



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
IFCE *CAMPUS* FORTALEZA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL
MESTRADO ACADÊMICO EM TECNOLOGIA E GESTÃO AMBIENTAL

SANDRO MOREIRA BRAGA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES
DE RESÍDUOS DE FRESADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

FORTALEZA

2024

SANDRO MOREIRA BRAGA

**ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES
DE RESÍDUOS DE FRESADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS**

Dissertação apresentada ao Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental. Área de Concentração: Gestão e Saneamento Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos

FORTALEZA

2024

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

Instituto Federal do Ceará - IFCE

Sistema de Bibliotecas - SIBI

Ficha catalográfica elaborada pelo SIBI/IFCE, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

B813 Braga, Sandro Moreira.

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE
RESÍDUOS DE FRESADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS / Sandro Moreira Braga. - 2024.
129 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal do Ceará, Tecnologia em Gestão Ambiental,
Campus Fortaleza, 2024.

Orientação: Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos.

1. Pavimentos. 2. RAP. 3. Fresagem. 4. Concreto. I. Título.

CDD 628



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DO CEARÁ
Av. 13 de maio, 2081 - Bairro Benfica - CEP 60040-531 - Fortaleza - CE - www.ifce.edu.br

FOLHA DE APROVAÇÃO

Processo: 23256.006503/2024-78

Interessado: Gemmelle Oliveira Santos

SANDRO MOREIRA BRAGA

ESTUDO DO COMPORTAMENTO DE CONCRETOS COM DIFERENTES TEORES DE RESÍDUOS DE FRESADO DE PAVIMENTOS ASFÁLTICOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Tecnologia e Gestão Ambiental do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) *Campus* de Fortaleza, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Tecnologia e Gestão Ambiental..

Aprovada em: 02/08/2024.

BANCA EXAMINADORA



Documento assinado digitalmente
GEMMELLE OLIVEIRA SANTOS
Data: 05/08/2024 10:10:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Gemmelle Oliveira Santos (Orientador)

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará - IFCE



Documento assinado digitalmente
TASSIO FRANCISCO LOFTI MATOS
Data: 05/08/2024 11:24:57-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Tassio Francisco Lofti Matos

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará (IFCE) - *Campus* Fortaleza



Documento assinado digitalmente
ALFRAN SAMPAIO MOURA
Data: 05/08/2024 10:00:26-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Alfran Sampaio Moura

Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dedico esse trabalho a minha esposa, Elizângela Maia Braga, que sempre acreditou em minhas ideias e aos meus filhos, Vitória e João, que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

A Deus, em primeiro lugar, por sempre estar ao meu lado me guiando e ajudando a vencer todos os desafios da minha vida.

Ao meu pai (*in memoriam*), Veriano Braga Neto, e a minha mãe, Ednólia Moreira Braga, pelos ensinamentos e valores a mim transmitidos, por sempre estarem ao meu lado nos momentos em que eu mais precisei e por servirem como espelho para as minhas aspirações futuras.

À minha esposa, Elizângela Maia Braga, e filhos, Vitória Beatriz e João Vítor, por toda dedicação e compreensão, principalmente em todos os dias dedicados a esta etapa de minha vida.

Aos meus irmãos, Saulo e Sarah, por sempre me ajudarem a trilhar caminhos certos, ensinando, valorizando e acreditando em meu potencial.

Aos meus familiares e amigos pela compreensão e incentivo nos períodos que me ausentei para me dedicar à elaboração do presente trabalho.

Agradeço especialmente ao meu orientador e amigo, professor Gemmelle Oliveira Santos, pela ajuda, profissionalismo, ética e acessibilidade em todos os momentos.

Gostaria de expressar minha gratidão à minha caríssima amiga professora Glória, pelos bons momentos que passamos e por me auxiliar e esclarecer dúvidas sempre que precisei.

Ao IFCE, colaboradores e professores, que certamente contribuíram com o melhor de si para formação dos novos conhecimentos adquiridos ao longo do curso.

Às empresas Insttale Engenharia, Maia Melo Engenharia, Torc Terraplenagem e Ibiza Construtora, pelo apoio técnico oferecido para a realização deste trabalho; em particular ao Eduardo, Vítor Mosca, Geanio, Vicente, Abodoral (Bidu), Carlos Sena, Everton, Fernando, Samuel, Cláudio, Heleno e Kergilnaldo, o meu muito obrigado.

Ao Departamento Nacional de Infraestrutura de Transporte, por me ajudar no decorrer do trabalho; em particular aos amigos Osvaldo, Rafael, Marcos, Waldir, Pitombeira, Luciana, Braga e Gurgel, a minha gratidão.

Meus agradecimentos se estendem a todos os colegas de Mestrado. Em especial à Senira, Lidiane, Maria Thereza, Clécio, Patrícia, Eulália e Leandro, pelas seções de estudo, pelas trocas saudáveis de ideias e experiências, e acima de tudo, pela camaradagem e bom humor que marcaram nossa convivência.

*“A felicidade não é ausência de conflitos,
mas sim a habilidade de lidar com eles.
Uma pessoa feliz não tem o melhor de
tudo, mas ela torna tudo melhor”
(Autor desconhecido).*

RESUMO

As intervenções de conservação e/ou restauração de uma rodovia, através da fresagem, resultam em grandes volumes de RAP (Resíduos de Pavimentos Asfálticos) que, na maioria das vezes, acabam às margens das rodovias ou acumulados em pátios. Diante desse passivo econômico e ambiental, bem como da versatilidade do concreto, a pesquisa objetivou analisar o efeito da adição do RAP sobre as propriedades físicas e mecânicas do Concreto de Cimento Portland (CCP). Foram moldados, curados em água e ensaiados corpos de prova de referência e com diferentes teores de RAP (25%, 50%, 75% e 100%) em substituição ao agregado miúdo (areia), gráudo (brita) e ambos. Em geral, observou-se tendência decrescente de trabalhabilidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e no módulo de elasticidade no concreto com RAP, apesar dos bons resultados alcançados em tais parâmetros em todas as dosagens. Os melhores resultados foram alcançados nas misturas com RAP gráudo substituindo a brita. A substituição dos agregados naturais por RAP também permitiu estimar, preliminarmente, algumas vantagens econômicas e ambientais, com destaque para a dosagem com 100% de RAP miúdo/gráudo substituindo areia/brita. Com a autorização do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (seção Ceará), foram instalados 200m de meio-fio pré-moldado com diferentes teores de RAP no Km 392 da BR-020/CE e, após 88 dias de operação, observou-se que as peças estavam em perfeito estado físico e funcionamento. Além de constatada a qualidade das misturas produzidas e sua aplicabilidade em grande escala, a pesquisa agregou valor ao RAP, contribuiu para o crescimento dos indicadores ambientais dentro do DNIT (seção Ceará) e iniciou uma tecnologia local para aproveitamento desse resíduo.

Palavras-chave: Pavimentos, RAP, fresagem, concreto.

ABSTRACT

Conservation and/or restoration interventions on a highway, through milling, result in large volumes of RAP (Reclaimed Asphalt Pavement) which, most of the time, end up on the sides of the roads or accumulated in yards. Faced with this economic and environmental liability, as well as the versatility of concrete, the research aimed to analyze the effect of adding RAP on the physical and mechanical properties of Portland Cement Concrete (PCC). Test specimens were molded, cured in water, and tested with different RAP contents (25%, 50%, 75%, and 100%) replacing fine aggregate (sand), coarse aggregate (gravel), and both. Generally, a decreasing trend in workability, compressive strength, tensile strength in bending, and modulus of elasticity was observed in the concrete with RAP, despite the good results achieved in these parameters in all dosages. The best results were achieved in mixtures with coarse RAP replacing gravel. The replacement of natural aggregates with RAP also allowed for a preliminary estimate of some economic and environmental advantages, especially for the dosage with 100% fine/coarse RAP replacing sand/gravel. With authorization from the National Department of Transport Infrastructure - DNIT (Ceará section), 200m of pre-molded curb with different RAP contents were installed at Km 392 of BR-020/CE and, after 88 days of operation, it was observed that the pieces were in perfect physical condition and functioning. In addition to confirming the quality of the mixtures produced and their applicability on a large scale, the research added value to the RAP, contributed to the growth of environmental indicators within DNIT (Ceará section), and initiated a local technology for utilizing this waste.

Keywords: Pavements, RAP, milling, concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	—	Esquema de seção transversal do pavimento	26
Figura 2	—	Estruturas para pavimento de concreto-cimento (a) e asfáltico (b).....	28
Figura 3	—	Ilustração da distribuição de esforços nos pavimentos rígidos e flexíveis	28
Figura 4	—	Representações esquemáticas de curvas de desempenho de um pavimento	30
Figura 5	—	Representação esquemática das evoluções e suas deflexões	31
Figura 6	—	Variação da serventia no tempo (desempenho do pavimento)	32
Figura 7	—	Curva granulométrica do material fresado	33
Figura 8	—	Cilindros para fresagem padrão (a), fina (b) e microfresagem (c)	35
Figura 9	—	Estrada vicinal beneficiada com RAP no Município de Caucaia-CE...	40
Figura 10	—	Meio-fio de concreto.....	44
Figura 11	—	Fluxograma da pesquisa.....	54
Figura 12	—	Materiais utilizados na pesquisa.....	55
Figura 13	—	Fresado asfáltico de pavimentação (RAP) do tipo não classificado.....	58
Figura 14	—	Amostras de RAP grosso (acima) e fino (abaixo), ambos do tipo sujo..	58
Figura 15	—	Curvas granulométrica dos agregados.....	59
Figura 16	—	Curva de Abrams.....	63
Figura 17	—	Processo de mistura do concreto até a moldagem dos CPs.....	68
Figura 18	—	Ensaio de abatimento do tronco de cone.....	70
Figura 19	—	Ensaio de resistência à compressão do concreto.....	70
Figura 20	—	Ensaio de resistência à tração na flexão do concreto.....	71
Figura 21	—	Ensaio de determinação do módulo de elasticidade.....	72
Figura 22	—	Croqui representativo do trecho experimental implantado.....	73
Figura 23	—	Registro fotográfico da confecção do MFC 05 (com e sem RAP) e implantação na BR-020/CE.....	74
Figura 24	—	Trecho experimental implantado no Km 392 da BR-020/CE.....	75
Figura 25	—	Dados da Pluviometria (09/04/24 a 04/06/24) - Caucaia (Posto nº38)..	76
Figura 26	—	Curvas granulométricas dos agregados miúdos (areia e RAPM).....	81
Figura 27	—	Curvas granulométricas dos agregados miúdos (brita e RAPG)	81
Figura 28	—	Resultados médios do ensaio de abatimento (<i>Slump Test</i>) em mm.....	82

Figura 29 — Resultados médios da massa (g) endurecida dos CPs cilíndricos.....	83
Figura 30 — Resistência à compressão (MPa) com 7 dias de cura dos concretos estudados.....	85
Figura 31 — Resistência à compressão (MPa) com 14 dias de cura dos concretos estudados.....	85
Figura 32 — Resistência à compressão (MPa) com 28 dias de cura dos concretos estudados.....	86
Figura 33 — Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) da resistência à compressão.....	90
Figura 34 — Resultados médios de resistência à tração na flexão (MPa).....	93
Figura 35 — Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) da resistência à tração na flexão....	96
Figura 36 — Resultados médios do módulo de elasticidade (GPa) aos 28 dias.....	99
Figura 37 — Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) do módulo de elasticidade.....	102

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 — Cronograma executivo de Implantação.....	76
Quadro 2 — Resumo das vistorias técnicas sobre o trecho experimental.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	— Utilização de RAP nos EUA (milhões de toneladas)	36
Tabela 2	— Descrição das preparações do concreto com e sem fresado (fase 1, piloto).....	51
Tabela 3	— Distribuição dos insumos nas dosagens estudadas (fase 1, piloto)....	52
Tabela 4	— Teores de RAP e de substituição na literatura.....	53
Tabela 5	— Lista de análises, parâmetros e ensaios realizados.....	55
Tabela 6	— Características do cimento CPIII 32-RS utilizado na pesquisa.....	56
Tabela 7	— Caracterização da areia grossa (AMN).....	59
Tabela 8	— Caracterização da brita ½" (AGN).....	60
Tabela 9	— Caracterização do fresado miúdo (RAPM).....	60
Tabela 10	— Caracterização do fresado graúdo (RAPG).....	60
Tabela 11	— Resumo das dosagens do concreto estudadas.....	62
Tabela 12	— Resistência mínima do concreto (MPa).....	62
Tabela 13	— Determinação do consumo de água aproximado (l/m³).....	64
Tabela 14	— Estimativa do consumo de água e cimento.....	64
Tabela 15	— Volume compactado seco (Vb) de agregado graúdo por m³ de concreto).....	65
Tabela 16	— Estimativa do consumo de agregado graúdo.....	65
Tabela 17	— Estimativa do consumo de agregado miúdo.....	66
Tabela 18	— Traço do concreto referencial.....	66
Tabela 19	— Composição dos concretos (kg/m³).....	67
Tabela 20	— Quantidade de corpos de prova e tipos de ensaios.....	69
Tabela 21	— Resumo da caracterização física dos agregados.....	77
Tabela 22	— Resultados citados na literatura referente a caracterização da areia e brita.....	79
Tabela 23	— Resultados citados na literatura referente a caracterização do RAP...	80
Tabela 24	— Resultados do ensaio de abatimento (<i>Slump Test</i>) em mm.....	82
Tabela 25	— Resultados dos ensaios de resistência à compressão (MPa) com 28 dias de cura dos concretos estudados.....	84
Tabela 26	— Dados da resistência à compressão de concretos com RAP.....	87
Tabela 27	— Teste de <i>Anderson-Darling</i> , resistência à compressão aos 28 dias....	89

Tabela 28	—	Teste de <i>ANOVA</i> , resistência à compressão aos 28 dias.....	90
Tabela 29	—	Teste de <i>ANOVA</i> , resistência à compressão aos 28 dias, por dosagem.....	90
Tabela 30	—	Resultados da regressão linear múltipla da resistência à compressão.....	91
Tabela 31	—	Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão (MPa).....	92
Tabela 32	—	Dados da resistência à tração na flexão de concretos com RAP.....	95
Tabela 33	—	Teste de <i>Shapiro-Wilk</i> para os dados de resistência à tração na flexão.....	95
Tabela 34	—	Teste de <i>ANOVA</i> , resistência à tração na flexão.....	96
Tabela 35	—	Teste de <i>ANOVA</i> , resistência à tração na flexão, por dosagem.....	96
Tabela 36	—	Resultados da regressão linear múltipla da resistência à tração na flexão.....	97
Tabela 37	—	Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (GPa).....	98
Tabela 38	—	Dados do módulo de elasticidade de concretos com RAP.....	101
Tabela 39	—	Teste de <i>Shapiro-Wilk</i> para os dados do módulo de elasticidade.....	102
Tabela 40	—	Teste de <i>ANOVA</i> , módulo de elasticidade aos 28 dias.....	103
Tabela 41	—	Teste de <i>ANOVA</i> , módulo de elasticidade aos 28 dias, por dosagem.	103
Tabela 42	—	Resultados da regressão linear múltipla do módulo de elasticidade...	104
Tabela 43	—	Informações utilizadas no cálculo da estimativa de custos dos concretos.....	105
Tabela 44	—	Estimativa dos custos de produção das dosagens estudadas.....	105
Tabela 45	—	Emissões de CO ₂ para a produção de 1 m ³ de concreto.....	107
Tabela 46	—	Estimativa das emissões de CO _{2equivalente} para os concretos estudados.....	108

LISTA DE SIGLAS

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AGN	Agregado Graúdo Natural
AGR	Agregado Graúdo Reciclado
AR	Agregado Reciclado
ARRA	<i>The Asphalt Recycling and Reclaiming Association</i>
ASTM	<i>American Society For Test and Materials</i>
AMN	Agregado Miúdo Natural
AN	Agregado Natural
CO _{2e}	Dióxido de Carbono Equivalente
CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CCP	Concreto de Cimento Portland
CCR	Concreto Compactado a Rolo
CPU	Composição de Preço Unitário
CMS	Concreto Magro Seco
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Corpo de Prova
DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
EAPA	<i>European Asphalt Pavement Association</i>
FRAP	Fractionado de RAP
FHWA	<i>Federal Highway Administration</i>
GEE	Emissões Gases de Efeito Estufa
MAA	Material Álcali-Ativado

MB	Misturas Betuminosas
ME	Módulo de Elasticidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MFC	Meio Fio de Concreto
NAPA	<i>National Asphalt Pavement Association</i>
NBR	Norma Brasileira
NCHRP	<i>National Cooperative Highway Research Program</i>
ODS	Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
ONU	Organização das Nações Unidas
OPEP	Organização dos Países Exportadores de Petróleo
PCCR	Pavimentos de Concreto Cimento Portland Compactado com Rolo
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RAP	<i>Reclaimed Asphalt Pavement</i> (Fresado)
RAPM	Fresado Miúdo
RAPG	Fresado Graúdo
RCD	Resíduos de Construção e Demolição
RCC	Resíduos de Construção Civil
RC	Resistência à Compressão
RLM	Regressão Linear Múltipla
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
RTF	Resistência à Tração na Flexão
SICRO	Sistema de Custos Referenciais de Obras do DNIT
SNIC	Sindicato Nacional da Indústria do Cimento
UL	Unidade Local do DNIT
VSA	Valor de Serventia Atual
ZTI	Zona de Transição Interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

a/c	Fator água/cimento
f_{cm7}	Resistência média do concreto à compressão aos 7 dias
f_{cm14}	Resistência média do concreto à compressão aos 14 dias
f_{cm28}	Resistência média do concreto à compressão aos 28 dias
f_{ck}	Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias
$f_{ck,est}$	Resistência característica estimada do concreto à compressão aos 28 dias
$f_{ctm,f}$	Resistência média do concreto à tração na flexão aos 28 dias
E_{ci}	Módulo estático de elasticidade do concreto
R^2	Coefficiente de determinação
S_d	Desvio padrão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	Considerações iniciais	19
1.2	Justificativa	22
2	OBJETIVOS	25
2.1	Geral	25
2.2	Específicos	25
3	REVISÃO DE LITERATURA	26
3.1	Pavimentação	26
3.2	Classificação dos pavimentos	27
3.3	Avaliação e restauração de pavimentos	29
3.4	Fresagem de pavimentos asfálticos	32
3.4.1	<i>Generalidades</i>	32
3.4.2	<i>Caracterização, geração e destinação do fresado</i>	36
3.5	A reciclagem e/ou reutilização do fresado	38
3.6	Drenagem em rodovias	41
3.6.1	<i>Generalidades</i>	41
3.6.2	<i>Drenagem superficial</i>	43
3.7	O uso de RAP no concreto	46
4	MATERIAIS E MÉTODOS	51
4.1	Considerações gerais	51
4.2	Seleção e caracterização geral dos materiais	54
4.3	Ensaio de caracterização	59
4.4	Produção dos concretos	61
4.4.1	<i>Concreto de referência</i>	61
4.4.2	<i>Concreto modificado</i>	61

5	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	77
6	CONCLUSÃO.....	111
	REFERÊNCIAS.....	113
	APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DAS MISTURAS.....	125
	APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RC AOS 7 E 14 DIAS..	126
	APÊNDICE C – RESUMO DOS RESULTADOS.....	127
	APÊNDICE D – ESTIMATIVA DOS CUSTOS.....	128
	APÊNDICE E – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂EQUIVALENTE.....	129

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A construção civil é uma indústria com grandes impactos ambientais, seja pelo elevado consumo de recursos naturais (água, solos, pedras, madeiras etc) seja pela geração de efluentes e resíduos sólidos.

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU), em 2019, a construção civil foi responsável por 38% das emissões de CO₂ em todo o planeta¹ (GLOBAL, 2020) e o setor consumiu de 30 a 40% do total da energia global (PLATI, 2019; OLIVIER; PETERS, 2020).

Na tentativa de conciliar as dimensões sociais, econômicas e ambientais², a indústria da construção civil vem tentando (i) usar menos energia ao longo da execução de obras, (ii) empregar materiais que sejam encontrados localmente³, (iii) adotar modelos de gestão de resíduos sólidos mais adequados⁴, (IV) reduzir o consumo e o desperdício de água, (v) reduzir o envio de materiais para áreas de transbordo, aterros sanitários e lixões.

O setor vem buscando, também, dar um maior significado aos seus resíduos (FERNANDES, 2020), sendo conhecida a utilização dos Resíduos da Construção e Demolição (RCD) em misturas asfálticas (GENNESSEAU, 2015; SUZUKI, 2019; LUZZI, 2019; CORREA, 2020), base e sub-base de pavimentos (CORREA *et al.*, 2014; HILARIO, 2016; MOLZ; CERVO, 2019; BRITO, 2022; COSTA, 2022), na produção de peças pré-moldadas de concreto para pavimentação tipo “*paver*” (FRANCISCO, 2019; VIEIRA, 2021), na produção de blocos de concreto⁵ (PRADO, 2006; SHAHIDAN *et al.*, 2017; STROHER *et al.*, 2017), na utilização de pavimento permeável em projetos

¹A produção de cimento, isoladamente, foi responsável pela emissão de cerca de 4% dos Gases de Efeito Estufa (GEE) em todo mundo, no ano de 2018 (PLATI, 2019). Estima-se que a produção mundial de cimento, no ano de 2020, ultrapassou os 4,19 bilhões de toneladas (SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO - SNIC (2021).

²Que seriam a base do desenvolvimento sustentável (CABRAL, 2007; PLATI, 2019).

³Chel, Kaushik (2018)

⁴Cobra (2022)

⁵A utilização de RCD no concreto é sem dúvida uma das melhores alternativas (LEITE, 2001).

de drenagem (FERNANDES, 2020), na produção de concretos leves (SANTIAGO, 2008), entre outros.

O setor da infraestrutura rodoviária, em particular, também exerce grande pressão sobre os recursos naturais, que começa com a supressão vegetal e se estende até o destino final dos resíduos, passando pelas escavações do entorno (áreas de empréstimo), cortes, aterros, desvios ou aterramento de recursos hídricos, impermeabilização de solos etc.

As rodovias pavimentadas, como representantes do setor de infraestrutura, perdem serventia e desempenho ao longo do tempo, precisando de manutenção preventiva e/ou corretiva (quando será necessário promover sua restauração e/ou reconstrução)⁶.

Segundo uma publicação do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (2005a), o decréscimo da condição ou serventia do pavimento ao longo do tempo é conhecido como deterioração⁷ e entender os mecanismos que regem esse processo é essencial para a identificação apropriada das causas e para a escolha e definição da técnica mais apropriada para reabilitação (PETERLINE, 2023).

Um das etapas dentro das intervenções de restauração e/ou reconstrução de uma rodovia pavimentada consiste na remoção do pavimento asfáltico através de fresagem⁸ mecânica a frio e o volume de material resultante desse corte depende da espessura indicada no projeto e da área demarcada.

Em linhas gerais, o fresado tem sido acondicionado nas faixas de domínio das rodovias e pátios⁹, para posterior reutilização, haja vista que seu descarte indiscriminado pode causar danos ao meio ambiente, conforme afirma Pereira *et al.* (2021).

⁶Entende-se por restauração, o conjunto de operações destinadas a restabelecer na íntegra ou em parte as características técnicas originais de um pavimento (intervenções). Entende-se por reconstrução, a operação de refazer o pavimento desde o subleito ou sub-base, com retirada total dos materiais e revestimentos antigos e substituição por novos materiais (BERNUCCI *et al.*, 2022).

⁷Conforme Balbo (2007), os custos de manutenção crescem exponencialmente com o aumento da degradação dos pavimentos.

⁸Na fresagem empreendem-se cortes por movimentos rotativos contínuos, ascendendo o material fresado para o caminhão basculante que irá realizar o transporte do material para a destinação (PEREIRA *et al.*, 2021).

⁹Os locais de estocagem devem ser previstos no projeto ou em locais obtidos pela construtora e devidamente aprovados pela fiscalização.

O Fresado de Pavimento Asfáltico (RAP) vem sendo objeto de várias pesquisas: Boussetta *et al.* (2020), Pasetto e Baldo (2016) e Van Den Bergh *et al.* (2017) investigaram o uso do RAP em misturas de concreto à base de cimento Portland para aplicação em estradas, Suzuki (2019) avaliou diversas misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes teores de RAP, Costa (2022) produziu um material alcalino ativado contendo agregados de RAP como um substituto para os agregados naturais a serem usados como camadas de base de pavimentos, Lima (2020) estudou o efeito da adição de cimento Portland e RAP na estabilização de solo argiloso, Correa (2020) fez a análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas à quente com diferentes tipos e teores de RAP, Centofante (2016) avaliou o dano causado pela água em misturas recicladas com 10, 20 e 30% de fresado e Arshad *et al.* (2017) avaliaram a propriedade da adesividade em misturas recicladas à quente com 0, 15, 25 e 35% de inserção de RAP.

O aproveitamento do fresado tem ainda forte apelo ambiental. Suzuki (2019) destaca que o uso do fresado reduz a exploração de novos recursos naturais, as emissões de GEE e a disposição em aterros sanitários e, do ponto de vista econômico, reduz os custos de aquisição de novos insumos¹⁰ e de transporte de materiais. Para Ferreira (2021), o uso do material fresado de pavimentos asfálticos permite reaproveitar seu ligante e seus agregados.

No Estado do Ceará, as intervenções de restauração e conservação das rodovias federais realizadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT geraram aproximadamente 646,5 mil toneladas de fresado nos últimos 10 anos e maior parte desse material permanece estocada nos pátios da instituição¹¹. Enquanto o transporte do fresado de cada obra até os pátios do DNIT acarreta um elevado custo, a estocagem desse material gera um crescente passivo ambiental.

Na tentativa de mitigar o cenário observado, decidiu-se investigar a possibilidade de empregar o fresado gerado pelo DNIT (seção Ceará) na produção de alguns dispositivos de drenagem (meio-fio pré-moldado) e aplicação em um trecho

¹⁰A busca por novos materiais que possam ser utilizados na construção e que tenham durabilidade, sustentabilidade e redução do custo do ciclo de vida tem sido o foco de muitos pesquisadores (FERREIRA, 2021).

¹¹Quando transportar até os pátios torna-se inviável, o fresado gerado nas obras do DNIT (seção Ceará) fica armazenado nas proximidades das rodovias, nas faixas de domínio.

experimental de uma rodovia federal em obras no estado. Para tanto, a pesquisa caracterizou o material, empregou teores (%) crescentes de fresado em substituição à areia (agregado miúdo natural - AMN), brita (agregado graúdo natural - AGN) e ambos em diferentes traços de concreto, ensaiou os corpos de prova após 28 dias de cura e instalou 100m do meio-fio pré-moldado desenvolvido com diferentes teores de fresado na BR-020, Km 392,704, Ceará.

1.2 Justificativa

Os pavimentos são executados para durarem um determinado período de tempo (vida útil) e, durante cada um destes períodos, o pavimento vai da condição ótima para a péssima, sendo essa redução conhecida como desempenho, e o fenômeno que rege a mudança conhecido como deterioração (PETERLINE, 2023).

Segundo Medina e Motta (2005), a definição do fim de vida útil de um pavimento depende dos critérios limites adotados e da classe da rodovia e, ao final de um número geralmente grande de aplicações de carga, os defeitos apresentados pela superfície comprometem o desempenho funcional (segurança e conforto) e revelam fraqueza estrutural.

Bernucci *et al.* (2022) lembram que os pavimentos são estruturas que, em geral, não apresentam ruptura súbita, mas sim deterioração funcional e estrutural acumuladas a partir de sua abertura ao tráfego.

Conforme Balbo (2007), na ausência de manutenção, o pavimento vai se degradar tão intensamente que sua reconstrução, parcial ou total, será inevitável em curto período de tempo e, quando o pavimento perde sua já focalizada habilitação, os custos operacionais serão elevados e incompatíveis com os preceitos de otimização técnico-econômica (DNIT, 2005a).

A fresagem é uma técnica tradicional utilizada nas manutenções dos pavimentos asfálticos das rodovias e, ao cortar uma ou mais camadas, gera resíduos em grande quantidade e volume. Estima-se que, para cada 1000m de uma fresagem com largura de 3,50m e espessura de 5cm, sejam geradas aproximadamente 420 toneladas de material¹².

¹²Trata-se de uma estimativa, pois os processos de fresagem são categorizados quanto à espessura do corte (superficial, rasa ou profunda) e à rugosidade que resulta na pista (padrão, fina ou micro), como bem destacou Bonfim (2011).

Os resíduos resultantes da fresagem precisam ser, cada vez mais, estudados e incorporados aos ciclos que compõem os processos de reutilização e reciclagem, evitando danos ambientais, desperdício de materiais e mais pressão sobre as jazidas naturais. Nesse sentido, além de atender a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), o aproveitamento desses materiais, em grande escala, contribui com alguns dos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável, publicados pela Organização das Nações Unidas - ONU¹³.

A produção de concretos, por sua vez, também exerce grande pressão sobre o meio ambiente a medida em que demanda agregados naturais (como a areia), água e cimento em sua composição tradicional. Segundo Dias, Silva e Poggiali (2017) o Concreto de Cimento Portland (CCP) é um dos materiais mais consumidos no mundo e apenas o cimento, para cada tonelada de clínquer produzido, lança uma tonelada de CO₂ na atmosfera.

O concreto tradicional vem sendo objeto de pesquisas que buscam torná-lo mais sustentável com a incorporação de materiais alternativos, como mostra vasta literatura (METHA; MONTEIRO, 1994; LEITE *et al.*, 2013; RODRIGUES; FUCALÉ, 2014; ALVES, 2017; TAHAR *et al.*, 2017; REIS *et al.*, 2021; MAIA *et al.*, 2022). Essas possibilidades existem porque o concreto tem fácil aplicação, é flexível (se adequando bem a várias situações), possui alto potencial para encapsulamento de substâncias nocivas, é durável (se bem confeccionado) e é razoavelmente resistente a agentes químicos e físicos (LEITE, 2001).

Diante da versatilidade do concreto e das negativas consequências financeiras e ambientais do acúmulo de fresado nos pátios do DNIT é que se planejou essa pesquisa, que de forma (in)direta contribui para (i) valorização do fresado como um resíduo (e não como rejeito), (ii) redução de danos ambientais decorrentes da estocagem inadequada, (iii) possível redução do consumo de agregados naturais e com isso (indiretamente) redução das emissões de GEE e (iv) aumento dos indicadores de sustentabilidade ambiental em obras de infraestrutura do DNIT (seção Ceará).

¹³Como comentado anteriormente, a pesquisa se voltou para o emprego de teores (%) de fresado substituindo a areia, a brita e ambos na confecção de concretos. Assim, a temática se aproxima das ações previstas no ODS 09 (indústria, inovação e infraestrutura), ODS 11 (cidades e comunidades sustentáveis), ODS 12 (consumo e produção responsáveis), ODS 13 (ação contra a mudança global do clima) e ODS 15 (vida terrestre).

A pesquisa também (i) preenche parte da lacuna existente na literatura, (ii) representa o começo do desenvolvimento de uma tecnologia local sobre aproveitamento de fresado que pode trazer ganhos estruturais, econômicos e ambientais para as obras locais de infraestrutura e (iii) contribui para geração de recursos humanos qualificados e para uma cultura de pesquisa aplicada dentro do DNIT (seção Ceará). Diferentemente da literatura (que geralmente aplica fresado em misturas asfálticas), a pesquisa inaugurou uma linha de investigação local sobre a mistura fresado-concreto na produção de dispositivos de drenagem potencialmente sustentáveis.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo geral desta pesquisa foi analisar o efeito da adição de Fresado de Pavimento Asfáltico (RAP) sobre as propriedades físicas e mecânicas do Concreto de Cimento Portland (CCP).

2.2 Específicos

Os objetivos específicos são:

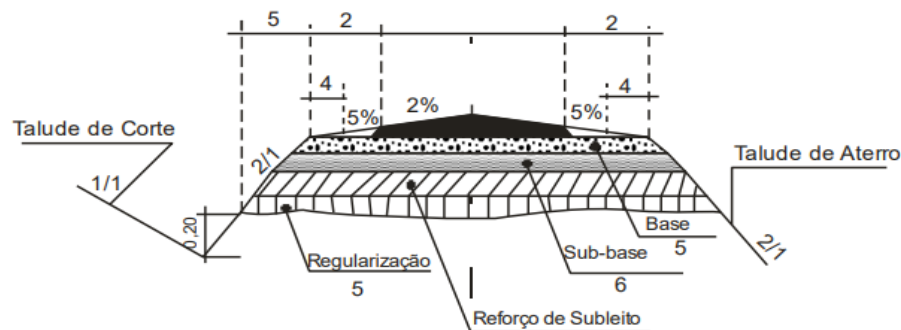
- Determinar, em laboratório, algumas características físicas e mecânicas do fresado;
- Moldar e ensaiar corpos de prova com (e sem) RAP incorporados ao concreto sob diferentes teores (25%, 50%, 75% e 100%) em substituição aos agregados (1) miúdos/areia, (2) graúdos/brita e (3) ambos;
- Avaliar o comportamento físico-mecânico dos diferentes CCP;
- Contribuir para a valorização econômica e ambiental do RAP;
- Contribuir para o desenvolvimento de novos materiais para a infraestrutura rodoviária;
- Contribuir, indiretamente, para o crescimento das práticas ambientais no DNIT (Seção Ceará);
- Implantar um trecho experimental na BR-020/CE com os dispositivos de drenagem (meio-fio pré-moldado) com RAP resultante da pesquisa.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Pavimentação

O DNIT (2006a) define pavimento como uma estrutura constituída por um determinado número de camadas, onde materiais de diferentes resistências e finalidades são unidos e sobrepostos para suportar as deformações causadas pelo tráfego. Além desses pré-requisitos, com a crescente preocupação com as questões ambientais, a estrutura de um pavimento deve ainda ser durável e sustentável, conforme Bernucci *et al.* (2022). A Figura 1 destaca e define os diversos constituintes do pavimento, em seção transversal.

Figura 1 – Esquema de seção transversal do pavimento



Fonte: DNIT (2006).

SUBLEITO: é o terreno de fundação do pavimento;

LEITO: é a superfície obtida pela terraplenagem ou obra-de-arte e conformada ao seu greide e perfis transversais;

GREIDE DO LEITO: é o perfil do eixo longitudinal do leito;

REGULARIZAÇÃO: é a camada posta sobre o leito, destinada a conformá-lo transversal e longitudinalmente de acordo com as especificações; a regularização não constitui, propriamente uma camada de pavimento, sendo, a rigor, uma operação que pode ser reduzida em corte do leito implantado ou em sobreposição a este, de camada com espessura variável;

REFORÇO DO SUBLEITO: é uma camada de espessura constante, posta por circunstâncias técnico-econômicas, acima da regularização, com características geotécnicas inferiores ao material usado na camada que lhe for superior, porém melhores que o material do subleito;

SUB-BASE: é a camada complementar à base, quando por circunstâncias técnico-econômicas não for aconselhável construir a base diretamente sobre regularização;

BASE: é a camada destinada a resistir e distribuir os esforços oriundos do tráfego e sobre a qual se constrói o revestimento;

REVESTIMENTO: é a camada, tanto quanto possível impermeável, que recebe diretamente a ação do rolamento dos veículos e destinada a melhorá-la, quanto à comodidade e segurança e a resistir ao desgaste (DNIT, 2006a).

Para Medina e Motta (2015), estas definições exprimem aquilo que foi, historicamente, o objetivo da pavimentação de estradas e ruas: melhorar as estradas de terra, protegendo-as da ação da água, do desprendimento de poeira e pedras, enfim, tornando-as mais cômodas e seguras ao tráfego e mais duráveis.

Para Souza (1980) o pavimento é uma estrutura de camadas em que materiais de diferentes resistências e deformabilidades são postos em contato, resultando em elevado grau de complexidade no que se refere ao cálculo das tensões e deformações.

Balbo (2007) define pavimento como uma estrutura não perene, composta por camadas sobrepostas de diferentes materiais compactados a partir do subleito do corpo estradal, adequada para atender estrutural e operacionalmente ao tráfego, de maneira durável e ao mínimo custo possível, considerando diferentes horizontes para serviços de manutenção preventiva, corretiva e de reabilitação obrigatórios.

Para Pinto e Preussler (2010), o pavimento é uma estrutura de engenharia complexa por envolver diversas variáveis interdependentes: solicitações de tráfego, solicitações climáticas e ambientais, técnicas construtivas empregadas, práticas de manutenção e reabilitação, tipo e qualidade dos materiais empregados, dentre outras.

De acordo com Kunz (2020), o pavimento deve ser projetado para uma longa duração, abrangendo misturas, técnicas adequadas de construção e quando necessário, uma manutenção para renovar a superfície. Ainda segundo o autor, as camadas constituintes variam de acordo com a classificação do pavimento: rígidos e flexíveis.

3.2 Classificação dos pavimentos

O pavimento viário classifica-se tradicionalmente em dois tipos básicos: rígidos e flexíveis. Mais recentemente, conforme Solanki e Zaman (2017) a nomenclatura vem chamando os rígidos de pavimentos de Concreto de Cimento Portland (ou

simplesmente concreto-cimento) e os flexíveis de pavimentos asfálticos, indicando o tipo de revestimento do pavimento (Figura 2).

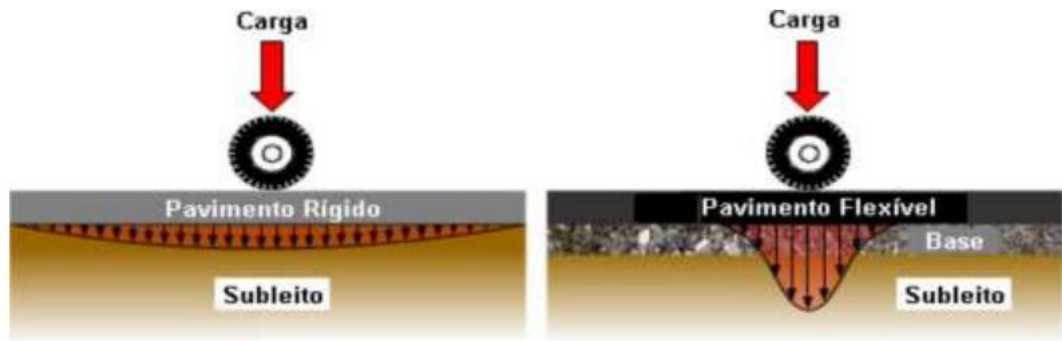
Figura 2 – Estruturas para pavimento de concreto-cimento (a) e asfáltico (b)

<i>Placa de concreto de cimento Portland</i>	<i>Revestimento asfáltico</i>
	<i>Base</i>
<i>Sub-base</i>	<i>Sub-base</i>
<i>Reforço do subleito</i>	<i>Reforço do subleito</i>
<i>Subleito</i>	<i>Subleito</i>

Fonte: Bernucci *et al.* (2022).

Conforme Solanki e Zaman (2017) os pavimentos flexíveis e rígidos convencionais diferem na maneira como distribuem a pressão vertical sobre o subleito. Enquanto no rígido há uma dispersão da pressão sobre as camadas inferiores, no pavimento flexível, a resposta está mais concentrada perto da área carregada com a pressão, como mostra a Figura 3.

Figura 3 – Ilustração da distribuição de esforços nos pavimentos rígidos e flexíveis



Fonte: Manual de Pavimentação do DNIT (2006a).

Ainda segundo Solanki e Zaman (2017), a estrutura necessária para a pavimentação flexível é mais complexa que a estrutura para a pavimentação rígida, devido à forma distinta de como as cargas são absorvidas. Porém, apesar de ser uma

estrutura mais simples, o pavimento rígido possui um maior rigor na sua metodologia de construção e na qualidade dos materiais.

Conforme o DNIT (2006a), o pavimento rígido tem menos camadas e é menos espesso que o flexível. Pode ser até 50% menos espesso (SENÇO, 2007). Essa espessura é fixada em função da resistência à tração na flexão das placas de concreto e das resistências das camadas subjacentes (MEDINA; MOTTA, 2015). Quando constituído por placas de concreto assentadas sobre o solo de fundação ou sub-base intermediária, apresentam trincamento, como ruptura típica, conforme Bernucci *et al.* (2022).

Já os pavimentos asfálticos, conforme Bernucci *et al.* (2022) englobam (i) os pavimentos flexíveis, cujas camadas abaixo do revestimento asfáltico são constituídas por materiais granulares (solos, solo-agregados) e (ii) os pavimentos semirrígidos, onde abaixo do revestimento asfáltico, a base ou sub-base são constituídas por materiais cimentados ou aglutinados por ligante hidráulico, resistentes aos esforços de tração.

Segundo o DNIT (2006a), pavimentos flexíveis são aqueles que sofrem deformações elásticas em todas as camadas, ou seja, as cargas se dispersam em várias parcelas basicamente iguais das diferentes camadas.

Conforme Senço (2007) as deformações no pavimento flexível, até certo limite, não levam ao rompimento; desde que bons materiais tenham sido utilizados nas camadas de sub-base e reforço do subleito. Ainda segundo o autor, os pavimentos flexíveis são dimensionados para compressão e tração por flexão, os quais são provocados pelo aparecimento das bacias de deformação sob as rodas dos veículos, causando deformações permanentes e rompimento por fadiga.

Para Medina e Motta (2015), a ruptura de pavimentos flexíveis ocorre essencialmente por afundamento resultante das deformações permanentes, e os pavimentos semirrígidos, à medida que sua camada cimentada degrada, passam a ter, pouco a pouco, comportamento flexível em termos de distribuição de tensões.

3.3 Avaliação e restauração de pavimentos

Segundo Oliveira (2018), a durabilidade de uma rodovia está diretamente relacionada com três fatores: a elaboração de um projeto construtivo, que dimensiona e especifica as diversas camadas da rodovia; a execução desse projeto, seguindo as

especificações do projeto; a manutenção da rodovia, que serve para prevenir ou corrigir os possíveis defeitos que aparecem ao longo do tempo.

Para a Confederação Nacional do Transporte - CNT (2017), uma das causas que colaboram para a pouca durabilidade do pavimento das rodovias brasileiras é a carência de fiscalização e controle de pesagem nas rodovias. Segundo a CNT, existe uma falta de postos de pesagem e que há escassez de investimento na conscientização dos usuários sobre os danos causados pelo sobrepeso dos veículos.

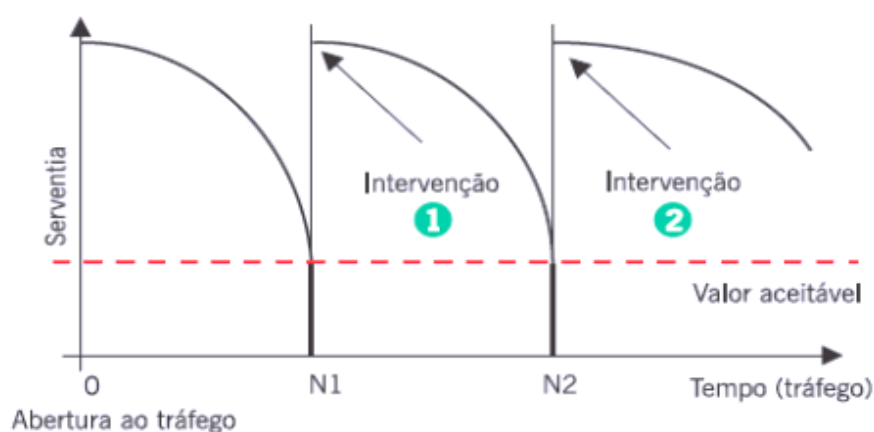
Além desses aspectos, Oliveira (2018) identifica dois fatores que controlam o comportamento de um pavimento: o clima, que age em função das mudanças de temperatura, das chuvas e da umidade, e o tráfego que é visualizado em função da degradação da estrutura do pavimento que suporta a carga e tensões desenvolvidas pelos veículos.

Conforme Bernucci *et al.* (2022), os pavimentos podem ser avaliados quanto a(o):

SERVENTIA: qualidade do pavimento, num determinado instante, quanto aos aspectos para o qual foi construído em relação ao conforto ao rolamento e segurança;

DESEMPENHO: variação da serventia ao longo do tempo (ou do tráfego) de uso do pavimento (Figura 4);

Figura 4 – Representação esquemática das curvas de desempenho de um pavimento



Fonte: DNER-PRO 10 (1979).

Para Silva Oliveira (2020), a restauração de pavimentos tem como finalidade garantir condições funcionais de tráfego, otimizando o desempenho das viagens, sob a premissa de conforto e segurança ao usuário.

Devido ao tempo e à ação do tráfego, o pavimento chega ao fim da sua vida útil e torna-se necessário que a infraestrutura receba ações de manutenção e reabilitação para que haja um ganho no nível de serventia do pavimento. Nesse sentido, a gerência sobre as condições dos pavimentos ajuda a definir o momento de promover a:

MANUTENÇÃO PREVENTIVA: operação de correções localizadas que não atingem a maioria da superfície do pavimento, repondo pequena parcela da condição de serventia;

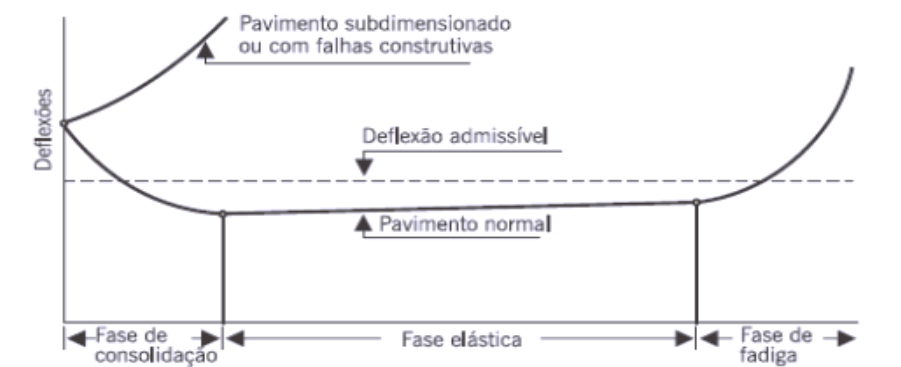
RESTAURAÇÃO: conjunto de operações destinadas a restabelecer na íntegra ou em parte as características técnicas originais de um pavimento (intervenções);

REFORÇO: operação de restauração onde se aproveita o valor residual da estrutura do pavimento e acrescenta-se nova camada de mistura asfáltica (também dito recapeamento);

RECONSTRUÇÃO: operação de refazer o pavimento no todo, desde o subleito ou a partir da sub-base, por retirada total dos materiais de base e revestimentos antigos e substituição por novos materiais;

Ainda conforme Bernucci *et al.* (2022), os pavimentos podem ser avaliados quanto à segurança, conforto ao rolamento, condição da superfície, interação pneu-pavimento, defeitos e irregularidades (do ponto de vista funcional) e quanto à capacidade de carga, ou seja, o projeto do pavimento e o seu dimensionamento (do ponto de vista estrutural). Ainda segundo os autores, os defeitos estruturais resultam especialmente da repetição das cargas e vinculam-se às deformações elásticas ou recuperáveis, e plásticas ou permanentes (Figura 5).

Figura 5 – Representação esquemática das evoluções e suas deflexões

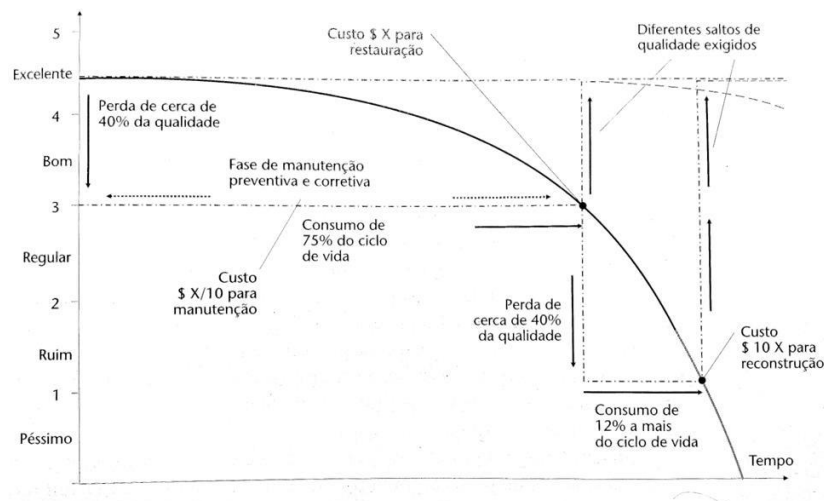


(b) Fases da vida estrutural (DNER-PRO 10)

Fonte: Bernucci *et al.* (2022).

Conforme o DNIT (2005a), se o ciclo de vida do pavimento for ultrapassado de forma significativa sem que as obras devidas de restauração tenham sido executadas, inicia-se uma anomalia e as deteriorações avançam e progridem de forma inexorável, com intervenções de conservação extremamente onerosas e que conferem pequena sobrevida aos segmentos então tratados, Figura 6.

Figura 6 – Variação da serventia no tempo (desempenho do pavimento)



Fonte: Balbo (2007).

Como se observa, os custos de manutenção crescem exponencialmente com o aumento da degradação dos pavimentos e as concessionárias geralmente realizam a análise do custo do ciclo de vida do pavimento para seleção da melhor alternativa tecnológica a se empregar na obra, o que muitas vezes resulta na utilização de técnicas e materiais mais novos, que podem apresentar um custo inicial mais elevado, mas que, no longo prazo, são mais eficientes, gerando um ganho futuro maior, por exemplo, devido à redução das necessidades de intervenções de manutenção.

3.4 Fresagem de pavimentos asfálticos

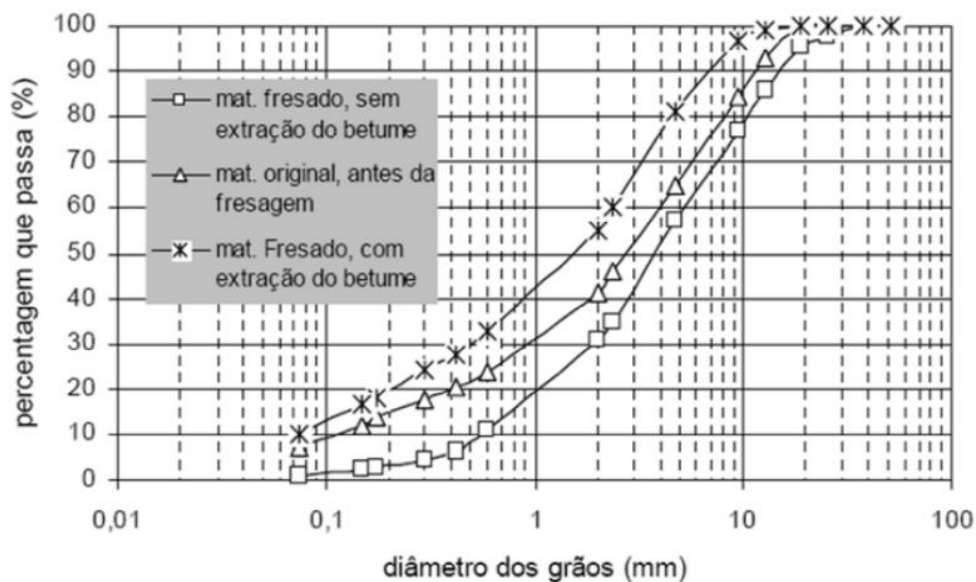
3.4.1 Generalidades

Conforme Bernucci *et al.* (2022), fresagem é a operação de corte, por uso de máquinas especiais, de parte ou de todo o revestimento asfáltico existente em um trecho de via, ou até englobando outra camada do pavimento, como forma de

restauração da qualidade ao rolamento da superfície, ou como melhoria da capacidade de suporte.

Para Oliveira (2018), a fresagem requer equipamentos e procedimentos específicos para desbastar a estrutura por meio de um processo abrasivo e rotação intensa. Ainda segundo o autor, a fresagem viabiliza a reobtenção de agregados granulares envolvidos por ligante envelhecido com granulometria modificada (Figura 7).

Figura 7 – Curva granulométrica do material fresado



Fonte: Dellabianca (2004).

Conforme Bonfim (2011), a mudança na curva granulométrica ocorre devido ao processo de fresagem provocar a quebra de parte dos agregados na altura da linha de corte da máquina. Quando o ligante do agregado é extraído, a granulometria do fresado apresentará uma curva com maior teor de finos e mais fechada se comparada com a curva do material original. Sem a extração do ligante, o material fresado será composto por grumos que são formados a partir da aglutinação dos finos ao ligante, apresentando assim uma curva granulométrica mais aberta.

Conforme Bonfim (2011), os processos de fresagem podem ser classificados quanto à espessura do corte e rugosidade resultante na pista, a saber:

A. Quanto à espessura de corte:

Fresagem Superficial

Conhecida como fresagem de regularização, é destinada apenas a correção de defeitos existentes na superfície do pavimento. Sendo assim, pode ser dispensado o posterior recapeamento da pista, uma vez que a textura obtida permite o rolamento de forma segura, porém não muito confortável, executando-se em pontos específicos onde a desagregação do revestimento remanescente acarrete a formação de buracos.

Fresagem Rasa

A fresagem rasa atinge normalmente as camadas superiores do pavimento, chegando em alguns casos na camada de ligação. Na maioria dos serviços é aplicada a uma profundidade média de corte em torno de 5cm. Esse procedimento é utilizado na correção de defeitos funcionais e em remendos superficiais. É aplicado, principalmente, em vias urbanas, onde se deseja manter o greide do pavimento com relação aos dispositivos de drenagem superficial e obras de arte correntes.

Fresagem Profunda

A fresagem profunda é aquela cujo corte atinge níveis consideráveis, podendo atingir as camadas de ligação, de base e até de sub-base do pavimento. Esse é um procedimento geralmente utilizado em intervenções de reabilitação estrutural, seja por recomposição da estrutura do pavimento ou mesmo, por reciclagem e incorporação do revestimento à base (BONFIM, 2011).

B. Quanto à rugosidade resultante na pista (Figura 8):

Fresagem Padrão (a)

A fresagem padrão resulta do cilindro originalmente oferecido nos equipamentos. A distância lateral entre os dentes do corte é de aproximadamente 15 mm. A fresagem padrão deve ser seguida da aplicação de uma nova camada de revestimento, devido à rugosidade elevada resultante.

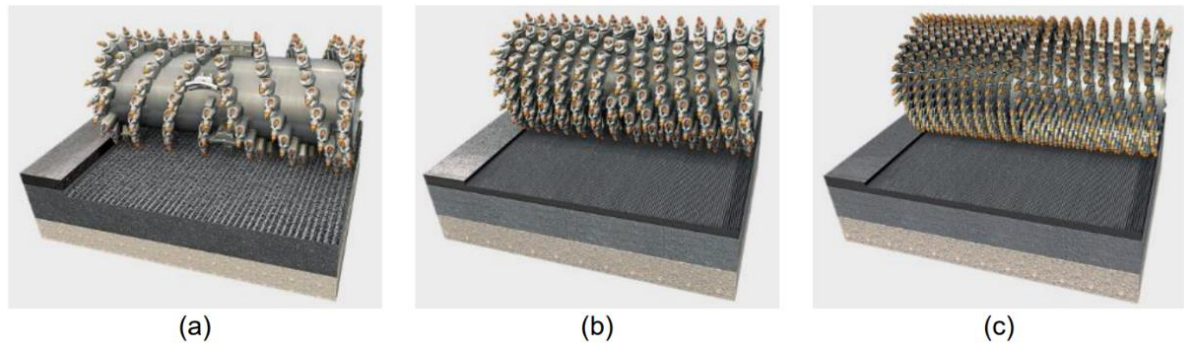
Fresagem Fina (b)

Este tipo de fresagem resulta do cilindro com um menor espaçamento entre os dentes do tambor, aproximadamente 8 mm, resultando sulcos menores e menor rugosidade na pista. Essa técnica é muito utilizada na regularização das vias, por possibilitar melhores condições de trafegabilidade aos usuários. Em alguns casos, neste tipo de aplicação, pode-se dispensar o posterior recapeamento da pista.

Microfresagem (c)

É resultante de fresagem com cilindro dotado de dentes espaçados lateralmente em aproximadamente 2 a 3mm. Consiste na remoção de uma camada muito delgada do revestimento, visando a adequação do perfil longitudinal ou retirada de faixas de sinalização horizontal das pistas, para alteração do layout viário (BONFIM, 2011).

Figura 8 – Cilindros para fresagem padrão (a), fina (b) e microfresagem (c)



Fonte: Adaptado de *Wirtgen Group* (2019).

O material oriundo da escarificação do pavimento tem sido designado de RAP (*Reclaimed Asphalt Pavement*) que, traduzido para o português, seria Pavimento Asfáltico Recuperado (ZUBARAN, 2014).

Segundo Zaumanis *et al.* (2014) e Pereira *et al.* (2021) o RAP, normalmente, é descartado ou utilizado nas entradas de fazendas e estradas vicinais como revestimento primário; quando não, ele fica depositado em pátios ou faixa de domínio às margens das rodovias, podendo dessa forma ocasionar passivos ambientais.

O RAP pode ser incorporado tanto em camadas de base quanto em camadas superficiais. A possibilidade de reaproveitar maiores quantidades de RAP é maior e mais viável em camadas de base, uma vez que estas são mais espessas, com requisitos de desempenho mais baixos e menos regulamentadas (PLATI, 2019).

De acordo com a *National Cooperative Highway Research Program - NCHRP* (2001), o RAP pode ser reutilizado em novas misturas asfálticas, pois seus componentes - ligante e agregados - ainda tem valor. O uso de RAP em novas misturas reduz a quantidade de material novo que precisa ser adicionado à mistura asfáltica, economizando assim, dinheiro e recursos naturais.

Para Han *et al.* (2019) os agregados e ligantes asfálticos são recursos não renováveis. Assim, a aplicação de RAP na produção de uma mistura asfáltica a quente é uma forma de reduzir o consumo desses recursos. Além disso, o uso do RAP reduzirá o volume de resíduos da construção que precisam ser eliminados. Em última análise, o uso do RAP permite o melhor aproveitamento dos recursos naturais e promove o desenvolvimento sustentável da indústria de asfalto.

3.4.2 Caracterização, geração e destinação do fresado

Segundo Ullah e Tanyu (2019), as propriedades do material fresado dependem do tipo da via, do agregado utilizado na mistura, do tipo de fresadora utilizada, do tempo de exposição do pavimento às condições climáticas e do teor de ligante utilizado.

Na pesquisa de Hoy *et al.* (2017), observou-se na composição química e mineral do RAP a presença de 41,93% de CaO e 36,18% de MgO. Segundo os autores, o alto teor de CaO, caso misturado com cinzas que contenham sílica e alumina, pode culminar em uma reação pozolânica melhorada. Ainda segundo os autores, o material oriundo do processo da fresagem pode ser reaproveitado¹⁴ para diversas finalidades, desde sua incorporação em camadas de bases ou sub-bases como para a produção de novos revestimentos. Com isso, há um ganho ambiental e econômico, pois são alternativas sustentáveis que promovem a redução do consumo de energia, de agregados, ligantes virgens e de gases do efeito estufa.

Nos Estados Unidos da América (EUA), a maioria do RAP é utilizada em misturas asfálticas quentes ou mornas (Tabela 1) e a menor quantidade é enviada para aterros.

Tabela 1 – Utilização de RAP nos EUA (milhões de toneladas)

RAP	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Agregados	5,5	3,7	3,4	6,4	3,8	5,8
Misturas quentes e mornas	74,2	76,9	76,2	82,2	89,2	87,0
Misturas frias	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4
Aterros	1,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,2
Outros	1,6	0,4	0,2	2,0	1,4	0,3
Total	82,5	81,3	80,1	90,9	94,8	93,7

Fonte: Adaptado da *National Asphalt Pavement Association* - NAPA (2020).

Segundo West (2010) e Zubaran (2014), o controle ineficiente sobre as pilhas de RAP leva os órgãos reguladores a resistir ao aumento dos percentuais de uso

¹⁴ Segundo Cunha Filho (2018), esse resíduo pode ser classificado como não perigoso e não inerte, considerando as definições da NBR 10.004/2004 e como Classe A, pela resolução CONAMA nº307.

desse resíduo na incorporação das misturas. Alguns órgãos reguladores dos EUA permitem apenas RAP de projetos conhecidos e de autoria do próprio órgão. Estes fresados são denominados de “RAP classificado” enquanto os de natureza não totalmente conhecida são chamados de “RAP não classificado”.

Para potencializar o uso do RAP, Brock e Richmond (2007) sugerem que as pilhas sejam estocadas sobre uma superfície pavimentada e ligeiramente inclinada, sejam cobertas, altas, cônicas, britadas e peneiradas em pequenas porções no dia do uso.

Segundo a *European Asphalt Pavement Association* - EAPA, em 2021, mais de 90% dos 5,5 milhões de quilômetros de rodovias da Europa foram construídas com material asfáltico, consumindo 290,6 milhões de toneladas de asfalto e gerando 47,7 milhões de toneladas de RAP. Ainda segundo a publicação, 72% do RAP disponível foi reutilizado, 25% reciclado e apenas 3% usado em aplicações desconhecidas ou colocado em aterro. Importante destacar a liderança da Hungria no *ranking* da reciclagem do RAP: 98%.

No Brasil, existem poucos casos de aplicação de misturas asfálticas recicladas. Para Suzuki (2019) isso ocorre por falta de exigência dos órgãos governamentais quanto ao emprego de materiais reciclados, falta de conscientização sobre os impactos ambientais causados para obtenção de agregados e ligantes asfálticos novos, falta de especificações técnicas adequadas para uma boa execução e controle tecnológico da obra.

A CNT estima a geração de 1.087.000 toneladas de fresado em rodovias federais e estaduais do Brasil concedidas para a iniciativa privada apenas nos estados de São Paulo, Rio de Janeiro e Paraná, entre os anos de 2017 e 2021. No âmbito do Ceará, dados do DNIT apontam para acúmulo de 646,5 mil toneladas de RAP nos últimos 10 anos¹⁵.

Para Brock e Richmond (2007), o RAP deve ser armazenado em pilhas e tratado da mesma forma que os demais agregados virgens, evitando sua contaminação e fazendo sua separação por granulometria.

Segundo West (2010), o bom manejo e organização das pilhas de estocagem do RAP podem produzir uma graduação mais consistente até mesmo que pilhas de estocagem de agregados virgens.

¹⁵Estimativa realizada pelo autor em outubro de 2023 com dados internos do DNIT.

Para Luzzi (2019) a capacidade produtiva bem como a qualidade do produto final nas usinas adaptadas para misturas recicladas passa pela qualidade da gestão e beneficiamento do estoque de material fresado a utilizar.

Pela literatura (GENNESSEAU, 2015; BOHN, 2017; LUZZI, 2019; SUZUKI, 2019), o manuseio e a estocagem do RAP é um fator importante para conferir um maior controle tecnológico na dosagem da mistura reciclada e, consequentemente, um comportamento homogêneo do material, uma vez que influenciam na granulometria e no teor de ligante final da mistura. Ainda segundo os autores, os caminhões responsáveis pelo transporte do material devem estar limpos, e o local onde será realizado a estocagem deve estar livre de sujeiras ou vegetação, buscando evitar o contato do RAP com agentes externos e sua mistura com outros materiais.

Costa (2022) sugere que o RAP seja fracionado em granulometrias diferentes (fino e grosso) para um melhor controle tecnológico, embora também seja possível utilizá-lo *all-in* (como está). Segundo o autor, a fração fina é comumente reciclada em novas misturas de asfalto, pois possui maiores teores de ligante asfáltico. Já a fração grossa necessita ser melhor estudada em termos de reutilização.

Conforme Brand *et al.* (2012), se o RAP passar por algum processamento adicional (lavagem, peneiramento, fracionamento) deve ser chamado de FRAP, indicando que não é mais um pavimento asfáltico recuperado típico. A pesquisa desses autores mostrou que, após lavagem, o FRAP reduziu de 21,9% para 4,5% o número de partículas finas. Também mostrou que a lavagem do FRAP não proporcionou melhora nas propriedades de resistência do concreto.

3.5 A Reciclagem e/ou reutilização do fresado

A reciclagem de pavimentos não era uma prática comum até o final da década de 1970, mas após o aumento dos preços do ligante asfáltico (decorrente do embargo do fornecimento de petróleo pelos países árabes) a indústria reagiu e desenvolveu tecnologias de reciclagem que possibilitaram a redução da demanda e dos custos (HOWARD *et al.*, 2009; BONFIM, 2011).

Segundo a literatura algumas práticas desenvolvidas naquela época ainda são utilizadas atualmente e passaram a fazer parte das operações rotineiras de construção e reabilitação de pavimentos no mundo (COPELAND, 2011; WEST *et al.*, 2013; ZAUMANIS *et al.*, 2016). No Brasil, a reciclagem de pavimentos teve início em

1980, na obra de restauração da Via Anchieta, no estado de São Paulo (BONFIM, 2011).

Conforme Pires *et al.* (2013), a reciclagem de pavimentos consiste em transformar um pavimento degradado em uma mistura homogênea, dimensionada para receber as ações do tráfego. A técnica consiste na desagregação de parte do concreto asfáltico, correção granulométrica e, se necessário, adição de um agente aglomerante como cal, cimento ou emulsão asfáltica. A reciclagem de pavimentos pode ser feita com reutilização total ou parcial dos materiais existentes no revestimento, na base e na sub-base, sendo feita novamente a mistura e compactação do material. Pode-se adicionar materiais agregados virgens para correção granulométrica e ligante asfáltico novo.

Para Gennesseaux (2015), a reciclagem de pavimentos surgiu devido à necessidade de proteger o meio ambiente no que diz respeito à economia de recursos naturais (agregados), aos espaços físicos (descargas), ao desperdício de energia e à redução dos gases de efeito estufa. Assim, quanto maior a taxa de incorporação de material reciclado em novas misturas, maior o benefício econômico e ambiental proporcionado, sendo uma opção sustentável para a indústria de pavimentação.

Para Luzzi (2019), a realização do serviço de reciclagem de pavimentos está diretamente ligada à economia de recursos e ao cuidado ambiental proposto pela técnica. Com ela, consegue-se diminuir a utilização de agregados virgens e de ligante asfáltico novo quando na produção de novas misturas asfálticas. Além destes, pode-se citar a economia de energia e dos custos de transporte.

Para Bernucci *et al.* (2022), a reciclagem de pavimentos é o processo que usa misturas asfálticas envelhecidas e deterioradas na produção de novas misturas, aproveitando os agregados e ligantes remanescentes, provenientes da fresagem, com acréscimo de agentes rejuvenescedores, espuma de asfalto, ligantes novos (quando necessários) e também com adição de aglomerantes hidráulicos.

Segundo Kandhal e Rajib (1998), a reciclagem do pavimento deteriorado também contribui para solucionar problemas de disposição do material na pista, pois o reuso do material permite manter a geometria e a espessura do pavimento. Em alguns casos, a interrupção do tráfego é menor do que em outras técnicas de reabilitação. Assim, a técnica de reciclagem tem como vantagens específicas: redução de custos da construção, aproveitamento de agregados e ligantes, preservação da

geometria existente, preservação do meio ambiente, menor tempo de execução, economia de energia nas etapas de produção, transporte e extração da matéria prima.

De acordo com Brosseaud (2011), a reciclagem de pavimentos nos Estados Unidos soma mais de 80 milhões de toneladas por ano e isso representa aproximadamente duas vezes mais que os quatro resíduos notadamente mais reciclados, que são papéis, vidros, plásticos e alumínio, onde juntos somam 40 milhões de toneladas recicladas por ano.

No Brasil, a reutilização do material fresado é realizada de maneira menos nobre, ou seja, em camadas de aterros de pavimentação, rodovias municipais de baixo volume de tráfego sem nenhum tipo de beneficiamento, acessos de lindeiros a rodovias, bem como operações tapa-buraco em rodovias municipais e rurais (LUZZI, 2019). O uso de RAP em concretos, como estudado nessa pesquisa, é ainda menos aplicado no país.

Figura 9 – Estrada vicinal beneficiada com RAP no Município de Caucaia-CE



Fonte: Autor (2024).

Segundo a ARRA (1992), existem diferentes métodos de reciclagem de pavimentos:

Fresagem com/sem recomposição

Consiste na remoção, controlada automaticamente, do revestimento asfáltico a uma desejada profundidade, com a restauração da superfície a uma

determinada cota e inclinação, livre de afundamentos ou outras imperfeições. Pode ser utilizada para regularização ou texturização do pavimento para eliminar o escorregamento e recuperar a resistência à derrapagem. A fresagem do revestimento do pavimento é realizada por um tambor rotativo que transfere o RAP para os caminhões que irão retirar o material do local. O pavimento resultante pode ser imediatamente liberado ao tráfego e posteriormente pode ser recapeado ou deixado como uma superfície de texturização.

Reciclagem a quente em usina

Neste método, o RAP é combinado com agregados virgem e concreto asfáltico ou agente reciclador para produzir misturas asfálticas quentes. Tanto as usinas gravimétricas quanto volumétricas podem ser utilizadas para produzir misturas recicladas. O RAP é geralmente obtido através da fresagem de pavimento, ou também por operação de trituração.

Reciclagem a quente no local

Esse método é realizado no próprio local da obra, com o pavimento existente processado a uma profundidade de 2 a 4 centímetros. O pavimento asfáltico deteriorado é aquecido e amolecido de modo a permitir que seja escarificado ou misturado por um rotativo a quente, a uma determinada profundidade. Novos materiais e/ou agente reciclador ou outro aditivo são adicionados ao material.

Reciclagem a frio no local

É uma técnica de reabilitação que reusa materiais de pavimentos existentes. Todo o trabalho é realizado enquanto o pavimento é reciclado e normalmente não é necessário o transporte de materiais, exceto o aditivo que for usado. Em alguns casos, podem ser adicionados agregados virgens ao material reciclado para melhorar as características do RAP. Geralmente utiliza-se emulsão de asfalto, mas também podem ser usados agentes rejuvenescedores.

Recuperação profunda do pavimento

É um método de reciclagem onde toda a seção do pavimento asfáltico e uma quantidade pré-determinada de material subjacente são tratados com aditivos para produzir uma camada de base estabilizada. Em alguns casos, a quantidade de material no local não é suficiente para atingir a espessura desejada da camada de base tratada e são necessários novos materiais para aumentar a espessura (ARRA, 1992).

3.6 Drenagem em rodovias

3.6.1 Generalidades

Para Jabôr (2023) um sistema de drenagem completo e eficaz tem por objetivo remover e/ou impedir tecnicamente o excesso de águas superficiais e profundas para proteger e melhorar tudo sobre que possam elas influir. Sendo assim, o sistema de drenagem é um conjunto de dispositivos que objetivam garantir a integridade do corpo

estradal e do seu entorno (meio ambiente), bem como a segurança dos usuários da via, com o mais baixo custo de implantação e manutenção.

Conforme Rocha (2022) a escolha e o dimensionamento dos dispositivos de drenagem serão feitos com base nos resultados e dados obtidos nos estudos hidrológicos, sendo um, pré-requisito para o outro. São esses estudos, por exemplo, que trazem informações sobre a parcela de precipitação que se transforma em deflúvio (DNIT, 2005b) e com a urbanização e impermeabilização das superfícies, entende-se de Schreiber (2022), crescem os volumes a escoar bem como os registros de inundações e alagamentos.

A água, conforme Suzuki *et al.* (2013), tem movimentação irrestrita na estrutura dos pavimentos (seja por infiltração, percolação, capilaridade ou movimentos de vapor de água), sendo uma das suas principais causas da deterioração precoce. De um modo geral, os efeitos danosos da água livre sobre a estrutura de um pavimento podem ser assim resumidos: redução da resistência dos materiais granulares não estabilizados e do solo do subleito; bombeamento nos pavimentos de concreto com consequente formação de vazios, de degraus, trincamento e deterioração dos acostamentos; bombeamento dos finos da base granular dos pavimentos flexíveis pela perda de suporte da fundação, devido à elevada pressão hidrodinâmica gerada pelo movimento do tráfego; comportamento e desempenho insatisfatório dos solos expansivos devido à presença de água; trincamento dos revestimentos (asfáltico e CCP) em função do contato direto com a água.

Conforme Reis (2016) diversos fatores geram a deterioração do pavimento: erro de projeto e construção, falta de manutenção, materiais inadequados, fadiga e oxidação, tráfego, sol, temperatura e a presença de água. De todos estes fatores, o autor destaca que o mais citado pela literatura é a água.

Rocha (2022) destaca que as precipitações pluviométricas são a maior fonte de água que penetra na estrutura dos pavimentos rodoviários, podendo ocasionar infiltrações, tanto pela superfície como pelas bordas da junção pista-acostamento. Ainda segundo o autor, a água presente no interior da estrutura de uma rodovia tem influência no comportamento e desempenho dos materiais de cada camada constituinte do pavimento. Com o passar do tempo, o excesso de água passa a influenciar negativamente sobre a serventia. Por fim, Rocha (2022) destaca que a presença da água em pavimentos asfálticos gera elevada deflexão na superfície, baixo raio de curvatura da bacia de deformação, trincamento por fadiga, redução da

capacidade de suporte e desagregação. Em pavimento rígido, os defeitos relacionados com a umidade são a instabilidade do subleito, bombeamento dos finos e consequente perda de suporte, além de anomalias do tipo trinca de canto.

3.6.2 Drenagem superficial

Conforme Carmo *et al.* (2024), a drenagem superficial é um aspecto crucial no planejamento e na construção de pavimentos urbanos e rodoviários. Segundo os autores, gerenciar adequadamente as águas pluviais é importante para evitar inundações, erosão e danos aos pavimentos, mas também contribui para a sustentabilidade e qualidade de vida das comunidades.

Para Lima *et al.* (2022) um sistema eficiente de drenagem em uma rodovia é um dos principais responsáveis pela segurança das pessoas, circulação de veículos e também pelo bom desempenho e longa vida do pavimento.

A função primordial da drenagem superficial em uma rodovia deve ser eliminar a água que, sob qualquer forma, atinge o corpo estradal, captando-a e conduzindo-a para locais em que menos afete a segurança e durabilidade da via (DNIT, 2006b). Ainda conforme o DNIT (2006b) um sistema de drenagem superficial eficiente utiliza uma série de dispositivos com objetivos específicos: valeta de proteção de corte, valeta de proteção de aterro, sarjeta de corte, sarjeta de aterro (meio fio), sarjeta de canteiro central, descida d'água, saída d'água, caixa coletora, bueiro de greide, dissipador de energia, escalonamento de taludes, corta-rio.

No que diz respeito especificamente ao dispositivo de drenagem superficial do tipo meio-fio, de forma geral, as normas e especificações técnicas do DNIT e de outros órgãos rodoviários, determinam que as características do concreto necessárias para a produção desses elementos estejam apoiadas na resistência característica (f_{ck}).

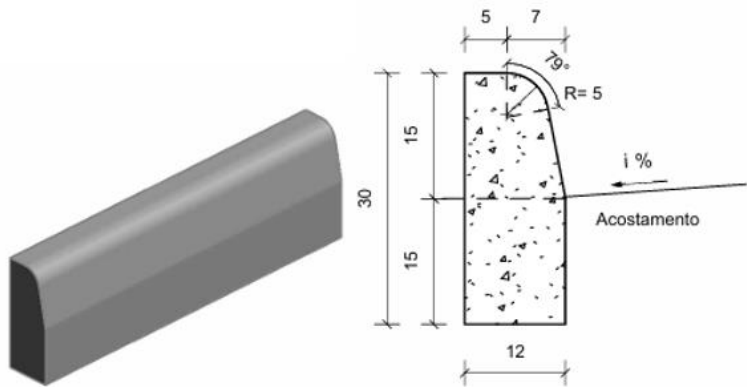
Os meios-fios são dispositivos destinados a conduzir longitudinalmente as águas precipitadas sobre a pista de rolamento para os bueiros de greide ou saídas d'água, impedindo que escoem pelo talude do aterro, provocando pontos de erosão. São normalmente executadas em concreto simples, podendo ser constituída de guia (meio-fio) e calha, ou somente de guia, com moldagem *in loco* de forma manual e/ou mecânica (DNIT, 2010). Essa diferença pode ser melhor entendida na Norma DNIT 020/2023, a saber:

Meios-fios: Limitadores físicos da plataforma rodoviária, com diversas finalidades, entre as quais, destaca-se a função de proteger o bordo da pista dos efeitos da erosão causada pelo escoamento das águas precipitadas sobre a plataforma que, decorrentes da declividade transversal, tendem a verter sobre os taludes dos aterros. Desta forma, os meios-fios têm a função de interceptar este fluxo, conduzindo os deflúvios para os pontos previamente escolhidos para o lançamento.

Guia: Dispositivos com a função de limitar a área da plataforma dos terrenos marginais, principalmente em segmentos onde se torna necessária a orientação do tráfego como: canteiro central, interseções, obras de arte e outros pontos singulares, cumprindo, desta forma, importante função de segurança, além de direcionar o escoamento na drenagem superficial (DNIT, 2010).

Esses dispositivos de drenagem devem ser executados em Concreto de Cimento Portland, moldados *in loco* pelo método convencional (fôrmas de madeira ou metálicas), por extrusão (fôrmas deslizantes) ou pré-moldados, devendo ser dosado racional e experimentalmente para uma resistência característica à compressão mínima, aos 28 dias, de 20 MPa (DNIT, 2018), Figura 10.

Figura 10 – Meio-fio de concreto



Consumos médios ³		Método executivo ⁴		
		Convencional	Extrusão	Pré-moldado
Escavação	m ³ /m	0,0180	0,0180	0,0180
Concreto fck ≥ 20 MPa	m ³ /m	0,0334	0,0334	0,0334
Fôrma	m ² /m	0,5141	-	-
Argamassa de cimento e areia ^{5 e 6}	m ³ /m	0,0001	-	0,0003

Notas: 1 - Dimensões em centímetros (cm); 2 - Os meios-fios devem atender aos requisitos da norma DNIT 020-ES; 3 - Os consumos médios indicados correspondem aos quantitativos efetivos segundo a geometria dos dispositivos, considerando a seção linear; 4 - Os meios-fios podem ser moldados *in loco* pelo método convencional (fôrmas de madeira ou metálicas), por extrusão (fôrmas deslizantes) ou pré-moldados; 5 - Argamassa de cimento e areia, traço 1:3, para rejuntamento das peças pré-moldadas, espessura 1 cm; 6 - Executar juntas de dilatação em intervalos de 12 m, preenchidas com argamassa de cimento e areia, traço 1:3, espessura de 1 cm.

Fonte: DNIT (2018).

Nos Estados Unidos, as normas exigem entre 20,68 e 27,58 MPa, a depender do estado (LAKE OSWEGO, 2018). No Canadá, a confecção de meio-fio de concreto deve atender às seguintes propriedades: 32 MPa, *Slump Test* de 30 a 80mm, relação água cimento de 0,45 e consumo mínimo de 340kg de cimento por metro cúbico de concreto produzido (MANITOBA, 2013).

Gomes Júnior (2020) produziu elementos de drenagem do tipo meio-fio com concreto convencional e modificado (contendo entre 5 e 7% de resíduos de pneus substituindo parcialmente o agregado miúdo). Observou que a melhor dosagem era aquela com até 5% de resíduo; quando mediu resistência à compressão axial de 22,72 MPa e tração na flexão de 4,81 MPa. Entretanto, a amostra com 7% de incorporação de resíduos de pneus apresentou melhora na tenacidade à fratura. Concluiu que o uso dos resíduos de pneus para a produção de elementos pré-fabricados de concreto não estrutural é viável técnica e ambientalmente.

Ruiz (2017) aplicou RAP na produção de concreto para construção de dispositivos de drenagem do tipo meio fio e sarjetas. O pesquisador usou as especificações técnicas do DNIT para elementos de drenagem superficial, ou seja, resistência característica à compressão de 20MPa. Constatou que o incremento de fresado em percentuais superiores a 15% afeta substancialmente as propriedades mecânicas do concreto. Por outro lado, observou que o concreto com RAP tem menor ascensão e absorção de água por capilaridade; qualidades importantes para dispositivos (meio fio) que ficarão expostos às intempéries e ao contato com a água. O autor alega que o uso do RAP no concreto gera redução no custo de fabricação, devido à redução de custos com a aquisição de matérias primas naturais extraídas de jazidas (areia e pedra britada).

Silva Filho *et al.* (2013) desenvolveram e patentearam diversos elementos de drenagem, entre eles meios-fios, usando concreto permeável. Segundo os autores, esse concreto serve para regular o ingresso de água no sistema de drenagem, permitindo que as águas das chuvas entrem nos meios-fios e sigam diretamente para o solo e, conseqüentemente, alcancem o lençol freático. A pesquisa também mostrou redução nos custos de produção desses elementos por parte do poder público ou órgão responsável pela execução dos mesmos. Além disso, foram realizados testes de aplicação da tecnologia em escala real com a implantação de provas experimentais em campo.

Carvalho e Medeiros (2014) utilizaram material fresado proveniente das pavimentações rodoviárias na confecção de concreto não estrutural (meio-fio e sarjeta). As peças alcançaram a resistência característica mínima exigida pelo DNIT com até 50% de RAP sem tratamento substituindo o agregado natural. Os autores relataram ganhos econômicos, ocasionados pela redução do custo de aquisição dos agregados comerciais e os respectivos transportes. Alegaram ainda, que a técnica pode ser considerada como alternativa para reutilização de resíduos, reduzindo assim os impactos ambientais gerados.

3.7 O uso de RAP no concreto

Conforme Ruiz (2017) vários motivos impulsionam o emprego de agregados reciclados no concreto: a necessidade de baratear o custo da fabricação deste importante insumo da construção, a necessidade de preservar as jazidas de materiais naturais tendo em vista que suas reservas são limitadas, a busca pela melhora do desempenho do concreto, abrindo a possibilidade de aproveitá-lo em novas aplicações.

Flores (2022) pesquisou o uso do RAP na produção de blocos para pavimentação intertravada, utilizando misturas asfálticas 100% RAP. Os resultados da primeira etapa apontaram que as misturas recicladas com RAP 50/70 obtiveram maiores resistências à compressão, tração e módulo de resiliência, enquanto apresentaram maior desgaste por abrasão, indicando que elas são mais rígidas e susceptíveis a danos por fadiga, apesar de resistirem melhor à tração e compressão. Já as misturas com o RAP 60/85 indicaram tendência de menor rigidez, com menor resistência à compressão, tração, módulo de resiliência e maior resistência ao desgaste por abrasão. O autor concluiu que os blocos avaliados, apesar de não atenderem à NBR 9781, poderiam ser utilizados em vias exclusivas de pedestres, passeios públicos, ciclovias, garagens residenciais e vias exclusivas para veículos leves, com baixo tráfego.

Costa (2022) investigou a possibilidade de incorporar o RAP como substituto de agregados naturais e o material álcali-ativado (MAA) como substituto do Cimento Portland (CP) nas camadas de base e sub-base. A ideia era produzir um material (RAP-MAA) com resistência e durabilidade aceitáveis com baixo impacto ambiental. Para melhoria da observação da Zona de Transição Interfacial (ZTI), o autor utilizou

um microscópio confocal de varredura a laser combinado com um microscópio eletrônico de varredura e observou a composição das partículas do RAP, fissuras na borda e dentro da matriz ativada. Os resultados da pesquisa demonstraram que o RAP-MAA é um material promissor para as camadas de base do pavimento, mas outras investigações são necessárias para melhor entendimento de suas propriedades a longo prazo.

Nandi e Ransinchung (2021) estudaram o potencial de utilização de RAP (frações grossas e finas não beneficiadas) em blocos de concreto para pavimentação. Os resultados laboratoriais revelaram que os blocos de concreto com RAP têm grande potencial para serem utilizados em aplicações de tráfego médio, pesado e muito pesado. Contrariamente ao consenso geral, as misturas com RAP finos produziram blocos com melhor resistência à compressão que as misturas de concreto com RAP grosso, devido à natureza relativamente bem graduada dos finos e ao menor teor de asfalto. Quanto à durabilidade, todos os blocos apresentaram valores satisfatórios de absorção de água e resistência à abrasão após 28 dias de cura úmida. Todas as misturas foram consideradas resistentes à carbonatação, independentemente do teor de RAP. A avaliação de sustentabilidade revelou que a fabricação de blocos com agregados de RAP reduziu o custo de produção de cada bloco em 19,9% e reduziu as emissões de CO₂ em 2%.

Boussetta *et al.* (2020) estudaram o reaproveitamento a frio do RAP como agregado alternativo na fabricação de Concreto Compactado a Rolo (CCR). Inicialmente foram estudados os efeitos da substituição de agregados naturais por RAP nas propriedades mecânicas do CCR (módulo de elasticidade, resistência à tração e compressão). Os ensaios mecânicos em seis misturas mostraram que as propriedades do CCR diminuem com o aumento do teor de RAP. A qualidade de adesão entre agregado e matriz cimentícia, por meio de modelagem, foi afetada negativamente pela presença do RAP.

Brand *et al.* (2012) investigaram o uso de RAP fracionado (FRAP) em substituição parcial (0%, 20%, 35% e 50%) do agregado graúdo virgem em uma mistura de concreto contendo cimento, escória e cinza volante. Os resultados demonstraram que até 50% de FRAP pode ser viável em um concreto para atender aos requisitos de resistência do Departamento de Transportes de Illinois (Estados Unidos) no que diz respeito a resistência à compressão e resistência à tração na flexão. Observaram também que o aumento do teor de FRAP no concreto gerava

maior abatimento, menor massa unitária e módulos elásticos e dinâmicos menores. O teor de ar permaneceu relativamente inalterado.

Debbarma *et al.* (2019) investigaram a fração ideal de RAP (grosso, fino e total) e sua proporção (50% e 100%) para misturas de pavimentos de Concreto Cimento Portland compactado com Rolo (PCCR), medindo várias propriedades frescas, mecânicas e de durabilidade. As frações de RAP reduziram as propriedades frescas das misturas de PCCR, no entanto, tiveram menos de 4% de efeito prejudicial nos valores de densidade seca quando comparadas com a mistura controle. A resistência à compressão de 27,6MPa para misturas PCCR foi alcançada por todas as misturas com RAP, exceto para a mistura contendo 100% de RAP total, no entanto, a mesma atingiu o valor de referência mínimo de resistência à tração na flexão de 3,67MPa. Os resultados de durabilidade indicaram que incorporações de RAP em PCCR podem ser benéficas em termos de menor porosidade, redução de absorção de água, menor taxa inicial e secundária de absorção capilar de água. Por outro lado, as misturas sofreram perdas drásticas quando submetidas a ambientes agressivos. Misturas individuais de RAP grosso e fino forneceram resistência à abrasão suficiente. Para os autores, a incorporação de qualquer fração de RAP proporciona uma redução nos custos totais de produção da mistura PCCR de 1 m³ em até 46% em comparação com a mistura convencional.

Han *et al.* (2019) fracionaram o RAP proveniente de uma via expressa que liga Pequim a Tibete com dispositivo de peneiramento mecânico composto por três aberturas (4,75mm, 9,5mm e 19mm). Foram obtidas três frações de RAP: um miúdo (0-5 mm) e dois graúdos (5-10 mm e 10-20 mm), com teores de asfalto de 8,2%, 5,1% e 2,0% respectivamente. Observaram que o teor de asfalto do RAP miúdo (0-5 mm) era 1,6 vezes maior que o do RAP graúdo (5-10 mm) e quatro vezes maior que o RAP graúdo (10-20 mm). Concluiriam que o uso do RAP miúdo (0-5 mm) em misturas recicladas tem mais benefícios econômicos quando comparados com o RAP graúdo.

Singh *et al.* (2018a) investigaram o potencial do RAP e das cinzas do bagaço de cana-de-açúcar para produção de misturas de concreto. Foram elaborados 5 traços com substituição parcial de agregados naturais por RAP grosso e RAP fino nas proporções de 50% e 100%. Foram preparadas 3 misturas subsequentes incorporando 100% de agregados RAP misturados com 10% e 15% de cinza de bagaço em substituição parcial ao cimento. Notou-se que as incorporações de agregados do tipo RAP fino diminuíram significativamente as propriedades frescas,

mecânicas e de durabilidade do concreto em comparação com os agregados RAP grosso. Descobriu-se que a incorporação de 10% de bagaço de cana melhora significativamente as propriedades mecânicas e de durabilidade do concreto. A análise econômica das misturas mostrou que nas incorporações, os agregados RAP misturados com bagaço de cana podem reduzir o custo total de 1 m³ de concreto em mais de 40% em comparação ao concreto convencional.

Singh *et al.* (2018b) estudaram a produção de Concreto Magro Seco (CMS) e Misturas Betuminosas (MB) com RAP Grosso (G) e Fino (F) extraídos de dois pavimentos flexíveis velho (V) e novo (N) com diferentes idades e vida útil de armazenamento. Foram moldados um total de 15 misturas de CMS, compostos por 9 misturas contendo diferentes proporções (25-100%) de agregados de RAP/G/V e RAP/G/N e 6 misturas contendo agregados RAP/F/V (25-100%) e RAP/F/N (25% e 50%). Os autores verificaram que os agregados obtidos de pavimentos antigos tinham potencial para substituir 75% de agregados grossos e 50% de agregados finos naturais, enquanto 25% de agregados RAP/G/N podem ser utilizados para misturas de CMS. Observaram que a utilização de agregados RAP não só reduziu o custo total das misturas (de 7% até 34%) como também proporcionou outros benefícios ambientais, tais como redução da pegada de carbono e redução na exploração de jazidas naturais.

Abraham e Ransinchung (2018) avaliaram o efeito da adição de frações finas de RAP, em substituição aos agregados naturais, sobre a densidade, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e resistência à tração por divisão de argamassas de cimento. As propriedades da argamassa endurecida com RAP foram menores em comparação com a mistura convencional e diminuíram com o aumento no teor de agregados finos de RAP. Houve uma diminuição máxima de 41,7%, 39,3% e 51,5% na resistência à compressão, resistência à tração na flexão e resistência à tração por divisão. A resistência mínima de 43MPa foi alcançada por misturas de argamassa com até 25% de RAP.

Van Den Bergh *et al.* (2017), ao apresentarem dois estudos sobre o uso de RAP em CCP, concluíram (1º) que a resistência à compressão diminuiu em até 42% com a adição do RAP e que até 25% dos agregados poderiam ser substituídos por RAP para iniciar a otimização das misturas de concreto, (2º) o RAP diminuiu a trabalhabilidade do concreto fresco devido à alta absorção e atrito interno, (3º) o RAP fino tem maior efeito

na trabalhabilidade que o RAP grosso e misturas com RAP apresentam redução na resistência à compressão em relação à mistura controle.

Delwar *et al.* (1997) investigaram diversos traços de CCP com substituições variadas de RAP grosso e fino (0%, 25%, 50%, 75% e 100%) e duas proporções água-cimento (a/c) (0,4 e 0,5). Com exceção de alguns casos, a tendência geral foi que a inclusão de RAP (fino e/ou grosso) aumentou a quantidade de ar aprisionado, diminuiu a massa unitária e diminuiu o abatimento. Os resultados das propriedades endurecidas mostraram que a adição de RAP (fino e/ou grosso) ao concreto reduziu o módulo de elasticidade e a resistência à compressão. A deformação no pico da carga compressiva também foi maior para o concreto com RAP. Os autores concluíram que o concreto com alto teor de RAP deve ser adequado para aplicações não pavimentadas, como calçadas, barreiras e calhas.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Considerações gerais

Essa pesquisa substituiu agregados naturais por teores diferentes de Fresado de Pavimento Asfáltico (RAP) em traços de Concreto de Cimento Portland (CCP). Após moldagem e cura dos corpos de prova, foram medidas algumas propriedades físicas e mecânicas. A pesquisa também contemplou a implantação de um trecho na BR-020/CE de 200m de comprimento com os dispositivos de drenagem (meio-fio pré-moldado do tipo MFC 05) contendo o RAP.

Na fase 1 (piloto) da pesquisa foram elaborados traços de concreto com teores de 10% a 40% de RAP miúdo, passante na peneira nº 4 (4,75 mm), em substituição a areia. Foram moldados corpos de prova, realizada cura por imersão em água¹⁶ e rompimento¹⁷ com 07 e 28 dias¹⁸. O concreto de referência foi preparado com as especificações utilizadas pelo DNIT na confecção de dispositivos de drenagem: 1:1,94:2,98:0,53 (cimento, areia, brita, fator água/cimento¹⁹), com f_{ck} ²⁰ de 20MPa²¹, uso de betoneira e lançamento manual. Parte dos detalhes da fase 1 (piloto) pode ser observada na Tabela 2 e 3.

Tabela 2 – Descrição das preparações do concreto com e sem fresado (fase 1, piloto)
Continua

Traço	Composição	Teores (%)	Corpos de Prova
Referência	Cimento, areia, brita, água	A100/F0	04
1	Cimento, areia, fresado, brita, água	A90/F10	04
2		A80/F20	04

¹⁶Esse processo tem por finalidade evitar a evaporação prematura da água necessária para a hidratação do cimento, além de proporcionar redução da sua porosidade, contribuindo para aumentar a durabilidade das estruturas.

¹⁷Os ensaios de resistência foram realizados no laboratório da Insttale Engenharia com prensa de concreto de 100 toneladas.

¹⁸Essas idades são utilizadas em diversos trabalhos e ambas estão de acordo com a NBR 5739/2018 da ABNT.

¹⁹Relação em massa.

²⁰Resistência característica do concreto à compressão aos 28 dias.

²¹Classe de resistência C20 e classe de consistência S50.

Tabela 2 – Descrição das preparações do concreto com e sem fresado (fase 1, piloto)

Traço	Composição	Teores (%)	Corpos de Prova
3	Cimento, areia, fresado, brita, água	A70/F30	04
4		A60/F40	04
Total		20	

Legenda: A (areia) e F (fresado).

Fonte: Autor (2024).

Tabela 3 – Distribuição dos insumos nas dosagens estudadas (fase 1, piloto)

Materiais	Unidade	Referência	A90/F10	A80/F20	A70/F30	A60/F40
Cimento	Kg	28,557	25,701	14,720	19,990	17,134
Brita				43,866		
Água				7,802		
Areia				22,845		
Fresado				5,711		

Fonte: Autor (2024).

A fase 1 (piloto) permitiu observar:

- (1) valores de *Slump Test* com pouca variação de abatimento nas misturas produzidas com RAP com relação a mistura de referência;
- (2) aumento gradativo na resistência a compressão ao longo da idade de rompimento (de 7 para 28 dias);
- (3) diminuição na resistência dos concretos que tinham os maiores teores de RAP embora todas as misturas tenham superado os 20MPa de referência.

Diante desses resultados, foi planejada a fase 2 (experimental) da pesquisa. Nela, foram elaborados traços de concreto com teores de 25, 50, 75 e 100% de RAP miúdo substituindo a areia (chamados na pesquisa de M25, M50, M75 e M100), RAP graúdo substituindo a brita (G25, G50, G75 e G100) e ambos (RAP miúdo e graúdo juntos) em substituição a areia e brita (MG25, MG50, MG75 e MG100). Todas as

substituições foram feitas em massa e as propriedades físicas e mecânicas dos concretos foram comparadas com um concreto de referência (REF). Cabe observar que não existe na literatura um padrão de substituição (Tabela 4).

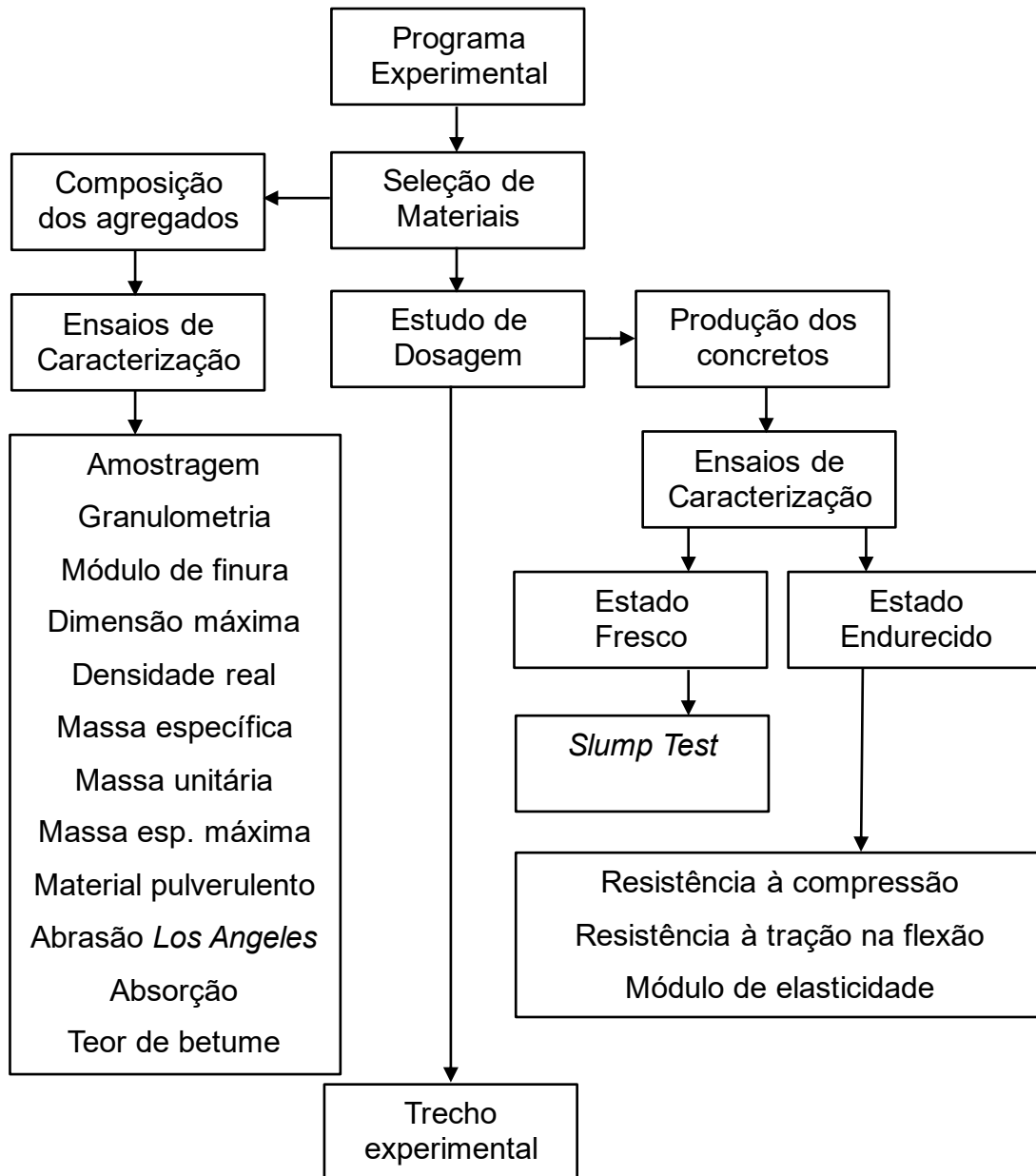
Tabela 4 – Teores de RAP e de substituição na literatura

Autor(es)	Tipo de RAP	Substituição
Ruiz (2017)	REF	0%
	Miúdo	9,6%
	Graúdo	29,7%
Brand e Roesler (2017b)	Miúdo	100%
Shi <i>et al.</i> (2017)	REF	0%
	Graúdo	20%
	Não Classificado	40%
Thomas <i>et al.</i> (2018)	REF	0%
	Graúdo	25% e 50%
Abraham e Ransinchung (2018)	REF	0%
	Miúdo	25% e 100%
Singh <i>et al.</i> (2018a)	REF	0%
	Miúdo	50% e 100%
Singh <i>et al.</i> (2018b)	REF	0%
	Graúdo/Velho	25% e 100%
	Graúdo/Novo	25% e 100%
	Miúdo/Velho	25% e 100%
	Miúdo/Novo	25% e 100%
Hossiney <i>et al.</i> (2010)	REF	0%
	Miúdo	10%
	Graúdo	40%
Shatarat <i>et al.</i> (2019)	REF	0%
	Graúdo	20% e 100%
Debbarma <i>et al.</i> (2019)	REF	0%
	Graúdo	50% e 100%
	Miúdo	50% e 100%
	Miúdo e Graúdo	50% e 100%
Huang <i>et al.</i> (2005)	REF	0%
	Graúdo	100%
	Miúdo	100%
	Miúdo e Graúdo	100%
Papakonstatinou (2018)	REF	0%
	Miúdo	20% e 100%
	Miúdo e Graúdo	5% e 15%

Fonte: Autor (2024)

A Figura 11 apresenta o fluxograma da fase experimental da pesquisa, e na sequência foram detalhadas as variáveis de cada etapa.

Figura 11 – Fluxograma da pesquisa



Fonte: Autor (2024).

4.2 Seleção e caracterização geral dos materiais

Os principais materiais utilizados nessa pesquisa foram RAP, brita 1/2" (AGN), areia grossa (AMN), cimento (CP-III-32RS) e água potável da rede da CAGECE; todos estavam disponíveis no pátio e/ou no laboratório da Superintendência Regional do DNIT (Seção Ceará) localizada na BR-116/CE, s/nº, Km 06, Cajazeiras, Fortaleza-CE. As amostras (Figura 12) e o concreto foram submetidos aos ensaios listados na Tabela 5.

Figura 12 – Materiais utilizados na pesquisa



a) Areia grossa



b) Brita 1/2" (graduação 0)



c) Fresado bruto



d) Cimento CP-III-32 RS

Fonte: Autor (2024).

Tabela 5 – Lista de análises, parâmetros e ensaios realizados

Ensaio ou Procedimento					Continua
	F	A	B	C	Referência
Amostragem	X	X	X		NBR 16915/2021
Granulometria	X	X	X		NBR 17054/2022
Módulo de finura e dimensão máxima	X	X	X		NBR 7211/2022
Densidade real dos agregados miúdos		X			DNER-ME 093/1994
Massa específica dos agregados graúdos		X	X		NBR 16917/2021
Massa unitária dos agregados	X	X	X		NBR 16972/2021
Massa específica máxima	X				ASTM D 2041(<i>rice test</i>)
Material pulverulento	X	X	X		NBR 16973/2021
Absorção do agregado miúdo	X	X			NBR 16916/2021
Absorção do agregado graúdo	X		X		NBR 16917/2021

Tabela 5 – Lista de análises, parâmetros e ensaios realizados

Ensaio ou Procedimento					Conclusão
	F	A	B	C	Referência
Perda de massa	X		X		NBR 16974/2022
Teor de betume	X				NBR 16208/2013
Determinação da consistência				X	NBR 16889/2020
Moldagem/cura dos corpos-de-prova				X	NBR 5738/2016
Resistência à compressão				X	NBR 5739/2018
Resistência à tração na flexão				X	NBR 12142/2010
Módulo de elasticidade				X	NBR 8522-1/2021
Legenda: F (fresado), A (areia), B (brita) e C (concreto).					

Fonte: Autor (2024).

O cimento utilizado na pesquisa foi o Cimento Portland de Alto-forno, Mizu CPIII 32-RS para uso geral, produzido pela POLIMIX Concreto Ltda para atender a norma NBR 16697 (ABNT, 2018). A Tabela 6 apresenta algumas características químicas, físicas e mecânicas desse cimento (dados fornecidos pelo fabricante).

Tabela 6 – Características do cimento CPIII 32-RS utilizado na pesquisa

Características		Unidade	Média	Desvio	NBR 16697:2018
Composição Química	Perda ao fogo	%	2,22	0,09	≤ 6,5
	Resíduo insolúvel	%	1,59	0,11	≤ 5,0
	Trióxido de enxofre (SO ₃)	%	3,41	0,08	≤ 4,5
	Óxido de cálcio (CaO) livre	%	0,34	0,09	-
Resistência à compressão	03 dias	MPa	13,56	1,04	≥ 10,0
	07 dias	MPa	22,80	1,29	≥ 20,0
	28 dias	MPa	38,40	1,40	≥ 32,0
Finura	Massa específica	g/cm ³	2,9	0	-
	Área específica (Blaine)	cm ² /g	4431	154,58	-
Pega	Início	min	224,6	9,46	≥ 60
	Fim	min	309,6	17,97	≤ 720
Consistência	Normal	%	33,08	0,29	-

Fonte: Dados fornecido pelo fabricante.

Para um melhor entendimento, a NBR 15116 (ABNT, 2021), define agregados como sendo:

1. agregado composto

agregado resultante da mistura intencional de agregado reciclado e agregado natural e/ou britado, possibilitando o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do produto a ser preparado com esse material.

2. agregado graúdo

agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos na ABNT NBR NM 248.

3. agregado miúdo

agregado cujos grãos passam pela peneira com abertura de malha de 4,75 mm, ressalvados os limites estabelecidos na ABNT NBR NM 248.

4. agregado natural

material granular de origem natural, já encontrado fragmentado ou resultante da britagem de rochas, sendo classificado em função da dimensão granulométrica conforme a ABNT NBR 7211.

5. agregado reciclado

material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção classe A, com características técnicas para aplicação em obras de engenharia

A areia grossa utilizada na composição dos concretos pesquisados foi adquirida no município de São Luiz do Curu, região metropolitana de Fortaleza-CE, proveniente do Rio Curu. Todo material foi seco ao ar, homogeneizado, ensacado e estocado.

A brita utilizada foi proveniente da Nordbrita Nordeste Mineração, localizada no município de Maracanaú, região metropolitana de Fortaleza-CE. Nessa pesquisa aplicou-se a brita granítica de 1/2" (graduação 0) e diâmetro máximo de 12,50 mm, por apresentar uma granulometria comumente usada em obras de drenagem do DNIT.

O RAP utilizado na pesquisa foi coletado no depósito do DNIT localizado no km 395,8 da BR-020/CE, na localidade de Minguaú, ou seja, utilizou-se um RAP proveniente de diversas obras de conservação rodoviária do órgão, sendo considerado RAP não classificado.

Figura 13 – Fresado asfáltico de pavimentação (RAP) do tipo não classificado



Fonte: Autor (2024).

O RAP da pesquisa foi fracionado em granulometrias diferentes (fina e grossa) para um melhor controle tecnológico, segundo orienta Costa (2022). O RAP fino foi o passante na peneira nº4 (4,75mm) para substituir a areia. O RAP grosso foi o passante na peneira de 1/2 polegada (12,5mm) e retido na peneira nº4 para substituir a brita. Como não foi feita a lavagem do fresado, o material também pôde ser considerado um *dirty rap* ou *rap sujo*. O ligante residual do RAP não foi estudado e nem reaproveitado. Assim, o RAP foi tratado como um *black rock*, ou seja, um agregado negro²².

Figura 14 – Amostras de RAP grosso (acima) e fino (abaixo), ambos do tipo sujo



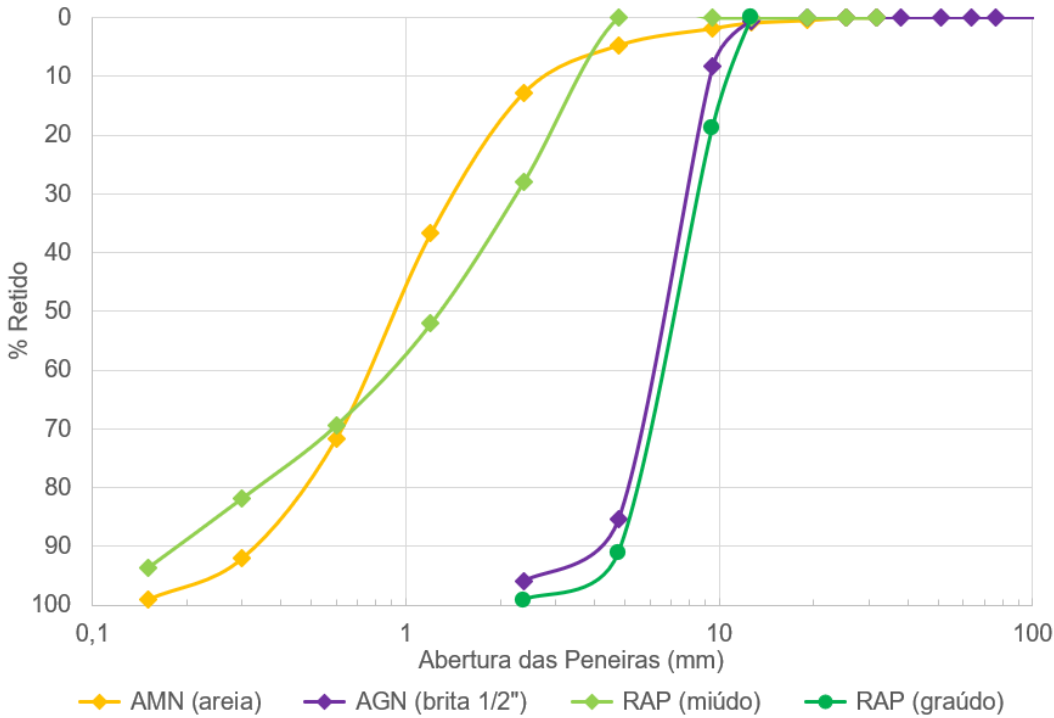
Fonte: Autor (2024).

²²A intenção da pesquisa foi trabalhar com amostras reais, ou seja, do jeito que são encontradas nos pátios do DNIT.

4.3 Ensaios de caracterização

As matérias primas utilizadas na pesquisa foram submetidas aos ensaios listados na Tabela 5. Após determinação da granulometria foram plotadas as curvas apresentadas na Figura 15. Os demais dados da caracterização dos agregados estão catalogados nas Tabelas 7, 8, 9 e 10.

Figura 15 – Curvas granulométricas dos agregados



Fonte: Autor (2024).

Tabela 7 – Caracterização da areia grossa (AMN)

Ensaios de caracterização	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio
Módulo de finura	3,1	3,2	3,3	3,2	0,06
Dimensão máxima (mm)	4,76	4,76	4,76	4,76	0,00
Massa unitária comp. (g/cm³)	1,627	1,625	1,622	1,624	0,003
Massa unitária solta (g/cm³)	1,578	1,581	1,582	1,580	0,002
Massa específica (g/cm³)	2,635	2,638	2,655	2,643	0,011
Material pulverulento (%)	1,00	1,44	1,08	1,17	0,24
Absorção (%)	0,90	1,11	1,00	1,01	0,10

Fonte: Autor (2024).

Tabela 8 – Caracterização da brita ½” (AGN)

Ensaio de caracterização	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio
Módulo de finura	5,7	5,8	5,7	5,7	0,05
Dimensão máxima (mm)	12,50	12,50	12,50	12,50	0,00
Massa unitária comp. (g/cm³)	1,522	1,524	1,523	1,523	0,001
Massa unitária solta (g/cm³)	1,444	1,443	1,444	1,444	0,000
Massa específica (g/cm³)	2,589	2,586	2,589	2,588	0,002
Material pulverulento (%)	0,41	0,34	0,33	0,36	0,04
Perda de massa LA (%)	26,33	27,31	26,52	26,72	0,52
Absorção (%)	0,89	0,91	0,93	0,91	0,02

Fonte: Autor (2024).

Tabela 9 – Caracterização do fresado miúdo (RAPM)

Ensaio de caracterização	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio
Módulo de finura	3,02	3,37	3,36	3,25	0,20
Dimensão máxima (mm)	4,76	4,76	4,76	4,76	0,00
Massa unitária comp. (g/cm³)	1,506	1,509	1,508	1,508	0,001
Massa unitária solta (g/cm³)	1,429	1,435	1,437	1,434	0,004
Massa esp. máxima (g/cm³)	2,465	2,478	2,474	2,472	0,007
Material pulverulento (%)	3,72	3,69	3,75	3,72	0,03
Teor de betume (%)	5,99	5,85	5,93	5,92	0,07
Absorção (%)	1,85	1,66	1,52	1,68	0,17

Fonte: Autor (2024).

Tabela 10 – Caracterização do fresado graúdo (RAPG)

Continua					
Ensaio de caracterização	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio
Módulo de finura	6,05	6,06	6,06	6,06	0,01
Dimensão máxima (mm)	12,50	12,50	12,50	12,50	0,00
Massa unitária comp. (g/cm³)	1,427	1,418	1,423	1,423	0,005
Massa unitária solta (g/cm³)	1,367	1,374	1,371	1,371	0,003
Massa esp. máxima (g/cm³)	2,551	2,551	2,553	2,551	0,001
Material pulverulento (%)	0,07	0,08	0,08	0,07	0,01

Tabela 10 – Caracterização do fresado graúdo (RAPG)

Ensaio de caracterização					Conclusão
	Amostra 01	Amostra 02	Amostra 03	Média	Desvio
Perda de massa LA (%)	18,41	16,77	17,07	17,42	0,87
Teor de betume (%)	3,37	3,30	3,26	3,31	0,06
Absorção (%)	0,87	1,14	0,98	1,00	0,13

Fonte: Autor (2024).

4.4 Produção dos concretos

4.4.1 Concreto de referência

O concreto é o material mais largamente utilizado em construção (MEHTA; MONTEIRO, 1994). De acordo com a definição 3.1 da NBR 12655/2022:

Concreto de cimento Portland

material formado pela mistura homogênea de cimento, agregados miúdo e graúdo e água, com ou sem a incorporação de componentes minoritários (aditivos químicos, pigmentos, metacaulim, sílica ativa e outros materiais pozolâmicos), que desenvolve suas propriedades pelo endurecimento da pasta de cimento (cimento e água).

Segundo especificações da norma DNIT 020/2023-ES, o concreto utilizado para confecção do meio fio, deve ter uma resistência característica à compressão mínima de 20MPa. Sendo assim, foi definido o traço de concreto referencial (REF), sem a incorporação de resíduos, com classe de resistência C20 (grupo I e resistência característica à compressão de 20MPa) e classe de consistência S50 (abatimento variando de 50 a 100mm), conforme NBR 8953 (ABNT, 2015).

4.4.2 Concreto modificado

Para analisar o efeito da adição de RAP sobre as propriedades físicas e mecânicas do CCP foram necessárias diversas dosagens. Optou-se por utilizar o conceito de dosagem racional e experimental da ABCP/ACI, baseado no método da *American Concrete Institute - ACI* pela sua simplicidade no procedimento e literatura (COSTA *et al.*, 2018; SILVA, 2023).

O experimento envolveu a confecção de 03 concretos diferentes: um com RAP miúdo (para substituir a areia), um com RAP graúdo (para substituir a brita), um com a mistura de ambos (para substituir a areia e brita juntos). Foram testados 04 teores de substituição: 25, 50, 75 e 100%. Assim, foram produzidas 13 (treze) dosagens (Tabela 11).

Tabela 11 – Resumo das dosagens do concreto estudadas

Dosagem	Sigla	Agregados	Teor de substituição (%RAP)
1	REF	Areia + Brita	0
2	M25	RAPM e/ou Areia + Brita	25
3	M50		50
4	M75		75
5	M100		100
6	G25	Areia + RAPG e/ou Brita	25
7	G50		50
8	G75		75
9	G100		100
10	MG25	RAPM e/ou Areia + RAPG e/ou Brita	25
11	MG50		50
12	MG75		75
13	MG100		100

Legenda: M (miúdo), G (graúdo), MG (miúdo e graúdo), RAPM (fresado miúdo) e RAPG (fresado graúdo).

Fonte: Autor (2024).

Para o cálculo da resistência de dosagem do concreto adotou-se a NBR 12655/2022 (item 5.6.3.1), ou seja, o cimento, os agregados e a água foram medidos em massa. Além disso, a resistência do concreto à compressão para uma idade desejada ($f_{c,j}$) foi calculada em função da resistência característica (f_{ck}) do concreto e do desvio padrão da dosagem (S_d) adotado, Equação 1, quando foram obtidos os resultados da Tabela 12.

$$f_{c,j} = f_{ck} + 1,65 \times S_d \quad (1)$$

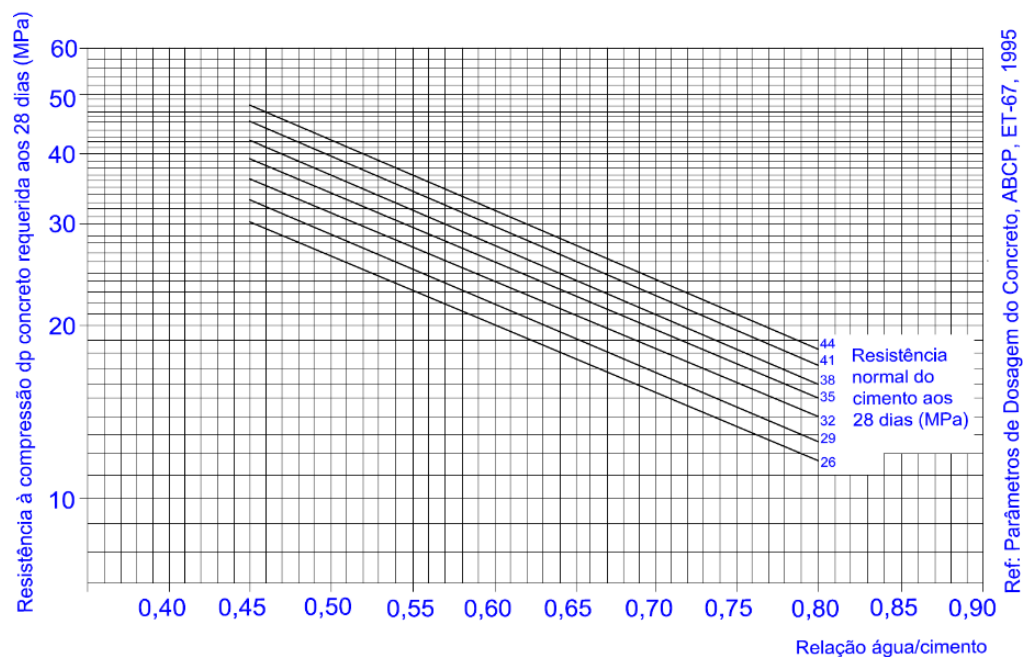
Tabela 12 – Resistência mínima do concreto (MPa)

Concreto	f_{ck}	S_d	$f_{c,j}$
CCP Referência	20,0	4,0	26,6

Fonte: Autor (2024).

A relação água/cimento foi definida com o uso da curva de Abrams; adotando para o estudo de dosagem o cimento CIII 32 e concretos com resistência à compressão aos 28 dias, conforme Figura 16. Desta forma, foi encontrada a relação a/c de 0,56, sendo posteriormente ajustada para 0,575 (para ajuste do teor de argamassa e menor consumo de cimento). Vale ressaltar que a relação A/C atende às recomendações da NBR 6118/2024 em função da correspondência entre a classe de agressividade e a qualidade do concreto. Para o caso em questão foi considerado uma classe de agressividade I.

Figura 16 – Curva de Abrams



Fonte: Silva (2019).

Sachet *et al.* (2013) destacam que dosagens de concretos com RAP necessitam de relações a/c maiores que as dos concretos de referência. Segundo os autores, este aumento se deve muito provavelmente pela impermeabilidade da superfície dos agregados fresados, devido à presença de filme asfáltico.

Para o traço de referência (REF), a dosagem foi calculada considerando o valor da resistência mínima do concreto ($f_{c,i}$) contido na Tabela 12. Quanto ao consumo de água, foi adotado um abatimento do tronco de cone na faixa de 40 a 60 mm (classe de consistência S50). Com tais informações e com o valor da dimensão máxima característica do agregado graúdo foi possível encontrar o valor do consumo de água aproximado, Tabela 13.

Tabela 13 – Determinação do consumo de água aproximado (l/m³)

Abatimento (mm)	Dimensão máxima do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190

Fonte: Silva (2019).

Para estimar o consumo de água por metro cúbico do concreto de referência (REF) foi necessário fazer interpolações e ajustes com os valores de $D_{máx}$ dos agregados de 9,5mm e 19mm, devido à falta de informação sobre o consumo de água para $D_{máx}$ do agregado de 12,5mm (usado na pesquisa). Diante disso, foi encontrado o valor de 212 litros/m³, mas esse consumo foi ajustado para 210,8 litros/m³ para um menor uso de cimento. De posse dessas informações, foi possível estimar o consumo de cimento por meio da Equação 2, obtendo os resultados da Tabela 14.

$$C_c = C_a / (a/c) \quad (2)$$

Sendo:

C_c : Consumo de cimento por metro cúbico de concreto (kg/m³)

C_a : Consumo de água por metro cúbico de concreto (l/m³)

(a/c): relação água/cimento (kg/kg)

Tabela 14 – Estimativa do consumo de água e cimento

Concreto	C_a (l/m³)	a/c (kg/kg)	C_c (kg/m³)
CCP Referencial (REF)	210,8	0,575	367

Fonte: Autor (2024).

A determinação do consumo de agregado graúdo (C_b) foi alcançada em função dos seus diâmetros máximos característicos (mm) e do módulo de finura do agregado miúdo, conforme Tabela 15.

Tabela 15 – Volume compactado seco (V_b) de agregado graúdo por m^3 de concreto

MF	Dimensão máxima do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19,0	25,0	32,0	38,0
3,0	0,525	0,650	0,675	0,700	0,725
3,2	0,505	0,630	0,655	0,680	0,705
3,4	0,485	0,610	0,635	0,660	0,685

Fonte: Adaptado de Silva (2019).

Com os dados da Tabela 15, com a dimensão máxima característica de 12,5mm do agregado utilizado e com módulo de finura de 3,2 foram realizadas novas interpolações e ajustes com os valores de $D_{máx}$ dos agregados de 9,5mm e 19mm. Encontrou-se o volume de $0,599m^3$ por metro cúbico de concreto. Assim, o consumo de brita foi obtido pela Equação 3 e os resultados reunidos na Tabela 16.

$$C_b = V_b \times \mu_u \quad (3)$$

Sendo:

C_b : é o consumo de agregado graúdo

V_b : Volume do agregado graúdo seco por m^3 de concreto

μ_u : Massa unitária compactada do agregado graúdo

Tabela 16 – Estimativa do consumo de agregado graúdo

Concreto	μ_u (kg/m^3)	V_b (m^3/m^3)	C_b (kg/m^3)
CCP Referencial (REF)	1523	0,599	911,8

Fonte: Autor (2024).

O consumo de agregado miúdo (C_m) foi calculado pela Equação 4.

$$V_a = 1 - ((C_c / \gamma_c) + (C_b / \gamma_b) + (C_a / \gamma_a)) \quad (4)$$

Sendo:

V_a : Volume de areia

C_c : Consumo de cimento

C_b : Consumo de brita

Ca: Consumo de água

γ_c : massa específica do cimento

γ_b : massa específica da brita

γ_a : massa específica da água

Para a areia, diferentemente dos outros materiais, o cálculo foi basicamente uma subtração entre os volumes anteriores, como também fez (SILVA, 2019). Diante disso, o volume de agregado miúdo foi calculado pela Equação 5 e seus resultados apresentados na Tabela 17.

$$C_m = \gamma_m \times V_a \quad (5)$$

Sendo:

C_m: Consumo de agregado miúdo

γ_m : massa específica da areia

Tabela 17 – Estimativa do consumo de agregado miúdo

Concreto	V _a (m ³ /m ³)	C _m (kg/m ³)
CCP Referencial (REF)	0,319	842,1

Fonte: Autor (2024).

A determinação da dosagem em massa foi feita com base nas relações dos diferentes materiais em relação à massa de cimento, conforme a Equação 6 e resultados com os traços referenciais apresentados na Tabela 18.

$$C_c / C_c : C_m / C_c : C_b / C_c : a/c \quad (6)$$

Tabela 18 – Traço do concreto referencial

Concreto	Traço C : A : B : a/c	Teor de argamassa (α)
CCP Referencial (REF)	1 : 2,30 : 2,49 : 0,575	57%
Legenda: C (cimento), A (areia), B (brita), a/c (relação água/cimento) e teor de argamassa (α = C+A / C+A+B)		

Fonte: Autor (2024).

Com a definição da dosagem pelo método da ABCP/ACI, foram executados os traços de concreto de referência e os traços modificados, com validação por meio de ensaios experimentais de resistência a compressão aos 28 dias. Como dito antes, trabalhou-se com massa, ou seja, para cada quantidade de agregado (areia, brita ou ambos) retirada de um traço de concreto realizou-se a introdução de uma mesma quantia de RAP na tentativa de manter todas as misturas constantes, alcançando os demonstrativos da Tabela 19.

Tabela 19 – Composição dos concretos (kg/m³)

Dosagem	Cimento	Areia	Brita	RAPM	RAPG	Água	Teor de argamassa
REF	367	842,1	911,8	-	-	210,8	57%
M25	367	631,6	911,8	210,5	-	210,8	57%
M50	367	421,1	911,8	421,1	-	210,8	57%
M75	367	210,5	911,8	631,6	-	210,8	57%
M100	367	-	911,8	842,1	-	210,8	57%
G25	367	842,1	683,9	-	228,0	210,8	57%
G50	367	842,1	455,9	-	455,9	210,8	57%
G75	367	842,1	228,0	-	683,9	210,8	57%
G100	367	842,1	-	-	911,8	210,8	57%
MG25	367	631,6	683,9	210,5	228,0	210,8	57%
MG50	367	421,1	455,9	421,1	455,9	210,8	57%
MG75	367	210,5	228,0	631,6	683,9	210,8	57%
MG100	367	-	-	842,1	911,8	210,8	57%

Legenda: RAPM (fresado miúdo) e RAPG (fresado graúdo).

Fonte: Autor (2024).

O plano de dosagem foi ajustado para bateladas de 20 e 40 litros de concreto por traço, com a utilização de uma betoneira descontínua (uma batelada por vez) de tambor rotativo e eixo horizontal, com capacidade de 120 litros. De posse das quantidades de insumos (Figura 17) realizou-se:

1. Umidificação da betoneira;
2. Acréscimo de agregado graúdo na betoneira mais 50% da quantidade de água do traço e mistura por 1 minuto;

3. Acréscimo de agregado miúdo na betoneira mais 25% da quantidade de água e mistura por 1 minuto;
4. Acréscimo do cimento na betoneira mais os últimos 25% da água e mistura por mais 2 minutos;
5. Parada do misturador, despejo do concreto no carrinho de mão e repouso da mistura por mais 2 minutos;
6. Testagem do concreto quanto ao abatimento e moldagem dos CPs.

Foram processadas aproximadamente 2,89 toneladas de insumos na fase laboratorial da pesquisa (excluso trecho experimental).

Figura 17 – Processo de mistura do concreto até a moldagem dos CPs



a) Medição da massa dos insumos



b) Serapação e organização dos insumos



c) Batelada de concreto



d) Ensaio de abatimento



e) CPs cilíndricos



f) CPs prismáticos

Fonte: Autor (2024).

Ao todo, foram moldados 247 corpos de prova, sendo 208 cilíndricos CP (de 100mmx200mm) e 39 prismáticos (de 150x150x500mm), conforme detalhado na Tabela 20.

Tabela 20 – Quantidade de corpos de prova e tipos de ensaios

Dosagem	RC			RTF	ME
	7 dias	14 dias	28 dias		
REF	2	2	8	3	4
M25	2	2	8	3	4
M50	2	2	8	3	4
M75	2	2	8	3	4
M100	2	2	8	3	4
G25	2	2	8	3	4
G50	2	2	8	3	4
G75	2	2	8	3	4
G100	2	2	8	3	4
MG25	2	2	8	3	4
MG50	2	2	8	3	4
MG75	2	2	8	3	4
MG100	2	2	8	3	4

Legenda: RC (resistência à compressão), RTF (resistência à tração na flexão) e ME (módulo de elasticidade).

Fonte: Autor (2024).

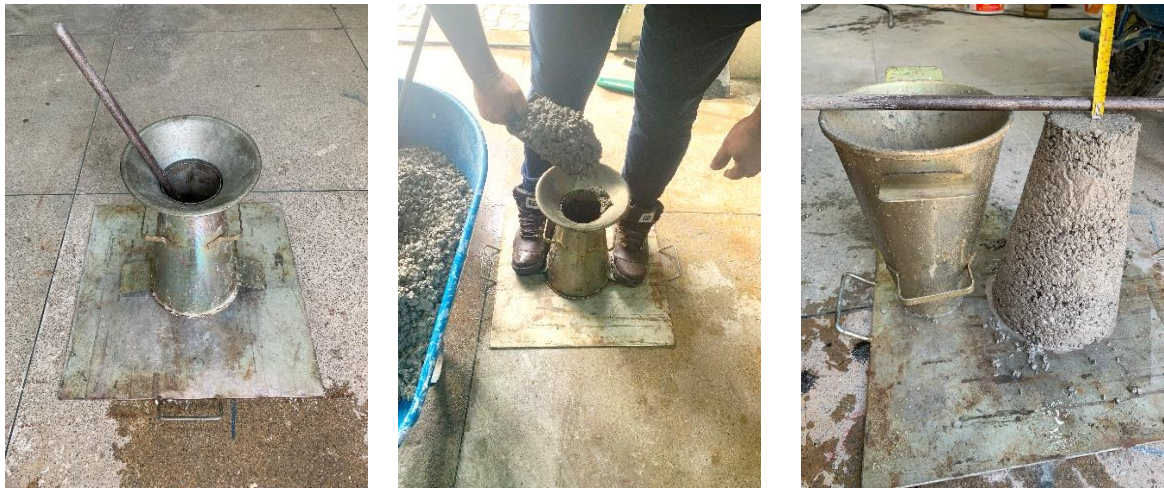
No estado fresco, a mistura do concreto foi analisada, quanto à consistência, pelo abatimento do tronco de cone, segundo a NBR 16889/2020²³, Figura 18.

Os ensaios de resistência à compressão foram realizados de acordo com a norma NBR 5739/2018. Ao todo foram moldados 208 corpos de prova cilíndricos. Antes da colocação do concreto, os moldes foram untados com óleo lubrificante a fim de facilitar o processo de desmoldar e foram adensados manualmente, em 2 camadas, com 12 golpes por camada. Os processos de moldagem e adensamento foram realizados de acordo com a NBR 5738/2015. Todos os CPs foram devidamente

²³O ensaio consiste no preenchimento do molde tronco-cônico (Cone de Abrams) em três camadas, sendo cada camada adensada em 25 golpes. Posteriormente, é medida a altura do abatimento com a inversão do molde tronco de cone e posicionamento na horizontal da haste de adensamento, tendo dessa forma um parâmetro de medida da trabalhabilidade.

identificados (traço, abatimento, numeração, data e hora da moldagem). Após 24 horas, os CPs foram desmoldados e mantidos em cura úmida por imersão em um tanque contendo somente água até chegar os 28 dias. Após o processo de cura, os CPs foram retificados a fim de promover uma maior regularização da superfície. Para o rompimento dos corpos de prova cilíndricos foi utilizada uma prensa com capacidade de carga de 100 tf existente no laboratório de concreto do DNIT (seção Ceará).

Figura 18 – Ensaio de abatimento do tronco de cone



Fonte: Autor (2024).

Figura 19 – Ensaio de resistência à compressão do concreto



Fonte: Autor (2024).

Os ensaios de resistência à tração na flexão foram realizados de acordo com a norma NBR 12142/2010). Ao todo foram moldados 03 (três) corpos de prova prismáticos por dosagem, totalizando 39 CPs. Os moldes foram untados com óleo

lubrificante e o concreto adensado mecanicamente com o uso de vibrador de imersão, em 1 camada. Os processos de moldagem e adensamento foram realizados de acordo com a NBR 5738/2015. Os CPs foram devidamente identificados. Após 48 horas, os CPs foram desmoldados e mantidos em cura úmida durante 28 dias. Na face de rasamento e na face oposta (face correspondente ao fundo da forma), foram traçadas linhas de modo a facilitar a centralização do corpo de prova no dispositivo de carregamento. Para o rompimento, utilizou-se uma prensa equivalente a citada anteriormente.

Figura 20 – Ensaio de resistência à tração na flexão do concreto



Fonte: Autor (2024).

O ensaio para determinação do módulo de elasticidade dos concretos foi realizado conforme a NBR 8522-1/2021. Para a realização do ensaio foram utilizados 04 corpos de prova²⁴ cilíndricos por dosagem, totalizando 52 CPs, moldados e curados como descrito antes.

O ensaio foi realizado com uma prensa servo-hidráulica, da marca EMIC, modelo SSH300, com capacidade máxima de 200 toneladas, com resolução de leitura de 0,1kN e dois extensômetros (*strain gages*) do tipo Trd11 para medida das deformações. Os valores foram coletados e transferidos para o programa TESC versão 3.04. A Figura 21 mostra a preparação do corpo de prova para realizar um ensaio do módulo de elasticidade: posicionamento dos *strain gages* nas laterais,

²⁴A Norma exige apenas 3 CPs.

posicionamento do corpo de prova no centro da prensa, ajuste da prensa ao corpo de prova.

Figura 21 – Ensaio de determinação do módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2024).

Diante dos resultados, realizou-se a análise estatística (descritiva e inferência) sobre os dados da resistência à compressão axial, resistência a tração na flexão e módulo de elasticidade de todos os corpos de provas de concreto convencional e modificado por teores crescentes de RAP. Utilizou-se um intervalo de confiança de 95%, o que equivale a um nível de significância de 0,05. Também foi realizada uma Regressão Linear Múltipla (RLM) para modelar o comportamento dos concretos estudados quanto aos parâmetros, alcançando R^2 de 0,939 para resistência à compressão axial, 0,703 para resistência a tração na flexão e 0,886 para e módulo de elasticidade.

Por fim, foi implantado em verdadeira grandeza um trecho na BR-020/CE de 200m de comprimento com os dispositivos de drenagem (meio-fio pré-moldado do tipo MFC 05) contendo o RAP, conforme detalhes da Figura 22 a 24, seguindo o cronograma do Quadro 1.

Figura 23 – Registro fotográfico da confecção do MFC 05 (com e sem RAP) e implantação na BR-020/CE



Fonte: Autor (2024).

- A. Preparo dos materiais, inclusive com o beneficiamento do RAP;
- B. Preparo o CCP convencional REF e com RAP miúdo;

- C. Execução do meio fio convencional e com RAP (M50i e M100i);
- D. Estocagem temporária;
- E. Carregamento e transporte até o trecho da BR;
- F. Limpeza/capina do local;
- G. Demarcação de níveis, cotas e alinhamento, conforme croqui;
- H. Escavação e assentamento, sentido decrescente;
- I. Escavação e assentamento, sentido crescente;
- J. Implantação dos marcos de localização;
- K. Serviços de acabamento, sentido crescente;
- L. Serviços de acabamento, sentido decrescente;
- M. Vista lateral concluída, sentido decrescente;
- N. Vista frontal da implantação concluída;
- O. Vista lateral da implantação concluída, sentido crescente.

Figura 24 –Trecho experimental implantado no Km 392 da BR-020/CE



Fonte: Autor (2024).

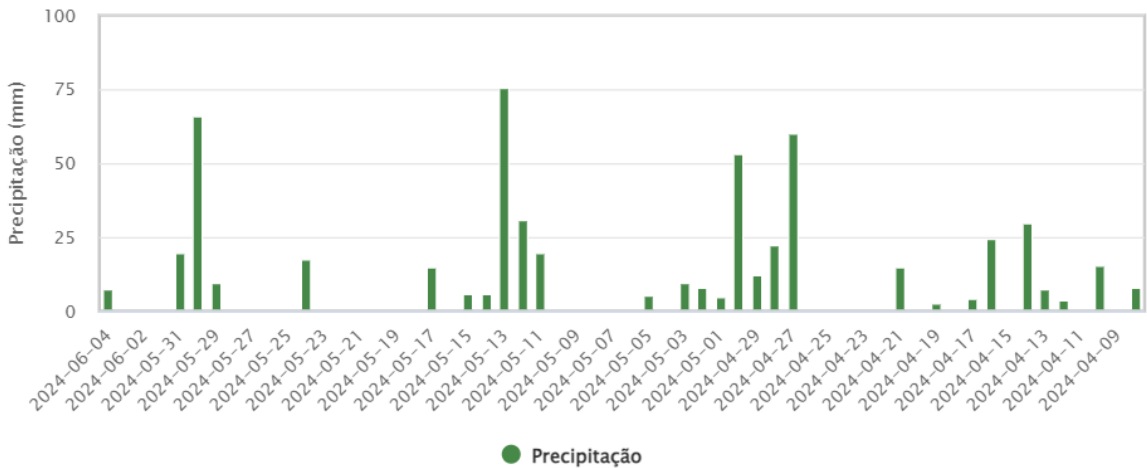
Quadro 1 – Cronograma executivo de Implantação

Atividades / Meses	01/24	02/24*	03/24*	04/24*	05/24*	06/24	07/24
Definição do local para implantação	Ok!						
Insumos (areia, brita, fresado) e equipamentos	Ok!	Ok!					
Produção do MFC 05 (referencial e FRAPM)			Ok!				
Construção do trecho experimental **				Ok!			
Operação do trecho experimental				Ok!	Ok!	Ok!	Ok!
Vistoria técnica mensal de acompanhamento				Ok!	Ok!	Ok!	Ok!

Legenda: * Quadra invernosa | ** Iniciado em 05/04/2024 e concluído em 08/04/2024.
Fonte: Autor (2024).

A construção do trecho experimental foi finalizada em 08 de abril de 2024 com registro de chuvas no local a partir do dia seguinte, Figura 25.

Figura 25 – Dados da Pluviometria (09/04/24 a 04/06/24) - Caucaia (Posto nº 38)



Fonte: FUNCEME (2024).

A implantação contou com os materiais, mão de obra e equipamentos fornecidos pela construtora contratada pelo DNIT para fazer a manutenção rodoviária da BR-020/CE. Naquele momento, havia uma limitação de tempo por causa do fim da vigência contratual, além de limitações orçamentárias e/ou financeiras. De todo modo, o trecho implantado serviu para (i) demonstrar a aplicação da técnica estudada, (ii) iniciar uma cultura de pesquisa junto aos colaboradores, (iii) acompanhar visualmente a durabilidade, o escoamento superficial e a rede de drenagem na área de aplicação.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os agregados utilizados na pesquisa foram RAP (miúdo e graúdo), brita e areia. As características desses materiais (média de 3 amostras) seguem na Tabela 21.

Tabela 21 – Resumo da caracterização física dos agregados

Ensaio de caracterização	Areia	Brita	RAP	
			Miúdo	Graúdo
Módulo de finura	3,20	5,70	3,25	6,06
Dimensão máxima (mm)	4,76	12,50	4,76	12,50
Massa unitária compactada (g/cm³)	1,624	1,523	1,508	1,423
Massa unitária solta (g/cm³)	1,580	1,444	1,434	1,371
Massa específica (g/cm³)	2,643	2,588	2,472	2,551
Material pulverulento (%)	1,17	0,36	3,72	0,07
Perda de massa Los Angeles (%)	-	26,72	-	17,42
Teor de betume (%)	-	-	5,92	3,31
Absorção (%)	1,01	0,91	1,68	1,00
OBS.: essas informações foram utilizadas no dimensionamento do concreto				

Fonte: autor (2024)

No geral, foi observado:

- (i) que o RAP miúdo teve um módulo de finura maior que a areia e o RAP graúdo maior que a brita;
- (ii) semelhança entre a dimensão máxima do RAP miúdo e areia bem como do RAP graúdo e brita;
- (iii) massa unitária compactada, solta e massa específica da areia maiores que as do RAP miúdo e da brita maiores que do RAP graúdo; igualmente ao resultado de Leite (2001), Cabral (2007) e Silva (2023);
- (iv) percentual de material pulverulento do RAP miúdo maior que o da areia enquanto o da brita foi maior que o do RAP graúdo;
- (v) perda Los Angeles da brita maior que do RAP graúdo;
- (vi) teor de betume maior no RAP miúdo que no graúdo;

(vii) absorção do RAP miúdo maior que a da areia e do RAP graúdo maior que a da brita.

Pela literatura, tanto as frações finas quanto as grossas (de RAP) podem apresentar massa específica e densidade aparente inferiores aos agregados naturais, possivelmente em consequência da baixa densidade do revestimento betuminoso (ABRAHAM; RANSINCHUNG, 2018; DEBBARMA *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2018a; COSTA, 2022).

Entende-se de Cabral (2007) que a massa unitária do agregado reciclado é menor que a do agregado natural pela própria densidade do material, alta porosidade e formato irregular das partículas. Além disso, essa redução é dependente também da granulometria dos agregados reciclados.

Sobre a perda de massa (equipamento Los Angeles) esperava-se que o RAP apresentasse valores maiores que a brita (LEITE, 2001; CABRAL, 2007), mas o comportamento observado ficou semelhante aos resultados de Okafor (2010), em estudos de esmagamento por impacto de RAP e cascalho virgem. Brand *et al.* (2012) destacam que o RAP pode ser capaz de absorver mais carga de impacto que o agregado virgem. Huang *et al.* (2006) sugerem que a inclusão de RAP resulta numa melhora na tenacidade do concreto.

Sobre o material pulverulento (partículas com dimensão inferior a 0,075 mm), todos os resultados atenderam ao especificado nas normas, a saber: NBR 7211/2022 limita o teor em 5% (areia natural) enquanto a NBR 15116/2021 limita em 12% (agregados provenientes de resíduos de concreto).

Sobre a taxa de absorção, que foi maior no RAP, Leite (2001) destaca que, para os agregados naturais, ela não apresenta quase nenhuma influência nas misturas de CCP já que apresentam pouca porosidade. Quando são utilizados agregados reciclados, esta influência torna-se importante, pois estes materiais apresentam valores mais altos de absorção; como também observou Cabral (2007).

Os agregados podem ainda apresentar maior absorção devido ao aumento da demanda de água da camada de poeira aderida (ABRAHAM; RANSINCHUNG, 2018; DEBBARMA *et al.*, 2019; SINGH *et al.*, 2018a; COSTA, 2022).

Quanto ao teor de ligantes, obteve-se o comportamento esperado: RAP miúdo maior que RAP graúdo devido a maior área superficial da fração fina, que geralmente requer uma maior quantidade de ligante para garantir uma cobertura adequada e proporcionar a coesão necessária dentro da mistura de origem.

Para efeito comparativo, foram reunidos nas Tabelas 22 e 23 resultados da literatura para a areia e RAP.

Tabela 22 – Resultados citados na literatura referente a caracterização da areia e brita

Autores	MF	DM ¹	MU	ME	MP	PM	TB	A
		mm		g/m ³				
Silva (2023)	3,17	4,75	1,54	2,33	4,15			0,86
		12,5	1,46	2,57				1,26
Costa (2022)	2,82			2,74				
Nandi e	2,15			2,60				1,11
Ransinchung	6,39			2,60				0,76
(2021)	6,98			2,63				0,55
Vieira (2021)	1,62	1,2	1,57	2,63				
	3,56	4,75	1,40	2,63				
	6,00	19,0	1,54	2,64				
Kunz (2020)	2,66	4,75		2,62	3,00	33,0		1,35
	6,87	19,0		2,70	0,93			0,99
Fernandes (2020)	3,59	4,75	1,16	2,60	4,4			1,50
	5,64	12,5	1,08		1,6			1,20
Francisco (2019)	2,65	19,0	1,55	2,93				1,52
Luzzi (2019)				2,60		19,8		0,95
				2,65				
Debbarma <i>et al.</i> (2019)			1,75	2,63				0,65
			1,74	2,59				0,60
Costa <i>et al.</i> (2018)	4,69	19,0	1,41	2,60				1,54
			1,55	2,62				3,67
Abraham e Ransinchung (2018)			1,63	2,65				0,85
Singh <i>et al.</i> (2018a)		16,0	1,42	2,61				0,81
			1,65	2,64				0,91
Singh <i>et al.</i> (2018b)			1,87	2,61				0,80
			1,53	2,65				0,70
Ruiz (2017)	2,48	19,0	1,27	2,76		17,0		0,75
			1,57	2,46				
Shi <i>et al.</i> (2017)			1,55	2,51		22,84		2,79
				2,58				2,06
Sachet <i>et al.</i> (2013)	3,51	2,4	1,63	2,62				
	4,02	4,75	1,59	2,63				
	6,81	9,5	1,39	2,71				

Legenda: MF (módulo de finura), DM (dimensão máxima), MU (massa unitária), ME (massa específica), MP (material pulverulento), PM (perda de massa), TB (teor de betume) e A (absorção).

¹DM: miúdo < 4,75mm > gráudo.

Fonte: Autor (2024).

Tabela 23 – Resultados citados na literatura referente a caracterização do RAP

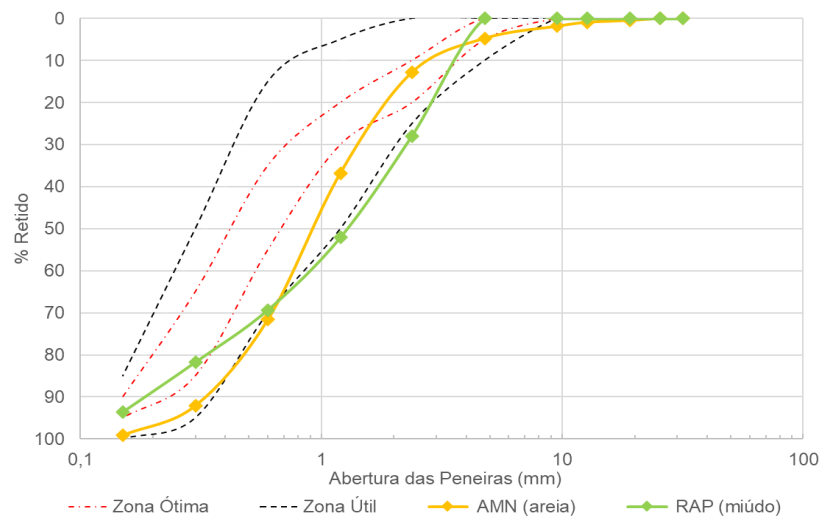
Autores	MF	DM ¹	MU	ME	MP	PM	TB	A
		mm		g/m ³			%	
Costa (2022)	4,53			2,24			6,90	
				2,53			4,80	
Almeida Jr (2022)				2,67			5,38	
				2,54			5,76	
Lima (2022)							4,64	
Flores (2022)				2,63			6,19	
				2,51			7,00	
				2,53				
Nandi e Ransinchung (2021)	3,69			2,32			6,10	2,46
	6,42			2,54			1,80	1,08
Vieira (2021)	1,62	1,20	1,57	2,63	2,8			3,35
Correa (2020)				2,67			5,38	
Luzzi (2019)				2,54			4,95	
Debbarma <i>et al.</i> (2019)			1,61	2,41			1,90	0,70
			1,66	2,35			4,50	2,03
Costa <i>et al.</i> (2018)	6,26	9,50	1,31	2,40			-	1,48
Abraham e Ransinchung (2018)			1,39	2,43			2,82	1,23
Singh <i>et al.</i> (2018a)			1,36	2,25			2,17	1,83
			1,43	2,49			5,20	2,46
Singh <i>et al.</i> (2018b)			1,49	2,49			2,17	1,90
			1,40	2,39			3,42	1,10
			1,58	2,25			5,20	2,46
			1,31	2,32			7,30	0,60
Ruiz (2017)		19,0	1,56	2,46		42	4,95	
Shi <i>et al.</i> (2017)			1,34	2,41			4,00	2,61
			1,26	2,40			5,25	1,89
			1,37	2,36			6,19	1,78
			1,42	2,33			4,62	2,69
Brand e Roesler (2017a)		4,75					2,10	
		9,50					3,90	
Sachet <i>et al.</i> (2013)	4,43	2,40		2,16				1,32
	0,78	19,0		2,29				

Legenda: MF (módulo de finura), DM (dimensão máxima), MU (massa unitária), ME (massa específica), MP (material pulverulento), PM (perda de massa), TB (teor de betume) e A (absorção).
¹DM: RAP miúdo < 4,75mm > RAP graúdo.

Fonte: Autor (2024).

Sobre a granulometria, realizou-se a plotagem dos resultados da areia e do RAP miúdo em comparação aos limites utilizáveis (zona útil e zona ótima para concreto) recomendados pela NBR 7211/2022 da ABNT, Figura 26. Observou-se parcial encaixe dos agregados dentro dos limites da norma.

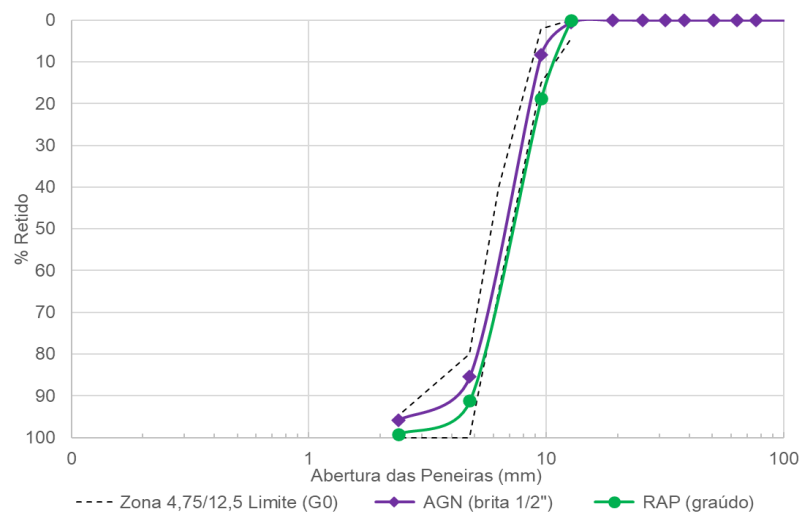
Figura 26 – Curvas granulométricas dos agregados miúdos (areia e RAP)



Fonte: Autor (2024).

Sobre a granulometria da brita e RAP graúdo (Figura 27) observou-se o encaixe perfeito e parcial, respectivamente, aos limites da NBR 7211/2022 da ABNT.

Figura 27 – Curvas granulométricas dos agregados graúdos (brita e RAP)



Fonte: Autor (2024).

A falta de encaixe nas zonas recomendadas pode ter relação com o déficit de materiais em algumas peneiras, como também concluíram Abraham; Ransinchung (2018) e Silva (2023), especialmente em amostra de RAP não classificado (como o utilizado nessa pesquisa).

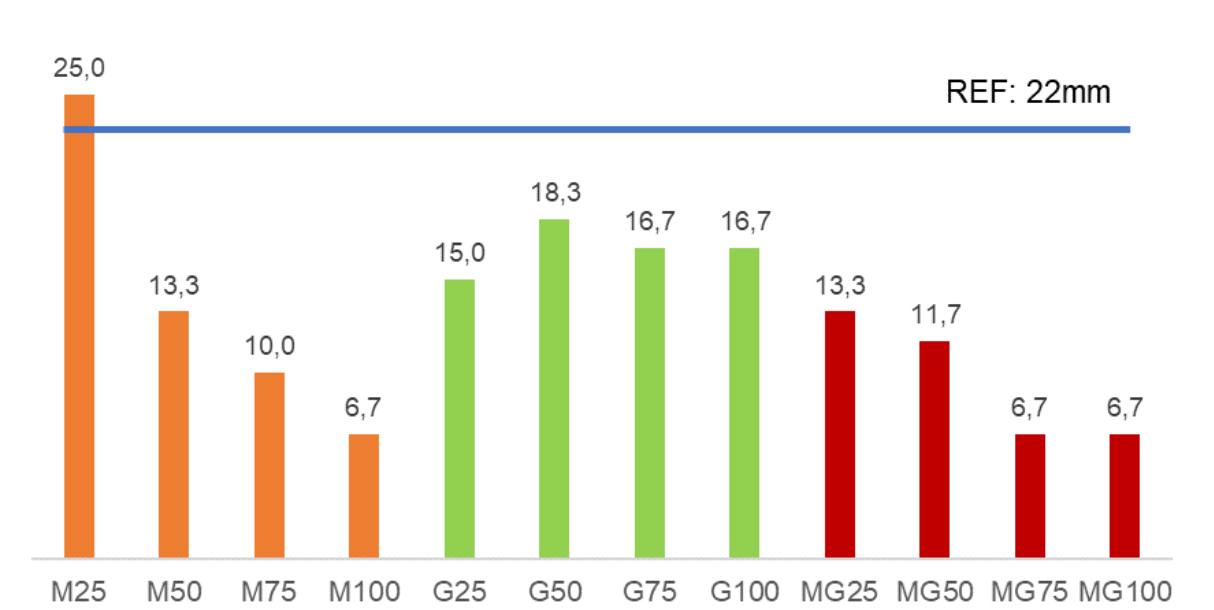
Diante da caracterização supracitada, realizou-se o processo de mistura e moldagem das dosagens com medição imediata do abatimento no concreto fresco de acordo com a NBR 16889/2020, alcançando os resultados reunidos na Tabela 24 e Figura 28.

Tabela 24 – Resultados do ensaio de abatimento (*Slump Test*) em mm

Dosagem	ST ₁	ST ₂	ST ₃	Média	Desvio	Δ/REF(%)
REF	20	25	20	21,7	2,9	-
M25	20	20	35	25,0	8,7	15,4
M50	10	10	20	13,3	5,8	-38,5
M75	10	10	10	10,0	0,0	-53,8
M100	10	0	10	6,7	5,8	-69,2
G25	10	25	10	15,0	8,7	-30,8
G50	10	25	20	18,3	7,6	-15,4
G75	10	25	15	16,7	7,6	-23,1
G100	15	10	25	16,7	7,6	-23,1
MG25	10	20	10	13,3	5,8	-38,5
MG50	10	15	10	11,7	2,9	-46,2
MG75	5	5	10	6,7	2,9	-69,2
MG100	15	0	5	6,7	7,6	-69,2

Legenda: ST (*Slump Test*) e Δ/REF (diferença relativa entre as dosagens e o CCP referencial).
Observação: percentual negativo indica que o traço com RAP perdeu parte das propriedades encontradas na dosagem de referência.
Fonte: Autor (2024).

Figura 28 – Resultados médios do ensaio de abatimento (*Slump Test*) em mm



Legenda: M (miúdo), G(graúdo) e MG (miúdo e graúdo).
Fonte: Autor (2024).

Como se observa, apenas uma dosagem (M25) superou, em termos de trabalhabilidade, o resultado de referência (22mm de abatimento).

A maior tendência de redução da trabalhabilidade ocorreu com o RAP miúdo substituindo a areia (equação da reta de regressão linear: $y = -5,82x + 28,3$ e $R^2 = 0,8889$), seguido da mistura miúdo/grauído ($y = -2,48x + 15,8$ e $R^2 = 0,8806$).

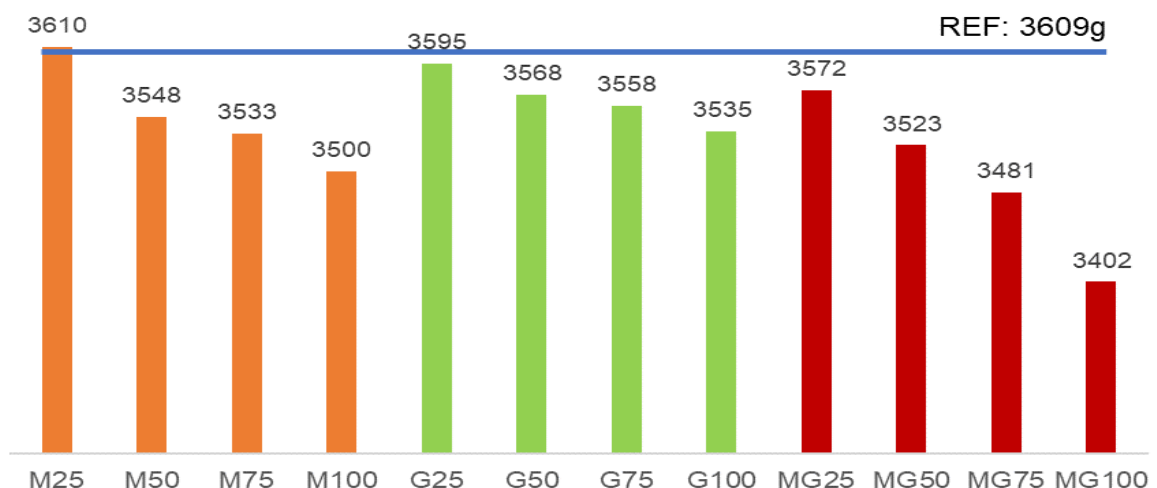
A substituição da brita pelo RAP grauído apresentou leve aumento da trabalhabilidade ($y = 0,35x + 15,8$ e $R^2 = 0,1124$), quando comparado com o miúdo, e teve o comportamento mais estável entre as dosagens pesquisadas, mesmo com o aumento dos teores (%) substituídos, sendo um importante indicador obtido na pesquisa.

Singh *et al.* (2018a) e Van Den Bergh *et al.* (2017) encontraram resultados similares, ou seja, concreto fresco com RAP grauído de melhor trabalhabilidade que concreto com RAP miúdo. Guo *et al.* (2018) consideram controversa a influência do RAP na trabalhabilidade do concreto e a literatura mostra esse dilema:

- Ruiz (2017) observou que a trabalhabilidade de suas misturas foi melhorada com a inserção do RAP no concreto;
- Van Den Bergh *et al.* (2017) concluíram que o RAP diminuiu a trabalhabilidade do concreto fresco devido à alta absorção e atrito interno;

Quanto a influência do RAP na massa endurecida dos corpos de prova cilíndricos observou-se uma relação direta, Figura 29, e proporcional ao aumento dos teores substituídos.

Figura 29 – Resultados médios da massa (g) endurecida dos CPs cilíndricos



Legenda: M (miúdo), G(grauído) e MG (miúdo e grauído).
Fonte: Autor (2024).

Como se observa, apenas uma dosagem (M25) foi praticamente igual o CP de referência. A maior redução de massa ocorreu com mistura de RAP miúdo/gráudo (equação da reta de regressão linear: $y = -55,2x + 3632,5$ e $R^2 = 0,9793$), seguido do RAP miúdo substituindo a areia ($y = -34,5x + 3634$ e $R^2 = 0,9339$) e do RAP gráudo substituindo a brita ($y = -19x + 3611,5$ e $R^2 = 0,9736$).

Os resultados observados estão em consonância com a literatura. Ruiz (2017) demonstrou que a massa específica do concreto convencional foi reduzida de $23,38\text{kN/m}^3$ para $22,83\text{kN/m}^3$ com a incorporação do RAP. Guo *et al.* (2018) também observaram a diminuição da massa específica do concreto com a incorporação do RAP devido à menor massa específica do RAP em comparação com o agregado natural, como também concluíram Abraham e Ransinchung (2018) e Costa (2022).

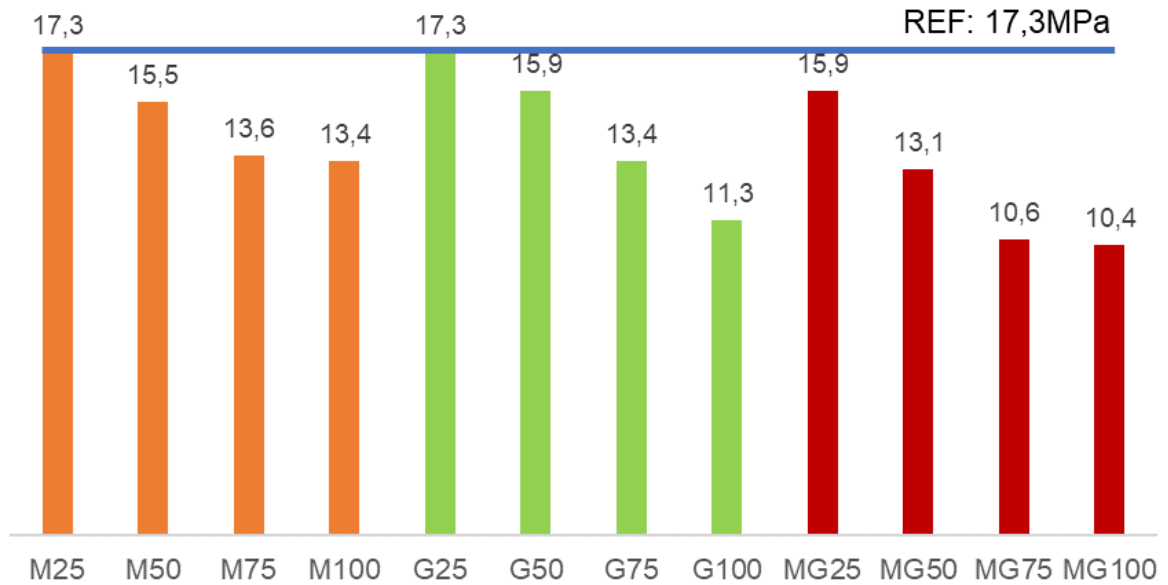
Os resultados da resistência à compressão do concreto convencional e modificado com teores diferentes de RAP, alcançando os resultados reunidos na Tabela 25 (28 dias de cura) e plotados nas Figura 30 a 32 (7, 14 e 28 dias de cura).

Tabela 25 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão (MPa) com 28 dias de cura dos concretos estudados

Dosagem	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄	CP ₅	CP ₆	Média	Desvio	$\Delta/\text{REF}(\%)$
REF	31,3	30,1	31,8	31,4	33,9	30,6	31,5	1,3	-
M25	32,3	30,3	31,5	30,2	32,5	29,6	31,1	1,2	-1,4
M50	26,9	29,2	27,6	25,3	28,9	28,5	27,7	1,5	-12,0
M75	24,5	24,0	24,7	22,7	23,4	23,3	23,8	0,8	-24,6
M100	19,9	20,6	20,1	20,6	21,0	19,5	20,3	0,6	-35,7
G25	30,2	30,3	32,7	27,9	30,8	30,6	30,4	1,5	-3,5
G50	27,9	27,1	28,0	27,9	28,5	28,2	27,9	0,5	-11,3
G75	24,1	23,6	24,3	23,7	25,3	23,3	24,1	0,7	-23,6
G100	20,5	23,2	20,9	22,5	21,6	21,2	21,7	1,0	-31,3
MG25	24,3	26,2	26,6	26,5	26,7	23,3	25,6	1,4	-18,9
MG50	22,5	21,7	20,9	21,7	20,7	20,9	21,4	0,7	-32,1
MG75	17,1	17,2	18,0	17,2	17,9	17,7	17,5	0,4	-44,4
MG100	13,0	13,3	12,9	13,1	12,9	13,1	13,1	0,2	-58,6

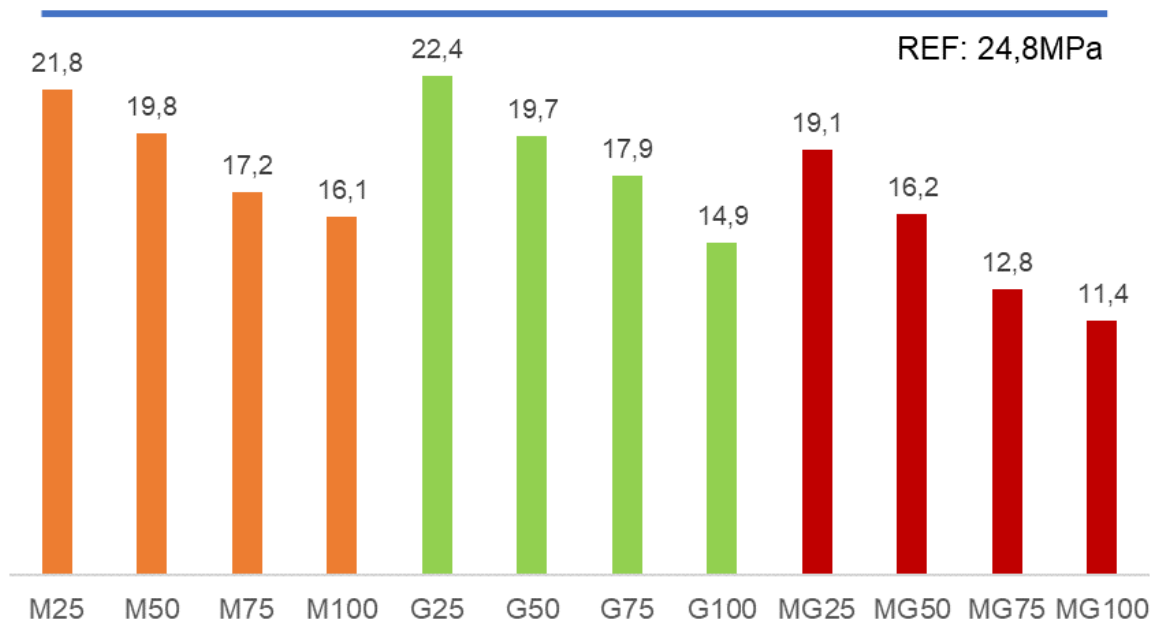
Legenda: CP (corpo de prova) e Δ/REF (diferença relativa entre as dosagens e o CCP de referência).
Observação: percentual negativo indica que o traço com RAP perdeu parte das propriedades encontradas na dosagem de referência.

Figura 30 – Resistência à compressão (MPa) com 7 dias de cura dos concretos estudados



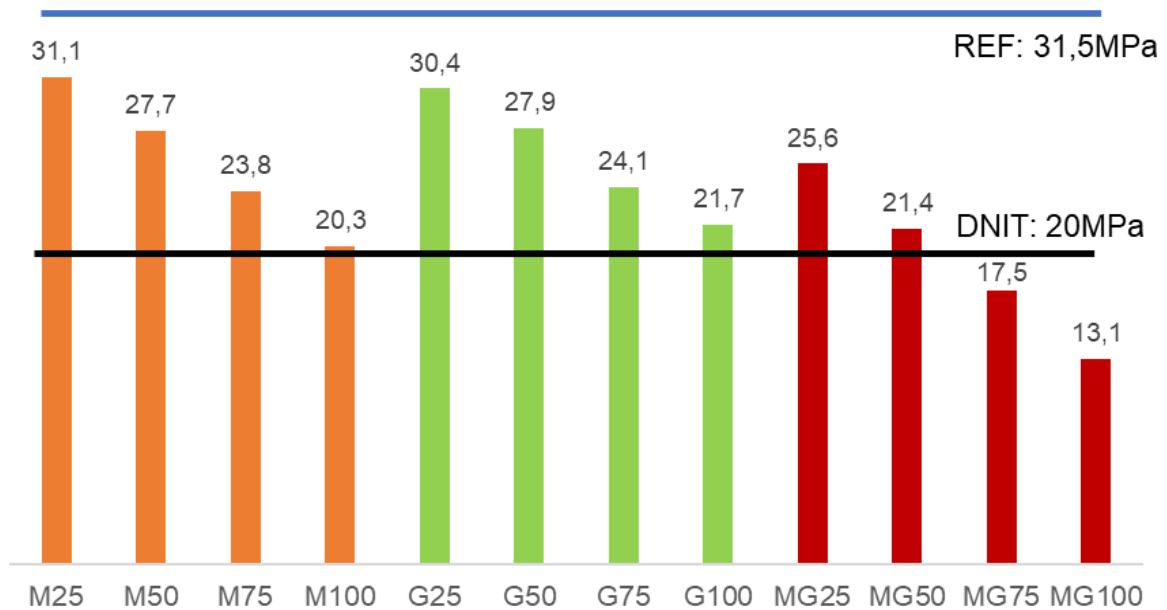
Legenda: M (miúdo), G(graúdo) e MG (miúdo e graúdo).
Fonte: Autor (2024).

Figura 31 – Resistência à compressão (MPa) com 14 dias de cura dos concretos estudados



Legenda: M (miúdo), G(graúdo) e MG (miúdo e graúdo).
Fonte: Autor (2024).

Figura 32 – Resistência à compressão (MPa) com 28 dias de cura dos concretos estudados



Legenda: M (miúdo), G (gráúdo) e MG (miúdo e gráúdo).
Fonte: Autor (2024).

Para as três idades (7, 14 e 28 dias) observou-se o mesmo comportamento geral: o aumento do teor de RAP no CCP diminuiu a resistência à compressão em até 31,3% para a dosagem G (RAP gráúdo substituindo a brita), 35,6% para M (RAP miúdo no lugar da areia) e 58,6% para a dosagem MG (RAP miúdo e gráúdo misturados substituindo juntos areia e brita)²⁵. As equações que definem essas reduções foram: RAP gráúdo ($y = -2,99x + 33,5$ e $R^2 = 0,9919$), RAP miúdo ($y = -3,63x + 34,8$ e $R^2 = 0,9993$) e ambos ($y = -4,14x + 29,75$ e $R^2 = 0,9995$).

Apesar desse comportamento, 84,6% dos resultados foram positivos (acima de 20MPa: referência do DNIT) incluindo o concreto de referência (31,5 MPa), todas as dosagens M (miúdo), todas as dosagens G (gráúdo) e duas MG (com 25 e 50% de RAP) aos 28 dias.

Os resultados estão em conformidade com outros estudos que substituíram agregados naturais por RAP em concretos (BRAND *et al.* 2012; RUIZ, 2017; BRAND; ROESLER, 2017b; ABRAHAM; RANSINCHUNG, 2018; PAPAKONSTATINOU, 2018; SINGH *et al.* 2018a). Além desses autores:

²⁵De modo comparativo, para cada 1% de substituição de areia por RAP miúdo observou-se uma redução de aproximadamente 0,356% na resistência à compressão. Para 1% de brita substituída por RAP gráúdo (0,313% de redução na resistência). Para 1% de areia/brita por RAP miúdo/gráúdo juntos, observou-se 0,586% de redução.

- a) Costa *et al.* (2018), apesar da diminuição geral nas resistências, também alcançaram acima de 20MPa com a substituição do agregado natural por RAP graúdo;
- b) Singh *et al.* (2018b) verificaram que os agregados obtidos de pavimentos antigos tinham potencial para substituir 75% do agregado graúdo natural e 50% do agregado miúdo natural;
- c) Boussetta *et al.* (2020) constataram que o aumento do teor de RAP influenciou negativamente as propriedades das misturas pela baixa adesão entre agregado e matriz cimentícia;
- d) Shatarat *et al.* (2019) obtiveram reduções na resistência de até 31,06% para concretos com 100% de RAP e atribuíram este comportamento à fraca aderência entre o RAP (que possuem revestimento asfáltico) e a matriz do concreto;
- e) Debbarma *et al.* (2019) investigaram a fração ideal de RAP (grosso, fino e total) e sua proporção (50% e 100%) para misturas de pavimentos de CCP compactado com rolo, medindo várias propriedades frescas, mecânicas e de durabilidade. Observaram que todas as misturas com RAP alcançaram 27,6MPa, exceto a que tinha 100% de RAP total;
- f) El Euch Ben Said *et al.* (2017) comprovaram que a baixa aderência das granulas de RAP à pasta de cimento comprometeu as propriedades mecânicas e durabilidade do concreto. Os autores concluíram que a incorporação de 60% de RAP produziu CCP de boa qualidade para utilização na construção de pavimentos rígidos. Os efeitos mais negativos foram vistos com o uso de RAP fino;
- g) Van Den Bergh *et al.* (2017) concluíram que misturas com RAP reduzem em até 42% a resistência à compressão e recomendam até 25% de substituição para iniciar a otimização das misturas de CCP.

Outros dados da literatura foram reunidos na Tabela 26.

Tabela 26 – Dados da resistência à compressão de concretos com RAP

Continua

Autor(es)	Resistência à compressão (MPa)
Ruiz (2017)	27,20 - 33,50
Brand e Roesler (2017b)	15,89

Tabela 26 – Dados da resistência à compressão de concretos com RAP

Conclusão	
Autor(es)	Resistência à compressão (MPa)
Shi <i>et al.</i> (2017)	17,77 - 33,61
Thomas <i>et al.</i> (2018)	30,10 - 73,80
Abraham e Ransinchung (2018)	34,00 - 51,00
Hossiney <i>et al.</i> (2010)	17,38 - 38,58
Huang <i>et al.</i> (2005)	10,4 - 37,7
Papakonstatinou (2018)	24,00 - 34,00
Brand <i>et al.</i> (2012)	17,90 - 37,20
Dados médios da pesquisa	25,72 (com RAP miúdo)
	25,35 (com RAP graúdo)
	19,40 (com RAP miúdo/grauído)

Fonte: Autor (2024).

Para Costa (2022) o maior desafio enfrentado ao usar o RAP no CCP, é superar os problemas de ligação causados pela presença de asfalto. A presença do fino revestimento betuminoso na superfície do agregado RAP é a principal razão para o desempenho inferior do ligante cimentício. O betume enfraquece a Zona de Transição Interfacial (ZTI), tornando-a maior e mais porosa. Assim, o revestimento de betume nos agregados reduz as propriedades mecânicas e a durabilidade devido ao aumento da permeabilidade.

Singh *et al.* (2018a) observaram a formação de três ZTI's na microestrutura do CCP com RAP: uma zona entre os agregados e a camada betuminosa, uma entre os agregados e a matriz cimentícia e outra entre a camada betuminosa e matriz cimentícia, sendo essa última a zona mais fraca das três.

Brand e Roesler (2017a) observaram mudanças na ZTI ao longo do tempo e amostras com RAP envelhecidas desenvolveram maior porosidade e maior largura da ZTI, reduzindo a resistência à compressão e o módulo de elasticidade do concreto. Os autores acreditam que a má ligação entre a pasta de cimento e o RAP pode ser a principal causa desses dois efeitos. Os autores sugeriram que o alto pH da solução nos poros poderia lixiviar compostos orgânicos do asfalto, comprometendo o processo de hidratação e a formação de hidróxido de cálcio e silicato de cálcio hidratado, resultando no enfraquecimento da ZTI ao longo do tempo.

Erdem e Blankson (2014) perceberam que o concreto produzido com RAP tende a romper predominantemente na ZTI entre as superfícies do RAP e da argamassa.

Mehta e Monteiro (1994) explicam que a ZTI serve de ponte entre os agregados e a pasta de cimento e mesmo que estas duas fases tenham elevada rigidez, a rigidez do compósito pode baixar devido aos vazios e microfissuras presentes que não permitem a transferência de tensões. A incorporação do RAP introduz um material macio (asfalto) à mistura, reduzindo ainda mais a rigidez do compósito.

Vieira (2021) alega que, no concreto convencional, a resistência à compressão está diretamente ligada à relação água/cimento empregada na mistura. Para Otsuki *et al.* (2003) quando a relação água/cimento é elevada, ocorre a formação de um filme de água na superfície do agregado, promovendo o aparecimento de uma interface porosa e pouco resistente, dentre outras consequências.

Thomas *et al.* (2018) sugerem a substituição do agregado natural por RAP para concreto não estrutural (como utilizado nessa pesquisa). Para fins estruturais, os autores sugerem o uso de RAP graúdo em preparação de CCP de alta resistência para se alcançar aplicações em infraestrutura de transporte.

Uma análise mais profunda sobre os dados plotados na Figura 32 (que retratam a resistência à compressão aos 28 dias prevista na NBR 5739/2018) permitiu observar um valor-P maior que 0,05 (no teste de *Anderson-Darling* - AD), significando a não rejeição da hipótese nula (H_0) e a distribuição normal dos dados com 95% de confiança (Tabela 27).

Tabela 27 – Teste de *Anderson-Darling*, resistência à compressão aos 28 dias

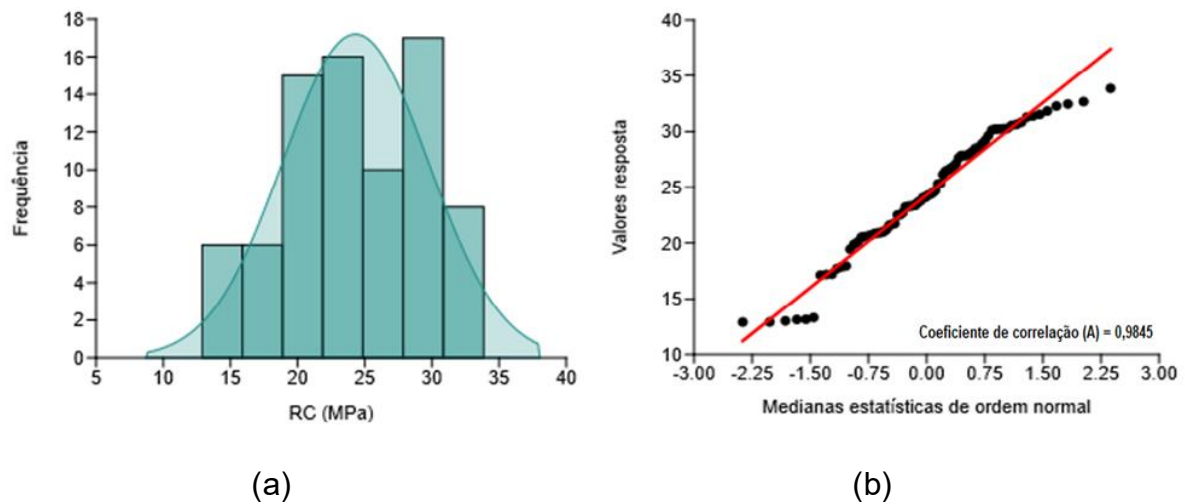
Hipótese aceita	Tamanho da amostra	AD	Nível de confiança	Significância (α)	Valor-P
H_0	78	0,6692	95%	0,05	0,0776

Nota: Teste de normalidade: *Shapiro-Wilk* ($n \leq 50$) | *Anderson-Darling* ($n > 50$).

Fonte: Autor (2024).

Diante dessas constatações, a Figura 33 apresenta o comportamento normal desses resultados em um histograma (com uma curva de Gauss associada) bem como um gráfico quartil-quartil ou Q-Q; onde se observou boa linearidade e aderência dos dados à reta.

Figura 33 – Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) da resistência a compressão



Fonte: Autor (2024).

O teste ANOVA indicou diferenças significativas entre os valores da resistência à compressão para todas as dosagens, ou seja, valor-P inferior a 0,05 e F maior que $F_{\text{crítico}}$ em um intervalo de 95% de confiança (Tabela 28). Já a Tabela 29 resumiu os resultados do teste para cada dosagem.

Tabela 28 – Teste de ANOVA, resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	2195,189	12	182,93	184,107	3×10^{-45}	1,904
Dentro dos grupos	64,585	65	0,9936			
Total	2259,774	77				

Legenda: SQ (soma de quadrados), GL (grau de liberdade), MQ (quadrados médios), F (valor estatístico de F considerando) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

Tabela 29 – Teste de ANOVA, resistência à compressão aos 28 dias, por dosagem

Dosagem	Média	Desvio	GL	F	Valor-P	Estatisticamente significativo?
REF	31,5	1,3	-	-	-	-
M25	31,1	1,2	11	0,40	0,540	NÃO
M50	27,7	1,5	11	22,64	$7,7 \times 10^{-4}$	SIM
M75	23,8	0,8	11	158,33	$1,9 \times 10^{-7}$	SIM
M100	20,3	0,6	11	380,04	$2,8 \times 10^{-9}$	SIM
G25	30,4	1,5	11	1,86	0,203	NÃO

Tabela 29 – Teste de ANOVA, resistência à compressão aos 28 dias, por dosagem

Dosagem	Média	Desvio	GL	F	Valor-P	Conclusão
						Estatisticamente significativo?
G50	27,9	0,5	11	40,54	$8,2 \times 10^{-5}$	SIM
G75	24,1	0,7	11	153,05	$2,2 \times 10^{-7}$	SIM
G100	21,7	1,0	11	214,43	$4,4 \times 10^{-8}$	SIM
MG25	25,6	1,4	11	56,87	$2,0 \times 10^{-5}$	SIM
MG50	21,4	0,7	11	285,71	$1,1 \times 10^{-8}$	SIM
MG75	31,5	1,3	11	647,77	$2,0 \times 10^{-10}$	SIM
MG100	31,1	1,2	11	1205,55	$9,3 \times 10^{-12}$	SIM

Legenda: GL (grau de liberdade), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

Como se observa, apenas os traços M25 e G25 (16,6%) apresentaram valor-P maiores que o valor da significância (0,05), indicando que não existem diferenças significativas entre os valores de resistência à compressão quando comparadas com o concreto de referência.

A análise por regressão linear múltipla (Tabela 30) confirmou uma forte relação entre as variáveis independentes (teor de substituição do agregado natural por RAP) com a variável dependente (resistência à compressão): $R^2 = 0,9399$. Por outro lado, o valor do erro padrão (1,3459) apontou para a possível existência de outras variáveis independentes influentes e desconhecidas.

Tabela 30 – Resultados da regressão linear múltipla da resistência a compressão

R múltiplo	0,9695				
R-quadrado	0,9399				
R-quadrado ajustado	0,9383				
Erro padrão	1,3459				
Observações	78				
	GL	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	2	2123,9060	1061,9530	586,2029	$1,64 \times 10^{-46}$
Resíduo	75	135,8684	1,8116		
Total	77	2259,7744			
	Coefficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	
Interseção	31,9725	0,2710	117,9787	$6,40 \times 10^{-87}$	
RAPM	-10,3785	0,4067	-25,5206	$1,02 \times 10^{-38}$	
RAPG	-9,5533	0,4067	-23,4914	$2,58 \times 10^{-36}$	

Legenda: SQ (soma de quadrados), GL (grau de liberdade), MQ (quadrados médios), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

O teste F apontou que o modelo proposto (Equação 7) é útil para explicar a variável dependente (resistência à compressão): valor-P de $1,64 \times 10^{-46}$ (abaixo de 0,05) e R múltiplo de 0,9695 (próximo de 1).

$$RC_{\text{estimada}} = 31,9725 - 10,3785 \times \text{RAPM} - 9,5533 \times \text{RAPG} + 1,3459 \quad (7)$$

$$R^2 = 0,9399$$

Sendo:

RC_{estimada} : Resistência à compressão estimado

RAPM: Teor de substituição da areia por RAP miúdo

RAPG: Teor de substituição da brita por RAP graúdo

Observou-se que as variáveis RAPM e RAPG ficaram significativamente relacionadas com a variável dependente (resistência à compressão), visto que individualmente apresentaram valor-P < 0,05.

Pela equação proposta, para cada aumento do teor de RAPM, o valor da RC_{estimada} diminuirá de 10,3785 enquanto que para cada aumento do teor de RAPG, o valor de RC_{estimada} diminuirá de 9,5533. Isso permitiu entender que o RAPG é, teoricamente, mais adequado (menos instável) na estimativa antecipada de uma resistência à compressão.

Sobre a resistência à tração na flexão (RTF), aos 28 dias, obteve-se os resultados apresentados na Tabela 31 e Figura 34.

Tabela 31 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão (MPa)

Dosagem	CP ₁	CP ₂	CP ₃	Média	Desvio	Continua
						$\Delta/\text{REF}(\%)$
REF	5,5	5,4	5,3	5,4	0,1	-
M25	5,3	5,2	5,9	5,5	0,4	1,4
M50	5,0	4,3	5,0	4,8	0,5	-11,7
M75	4,8	4,4	4,5	4,6	0,2	-16,0
M100	3,7	4,1	4,3	4,0	0,3	-26,3
G25	4,6	5,5	6,0	5,4	0,7	-0,8
G50	5,1	5,5	4,7	5,1	0,4	-6,0
G75	4,5	4,5	4,8	4,6	0,2	-15,5
G100	4,0	4,3	4,4	4,2	0,2	-21,9
MG25	4,1	4,6	4,5	4,4	0,3	-18,9

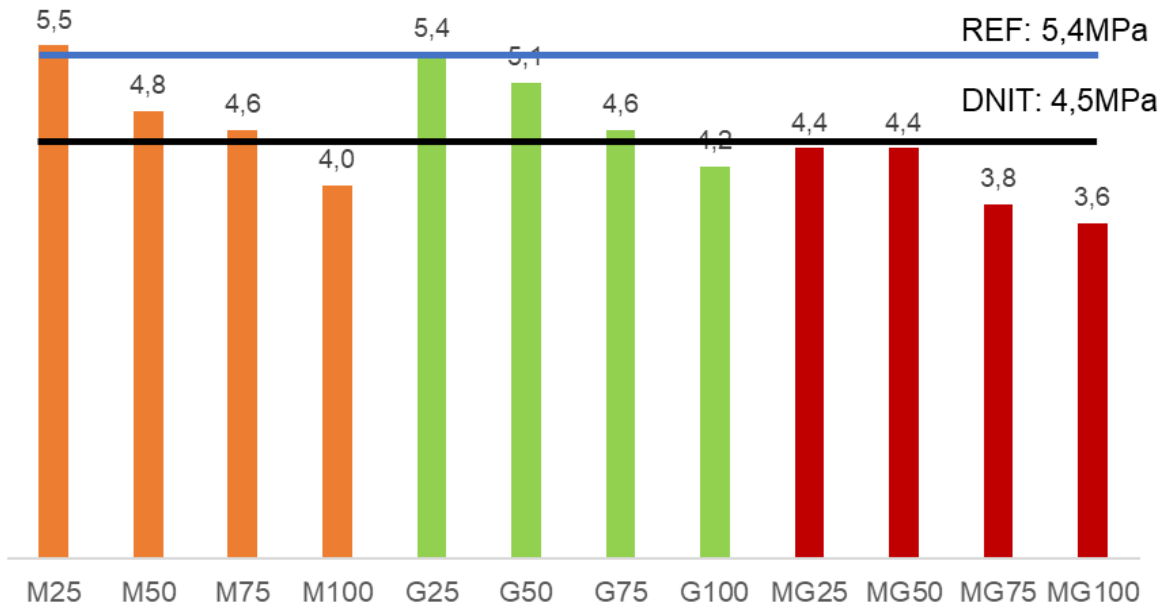
Tabela 31 – Resultados dos ensaios de resistência à tração na flexão (MPa)

Dosagem	CP ₁	CP ₂	CP ₃	Média	Desvio	Conclusão
						$\Delta/REF(\%)$
MG50	4,5	4,2	4,6	4,4	0,2	-18,2
MG75	3,9	3,8	3,6	3,8	0,2	-30,6
MG100	3,5	3,7	3,7	3,6	0,1	-33,3

Legenda: CP (corpo de prova) e Δ/REF (diferença relativa entre as dosagens e o CCP de referência).
Observação: percentual negativo indica que o traço com RAP perdeu parte das propriedades encontradas na dosagem de referência.

Fonte: Autor (2024).

Figura 34 – Resultados médios de resistência à tração na flexão (MPa)



Legenda: M (miúdo), G(graúdo) e MG (miúdo e graúdo).
Fonte: Autor (2024).

Como se observa, o concreto de referência alcançou 5,4MPa e 54% das dosagens superaram o parâmetro de aceitabilidade do DNIT para RTF (4,5 MPa). O M25, por exemplo, teve um ganho discreto (1,4%) acima do resultado da RTF do concreto de referência.

O comportamento geral da RTF repetiu a tendência da resistência à compressão debatida anteriormente, ou seja, o aumento do teor de RAP no CCP diminuiu a RTF em até 21,9% para a dosagem G (RAP graúdo substituindo a brita), 26,3% para M (RAP miúdo no lugar da areia) e 33,3% para a dosagem MG (RAP miúdo e graúdo misturados substituindo juntos areia e brita). Mesmo reduzidos,

obteve-se concretos de boa qualidade possivelmente em decorrência da natureza viscoelástica do revestimento betuminoso, como também observou Huang *et al.* (2005).

Importante relatar que as taxas máximas de redução da RTF foram menores que as taxas de redução da RC, concordando com os resultados de Ruiz (2017), Shi *et al.* (2017) e El Euch Ben Said *et al.* (2018). Esta foi uma descoberta importante no comportamento da RTF, pois tem relevância para aplicação em pavimentos de CCP.

As equações que definiram as reduções na RTF foram: RAP graúdo ($y = -0,41x + 5,85$ e $R^2 = 0,9917$), RAP miúdo ($y = -0,47x + 5,9$ e $R^2 = 0,9625$) e ambos ($y = -0,303x + 4,815$ e $R^2 = 0,8634$), ou seja, a mistura com RAP graúdo foi a que menos sofreu interferência. Esses resultados estão em conformidade com outros estudos (HUANG *et al.* 2005; HOSSINEY *et al.* 2010). Além desses autores:

- a) Costa (2022) observou uma redução média de 31% na RTF de argamassas ao substituir agregado natural por RAP. Para a autora, os agregados RAP comprometeram a capacidade das amostras de ganhar resistência, provavelmente devido à fraca ligação entre o betume e a matriz/agregados e ao ZTI mais fraco;
- b) Debbarma *et al.* (2019) mediram RTF de 3,67MPa em misturas de pavimentos de CCP compactado com rolo, contendo RAP. Diante desse resultado, os autores indicaram o potencial de incorporação de RAP em qualquer fração (miúdo, graúdo ou combinado) para aquele tipo de pavimento;
- c) Abraham e Ransinchung (2018) observaram diminuição máxima de 39,3% na RTF no concreto com RAP em comparação a mistura controle.
- d) Brand *et al.* (2012) concluíram que a RTF diminuiu entre 4 e 16% com a adição de 20% de RAP miúdo ao concreto, entre 9 a 10% com 35% de RAP adicionado e entre 19 e 33% com misturas com 50% de RAP miúdo.

Outros dados da literatura foram reunidos na Tabela 32.

Tabela 32 – Dados da resistência à tração na flexão de concretos com RAP

Autor(es)	Resist. á tração na flexão (MPa)
Ruiz (2017)	4,40 – 4,70
Brand e Roesler (2017b)	2,42
Shi <i>et al.</i> (2017)	3,10 – 4,50
Abraham e Ransinchung (2018)	2,30 – 4,90
Hossiney <i>et al.</i> (2010)	2,34 – 3,73
Huang <i>et al.</i> (2005)	1,59 – 3,21
Brand <i>et al.</i> (2012)	3,40 – 6,30
Dados médios da pesquisa	4,72 (com RAP miúdo)
	4,82 (com RAP graúdo)
	4,05 (com RAP miúdo/grauído)

Fonte: Autor (2024).

Uma análise mais profunda sobre os dados plotados na Figura 34 permitiu observar um *valor-P* maior que 0,05 (no teste de *Shapiro-Wilk*), significando a não rejeição da hipótese nula (H_0) e a distribuição normal dos dados com 95% de confiança (Tabela 33). Mesmo comportamento da resistência à compressão, debatido anteriormente.

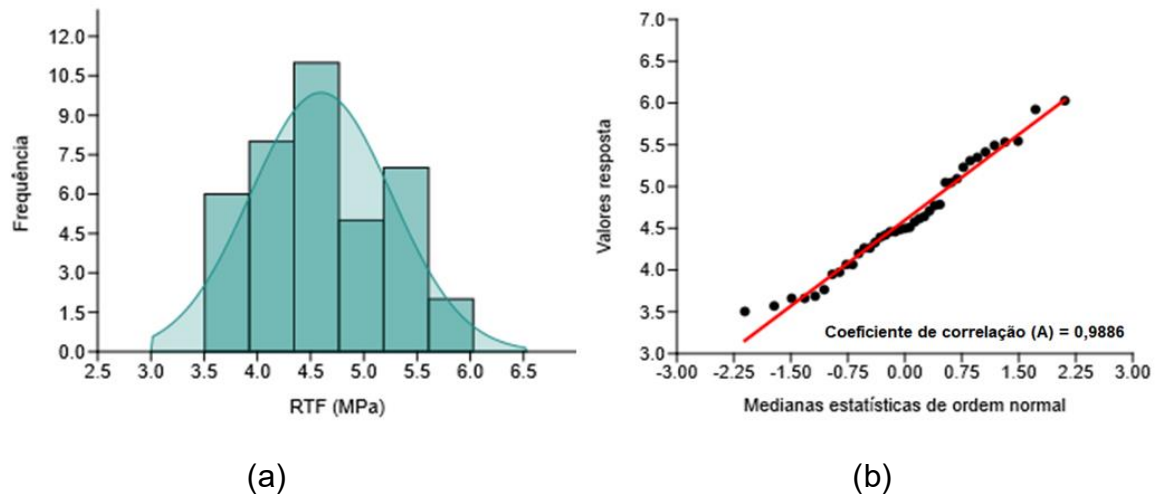
Tabela 33 – Teste de *Shapiro-Wilk* para os dados de resistência à tração na flexão

Hipótese aceita	Tamanho da amostra	SW	Nível de confiança	Significância (α)	Valor-P
H_0	39	0,9685	95%	0,05	0,3371
Nota: Teste de normalidade: <i>Shapiro-Wilk</i> ($n \leq 50$) <i>Anderson-Darling</i> ($n > 50$).					

Fonte: Autor (2024).

Diante dessas constatações, a Figura 35 apresenta o comportamento normal dos resultados em um histograma (com uma curva de Gauss associada) bem como um gráfico quartil-quartil ou Q-Q; onde se observou boa linearidade e aderência dos dados à reta.

Figura 35 – Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) da resistência à tração na flexão



Fonte: Autor (2024).

O teste ANOVA indicou diferenças significativas entre os valores da RTF para todas as dosagens, ou seja, valor-P inferior a 0,05 e F maior que $F_{\text{crítico}}$ em um intervalo de 95% de confiança (Tabela 34). Já a Tabela 35 resumiu os resultados do teste para cada dosagem.

Tabela 34 – Teste de ANOVA, resistência à tração na flexão

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	13,836	12	1,153	10,346	$4,5 \times 10^{-7}$	2,148
Dentro dos grupos	2,897	26	0,111			
Total	16,733	38				

Legenda: SQ (soma de quadrados), GL (grau de liberdade), MQ (quadrados médios), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

Tabela 35 – Teste de ANOVA, resistência à tração na flexão, por dosagem

Dosagem	Média	Desvio	GL	F	Valor-P	Estatisticamente significativo?
REF	5,4	0,1	-	-	-	-
M25	5,5	0,4	5	0,122	$7,4 \times 10^{-1}$	NÃO
M50	4,8	0,5	5	5,545	$7,8 \times 10^{-2}$	NÃO
M75	4,6	0,2	5	41,554	$3,0 \times 10^{-3}$	SIM
M100	4,0	0,3	5	56,427	$1,7 \times 10^{-3}$	SIM
G25	5,4	0,7	5	0,010	$9,2 \times 10^{-1}$	NÃO
G50	5,1	0,4	5	1,882	$2,4 \times 10^{-1}$	NÃO
G75	4,6	0,2	5	50,336	$2,1 \times 10^{-3}$	SIM

Continua

Tabela 35 – Teste de ANOVA, resistência à tração na flexão, por dosagem

Dosagem	Média	Desvio	GL	F	Valor-P	Conclusão
						Estatisticamente significativo?
G100	4,2	0,2	5	65,780	$1,3 \times 10^{-3}$	SIM
MG25	4,4	0,3	5	30,749	$5,2 \times 10^{-3}$	SIM
MG50	4,4	0,2	5	48,139	$2,3 \times 10^{-3}$	SIM
MG75	3,8	0,2	5	165,898	$2,1 \times 10^{-4}$	SIM
MG100	3,6	0,1	5	412,010	$3,5 \times 10^{-5}$	SIM

Legenda: GL (grau de liberdade), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

Como se observa, apenas os traços M25, M50, G25 e G50 (33,3%) apresentaram valor-P maiores que o valor da significância (0,05), indicando que não existem diferenças significativas entre os valores de resistência à tração na flexão quando comparadas com o concreto de referência.

A análise por regressão linear múltipla (Tabela 36) confirmou uma forte relação entre as variáveis independentes (teor de substituição do agregado natural por RAP) com a variável dependente (resistência à tração na flexão): $R^2 = 0,7028$. O valor do erro padrão (0,3717) apontou para a possível existência de outras variáveis independentes influentes e desconhecidas.

Tabela 36 – Resultados da regressão linear múltipla da resistência à tração na flexão

R múltiplo	0,8383				
R-quadrado	0,7028				
R-quadrado ajustado	0,6863				
Erro padrão	0,3717				
Observações	39				
	GL	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	2	11,7596	5,8798	42,5592	$3,27 \times 10^{-10}$
Resíduo	36	4,9736	0,1382		
Total	38	16,7332			
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	
Interseção	5,4005	0,1058	51,0261	$3,54 \times 10^{-35}$	
RAPM	-1,1459	0,1588	-7,2151	$1,71 \times 10^{-8}$	
RAPG	-0,9430	0,1588	-5,9377	$8,41 \times 10^{-7}$	

Legenda: SQ (soma de quadrados), GL (grau de liberdade), MQ (quadrados médios), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

O teste F apontou que o modelo proposto (Equação 8) é útil para explicar a variável dependente (resistência à tração na flexão): valor-P de $3,27 \times 10^{-10}$ (abaixo de 0,05) e R múltiplo de 0,8383 (próximo de 1).

$$RTF_{\text{estimada}} = 5,4005 - 1,1459 \times \text{RAPM} - 0,943 \times \text{RAPG} + 0,3717 \quad (8)$$

$$R^2 = 0,7028$$

Sendo:

RTF_{estimada}: Resistência à tração na flexão estimada

RAPM: Teor de substituição da areia por RAP miúdo

RAPG: Teor de substituição da brita por RAP graúdo

Observou-se que as variáveis RAPM e RAPG ficaram significativamente relacionadas com a variável dependente (RTF), visto que individualmente apresentaram valor-P < 0,05.

Pela equação proposta, para cada aumento do teor de RAPM, o valor da RTF_{estimada} diminuirá de 1,1459 enquanto que para cada aumento do teor de RAPG, o valor de RTF_{estimada} diminuirá de 0,9430. Isso permitiu entender que o RAPG é, teoricamente, mais adequado (menos instável) na estimativa antecipada de uma RTF.

Sobre o módulo de elasticidade (ME) considerou-se inicialmente um $f_{ck} \leq 50\text{MPa}$ (item 8.2.8 da norma NBR 6118/2024), Equação 9.

$$E_{ci} = \alpha_E \times 5600 \times f_{ck}^{0,5} \quad (9)$$

Diante do concreto de referência (f_{ck} de 20MPa e α_E de 1,0 para granito) calculou-se ME de 25,04GPa, ou seja, diferente apenas 2,19% do ME ensaiado conforme a NBR 8522-1/2021. Considerou-se ainda uma variação admissível para o E_{ci} de 20% para mais ou menos do ME do concreto de referência, atendendo a NBR 8522-1/2021), ACI 318/2019 e conforme Ruiz (2017). Os resultados dos ensaios de ME para todas as misturas, na idade de 28 dias foram reunidos na Tabela 37 e Figura 36.

Tabela 37 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (GPa)

Dosagem	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄	Média	Desvio	$\Delta/\text{REF}(\%)$
REF	25,2	24,5	25,6	27,3	25,6	1,2	-
M25	22,2	21,8	18,8	23,2	21,5	1,9	-16,1
M50	18,7	18,1	16,9	17,2	17,7	0,8	-30,8

Continua

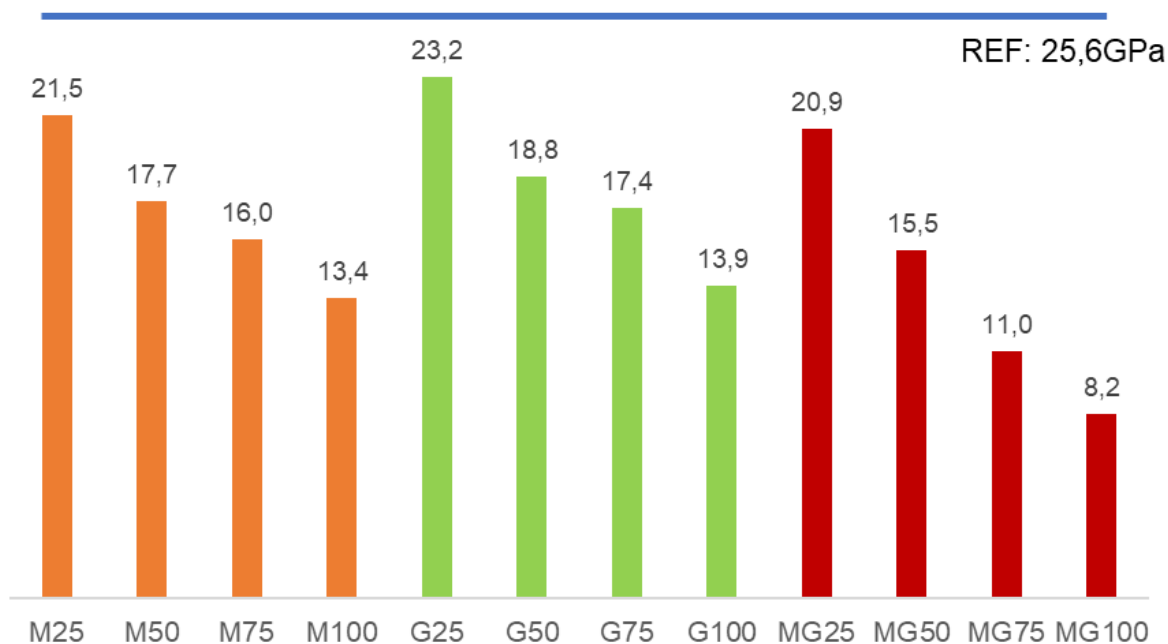
Tabela 37 – Resultados dos ensaios de módulo de elasticidade (GPa)

Dosagem	CP ₁	CP ₂	CP ₃	CP ₄	Média	Desvio	Conclusão
							$\Delta/REF(\%)$
M75	17,0	16,2	15,8	15,3	16,0	0,7	-37,4
M100	13,0	13,2	15,2	12,3	13,4	1,3	-47,6
G25	22,6	21,4	25,0	23,7	23,2	1,5	-9,6
G50	20,3	17,9	16,7	20,4	18,8	1,8	-26,7
G75	19,0	18,1	16,6	16,0	17,4	1,3	-32,0
G100	14,4	14,2	14,0	13,0	13,9	0,6	-45,7
MG25	20,8	19,6	22,5	-	20,9	1,5	-18,3
MG50	15,6	15,1	15,8	-	15,5	0,4	-39,5
MG75	10,9	10,9	11,3	-	11,0	0,2	-56,9
MG100	7,8	8,3	8,6	-	8,2	0,4	-67,9

Legenda: CP (corpo de prova) e Δ/REF (diferença relativa entre as dosagens e o CCP de referência).
 Observação: percentual negativo indica que o traço com RAP perdeu parte das propriedades encontradas na dosagem de referência.

Fonte: Autor (2024).

Figura 36 – Resultados médios do módulo de elasticidade (GPa) aos 28 dias



Legenda: M (miúdo), G(graúdo) e MG (miúdo e graúdo).

Fonte: Autor (2024).

Como se observa, o concreto de referência alcançou 25,6GPa e todas as dosagens ficaram inferiores. Entretanto, as misturas M25 (21,5GPa), G25 (23,2GPa) e MG25 (20,9GPa), apresentaram valores médios satisfatórios, com resultados compreendidos entre 20,5GPa e 30,7GPa, aos 28 dias.

O comportamento geral do módulo de elasticidade, repetiu as tendências anteriores (da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão), ou seja, com o aumento do teor de RAP no CCP diminuiu-se o ME em até 45,7% para a dosagem G (RAP graúdo substituindo a brita), 47,6% para M (RAP miúdo no lugar da areia) e 67,9% para a dosagem MG (RAP miúdo e graúdo misturados substituindo juntos areia e brita).

As equações que definiram as reduções no ME foram: RAP graúdo ($y = -2,93x + 25,65$ e $R^2 = 0,9662$), RAP miúdo ($y = -2,6x + 23,65$ e $R^2 = 0,9766$) e ambos ($y = -4,26x + 24,55$ e $R^2 = 0,9814$). Importante observar que as taxas de redução do ME foram maiores que as taxas de redução da resistência à compressão e da resistência à tração na flexão. Dosagens com teores de RAP graúdo sofreram menor interferência no ME quando comparadas com as de RAP miúdo.

Os resultados estão em conformidade com outros estudos (HOSSINEY *et al.*, 2010; BRAND *et al.*, 2012; ERDEM; BLANKSON, 2014; SHI *et al.*, 2017; BRAND; ROESLER, 2017a; EL EUCH BEM SAID *et al.*, 2018; PAPAKONSTATINOUS, 2018; COSTA, 2022). Além desses autores:

- a) Ruiz (2017) obteve CCP de referência com 32,35 e 32,68GPa e com RAP: 25,06 e 25,75GPa. Segundo o autor, mesmo fora dos limites estabelecidos, a mistura com RAP foi útil para confecção de elementos de segurança viária;
- b) Silva (2023) observou uma redução no ME para as dosagens produzidas com RAP em comparação à mistura de referência, provavelmente pela maior porosidade existente no RAP. Observou ainda que o ME foi influenciado, em maior proporção, para as misturas com substituição apenas do agregado miúdo, evidenciado a influência do tamanho do agregado nesta propriedade.

Outros dados da literatura foram reunidos na Tabela 38.

Tabela 38 – Dados do módulo de elasticidade de concretos com RAP

Autor(es)	Módulo de elasticidade (GPa)
Ruiz (2017)	27,3 – 27,9
Shi <i>et al.</i> (2017)	24,1 – 32,9
Hossiney <i>et al.</i> (2010)	16,2 – 32,9
Papakonstatinou (2018)	22,9 – 30,0
Brand <i>et al.</i> (2012)	31,9 – 44,4
Dados médios da pesquisa	17,15 (com RAP miúdo)
	18,32 (com RAP graúdo)
	13,90 (com RAP miúdo/grauído)

Fonte: Autor (2024).

Guo *et al.* (2018) sugerem que as misturas contendo RAP melhoraram a ductilidade e apresentaram excelentes propriedades de resistência à quebra. Já Hossiney *et al.* (2010) observaram que as tensões máximas no CCP diminuem à medida que o teor de RAP da mistura aumenta devido à diminuição do ME.

Erdem e Blankson (2014) demonstram que o ME não aumenta proporcionalmente com o aumento da resistência à compressão. Para os autores, a rigidez é, provavelmente, mais influenciada pela ligação agregado-agregado que pela ligação argamassa-agregado.

Cabral (2007) sugere que o comportamento do ME dos concretos é regido pelo agregado, ou seja, considerando que o RAP é geralmente mais deformável que o agregado natural, o CCP produzido com RAP é mais deformável.

Para Mehta e Monteiro (1994) o ME está intimamente ligado à fração volumétrica, à massa específica, ao ME do agregado e da matriz de cimento e às características da ZTI. O ME do agregado, por sua vez, está relacionado particularmente à sua porosidade e, em grau um pouco menor, ao diâmetro máximo do agregado, forma, textura, granulometria e composição mineralógica. Para os autores, a rigidez do agregado é quem controla a capacidade de restrição da deformação da matriz, assim como sua rigidez é influenciada por sua porosidade. O ME é regido pela porosidade da pasta, que por sua vez é controlada pela relação a/c, pelo grau de hidratação do cimento, pelo conteúdo de ar da mistura e pela presença de adições minerais. Na ZTI existe a influência dos espaços vazios, das microfissuras

e dos cristais de hidróxido de cálcio orientados sobre as relações de tensão/deformação.

Uma análise mais profunda sobre os dados plotados na Figura 36 (que retratam o módulo de elasticidade) permitiu observar um *valor-P* maior que 0,05 (no teste de *Shapiro-Wilk*), significando a não rejeição da hipótese nula (H_0) e a distribuição normal dos dados com 95% de confiança (Tabela 39).

Tabela 39 – Teste de *Shapiro-Wilk* para os dados do módulo de elasticidade

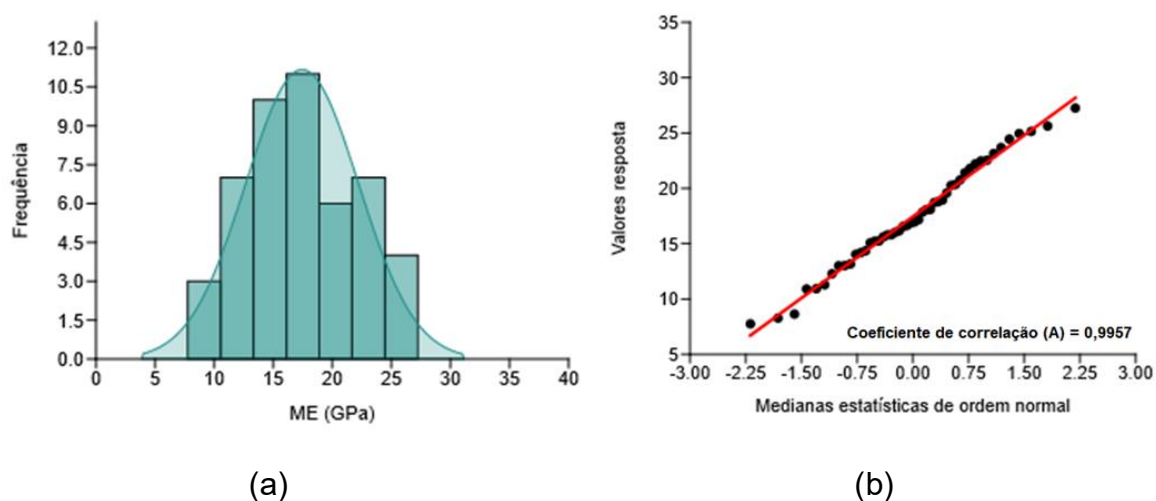
Hipótese aceita	Tamanho da amostra	SW	Nível de confiança	Significância (α)	Valor-P
H_0	48	0,9851	95%	0,05	0,7934

Nota: Teste de normalidade: *Shapiro-Wilk* ($n \leq 50$) | *Anderson-Darling* ($n > 50$).

Fonte: Autor (2024).

Diante dessas constatações, a Figura 39 apresenta o comportamento normal desses resultados em um histograma (com uma curva de Gauss associada) bem como um gráfico quartil-quartil ou Q-Q; onde se observou boa linearidade e aderência dos dados à reta.

Figura 39 – Histograma (a) e gráfico Q-Q (b) do módulo de elasticidade



Fonte: Autor (2024).

O teste ANOVA indicou diferenças significativas entre os valores do módulo de elasticidade para todas as dosagens, ou seja, valor-P inferior a 0,05 e F maior que

$F_{\text{crítico}}$ em um intervalo de 95% de confiança (Tabela 40). Já a Tabela 41 resumiu os resultados do teste para cada dosagem.

Tabela 40 – Teste de ANOVA, módulo de elasticidade aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	GL	MQ	F	Valor-P	$F_{\text{crítico}}$
Entre grupos	1019,147	12	84,929	57,373	$2,3 \times 10^{-19}$	2,041
Dentro dos grupos	51,810	35	1,480			
Total	1070,957	47				

Legenda: SQ (soma de quadrados), GL (grau de liberdade), MQ (quadrados médios), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

Tabela 41 – Teste de ANOVA, módulo de elasticidade aos 28 dias, por dosagem

Dosagem	Média	Desvio	GL	F	Valor-P	Estatisticamente significativo?
REF	25,6	1,2	-	-	-	-
M25	21,5	1,9	7	13,781	$9,9 \times 10^{-3}$	SIM
M50	17,7	0,8	7	117,551	$3,6 \times 10^{-5}$	SIM
M75	16,0	0,7	7	189,192	$9,2 \times 10^{-6}$	SIM
M100	13,4	1,3	7	198,177	$8,0 \times 10^{-6}$	SIM
G25	23,2	1,5	7	6,564	$4,3 \times 10^{-2}$	SIM
G50	18,8	1,8	7	39,164	$7,7 \times 10^{-4}$	SIM
G75	17,4	1,3	7	83,820	$9,6 \times 10^{-5}$	SIM
G100	13,9	0,6	7	307,852	$2,2 \times 10^{-6}$	SIM
MG25	20,9	1,5	6	22,063	$5,4 \times 10^{-3}$	SIM
MG50	15,5	0,4	6	193,723	$3,4 \times 10^{-5}$	SIM
MG75	11,0	0,2	6	419,832	$5,1 \times 10^{-6}$	SIM
MG100	8,2	0,4	6	559,066	$2,5 \times 10^{-6}$	SIM

Legenda: GL (grau de liberdade), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

Como se observa, todos os traços apresentaram valor-P menores que o valor da significância (0,05), indicando que existem diferenças significativas entre os valores de ME quando comparadas com o concreto de referência.

A análise por regressão linear múltipla (Tabela 42) confirmou uma forte relação entre as variáveis independentes (teor de substituição do agregado natural por RAP) com a variável dependente (módulo de elasticidade): $R^2 = 0,8860$. Por outro lado, o valor do erro padrão (1,6473) apontou para a possível existência de outras variáveis independentes influentes e desconhecidas.

Tabela 42 – Resultados da regressão linear múltipla do módulo de elasticidade

R múltiplo	0,9413				
R-Quadrado	0,8860				
R-quadrado ajustado	0,8809				
Erro padrão	1,6473				
Observações	48				
	GL	SQ	MQ	F	Valor-P
Regressão	2	948,8507	474,4253	174,8401	$6,05 \times 10^{-22}$
Resíduo	45	122,1066	2,7135		
Total	47	1070,9573			
	Coeficientes	Erro padrão	Stat t	Valor-P	
Interseção	23,9114	0,4207	56,8407	$1,50 \times 10^{-43}$	
RAPM	-9,5227	0,6383	-14,9191	$4,90 \times 10^{-19}$	
RAPG	-8,2170	0,6383	-12,8735	$1,08 \times 10^{-16}$	

Legenda: SQ (soma de quadrados), GL (grau de liberdade), MQ (quadrados médios), F (valor estatístico de F considerado) e valor-P (valor em relação ao nível de significância).

Fonte: Autor (2024).

O teste F apontou que o modelo proposto (Equação 10) é útil para explicar a variável dependente (módulo de elasticidade): valor-P de $6,05 \times 10^{-22}$ (abaixo de 0,05) e R múltiplo de 0,9413 (próximo de 1).

$$ME_{\text{estimado}} = 23,9114 - 9,5227 \times \text{RAPM} - 8,217 \times \text{RAPG} + 1,6473 \quad (10)$$

$$R^2 = 0,886$$

Sendo:

ME_{estimado} : Módulo de elasticidade estimado

RAPM: Teor de substituição da areia por RAP miúdo

RAPG: Teor de substituição da brita por RAP graúdo

Observou-se que as variáveis RAPM e RAPG ficaram significativamente relacionadas com a variável dependente (módulo de elasticidade), visto que individualmente apresentaram valor-P < 0,05.

Pela equação proposta, para cada aumento do teor de RAPM, o valor da ME_{estimado} diminuirá de 9,5227 enquanto que para cada aumento do teor de RAPG, o valor de ME_{estimado} diminuirá de 8,2170. Isso permitiu entender que o RAPG é, teoricamente, mais adequado (menos instável) na estimativa antecipada do ME.

Para encerrar a pesquisa, mesmo que não tenha sido um objetivo específico, realizou-se uma breve estimativa dos ganhos financeiros e ambientais decorrentes do emprego do RAP no concreto. Como destacaram Shi *et al.* (2017), a utilização de RAP

para produzir diferentes classes de CCP promove economia de custos, reduz os impactos negativos do armazenamento e facilita a sustentabilidade ao consumir menor quantidade de agregados virgens.

Nesse contexto, a estimativa dos ganhos financeiros levou em conta o Sistema de Custos Referenciais de Obras (SICRO) do DNIT (tabela de janeiro de 2024 do Ceará), a Composição de Preço Unitário (CPU) do Concreto de 20MPa e as quantidades de materiais empregados na pesquisa. Também foi consultado o Sistema Nacional de Pesquisa de Custos e Índices da Construção Civil (SINAPI), da Caixa Econômica Federal, para estimar o custo do beneficiamento do fresado por peneiramento. Não foi considerado custo de transporte do fresado porque as amostras já estavam no pátio do DNIT. Sobre as distâncias, que afetam o custo, foram adotadas as informações constantes nos contratos vigentes do órgão na obra da BR-020/CE. A Tabela 43 apresenta as informações utilizadas na estimativa enquanto a Tabela 44 traz os resultados alcançados.

Tabela 43 – Informações utilizadas no cálculo da estimativa de custos dos concretos

Descrição	Unidade	Custo (R\$/Unidade)		DMT (km)
		SICRO	SINAPI	
Cimento	kg	0,7074	-	21,20
Areia	m ³	125,4912	-	80,34
Brita	m ³	134,2623	-	24,00
RAP	m ³	-	-	-
Peneiramento	m ³	-	31,3000	-
Caminhão basculante 10m ³	t.km	0,7800	-	-
Caminhão carroceria 15t	t.km	0,7300	-	-
Data base	-	Jan/2024		

Legenda: DMT (distância média de transporte entre fornecedor e local de fabricação do concreto).

Fonte: Elaborado pelo autor com dados do DNIT, SICRO e SINAPI.

Tabela 44 – Estimativa dos custos de produção das dosagens estudadas

Dosagem							Redução (R\$)	Δ /REF (%)
	A+B (R\$)	C (R\$)	D (R\$)	E (R\$)	F (R\$)	Total (R\$)		
REF	69,07	411,68	-	15,34	-	496,09	-	-
M25	69,07	394,07	4,39	15,34	-	482,87	13,22	-2,66
M50	69,07	376,45	8,79	15,34	-	469,65	26,44	-5,33
M75	69,07	358,84	13,18	15,34	-	456,43	39,66	-7,99

Continua

Tabela 44 – Estimativa dos custos de produção das dosagens estudadas

Dosagem							Conclusão	
	A+B (R\$)	C (R\$)	D (R\$)	E (R\$)	F (R\$)	Total (R\$)	Redução (R\$)	Δ /REF (%)
M100	69,07	341,23	17,57	15,34	-	443,21	52,88	-10,66
G25	69,07	391,28	4,76	15,34	-	480,44	15,65	-3,15
G50	69,07	370,87	9,51	15,34	-	464,79	31,29	-6,31
G75	69,07	350,47	14,27	15,34	-	449,15	46,94	-9,46
G100	69,07	330,07	19,03	15,34	-	433,50	62,59	-12,62
MG25	69,07	373,66	9,15	15,34	-	467,22	28,87	-5,82
MG50	69,07	335,65	18,30	15,34	-	438,35	57,73	-11,64
MG75	69,07	297,63	27,45	15,34	-	409,49	86,60	-17,46
MG100	69,07	259,62	36,60	15,34	-	380,62	115,47	-23,28

Nota: A (equipamentos), B (mão de obra), C (material), D (atividade auxiliar - beneficiamento), E (tempo fixo) e F (momento de transporte: ficou zerado por ser uma condição para formação de preço público referencial, ou seja, o frete faz parte do custo no DNIT).

Fonte: Autor (2024).

Como se observa, o concreto de referência custou R\$ 496,09 por m³ e todas as dosagens com RAP representaram uma economia financeira que acompanhou o teor substituído, variando entre R\$ 13,22 por m³ ou 2,66% (dosagem M25) até R\$ 115,47 por m³ ou 23,28% (dosagem MG100).

Cunha (2022), em sua tese de doutorado, concluiu que a viabilidade máxima da substituição da brita por agregado reciclado de construção deve ser da ordem de 50%, quando observou uma redução de 26,21% no valor de composição dos agregados, mesmo com a elevação do consumo de cimento.

Para Ruiz (2017) o aspecto econômico é muito importante, mas não deve ser o único aspecto relevante a ser considerado, pois existem outros fatores que complementam o rol de indicadores que permitam realizar uma melhor análise, tais como o financeiro, impactos ambientais, qualidade, disponibilidade de materiais, mão de obra qualificada, trabalhabilidade, entre outros. O autor, obteve redução de R\$ 35,24 por m³ ao substituir o agregado natural por RAP em concreto para elementos de segurança viária e de R\$ 31,81 por m³ em concreto para os elementos de drenagem.

Debbarma *et al.* (2019) observaram redução de até 46% nos custos totais de produção de cada m³ de pavimentos de CCP compactado com rolo com a incorporação de qualquer fração de RAP.

Nandi e Ransinchung (2021) estimaram em 19,9% a redução do custo de produção de um bloco com 100% de RAP grosso e uma redução de 12,9% com RAP fino.

Singh *et al.* (2018a) mostraram que as incorporações de RAP ao concreto podem reduzir o custo total de 1 m³ em mais de 40% em comparação ao concreto convencional. Em outra pesquisa, Singh *et al.* (2018b) observaram redução no custo total das misturas variando entre 7% a 34%.

Em termos ambientais, a pesquisa estimou a possível redução da emissão de CO₂equivalente decorrente do emprego do RAP no concreto, considerando os materiais, a produção e o transporte dos concretos elaborados. Tomou-se como base valores médios de emissões disponíveis na literatura (Tabela 45) alcançando os resultados mostrados na Tabela 46.

Tabela 45 – Emissões de CO₂ para a produção de 1 m³ de concreto

Insumos	Unidade	Autores			Média
		A	B	C	
Cimento		9,44E-01	9,80E-01	9,27E-01	9,50E-01
Areia		2,65E-03	2,60E-03	1,29E-02	6,05E-03
Brita	CO ₂ .kg/kg	7,50E-03	7,50E-03	1,63E-02	1,04E-02
RAP miúdo		-	8,00E-04	-	8,00E-04
RAP graúdo		-	8,00E-04	-	8,00E-04
Água		1,96E-04	3,00E-04	-	2,48E-04
PC	CO ₂ .kg/m ³	8,00E-03	7,70E-03	-	7,85E-03
TCG	CO ₂ .kg/kg.km	5,18E-05	5,18E-05	-	5,18E-05
TCB		6,30E-05	6,00E-05	-	6,15E-05

Legenda: PC (produção de concreto), TCG (transporte em caminhão grade), TCB (transporte em caminhão basculante). A: Yang *et al.* (2013), B: Nandi e Ransinchung (2021), C: Cunha (2022). Distância Média de Transporte do Fresado: 39,59km. Demais dados: Tabela 43.

Fonte: autor (2024)

Tabela 46 – Estimativa das emissões de CO₂equivalente para os concretos estudados

Dosagem	Material	Produção	Transporte	Total	Redução	Δ/REF
	(Kg de CO ₂ por m ³)					(%)
REF	363,43	18,04	5,70	387,17	-	-
M25	362,33	18,04	5,17	385,54	1,63	-0,42
M50	361,22	17,73	4,64	383,59	3,57	-0,92
M75	360,12	17,65	4,11	381,88	5,28	-1,36
M100	359,01	17,49	3,59	380,09	7,08	-1,83
G25	361,24	17,97	5,97	385,17	2,00	-0,52
G50	359,04	17,83	6,24	383,11	4,05	-1,05
G75	356,84	17,78	6,51	381,14	6,03	-1,56
G100	354,65	17,67	6,78	379,10	8,07	-2,08
MG25	360,13	17,85	5,44	383,42	3,74	-0,97
MG50	356,83	17,61	5,19	379,62	7,54	-1,95
MG75	353,53	17,40	4,93	375,85	11,31	-2,92
MG100	350,23	17,00	4,67	371,90	15,27	-3,94

Fonte: Autor (2024).

Como se observa, o concreto de referência tem potencial para emitir 387,17 Kg de CO₂ por m³ e todas as dosagens com RAP representam uma possível redução na emissão, acompanhando o teor substituído e variando entre 0,42% por m³ ou 1,63 Kg de CO₂ por m³ (dosagem M25) até uma redução de 3,94% por m³ ou 15,27 Kg de CO₂ por m³ (dosagem MG100).

Foi observado também que a maior contribuição nas emissões estava relacionada ao material, superando em muito as outras duas fases (produção do concreto e transporte), sendo o cimento o maior contribuinte.

Yang *et al.* (2013), em seus procedimentos de cálculo das emissões de CO₂ correspondentes ao concreto de 40 MPa, estimaram para o material 352,90 Kg de CO₂ por m³, para a produção 18,7 Kg de CO₂ por m³ e para o transporte 28,8 Kg de CO₂ por m³.

Nandi e Ransinchung (2021) estimaram no bloco de concreto de referência a emissão de 382,966 Kg de CO₂ por m³ para o material, 18,592 Kg de CO₂ por m³ para a produção e 2,357 Kg de CO₂ por m³ para o transporte. Quando os autores

substituíram todo o agregado natural graúdo por RAP graúdo as emissões caíram para 375,31 Kg de CO₂ por m³ (material), 18,447 Kg de CO₂ por m³ (produção) e 1,887 Kg de CO₂ por m³ (transporte). Concluíram que a reciclagem de resíduos provenientes de pavimentos asfálticos em blocos de concreto oferece alternativas economicamente rentáveis de gestão de resíduos, conservação de agregados naturais limitados e, ao mesmo tempo, incentiva boas práticas de produção sustentáveis na indústria do setor rodoviário.

Suzuki (2019) destaca que o uso do fresado reduz a exploração de novos recursos naturais, as emissões de GEE e a disposição em aterros sanitários e, do ponto de vista econômico, reduz os custos de aquisição de novos insumos e transporte de materiais. O uso do material fresado de pavimentos asfálticos permite reaproveitar seu ligante e seus agregados (FERREIRA, 2021).

Singh *et al.* (2018b) observaram que a utilização de RAP não só reduziu o custo total das misturas como também proporcionou outros benefícios ambientais, tais como redução da pegada de carbono e redução na exploração de jazidas naturais.

Ruiz (2017), quando substituiu agregados naturais por RAP na confecção de elementos de segurança viária, constatou a redução da emissão de 30,1 Kg de CO₂ por m³ e no concreto destinado a elementos de drenagem superficial obteve uma redução 29,0 Kg de CO₂ por m³.

Por fim, cabem alguns comentários sobre o monitoramento dos dispositivos de drenagem (meio-fio pré-moldado com RAP) instalados no Km 392 da BR-020/CE. Após 04 vistorias (abril, maio, junho e julho de 2024, totalizando 88 dias) todas as peças, exceto uma que sofreu vandalismo, estavam em perfeito estado e funcionais. Outros detalhes foram reunidos no Quadro 2.

Quadro 2 – Resumo das vistorias técnicas sobre o trecho experimental

Vistoria 1, 09/04/2024, 10:20h.



- Trecho experimental em operação há 1 dia;
- Temperatura da pista (40,7°C)
- Meio-Fio amarelo (32,6°C)
- Meio-Fio vermelho (30,4°C)
- Meio-Fio preto (30,9°C)
- Chuvas recorrentes (quadra invernal)
- O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas.

Vistoria 2, 16/05/2024, 10:50h.



- Trecho experimental em operação há 38 dias;
- Temperatura da pista (43,6°C)
- Meio-Fio amarelo (31,8°C)
- Meio-Fio vermelho (31,3°C)
- Meio-Fio preto (33,0°C)
- Chuvas recorrentes (quadra invernal);
- Fissuras evidentes nas juntas do MFC05;
- O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas.

Vistoria 3, 25/06/2024, 8:10h.



- Trecho experimental em operação há 78 dias;
- Temperatura da pista (38,2°C)
- Meio-Fio amarelo (24,2°C)
- Meio-Fio vermelho (23,1°C)
- Meio-Fio preto (23,4°C)
- Observado vandalismo no trecho, onde um meio-fio danificado e um marco cônico de concreto de identificação foi levado;
- O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas.

Vistoria 4, 05/07/2024, 10:40h.



- Trecho experimental em operação há 88 dias;
- Temperatura da pista (39,1°C)
- Meio-Fio amarelo (27,6°C)
- Meio-Fio vermelho (24,2°C)
- Meio-Fio preto (25,9°C)
- Observada vegetação crescida e sobre o dispositivo de drenagem
- O sistema de drenagem estava funcionando perfeitamente com as chuvas;
- Entretanto, o experimento carece de mais tempo para observações.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos permitiram concluir que:

- a) O beneficiamento (peneiramento) do RAP permitiu o aprimoramento da granulometria dos agregados naturais e o alcance dos limites utilizáveis (zona útil e zona ótima) para CCP recomendados pela NBR 7211/2022. Assim, reduzindo a variabilidade granulométrica e aumento da qualidade e estabilidade dos resultados;
- b) Não houve grande diferença entre o processo de produção dos concretos com RAP e o do concreto de referência;
- c) Houve uma tendência decrescente de trabalhabilidade no concreto com RAP em relação ao convencional, exceto para a dosagem com M25;
- d) As dosagens somente com RAP graúdo foram as que menos sofreram interferência na trabalhabilidade, na resistência à compressão, na tração na flexão e no módulo de elasticidade, sugerindo ser a fração ideal para CCP modificados;
- e) Houve influência direta do RAP na redução da massa endurecida dos concretos em função da menor massa específica desse material;
- f) Os concretos com RAP apresentaram menores valores de *Slump*, RC, RTF e ME, quando comparados com o REF, apesar dos bons resultados gerais das misturas;
- g) As dosagens com a incorporação simultânea de RAP miúdo e graúdo foram as que mais sofreram diminuição na resistência à compressão e à tração na flexão;
- h) Estatisticamente os traços M25 e G25 não apresentaram diferenças significativas para a RC em comparação ao REF, assim como as dosagens M25, M50, G25 e G50 quanto à RTF;
- i) A dosagem M25 superou em 1,4% a resistência à tração na flexão obtida no concreto de referência;
- j) O aumento do teor de RAP no CCP estudado diminuiu os resultados de módulo de elasticidade e, novamente, as misturas com incorporação simultânea de RAP miúdo e graúdo foram as que mais sofreram diminuição desse parâmetro;

- k) A variação dos valores de módulo de elasticidade foi maior que a variações obtidas na resistência à compressão e na resistência à tração na flexão ($\Delta ME > \Delta RC > \Delta RTF$);
- l) A maior parte do f_{ck} (estimado) das misturas estudadas atendeu ao critério de conformidade estabelecido pela norma DNIT 020/2023-ES;
- m) Mesmo não sendo objetivo direto da pesquisa, a aplicação do RAP no CCP estudado trouxe uma estimativa de ganhos econômicos e ambientais positiva e linear para todos os teores incorporados, com destaque para a dosagem MG100;
- n) O trecho experimental implantado no Km 392 da BR-020/CE, após 4 vistorias técnicas e 88 dias de operação, se manteve em perfeito estado físico e de funcionamento. Cabe recomendar que ele seja monitorado por um período maior para avaliação da sua qualidade ao longo do tempo.

Por fim, a pesquisa ajudou na valorização do fresado e no aprimoramento técnico dos envolvidos na pesquisa. A pesquisa possui potencial para promover a iniciação de uma tecnologia local sobre aproveitamento do fresado, bem como o crescimento dos indicadores ambientais da SR/DNIT/CE.

Fica como sugestão para outros trabalhos:

- Avaliar em profundidade os ganhos econômicos e ambientais da incorporação dos RAP no CCP;
- Avaliar o comportamento do concreto com a incorporação do *filler* do RAP substituindo o cimento;
- Avaliar a variação das resistências do concreto com RAP e seu comportamento em função da variação da temperatura ambiente.

REFERÊNCIAS

ABRAHAM, S. M.; RANSINCHUNG, G.D.R.N. Strength and permeation characteristics of cement mortar with Reclaimed Asphalt Pavement Aggregates. **Construction and Building Materials**. v.167, p.700-706, abril, 2018.

ALMEIDA JÚNIOR, P. O. B. **Reciclagem de misturas 100% RAP: Investigação de parâmetros para avaliação e dosagem de agentes rejuvenescedores com foco na fadiga**. 401p. Tese de doutorado. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, RS, 2022.

ALVES, R. L. D. M. **Concreto produzido com resíduo de pavimento asfáltico**. Monografia (Graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Curso de Graduação em Engenharia Civil. Natal, RN, 2017.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **ACI 318**: Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary, Farmington Hills, Michigan, USA. 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TEST AND MATERIALS. **ASTM D 2041**: Standard test method for theoretical maximum specific gravity and density of bituminous paving mixtures. West Conshohocken, 2011.

ASPHALT RECYCLING AND RECLAIMING ASSOCIATION. **ARRA**. An overview of recycling and reclamation methods for asphalt pavement rehabilitation. Annapolis, USA, 1992.

ARSHAD, A. K.; AWANG, H.; SHAFFIE, E.; HASHIM, W.; RAHMAN, Z. A. Performance Evaluation of Hot Mix Asphalt with Different Proportions of RAP Content. **International Conference on Civil & Environmental Engineering (CENVIRON)** Penang, Malaysia, 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738**: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro, RJ. 2015.

_____. **NBR 5739**: Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2024.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Requisitos. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

_____. **NBR 8522-1**: Concreto endurecido – Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação Parte 1: Módulos estáticos à compressão. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, RJ. 2015.

_____. **NBR 12142:** Concreto – Determinação da resistência à tração na flexão de corpos de prova prismáticos. Rio de Janeiro, RJ. 2010.

_____. **NBR 12655:** Concreto de cimento Portland – Preparo, controle, recebimento e aceitação – Procedimento. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

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

_____. **NBR 16208:** Misturas asfálticas – Determinação do teor de betume pelo Soxhlet, pelo Rotarex e pelo refluxo duplo. Rio de Janeiro, RJ. 2013.

_____. **NBR 16697:** Cimento Portland — Requisitos. Rio de Janeiro, RJ. 2018.

_____. **NBR 16889:** Concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone (Slump test). Rio de Janeiro, RJ. 2020.

_____. **NBR 16915:** Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16916:** Agregado miúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16917:** Agregado graúdo – Determinação da densidade e da absorção de água. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16972:** Agregados – Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16973:** Agregados – Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem. Rio de Janeiro, RJ. 2021.

_____. **NBR 16974:** Agregado graúdo – Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão *Los Angeles*. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

_____. **NBR 17054:** Agregados – Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio. Rio de Janeiro, RJ. 2022.

BALBO, J. T. **Pavimentação Asfáltica: Materiais, Projeto e Restauração.** 1ª edição. Ofício de Textos. São Paulo, 2007.

BERNUCCI, L. B.; MOTTA, L. M. G.; CERATTI, J. A. P.; SOARES, J. **Pavimentação Asfáltica: Formação Básica para Engenheiros.** 2ª edição. Petrobras: ABEDA. Rio de Janeiro, 2022.

BOHN, K. A. **Avaliação das misturas asfálticas mornas com uso de ligantes convencional e modificado por polímero.** 254f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Santa Maria, RS, 2017.

BONFIM, V. **Fresagem de Pavimentos Asfálticos**. 3 Ed., São Paulo, Exceção Editorial, 2011.

BOUSSETTA, I., EL EUCH KHAY, S., NEJI, J. Experimental testing and modelling of roller compacted concrete incorporating RAP waste as aggregates. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, v.24, n.11, p.1729-1743, 2020.

BRAND, A. S.; ROESLER, J. R. Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part I - The interfacial transition zone. **Construction and Building Materials**. v.130, p.171-181, january, 2017a.

_____. Bonding in cementitious materials with asphalt-coated particles: Part II – Cement-asphalt chemical interactions. **Construction and Building Materials**. v.130, p.182-192, january, 2017b.

BRAND, A. S.; ROESLER, J. R.; AL-QADI, I. L.; SHANGGUAN, P. Fractionated reclaimed asphalt pavement (FRAP) as a coarse aggregate replacement in a ternary blended concrete pavement. **ICT-12-008**. 2012.

BRASIL. REPÚBLICA FEDERATIVA DO. Lei 12.305/2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **DOU**: Brasília, DF, 3 ago. 2010.

BRITO, J. R. **Efeito da Adição de Fibras de Coco em Misturas Cimentadas com Agregados Reciclados para Subcamadas de Pavimentos**. 89f. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2022.

BROCK, J. D.; RICHMOND, J. L. Milling and Recycling. Technical Paper T-127. **Astec Industries**. 2007.

BROSSEAUD, Y. Reciclagem de misturas asfálticas: Evolução após 20 anos e a situação atual na França. **7º Congresso Brasileiro de Rodovias e Concessões**, Anais...Foz do Iguaçu, 2011.

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. 280p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2007.

CARMO, L. D. S.; PAULO, E. E. D. O.; LARA, R. A; MELO, F. C. L; AGNOLETTI, E. Avaliação do Impacto de Drenagem Superficial na Vida Útil de Pavimentos. **Nativa-Revista de Ciências Sociais do Norte de Mato Grosso**, v.13, n.1, 2024.

CARVALHO, T. R. de; MEDEIROS, D. F. de. Material Fresado: Uma Opção Sustentável. **6º Congresso Brasileiro do Cimento**, Anais...SP, 2014.

CENTOFANTE, R. **Estudo Laboratorial da Utilização de Material Fresado em Misturas Asfálticas Recicladas à quente**. 162 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS, 2016.

CHEL, A.; KAUSHIK, G. Renewable energy technologies for sustainable development of energy efficient building. **Alexandria Engineering Journal**, v.57, n.2, p.655-669, jun. 2018.

COBRA, A. M. N. **Gestão de resíduos de construção e demolição em obras de infraestrutura urbana no Município de São Paulo: Estudo de caso da requalificação do Vale do Anhangabaú**. 149f. Dissertação (Mestrado em Habitação), Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2022.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE. CNT. **Transporte rodoviário: por que os pavimentos das rodovias dos Brasil não duram?** 160 p.: il. color.; gráficos. Brasília: CNT, 2017.

COPELAND, A. **Reclaimed Asphalt Pavement in Asphalt Mixtures: State of the Practice**. Report No. FHWA-HRT-11-021, n. FHWA, p. McLean, VA, 2011.

CORREA, A. L.; BRAGA, S. M.; AGUIAR, M. F. P.; OLIVEIRA, F. H. L.; MONTEIRO, F. F.; PINHEIRO NETO, J. C. Melhoramento de solos para camadas de pavimentos rodoviários com material fresado e estabilização química. **43ª Reunião Anual de Pavimentação (RAPv)**, Anais... Maceió-AL, 2014.

CORREA, B. M. **Análise de rigidez e danificação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes tipos e teores de RAP**. 145p. Dissertação (Mestrado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, 2020.

COSTA, J. O. **Alkali-activated binders with reclaimed asphalt aggregates as a potential base layer of pavements**. 178p. Tese (Doutorado). Universidade de Antuérpia, 2022.

COSTA, V. S. D.; TEIXEIRA, F. R.; RODRIGUES, J. M.; TORRES, A. D. S. Estudo do Uso de Resíduo da Fresagem de Pavimentos Flexíveis em Concretos Estruturais. v. 11 n. 20. **Paranoá**. 2018.

CUNHA FILHO, J. F. D. **Estudo dos efeitos da incorporação de resíduo asfáltico como agregado miúdo no concreto**. 18 f. Monografia (graduação). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Civil. Natal-RN, 2018.

CUNHA, I. B. **Análise dos impactos ambientais de concretos com agregado reciclado de resíduos de construção civil**. 141 f. Tese (Doutorado). Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUCRS, Rio Grande do Sul. 2022.

DEBBARMA, S.; RANSINCHUNG, G. D.; SINGH, S. Feasibility of roller compacted concrete pavement containing different fractions of reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**. v.199, p.508-525, february, 2019.

DELLABIANCA, L. M. A. **Estudo do comportamento de material fresado de revestimento asfáltico visando sua aplicação em reciclagem de pavimentos**. 110p. Tese de Doutorado, Publicação G.TD-020/04, Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2004.

DELWAR, M.; FAHMY, M; TAHA, R. Use of Reclaimed Asphalt Pavement as an Aggregate in Portland Cement Concrete. **ACI Materials Journal**, v.94, n.3, p.251-256. 1997.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM – **DNER-ME 093**: Solos – Determinação da densidade real. Método de Ensaio. 1994

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES - DNIT. **Álbum de projetos – tipo de dispositivos de drenagem**. n.p. 5. ed. Publ. IPR-736. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **Manual de restauração de pavimentos asfálticos**. 310p. 2. ed. Publ. IPR-720. Rio de Janeiro, 2005a.

_____. **Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem**. 133p. 2. ed. Publ. IPR-715. Rio de Janeiro, 2005b.

_____. **Manual de pavimentação**. 274p. 3ª ed. Publ. IPR-719. Rio de Janeiro, 2006a.

_____. **Manual de drenagem de Rodovias**. 333p. 2. ed. Publ. IPR-724. Rio de Janeiro, 2006b.

_____. **Manual de implantação básica de Rodovias**. 617p. 3. ed. Publ. IPR-742. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **DNIT 020-ES**. Drenagem – Meios-fios e guias – Especificação de serviço. Rio de Janeiro, 2023.

DIAS, A. D. M.; SILVA, T. J. V.; POGGIALI, F. S. J. O Concreto Sustentável Brasileiro. The Brazilian Sustainable Concrete. **Revista Construindo**, Belo Horizonte, v. 8, 1º Ed., p. 84 – 97, Jan-Jun. 2017

EL EUCH BEN SAID, S.; EL EUCH KHAY, S.; ACHOUR, T.; LOULIZI, A. Modelling of the adhesion between reclaimed asphalt pavement aggregates and hydrated cement paste. **Construction and Building Materials**, v.152, p.839-846, october, 2017.

EL EUCH BEN SAID, S.; EL EUCH KHAY, S.; LOULIZI, A. Experimental Investigation of PCC Incorporating RAP. **International Journal of Concrete Structures and Materials**, v.12, n.8, january, 2018.

ERDEM, S.; BLANKSON, M.A. Environmental performance and mechanical analysis of concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) and waste precast concrete as aggregate, **Journal of Hazardous Materials**, v.264, p.403– 410, 2014.

EUROPEAN ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION. EAPA. **Asphalt In Figures 2021**. Disponível em https://164.wpcdnnode.com/eapa.org/wp-content/uploads/2023/02/asphalt_in_figures_2021_.pdf. Acesso em: 04 nov. 2023.

FERNANDES, G. D. S. **Utilização de pavimento permeável de concreto com agregados de RCD na mitigação de alagamentos: Estudo de caso do estacionamento do Instituto Central de Ciências da UnB**. 145 f. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo), Universidade de Brasília, Brasília, 2020.

FERREIRA, W. L. G. **Degree of RAP Binder Activation and its Impact on Recycled Asphalt Mixture Design**. 124 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Transportes, Fortaleza, 2021.

FLORES, G. C. **Estudo de Dosagens de Misturas 100% RAP na Fabricação de Blocos para Pavimentos Intertravados**. 107p. Dissertação (mestrado). Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2022.

FRANCISCO, J. T. M. **Resíduo de construção e demolição em concreto: propriedades de peças pré-moldadas para pavimentação intertravada**. 61f. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual Paulista (Unesp), Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente, São Paulo, 2019.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. FUNCEME. **Pluviometria – Posto nº 38 (Caucaia)**. Disponível em: http://www.funceme.br/?page_id=2694. Acesso em: 05/06/2024

GENNESSEAU, M. de M. L. **Avaliação da durabilidade de misturas asfálticas a quente e mornas contendo material asfáltico fresado**. 195p. Tese (Doutorado em Engenharia – Departamento de Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2015.

GLOBAL, A. B. C. Global status report for buildings and construction. **Global Alliance for Buildings and Construction**, 2020.

GOMES JUNIOR, M. R. **Concreto com resíduos de pneus para aplicação em meio fio**. 79p. Dissertação (Mestrado), Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Pará – IFPA/Campus Belém, Pará, 2020.

GUO, S.; HU, J.; DAI, Q. A critical review on the performance of portland cement concrete with recycled organic components. **J. Clean. Prod.** 188, 92–112. 2018.

HAN, S.; CHENG, X.; LIU, Y.; ZHANG, Y. Laboratory performance of hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement (RAP) and fine reclaimed asphalt pavement (FRAP) content. **Materials**, v.12, n.16, august, 2019.

HILÁRIO, R. Q. **Uso de pavimento reciclado adicionado com cimento para uso como reforço de base para rodovias – estudo de caso BR-120**. 139f. Dissertação

(Programa de Pós-Graduação em Geotecnia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto. 2016.

HOSSINEY, N.; TIA, M.; BERGIN, M. J. Concrete containing RAP for use in concrete pavement. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v. 3, n. 5, p. 251, 2010.

HOWARD, I. L.; COOLEY, L. A.; DOYLE, J. **Laboratory testing and economic analysis of high RAP warm mixed asphalt**. No. FHWA/MS-DOT-RD-09-200. Mississippi State University. Dept. of Civil Engineering, 2009.

HOY, M.; RACHAN, R.; HORPIBULSUK, S.; ARULRAJAH, A.; MIRZABABAEI, M. Effect of wetting-drying cycles on compressive strength and microstructure of recycled asphalt pavement – Fly ash geopolymer. **Construction and Building Materials**, v.144, n.30, p.624-634, july, 2017.

HUANG, B.; SHU, X.; LI, G. Laboratory investigation of portland cement concrete containing recycled asphalt pavements. **Cement and Concrete Research**. v. 35, n. 10, p. 2008-2013, 2005.

HUANG, B.; SHU, X.; BURDETTE, E. G. Mechanical properties of concrete containing recycled asphalt pavements. **Magazine of Concrete Research**, v. 58, n. 5, p. 313-320, 2006.

JABÔR, M. A. **Drenagem de Rodovias. Estudos hidrológicos e projeto de drenagem**. Apostila do curso de drenagem em rodovias. 2023.

KANDHAL, P. S.; RAJIB, B. M. Pavement Recycling Guidelines for State and Local Governments: Participant's Reference Book. **U.S. Department of Transportation**, FHWA-SA-98-042, Washington, D.C. Dezembro, 1998.

KUNZ, F. D. O. **Estudo experimental do whitetopping com adição de fibras sintéticas**. 91f. Dissertação (Mestrado em Sistemas de Infraestrutura Urbana), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Campinas, São Paulo, 2020.

LAKE OSWEGO. **Vertical curb detail: S2-01**. Oregon. 2018. Disponível em: <<https://www.ci.oswego.or.us/sites/default/files/fileattachments/publicworks/webpage/19668/s2-01.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2024.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição**. 290 f. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre, 2001.

LEITE, M. B.; FIGUEIRÊDO FILHO, J. G.; LIMA, P. R. L. Workability study of concretes made with recycled mortar aggregate. **Materials and Structures**, v.46, n.10, p.1765- 1778, january, 2013.

LIMA, D. A. D. S. **Efeito da adição de cimento Portland e RAP na estabilização de solo argiloso da formação Guabirotuba**. 144f. Dissertação (Mestrado), Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Curitiba, 2020.

LIMA, W. A. de S.; SOUSA, J. P. de.; MATOS, O. da S.; SILVA, F. G. S. da; OLIVEIRA, M.M. de; PACHECO, G. V. Sistemas de drenagem: a importância para a Infraestrutura do transporte rodoviário brasileiro. **Brazilian Journal of Development**, v.8, n.3, 2022.

LUZZI, F. C. **Adaptação de usina para reciclagem à quente e avaliação laboratorial das misturas asfálticas produzidas**. 187f. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, RS, 2019.

MAIA, P. S.; JUNIOR, L. A. S.; SALLES, P. V.; CARVALHO, M. V. S. Avaliação técnica de concreto estrutural fabricado com agregado graúdo de resíduos de construção e demolição. **Research, Society and Developem**t, v.11, n.8, e45011830582, 2022.

MANITOBA. **Specifications for concrete curbing**. 2013. Disponível em: <<https://www.gov.mb.ca/mit/contracts/pdf/manual/860i.pdf>>. Acesso em: 20 mai. 2024.

MEDINA, J. M. G.; MOTTA, L. G. **Mecânica dos Pavimentos**: 2. ed. Rio de Janeiro: editora COPPE, 2005.

_____. **Mecânica dos Pavimentos**: 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2015.

METHA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais**. São Paulo: PINI, 1994.

MOLZ, C.; CERVO, T. C. Uso do material fresado estabilizado granulometricamente em camadas granulares na pavimentação. **X Seminário de Engenharia Geotécnica do Rio Grande do Sul**, Anais... Santa Maria: Associação Brasileira de Mecânica dos Solos, Núcleo do Rio Grande do Sul, 2019.

NANDI, S.; RANSINCHUNG, G. D. R. N. Performance evaluation and sustainability assessment of precast concrete paver blocks containing coarse and fine RAP fractions: A comprehensive comparative study. **Construction and Building Materials**, v.300, n.20, september, 2021.

NATIONAL ASPHALT PAVEMENT ASSOCIATION (NAPA). **Asphalt Pavement Industry Survey on Recycled Materials and Warm-Mix Asphalt Usage: 2020**. Information Series 138 (11th edition), 2020.

NATIONAL COOPERATIVE HIGHWAY RESEARCH PROGRAM. NCHRP. **Recommended Use of Reclaimed Asphalt Pavement in the Superpave Mix Design Method: Technician's Manual**. Report 452. Transportation Research Board – National Research Council. National Academy Press, Washington, D. C. 2001.

OKAFOR, F. O. Performance of Recycled Asphalt Pavement as Coarse Aggregate in Concrete. **Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies**, Issue 17, pp. 47-58. 2010.

OLIVEIRA, L. L. **Reciclagem de Pavimentos a frio in situ**. Anápolis, Goiás, Brasil, 2018.

OLIVIER, J. G.; PETERS, J. A. H. W. Trends in global CO₂ and total greenhouse gas emissions: 2020 Report. **PBL Netherlands Environmental Assessment Agency**, v.5, p.1-11. 2020.

OTSUKI, N.; YODSUDJAI, W.; NISHIDA, T.; YAMANE, H. Developed method for measuring flexural strength and modulus of elasticity of micro-regions in normal and recycled aggregate concretes. **Magazine of Concrete Research**, v.55, n.5, p.439-448, 2003.

PASETTO, M.; BALDO, N. Unified approach to fatigue study of high performance recycled asphalt concretes. **Materials and Structures**, v.50, n.2, p.1-15, november, 2016.

PAPAKONSTANTINO, C.G. Resonant column testing on Portland cement concrete containing recycled asphalt pavement (RAP) aggregates. **Constr. Build. Mater.** 173, 419-428. 2018.

PEREIRA, P. O.; GOUVEIA, L. T. D.; PEREIRA, J. A. M.; PEREIRA, J. R. Estudo sobre destinação de resíduos da fresagem de pavimento asfáltico no Estado paraná, sob jurisdição do DER. **X Seminário Internacional Sobre Desenvolvimento Regional**, Anais... RS, 2021.

PETERLINE, P. S. **Reabilitação de Manifestações Patológicas em Pavimentos Asfálticos**: 1. ed. São Paulo: Leud, 2023.

PINTO, S.; PREUSSLER, E. S. **Pavimentação Rodoviária: Conceitos fundamentais sobre pavimentos flexíveis**. 2. ed. São Paulo: Synergia, 2010.

PIRES, G. M.; VITORELO, T.; HIRSH, F.; CRONST, F.; BERGMANN, E. C.; TIENFENSEE, M. D., SPECHT, L. P. Utilização de material fresado como camada de pavimento: Estudo laboratorial e aplicação em campo. **42ª Reunião Anual de Pavimentação**. Rio de Janeiro: ABPv, 2013.

PLATI, C. Sustainability factors in pavement materials, design, and preservation strategies: A literature review. **Construction & Building Materials**. v.211, n.1, p.539-555. 2019.

PRADO, D. M. **Propriedades Físicas e Mecânicas de Blocos Estruturais Produzidos com Agregados Reciclados de Concreto**. 128p. Dissertação (Mestrado), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, SP, 2006.

REIS, G. R.; SILVA, C. P.; LIMA, H. J. N. Avaliação do uso de agregados reciclados na fabricação de concreto. **Inter scientia**, v.8, n.1, 2021.

REIS, N. F. D.S. **Estrutura de pavimentos rodoviários: Aplicação de método de dimensionamento**. Dissertação (Mestrado), Curso de Engenharia Civil, Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2016.

ROCHA, E. G. D. A. **Conceitos Básicos de Hidrologia e Drenagem para Projetos Rodoviários**. Módulo 4. Brasília, 2022.

RODRIGUES, C. R. S.; FUCALE, S. Dosagem de Concretos Produzidos com Agregado Miúdo Reciclado de Resíduo de Construção e Demolição. **Ambiente Construído**, v.14, n.1, p.99-111, 2014.

RUIZ, A. N. **Concreto com fresado asfáltico aplicado em dispositivos de proteção e drenagem de obras viárias**. 191p. Dissertação (mestrado), Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologias, Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana. PUC, Campinas-SP, 2017.

SACHET, T.; BALBO, J. T.; BONSEMBIANTE, F. T. Interpretação da perda de resistência em concretos secos com incorporação de fresados asfálticos com apoio de análise microscópica. **Revista IBRACON de Estruturas e Materiais**, v. 6, p. 933-954, 2013.

SANTIAGO, E. Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves. **Feria de Santana**, v. 185, 2008.

SCHREIBER, K. V. Best Management Practices as an Alternative Approach for Urban Flood Control. In: **Flood Handbook**. CRC Press, p. 53-76, 2022.

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

SHAHIDAN, S.; AZMI, M. A. M.; KUPUSAMY, K.; ZUKI, S. S. M.; ALI, N. Utilizing Construction and Demolition (C&D) Waste as Recycled Aggregates (RA) in Concrete. **Procedia Engineering**, v.174, p.1028-1035, 2017.

SHATARAT, N.; ALHAQ, A. A.; KATKHUDA, H.; JABER, M. A. Investigation of axial compressive behavior of reinforced concrete columns using Recycled Coarse Aggregate and Recycled Asphalt Pavement aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 217, p. 384-393, 2019.

SHI, X., MUKHOPADHYAY, A., LIU, K.W. Mix design formulation and evaluation of portland cement concrete paving mixtures containing reclaimed asphalt pavement. **Construction and Building Materials**. v.152, p.756-768, 2017.

SILVA, D. D. C. e. **Materiais de construção civil: dosagem do concreto uma abordagem prática**. 1. ed. Editora CRV, Curitiba, 2019.

SILVA, J. L. O. **Análise de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes dosagens de agregados reciclados de concreto**. 107 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas.

Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Maceió, 2023.

SILVA FILHO, L. C. P. D.; LORENZI, A.; CHIES, J. A.; HÖLTZ, F. D. C.; PASSUELLO, A.; BAGGIO, T. F.; LUCAS, E. W. P. **Sistema aplicado em moldagem de elementos para drenagem urbana e elementos pré-moldados**. Patente BR 10 2013 001900-3 A2, 2013.

SILVA OLIVEIRA, M. **Análise da Fadiga em Misturas Asfálticas Recicladas à Quente**. 136 p. Dissertação de Mestrado, Publicação 349/20, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 2020.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO. **Relatório Anual 2021**. São Paulo, 2023. Disponível em: <https://snic.org.br/numeros-relatorio-anual.php>. Acesso em: 21 agosto 2023.

SINGH, S.; RANSINCHUNG, G. D.; DEBBARMA, S.; KUMAR, P. Utilization of reclaimed asphalt pavement aggregates containing waste from Sugarcane Mill for production of concrete mixes. **Journal of Cleaner Production**, v.174, p.42-52, february, 2018a.

SINGH, S.; RANSINCHUNG, G. D. R. N.; MONU, K.; KUMAR, P. Laboratory investigation of RAP aggregates for dry lean concrete mixes. **Construction and Building Materials**, v.166, p.808-816, march, 2018b.

SOLANKI, P.; ZAMAN, M. Design of semi-rigid type of flexible pavements. **International Journal of Pavement Research and Technology**, v.10, n.2, p.99-111, march, 2017.

SOUZA, M. L. D. **Pavimentação Rodoviária**. Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., DNER-IPR. Rio de Janeiro, 1980.

STROHER, A. P.; KATO, D. S.; YAMAGUCHI, N. U.; JUNIOR, O. M. C. Utilização da Cerâmica de Entulho na Substituição de Agregado Graúdo do Concreto. **Cerâmica Industrial**, v.22, n.4, p.34-46, 2017.

SUZUKI, C. Y.; AZEVEDO, A. M.; JÚNIOR, F. I. K. **Drenagem subsuperficial de pavimentos: Conceitos e dimensionamento**. Oficina de Textos, 2013.

SUZUKI, K. Y. **Avaliação de misturas asfálticas recicladas a quente com diferentes teores de material fresado**. 153f. Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Transportes, São Paulo, 2019.

TAHAR, Z.; NGO, T.; HADJ, E. Effect of Cement and Admixture on the Utilization of Recycled Aggregates in Concrete. **Construction and Building Materials**, v.149, p.91-102, september, 2017.

THOMAS, R.J.; FELLOWS, A.J.; SORENSEN, A.D. Durability analysis of recycled asphalt pavement as partial coarse aggregate replacement in a high-strength concrete mixture. **J. Mater. Civ. Eng.** v.30, p.1-7, 2018.

ULLAH, S.; TANYU, B. F. Methodology to develop design guidelines to construct unbound base course with reclaimed asphalt pavement (RAP), **Construction and building materials**, v.223, n.30, p.463-476, october, 2019.

VAN DEN BERGH, W.; KARA, P.; ANTHONISSEN, J.; MARGARITIS, A.; ACOBS, G.; COUSCHEIR, K. Recommendations and strategies for using reclaimed asphalt pavement in the Flemish Region based on a first life cycle assessment research. In: **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**. IOP Publishing, v.236, n.1, september, 2017.

VIEIRA, M. D. O. **Avaliação do emprego de agregado miúdo reciclado na produção de peças pré-moldadas para pavimentação tipo “paver”**. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará, Pará, 2021.

WEST, R. C. **Reclaimed Asphalt Pavement Management: Best Practices**. Auburn, AL: National Center for Asphalt Technology, NCAT Draft Report, 2010.

WEST, R.; WILLIS, J. R.; MARASTEANU, M. **Improved mix design, evaluation, and materials management practices for hot mix asphalt with high reclaimed asphalt pavement content**. National Academies of Sciences, Engineering and Medicine. Washington, DC: The National Academies Press, 2013.

YANG, K. H; SONG, J. K; SONG, K. I. Avaliação da redução de CO₂ de concreto ativado por álcali. **Journal of Cleaner Production**, v. 39, p. 265-272, 2013.

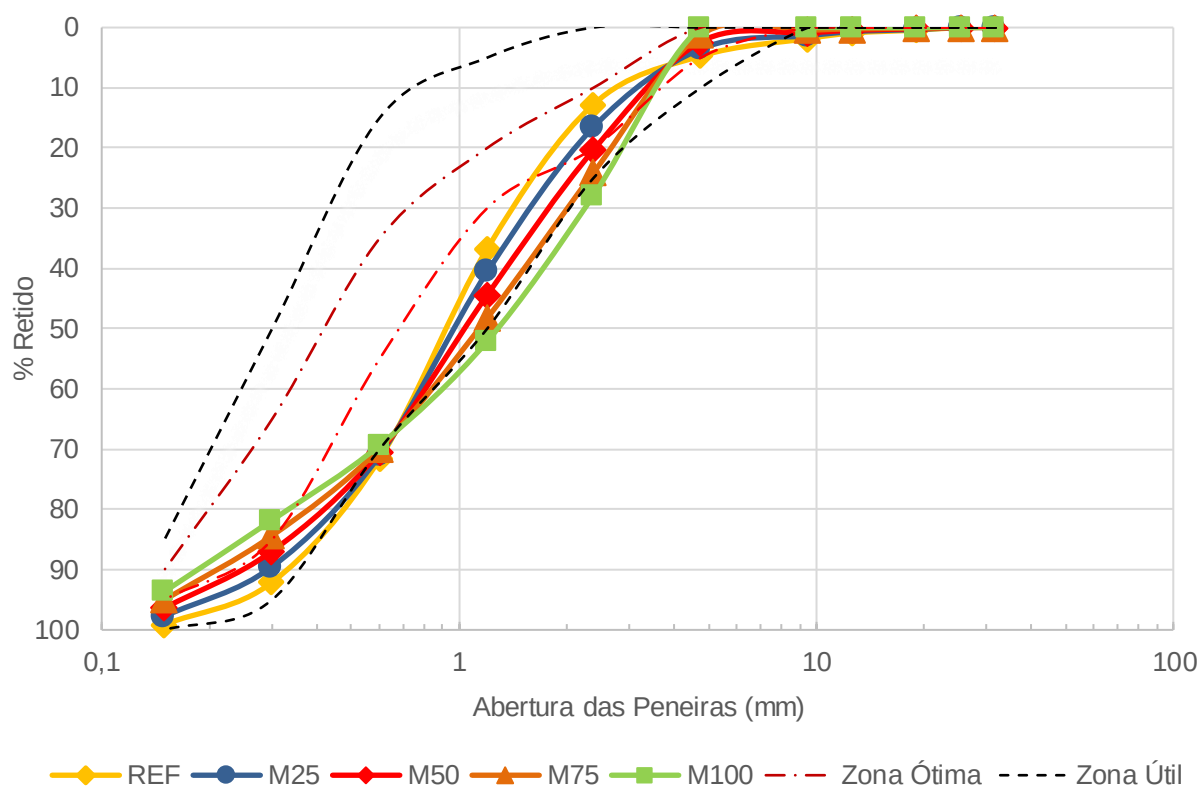
ZAUMANIS, M., MALLICK, R. B., FRANK, R. 100% hot mix asphalt recycling: challenges and benefits. **Transportation Research Procedia**, v.14, p.3493-3502, april, 2016.

_____. 100% recycled hot mix asphalt: A review and analysis. **Resources, Conservation and Recycling**, v.92, issue C, p.230-245, 2014.

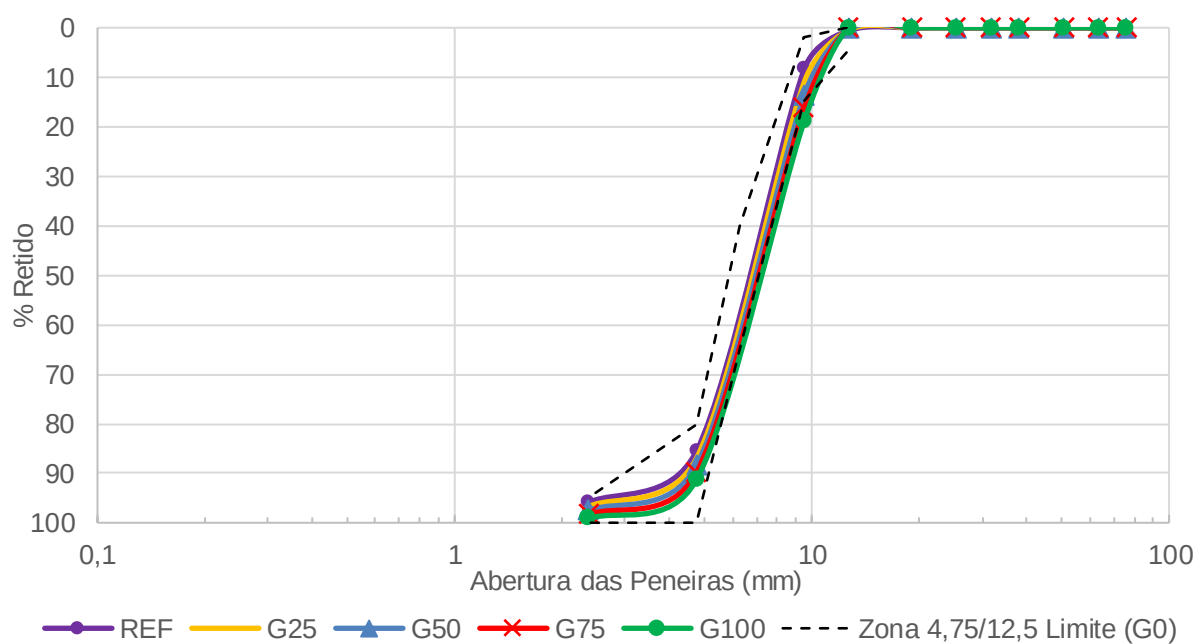
ZUBARAN, M. **Avaliação do comportamento de misturas asfálticas recicladas mornas em laboratório e usina de asfalto**. 151p. Dissertação (Mestrado em Ciências em Engenharia Civil), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2014.

APÊNDICE A – GRANULOMETRIA DAS MISTURAS

MIÚDO



GRAÚDO



Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE B – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE RC AOS 7 E 14 DIAS

Resultados dos ensaios de RC (MPa) aos 7 dias

Dosagem	CP ₁	CP ₂	Média	Desvio	Δ/REF
REF	17,8	16,8	17,3	0,7	-
M25	16,6	18	17,3	1	0%
M50	15,3	15,7	15,5	0,2	-11%
M75	13,6	13,5	13,6	0,1	-22%
M100	13,2	13,6	13,4	0,3	-23%
G25	16,8	17,8	17,3	0,7	0%
G50	17,8	14	15,9	2,7	-8%
G75	13,9	13	13,4	0,6	-22%
G100	11,1	11,4	11,3	0,2	-35%
MG25	16,1	15,8	15,9	0,2	-8%
MG50	13,3	13	13,1	0,2	-24%
MG75	10,1	11	10,6	0,6	-39%
MG100	9,7	11	10,4	0,9	-40%

Legenda: CP (corpo de prova) e Δ/REF (diferença relativa entre as dosagens e o CCP referencial).
Fonte: Autor (2024).

Resultados dos ensaios de RC (MPa) aos 14 dias

Dosagem	CP ₁	CP ₂	Média	Desvio	Δ/REF
REF	23,6	26	24,8	1,7	-
M25	21,9	21,8	21,8	0	-12%
M50	19,2	20,5	19,8	0,9	-20%
M75	17,7	16,7	17,2	0,7	-31%
M100	15,9	16,4	16,1	0,4	-35%
G25	22,2	22,6	22,4	0,3	-10%
G50	19,5	19,9	19,7	0,3	-20%
G75	17,5	18,3	17,9	0,5	-28%
G100	14,8	15,1	14,9	0,2	-40%
MG25	19,7	18,6	19,1	0,8	-23%
MG50	16,7	15,6	16,2	0,8	-35%
MG75	12,6	13,1	12,8	0,4	-48%
MG100	11,2	11,7	11,4	0,4	-54%

Legenda: CP (corpo de prova) e Δ/REF (diferença relativa entre as dosagens e o CCP referencial).
Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE C – RESUMO DOS RESULTADOS

Resumo dos resultados das características mecânicas dos concretos

Dosagem	f_{cm7} (MPa)	f_{cm14} (MPa)	f_{cm28} (MPa)	$f_{ck,est}$ (MPa)	E_{ci} (GPa)	f_{cm28}^* (MPa)	$f_{ctm,f}$ (MPa)	Slump (mm)
REF	17,3	24,8	31,5	29,4	25,6	29,6	5,4	21,7
M25	17,3	21,8	31,1	29,1	21,5	25,5	5,5	25,0
M50	15,5	19,8	27,7	25,3	17,7	21,6	4,8	13,3
M75	13,6	17,2	23,8	22,5	16,0	18,6	4,6	10,0
M100	13,4	16,1	20,3	19,3	13,4	17,8	4,0	6,7
G25	17,3	22,4	30,4	27,9	23,2	24,2	5,4	15,0
G50	15,9	19,7	27,9	27,2	18,8	22,3	5,1	18,3
G75	13,4	17,9	24,1	22,9	17,4	21,1	4,6	16,7
G100	11,3	14,9	21,7	20,0	13,9	17,7	4,2	16,7
MG25	15,9	19,1	25,6	23,2	20,9	23,8	4,4	13,3
MG50	13,1	16,2	21,4	20,3	15,5	20,1	4,4	11,7
MG75	10,6	12,8	17,5	16,9	11,0	16,3	3,8	6,7
MG100	10,4	11,4	13,1	12,8	8,2	14,2	3,6	6,7

Nota: *RC em corpos de prova cilíndricos após ensaio de módulo estático de elasticidade.

Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE D – ESTIMATIVA DOS CUSTOS

Dosagem	Cimento	Areia	Brita	RAPM	RAPG	Aditivo
MG100	367,00	-	-	842,10	911,80	

	Cimento	Areia	Brita	RAPM	RAPG	Aditivo	
Quantidade	367,00000	-	-	0,56140	0,60787	-	
Unidade	kg	m3	m3	m3	m3	kg	
Preço unitário	R\$ 0,7074	R\$ 125,4912	R\$ 134,2623	R\$ -	R\$ -	R\$ 6,6104	Total
Custo de Aquisição	R\$ 259,6158	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 259,62

Quantidade	367,00000	-	-	0,56140	0,60787	-	
Unidade	kg	m3	m3	m3	m3	kg	
Preço unitário				R\$ 31,3000	R\$ 31,3000	R\$ -	Total
Custo beneficiamento	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ 17,5718	R\$ 19,0262	R\$ -	R\$ 36,60

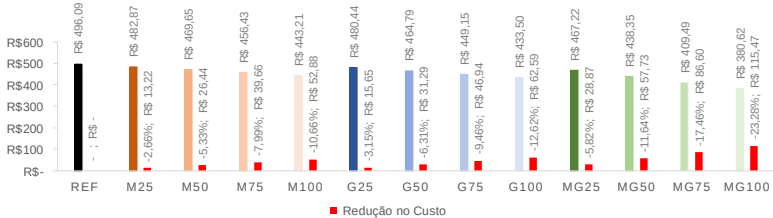
Quantidade	0,36700	-	-	0,84210	0,91180		
Unidade	ton	ton	ton	ton	ton	ton	
Preço unitário	R\$ 33,4700	R\$ 1,7400	R\$ 1,7400	R\$ 1,7400	R\$ 1,7400	R\$ 33,4700	Total
Custo do tempo fixo	R\$ 12,2835	R\$ -	R\$ -	R\$ 1,4653	R\$ 1,5865	R\$ -	R\$ 15,34

Quantidade	0,36700	-	-	0,84210	0,91180	-	
Unidade	t.km	t.km	t.km	t.km	t.km	t.km	
Custo Rod. Pav.	R\$ 0,7300	R\$ 0,7800	R\$ 0,7800	R\$ 0,7800	R\$ 0,7800	R\$ 0,7300	
Distância				-	-	19,20	Total
Custo do transporte	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -	R\$ -

MG100	
Equipamentos + MO	R\$ 69,0726
Material	R\$ 259,6158
Atividade auxiliar	R\$ 36,5980
Tempo fixo	R\$ 15,3353
Momento de transporte	R\$ -
TOTAL	R\$ 380,6217
DIFFERENÇA	- 115,47

Serviços	REF	M25	M50	M75	M100	G25	G50	G75	G100	MG25	MG50	MG75	MG100
Equipamentos + MO	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07	69,07
Materiais	411,68	394,07	376,45	358,84	341,23	391,28	370,87	350,47	330,07	373,66	335,65	297,63	259,62
Atividades auxiliares	-	4,39	8,79	13,18	17,57	4,76	9,51	14,27	19,03	9,15	18,30	27,45	36,60
Tempo fixo	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34	15,34
Momento de transporte	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL	496,09	482,87	469,65	456,43	443,21	480,44	464,79	449,15	433,50	467,22	438,35	409,49	380,62
DIFFERENÇA	-	-13,22	-26,44	-39,66	-52,88	-15,65	-31,29	-46,94	-62,59	-28,87	-57,73	-86,60	-115,47
%	-	-2,66	-5,33	-7,99	-10,66	-3,15	-6,31	-9,46	-12,62	-5,82	-11,64	-17,46	-23,28

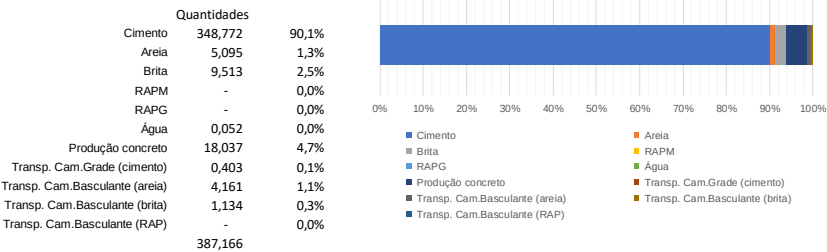
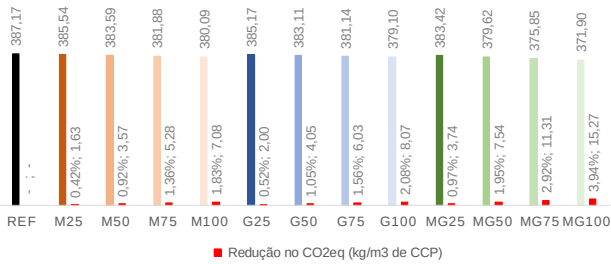
	REF	M25	M50	M75	M100	G25	G50	G75	G100	MG25	MG50	MG75	MG100
Custo de Produção	R\$ 496,09	R\$ 482,87	R\$ 469,65	R\$ 456,43	R\$ 443,21	R\$ 480,44	R\$ 464,79	R\$ 449,15	R\$ 433,50	R\$ 467,22	R\$ 438,35	R\$ 409,49	R\$ 380,62
Redução no Custo	R\$ -	R\$ 13,22	R\$ 26,44	R\$ 39,66	R\$ 52,88	R\$ 15,65	R\$ 31,29	R\$ 46,94	R\$ 62,59	R\$ 28,87	R\$ 57,73	R\$ 86,60	R\$ 115,47
%	-	-2,66%	-5,33%	-7,99%	-10,66%	-3,15%	-6,31%	-9,46%	-12,62%	-5,82%	-11,64%	-17,46%	-23,28%
USD	USD 2,40	USD 4,81	USD 7,21	USD 9,62	USD 12,03	USD 15,65	USD 31,29	USD 46,94	USD 62,59	USD 28,87	USD 57,73	USD 86,60	USD 115,47
		USD 87,84	USD 85,44	USD 83,03	USD 80,63	USD 87,40	USD 84,55	USD 81,71	USD 78,86	USD 85,00	USD 79,74	USD 74,49	USD 69,24



Fonte: Autor (2024).

APÊNDICE E – ESTIMATIVA DAS EMISSÕES DE CO₂EQUIVALENTE

Dosagem	Cimento	Areia	Brita	RAPM	RAPG	Água	ME						
REF2	367,00	842,10	911,80			210,80	2.297,67						
	Quantidades	DMT											
Cimento	367,00		9,50E-01	348,77									
Areia	842,10		6,05E-03	5,09									
Brita	911,80		1,04E-02	9,51									
RAPM	-		8,00E-04	-									
RAPG	-		8,00E-04	-									
Água	210,80		2,48E-04	0,05									
		Fase dos materiais		363,43									
Produção concreto	2.297,67		7,85E-03	18,04									
		Fase de produção		18,04									
Transp. Cam. Grade (cimento)	367,00	21,20	5,18E-05	0,40									
Transp. Cam. Basculante (areia)	842,10	80,34	6,15E-05	4,16									
Transp. Cam. Basculante (brita)	911,80	24,00	5,18E-05	1,13									
Transp. Cam. Basculante (RAP)	-	39,59	6,15E-05	-									
		Fase de transporte		5,70									
Fases	REF2												
Material	363,43												
Produção	18,04												
Transporte	5,70												
Total	387,17												
Fases	REF	M25	M50	M75	M100	G25	G50	G75	G100	MG25	MG50	MG75	MG100
Material	363,43	362,33	361,22	360,12	359,01	361,24	359,04	356,84	354,65	360,13	356,83	353,53	350,23
Produção	18,04	18,04	17,73	17,65	17,49	17,97	17,83	17,78	17,67	17,85	17,61	17,40	17,00
Transporte	5,70	5,17	4,64	4,11	3,59	5,97	6,24	6,51	6,78	5,44	5,19	4,93	4,67
Total	387,17	385,54	383,59	381,88	380,09	385,17	383,11	381,14	379,10	383,42	379,62	375,85	371,90
Total	REF	M25	M50	M75	M100	G25	G50	G75	G100	MG25	MG50	MG75	MG100
Redução no CO2eq (kg/m3 de CCP)	-	1,63	3,57	5,28	7,08	2,00	4,05	6,03	8,07	3,74	7,54	11,31	15,27
%	-	0,42%	0,92%	1,36%	1,83%	0,52%	1,05%	1,56%	2,08%	0,97%	1,95%	2,92%	3,94%



Fonte: Autor (2024).