010b. Disponível em: <https://newroads.com.br/wp-content/uploads/2018/01/dnit155_2010_me.pdf>. Acesso: 06 de mar de 2021.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES. DNIT 178/2018 – PRO. Pavimentação asfáltica - Preparação de corpos de prova para

ensaios mecânicos usando o compactador giratório Superpave ou o Marshall – Procedimento. Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes, 2018. Disponível em: <https://www.gov.br/dnit/pt-br/assuntos/planejamento-e-pesquisa/ipr/coletanea-de-normas/coletanea-de-normas/procedimento-pro/dnit178_2018_pro.pdf>. Acesso em: 08 de fev de 2021.

FARIAS M. M.; PALMEIRA, E. M., Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência para Construção Civil, IBRACON 2007, v.01, p.481 – 503, Ed. Ipsis, São Paulo, 2007.

GÓNGORA, I. A. G. (2011). Utilização de Geossintéticos como Reforço de Estradas não Pavimentadas: Influência do Tipo de Reforço e do Material de Aterro. Dissertação de Mestrado, Publicação G.TM-190/11, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília. Brasília - DF. 76p.

LA SERNA; H. A.; REZENDE, M. M. Agregados para a construção civil. Brasília: Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), 2011. Disponível em: <<http://www.anepac.org.br>>. Acesso de 27 de fev de 2021.

LEVY, S.M. Reciclagem do entulho da construção civil, para utilização com agregados para argamassas e concretos. São Paulo, 1997^a. 147p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

MARQUES NETO, José da Costa. Gestão dos Resíduos de Construção e Demolição no Brasil. São Carlos: Rima, 2005. 152 p.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. Concreto: microestrutura, propriedades e materiais. 3. ed. São Paulo: Ibracon - Instituto Brasileiro de Concreto, 2008. 674p. 2008.

MIRANDA, Leonardo Fagundes Rosemback; ANGULO, Sérgio Cirelli; CARELI, Élcio Duduchi. A reciclagem de resíduos de construção civil no Brasil: 1986 - 2008. In: Ambiente Construído. v. 9. n. 1. p. 57-71. Porto Alegre, 2009.

NASCIMENTO, Amanda Cristina Gonçalves do; NETO, Edgar de Castro Tôres; GOUVEIA, Lorrana Almeida; OLIVEIRA, João Carlos de; Aplicação de resíduos de construção e demolição - RCD da região metropolitana de Goiânia em concreto asfáltico. Programa Institucional de Bolsas de Iniciação em Desenvolvimento Tecnológico e Inovação (PIBITI), 2018.

OLIVEIRA, Jardel A. de; CABRAL, Antonio E.B.; BRANCO, Verônica T.F. Castelo; BARROSO, Suelly H.A. Estudo da reutilização de resíduos de construção e demolição como agregado em misturas asfálticas. IV Simpósio Internacional de Avaliação de Pavimentos e Projetos de Reforço, Fortaleza – CE, 2009.

OLIVEIRA, Maria E. D. de; SALES, Raquel J. de M.; OLIVEIRA, Lúcia A. S. de; *et al.* Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE. Engenharia Sanitaria e Ambiental, v. 16, n. 3, p. 219–224, 2011. Disponível em:

<https://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1413-41522011000300003>. Acesso em: 25 fev. 2021.

PINTO, T. P.; GONZÁLES, J. L. R. Manejo e Gestão de Resíduos da Construção Civil. Como implantar um Sistema de Manejo e Gestão dos Resíduos da Construção Civil nos Municípios. Brasília: Caixa Econômica Federal; Ministério das Cidades, Ministério do Meio Ambiente, 2005. v. 1, 198p. Disponível em: <http://www.resol.com.br/textos/manual_res_construc_civil_vol2.pdf>. Acesso: 25 de fev de 2021.

PINTO, Tarcísio de P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. São Paulo, 1999. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Disponível em: <<http://www.casoi.com.br/hjr/pdfs/GestResiduosSolidos.pdf>>. Acesso em: 28 de fev de 2021.

PREFEITURA DA CIDADE DO RIO DE JANEIRO. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos - PMGIRS da Cidade do Rio de Janeiro. 2012. Disponível em: <http://www.rio.rj.gov.br/dlstatic/10112/3035089/DLFE-247507.pdf/Plano_Gestao_Integrada_Residuos.pdf>. Acesso em: 25 de fev de 2021. SANTANA, H. Considerações sobre os nebulosos conceitos e definições de fíler em misturas asfálticas. In: REUNIÃO ANUAL DE PAVIMENTAÇÃO, 29., 1995, Cuiabá. Anais Cuiabá: Associação Brasileira de Pavimentação, 1995.

RIBEIRO, H.C. Aplicação de resíduos sólidos da Construção Civil em Revestimento Asfáltico tipo CBUQ PF-0001A/04, Curso de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Goiás, Anápolis, GO, 106p. 2004.

SINISTERRA, Ferney Q. Aplicabilidade de resíduos reciclados da construção e demolição como agregados em misturas asfálticas. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-099/14, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2014, 168 p.

SOUZA, J. A.; SOUSA, J. M.; KATO, R. B. Análise do desempenho de Concreto Betuminoso Usinado à Quente com adição de rejeito da mineração do cobre segundo os parâmetros Marshall. Disponível em: <<http://periodicoscientificos.ufmt.br/ojs/index.php/eng/article/view/3168>>. Acesso em: 22 dez. 2021.

SPECHT, L. P. Projeto de misturas asfálticas. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/236276919/aula8>>. Acesso em: 01 dez. 2021.