

**INSTITUTO FEDERAL GOIANO DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E  
TECNOLOGIA  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO E INOVAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA APLICADA E  
SUSTENTABILIDADE - CAMPUS RIO VERDE**

**AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO DA USINA  
DE RCC DE RIO VERDE/GO: CARACTERIZAÇÃO E  
VERIFICAÇÃO NORMATIVA PARA FINS DE  
PAVIMENTAÇÃO**

Autor: Vitor Alvares  
Orientador: Dr. Philippe Barbosa Silva

RIO VERDE - GO

Agosto - 2022

**VITOR ALVARES**

**AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO DA USINA DE RCC DE RIO  
VERDE/GO: CARACTERIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO NORMATIVA PARA  
FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Dissertação apresentada, como parte das exigências para obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE, no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano – Campus Rio Verde

Autor: Vitor Alvares

Orientador: Dr. Philippe Barbosa Silva

RIO VERDE - GO

Agosto - 2022

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP  
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
**Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano**

AA473a           Alvares, Vitor  
                  AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO DA USINA DE RCC  
DE RIO VERDE/GO: CARACTERIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO  
NORMATIVA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO / Vitor Alvares;  
orientador Philippe Barbosa Silva. -- Rio Verde,  
2022.  
                  62 p.

Dissertação (Mestrado em PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO  
EM ENGENHARIA APLICADA E SUSTENTABILIDADE - CAMPUS  
RIO VERDE) -- Instituto Federal Goiano, Campus Rio  
Verde, 2022.

1. Resíduos de construção. 2. Pavimentação. 3. Base.  
4. Sub-base. 5. Pavimentação rural. I. Barbosa Silva,  
Philippe, orient. II. Título.

# TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610, de 19 de fevereiro de 1998, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano a disponibilizar gratuitamente o documento em formato digital no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

## IDENTIFICAÇÃO DA PRODUÇÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA

Tese (doutorado)

Dissertação (mestrado)

Monografia (especialização)

TCC (graduação)

Artigo científico

Capítulo de livro

Livro

Trabalho apresentado em evento

Produto técnico e educacional - Tipo:

Nome completo do autor:

Matrícula:

Título do trabalho:

## RESTRIÇÕES DE ACESSO AO DOCUMENTO

Documento confidencial:    Não    Sim, justifique:

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano:    /    /

O documento está sujeito a registro de patente?    Sim    Não

O documento pode vir a ser publicado como livro?    Sim    Não

## DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O(a) referido(a) autor(a) declara:

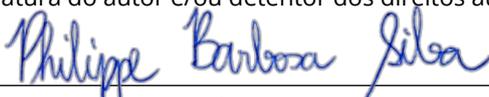
- Que o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
- Que obteve autorização de quaisquer materiais inclusos no documento do qual não detém os direitos de autoria, para conceder ao Instituto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

Local

/ /  
Data

  
Assinatura do autor e/ou detentor dos direitos autorais

Ciente e de acordo:

  
Assinatura do(a) orientador(a)



SERVIÇO PÚBLICO FEDERAL  
MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA  
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA GOIANO

Documentos 103/2022 - SREPG/CMPR/CPG-RV/DPGPI-RV/CMPRV/IFGOIANO

**AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO DA USINA DE RCC DE RIO VERDE/GO:  
CARACTERIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO NORMATIVA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

Autor: Vitor Alvares  
Orientador: Prof. Dr. Philippe Barbosa Silva

TITULAÇÃO: Mestre em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade - Área de  
Concentração Engenharia Aplicada e Sustentabilidade

**APROVADO** em 29 de agosto de 2022.

Prof. Dr. Rogério Lemos Ribeiro  
Avaliador Externo - UFU / Uberlândia

Prof. Dr. Michell Macedo Alves  
Avaliador Interno - IF Goiano / Rio  
Verde

Prof. Dr. Philippe Barbosa Silva  
Presidente da Banca - IF Goiano / Rio Verde

Documento assinado eletronicamente por:

- **Michell Macedo Alves**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 10/10/2022 15:59:08.
- **Rogério Lemos Ribeiro**, Rogério Lemos Ribeiro - Professor Avaliador de Banca - Ufu (1), em 04/10/2022 12:26:31.
- **Philippe Barbosa Silva**, PROFESSOR ENS BASICO TECN TECNOLOGICO, em 04/10/2022 10:53:08.

Este documento foi emitido pelo SUAP em 29/07/2022. Para comprovar sua autenticidade, faça a leitura do QRCode ao lado ou acesse <https://suap.ifgoiano.edu.br/autenticar-documento/> e forneça os dados abaixo:

Código Verificador: 411162  
Código de Autenticação: 2a24d5fb8a



## AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por sempre olhar e abençoar os caminhos em que eu sigo, a minha mãe Lilian, minha irmã Carolina e meu pai Carlos que sempre me olham e guiam meus caminhos onde estiver. O amor que sinto por vocês é incondicional.

Ao meu primeiro orientador, professor Bruno Botelho Saleh, por toda a ajuda durante a realização deste trabalho. Sua contribuição foi essencial para o seguimento da pesquisa.

Ao meu orientador, Professor Philippe Barbosa Silva, pela oportunidade de realizar este trabalho. Obrigado pela confiança e por me atender com paciência todas as vezes que bati em sua porta e por me entender e trazer de volta em momentos difíceis.

Agradeço por todos os ensinamentos compartilhados de forma admirável, e por me guiar em minha caminhada na pós-graduação. Muito obrigada por tudo!

À Mariana Gouveia, que me ajudou em todas as etapas desta pesquisa. Solicitei a sua ajuda inúmeras vezes, e em todas fui atendido com paciência e tranquilidade. Serei eternamente grato por toda ajuda durante a realização deste trabalho.

A minha amiga, prima e chefe, Kelly Patricia Torres Brasileiro. Um grande exemplo de profissional, de força e serenidade. Companheiro nesta caminhada, precisei inúmeras vezes da sua ajuda e compreensão para conclusão desta pesquisa. A você, minha eterna gratidão!

Agradeço ao Instituto Federal Goiano de Educação, Ciência e Tecnologia, pela oportunidade de realizar o curso de pós-graduação

Agradeço a Universidade de Rio Verde UNIRV do município de Rio Verde, por abrir as portas de seus laboratórios para o desfecho desta pesquisa.

E, por fim agradeço a Prefeitura Municipal de Rio Verde – GO, por ter me fornecido o material estudado, pelo trabalho e todo o apoio para a conclusão.

## **BIOGRAFIA DO AUTOR**

Vitor Alvares, brasileiro, nascido em Jataí-GO, Engenheiro Civil formado pela Pontifícia Universidade Católica de Goiás em 2016, no momento trabalhando na área de projetos e orçamento de obras públicas para Prefeitura municipal de Rio Verde – GO e mestrando no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Aplicada e Sustentabilidade do Instituto Federal Goiano de Educação, Ciência e Tecnologia.

## ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO GERAL.....	11
2	PROBLEMA.....	12
3	HIPÓTESE.....	13
4	OBJETIVO .....	13
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	13
6	CAPÍTULO 1.....	15
	REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA - ANÁLISE DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) EM BASES, SUB-BASES E REFORÇO DE SUBLEITO EM PAVIMENTAÇÃO .....	15
6.1	INTRODUÇÃO .....	17
6.2	MÉTODOS .....	17
6.2.1	Enquadramento metodológico da pesquisa.....	17
6.2.2	Seleção do portfólio bibliográfico .....	19
6.3	RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS .....	20
6.4	DISCUSSÕES.....	23
6.4.1	Materiais utilizados pelos trabalhos.....	24
6.4.2	Granulometria dos agregados .....	26
6.4.3	Absorção de água.....	27
6.4.4	Compactação.....	28
6.4.6	Deformação permanente .....	32
6.4.7	Ensaio CBR.....	33
6.5	CONCLUSÕES.....	35
6.6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	36
7	CAPÍTULO 2.....	41

AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO DA USINA DE RCC DE RIO VERDE/GO: CARACTERIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO NORMATIVA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO .....	41
7.1 INTRODUÇÃO .....	43
7.2 MATERIAIS E MÉTODOS .....	44
7.3 RESULTADOS.....	45
7.3.1 Composição do material .....	45
7.3.2 Materiais Indesejáveis.....	46
7.3.3 Distribuição Granulométrica.....	47
7.3.4 Absorção de Água e Massa Específica .....	49
7.3.5 Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade.....	50
7.3.6 Lamelaridade .....	50
7.3.7 Equivalente de Areia.....	51
7.3.8 Ensaio de Compactação .....	52
7.3.9 Índice de Suporte Califórnia (CBR) .....	53
7.3.10 Abrasão Los Angeles .....	56
7.4 CONCLUSÕES.....	56
7.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	58
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	61
9 TRABALHOS FUTUROS .....	62

## ÍNDICE TABELAS

### CAPÍTULO 1:

Tabela 1 - Relação dos artigos selecionados quanto aos periódicos, ano e quantidade. ....	20
Tabela 2 - Relação dos ensaios realizados pelos autores.....	23
Tabela 3 - Relação dos materiais utilizados pelos autores.....	25
Tabela 4 - Relação dos autores quanto aos ensaios de granulometria. ....	26
Tabela 5 - Relação dos autores quanto aos ensaios de absorção de água. ....	27
Tabela 6 - Relação dos autores quanto aos ensaios de compactação.....	28
Tabela 7 - Relação dos autores quanto aos ensaios de Abrasão “Los Angeles” .....	30
Tabela 8 - Relação dos autores quanto aos ensaios de deformação permanente.....	32
Tabela 9 - Relação dos autores quanto aos ensaios de CBR. ....	33

### CAPÍTULO 2:

Tabela 1. Composição granulométrica da brita graduada.....	47
Tabela 2. Parâmetros granulométricos.....	48
Tabela 3. Resultados referentes aos limites de liquidez e índices de plasticidade das misturas solo/BGS. ....	50
Tabela 4. Valores mínimos de ISC e Expansão.....	54
Tabela 5. Resultados de CBR e expansão.....	55

## ÍNDICE FIGURAS

### CAPÍTULO 1:

Figura 1 - Processo de seleção dos trabalhos.....	19
Figura 2 - Relação das palavras-chave mais utilizadas pelos autores.....	21
Figura 3 - Apresentação dos trabalhos selecionados quanto ao país de origem. ....	22
Figura 4 - Quantidade de publicações com relação aos anos. ....	22
Figura 5 – Ensaio realizados pelos autores. ....	24

### CAPÍTULO 2:

Figura 1. Fluxograma da metodologia a ser aplicada. ....	45
Figura 2. Composição do agregado. ....	46
Figura 3. Curva granulométrica BGS obtida. ....	48
Figura 4. Ensaio de absorção de água.....	49
Figura 5. Ensaio de equivalente de areia realizado.....	51
Figura 6. Ensaio de equivalente de areia realizado.....	52
Figura 7. Curvas de compactação das misturas de BGS/Solo. ....	52
Figura 8. Execução da penetração do pistão no corpo de prova.....	54
Figura 9. Resumo dos ensaios realizados. ....	57

**LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACIONES E UNIDADES**

RCC	Resíduo de Construção Civil
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
CBR	California Bearing Ratio
LL	Limite de Liquidez
LP	Limite de Plasticidade
IP	Índice de plasticidade

## RESUMO

A construção civil é um dos setores que mais causam impactos ambientais no mundo e também um dos maiores produtores de resíduos, sendo que o município de Rio Verde produz uma média diária de aproximadamente 188t de resíduos de construção civil (RCC), onde este trabalho mostra uma alternativa de reaproveitamento e beneficiamento dos resíduos produzidos pela indústria da construção através de usina de reciclagem fixa instalada no município de Rio Verde - GO, e os resíduos provenientes de construções e demolições são transformados em agregados, podendo ser utilizados em camadas de pavimento (base, sub-base, reforço de subleito ou revestimento primário). Neste sentido, avaliou-se a possibilidade de utilização dos RCC na forma de ARC para essa finalidade de pavimentação, avaliando tecnicamente o emprego de ARC em camadas granulares de pavimento, mediante caracterização física e mecânica dos materiais beneficiados na usina de reciclagem do município de Rio Verde. De modo que os materiais apresentaram características técnicas aceitáveis pelas normas da GOINFRA ES - PAV 005/2019, DER-ET-DE-P00/013 e NBR 15115-2004 através dos ensaios realizados para a caracterização física e mecânica dos ARC.

**Palavras-chave:** Resíduos de construção, Pavimentação, Base, Sub-base, Pavimentação rural.

**ABSTRACT**

Civil construction is one of the sectors that most cause environmental impacts in the world and also one of the largest waste producers, and the municipality of Rio Verde produces a daily average of approximately 188t of civil construction waste (CW), so this work shows an alternative for the reuse and improvement of waste produced by the construction industry through a fixed recycling plant installed in the municipality of Rio Verde - GO, and waste from construction and demolition is transformed into aggregates, which can be used in pavement layers (base, subbase, subgrade reinforcement or primer coating). In this sense, the possibility of using CW in the form of RCA for this paving purpose was evaluated, technically evaluating the RCA use in granular layers of pavement, through physical and mechanical characterization of the materials processed in the recycling plant of Rio Verde. So that the materials showed acceptable technical characteristics by the standards of GOINFRA ES - PAV 005/2019, DER-ET-DE-P00/013 and NBR 15115-2004 through the tests carried out for RCA physical and mechanical characterization.

**Keywords:** Construction waste. Paving, Base, Sub-base, Rural paving.

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

A construção civil é um dos setores brasileiros mais importantes por assegurar o desenvolvimento econômico e social, ocasionando crescimento e geração de emprego para a população. No entanto, o alto consumo de recursos naturais e o alto índice de geração de resíduos desprovidos de destinação adequada, faz deste setor grande gerador de impactos ambientais, sendo a indústria que mais consome matérias-primas e recursos naturais no planeta e outro grande impacto proporcionado pela construção civil é a geração de resíduos e a destinação final irregular. (MORAES & HENKES, 2013).

Os resíduos da construção civil (RCC) são oriundos de construção, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil. Nestes também são incluídos os resíduos resultantes do preparo e escavação do terreno para a construção civil. O gerenciamento destes resíduos é de responsabilidade dos grandes geradores, porém quando se trata de pequenos geradores esta passa a se tornar responsabilidade do poder público (PMGIRS, 2018).

As resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA nº 307, 2002) estabelecem diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Estas atribuem aos geradores de resíduos de construção civil o objetivo principal da não geração e, o objetivo secundário, da redução, reutilização, reciclagem, o tratamento dos resíduos sólidos e a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, evitando, dessa forma o descarte inapropriado desses resíduos no meio ambiente (SILVA, 2018).

Os RCC são compostos por 51% de concreto e blocos em execução de alvenaria e estrutura, já na execução de revestimento, a predominância é de argamassa 38%, gesso 26%, solo e areia 23%, no geral, concreto, blocos e argamassa representam 67% da sua composição, sendo esses passíveis de reutilização (PERINA *et al.*, 2019). Essa composição típica e características associadas aos materiais constituintes apontam para possibilidade de diferentes usos dos RCC, como em base de tubos, enchimento, material agregado para concreto e argamassa, e camadas de pavimentos.

Em termos de pavimentação, os agregados reciclados são utilizados em todas as camadas do pavimento, proporcionando bons resultados no produto. Diversos estudos admitem que os resíduos de construção e demolição são adequados para ser utilizados como agregados na construção de pavimentos (LEITE *et al.*, 2011).

O material reciclado utilizado em obras de construção deve ser submetido a testes análogos aos do material natural, como ensaios de compactação, CBR, granulometria, absorção, entre outros, e o agregado reciclado deve atender a resistência mínima, estabilidade, durabilidade, entre outras especificações, necessárias para qualquer aplicação geotécnica. Além disso, o material não deve apresentar, em sua composição, contaminantes, componentes perigosos e impurezas orgânicas (GAUTAM *et al.*, 2018).

Neste contexto, está sendo instalada no município de Rio Verde/Goiás uma Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil, que realizará o tratamento destes a partir de britagem e separações balísticas. Como resultado serão obtidos agregados reciclados, possibilitando a reutilização dos RCC através do emprego do agregado em diversas atividades da construção, implicando na necessidade de estudos de viabilidade da utilização deste material. No caso específico deste trabalho, objetiva-se explorar o potencial de utilização dos agregados reciclados em camadas granulares de pavimento.

## **2 PROBLEMA**

Os resíduos de construção representam uma parcela significativa dos resíduos sólidos gerados em todo o mundo (HIDALGO *et al.*, 2019). Em 2020 foram gerados cerca de 47 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição no Brasil, que corresponde a mais de 50% de todos os resíduos sólidos urbanos do país (ABRELPE, 2021). Os problemas associados a este material estão relacionados ao custo de descarte e ao significativo impacto ambiental negativo.

Conforme o Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Rio Verde, a cidade produz a média diária de 187.943,70 quilogramas de RCC, os quais são provenientes da coleta das empresas de aluguel de contêineres somados aos coletados pela própria prefeitura. Tais resíduos coletados, no entanto, ainda são encaminhados ao sistema de disposição final em aterros sanitários (PMGIRS, 2018).

A principal destinação dos RCC é o reaproveitamento e beneficiamento por usina de triagem de resíduos de construção civil, visto que este meio reduz quantitativamente o resíduo nas áreas de disposição, sendo altamente sustentável, garantindo fornecimento de material de consumo para obras da prefeitura (PMGIRS, 2018).

Nesse contexto, a Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil que está sendo instalada se mostra como importante avanço para atendimento do previsto nas resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA nº 307, 2002). A usina irá

tratar, através de britagem e separações balísticas, os resíduos da construção civil. Além disso, os agregados provenientes do tratamento dos resíduos de construção poderão ser reintroduzidos na cadeia de valor e serem utilizados pela prefeitura em diversas frentes de serviço, especialmente de manutenção e pavimentação de estradas rurais.

Segundo a ABRECON (2016), o uso em camadas granulares de pavimentação (base, sub-base ou revestimento primário) é a forma simples da reciclagem do entulho, exigindo menor utilização de tecnologia, e implica menor custo do processo. Neste sentido, a proposta aqui apresentada é de avaliar a viabilidade de utilização dos RCC para essa finalidade de pavimentação.

Dada a alta variabilidade na composição e propriedades do RCC, por conta de sua origem, características físicas e mineralogia, deve-se apresentar a realização de ensaios e processo de caracterização das propriedades físico-mecânicas para aplicação destes resíduos em pavimentos, em que os agregados reciclados devem atender aos requisitos mínimos estabelecidos pelas normas regulamentadoras relacionadas a utilização de agregados em camadas de pavimento.

### **3 HIPÓTESE**

Como hipótese do trabalho, tem-se que os agregados de concreto reciclado (ARC) provenientes da usina de reciclagem de Rio Verde/GO apresentam parâmetros normativos de características físico-mecânicas compatíveis para o emprego em camadas granulares de pavimentação.

### **4 OBJETIVO**

O objetivo geral do trabalho é avaliar a viabilidade técnica dos ARC produzidos pela usina de reciclagem de Rio Verde/GO, mediante aos limites mínimos estabelecidos pelas normas vigentes quanto a caracterização física e mecânica dos materiais para emprego em camadas granulares de pavimento.

### **5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

MORAES, N. C. de; HENKES, J. A. Avaliação do programa de gerenciamento de resíduos da construção civil e demolição, no município de Caçapava-SP. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v.2, n.1, p.113-134, 2013.

PMGIRS. Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do Município de Rio Verde – Goiás. Expert – Consultoria e Treinamentos Ltda, Rio Verde, 2018.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente, resolução nº 307 de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil.

SILVA, A. M. G.; MONTEIRO, O. H. C.; PIMENTEL, M. S.; GONZAGA, W. V.. Análise do controle das ações de logística reversa aplicadas pelo Diretório de Gestão Ambiental (DGA) da UFPE no ano de 2016. In: XII Congresso UFPE de Ciências Contábeis, 2018, Recife. Responsabilidade Social, Ambiental e Econômica da Contabilidade, 2018.

PERINA, J.M.; TRANNIN, I.C.B. (2019). Proposta para aproveitamento de resíduos da construção civil gerados em canteiros de obras. Revista Sodebras [on line], v. 14, n. 159, p. 192-197.

CONCEIÇÃO LEITE, Fabiana; SANTOS MOTTA, Rosângela; L VASCONCELOS, Kamilla; BERNUCCI, Liedi. Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. Construction and Building Materials, Brazil, v. 25, p. 2972–2979, 2011.

GAUTAM, P. K.; KALLA, P.; JETHOO, A. S.; AGRAWAL, R.; SINGH, H. Sustainable use of waste in flexible pavement: A review. Construction and Building Materials, v. 180, p. 239-253.

HIDALGO, C .; CARVAJAL, G .; MUÑOZ, F. Avaliação laboratorial de resíduos de tijolos finamente fresados como estabilizador de solo. Sustentabilidade, v. 11, n. 4, 2019.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DAS EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS - ABRELPE. PANORAMA 2021 DOS RESÍDUOS SÓLIDOS NO BRASIL. Disponível em: <[http:// https://abrelpe.org.br/](http://https://abrelpe.org.br/)>. Acesso em 05 ago. 2022

## 6 CAPÍTULO 1

(Normas de acordo com o periódico *Ain Shams Engineering Journal* – ISSN: 2090-4479)

### REVISÃO SISTEMÁTICA DE LITERATURA - ANÁLISE DA VIABILIDADE DO EMPREGO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) EM BASES, SUB-BASES E REFORÇO DE SUBLEITO EM PAVIMENTAÇÃO

### SYSTEMATIC REVIEW OF LITERATURE – FEASIBILITY ANALYSIS OF EMPLOYMENT CIVIL CONSTRUCTION WASTE (RCC) IN BASES, SUB-BASES, AND SUB-GRADE IN PAVEMENT

#### RESUMO

Com o intuito de comprovar a viabilidade técnica da utilização de resíduos da construção civil (RCC) em pavimentação (camadas de base, sub-base, reforço de subleito e revestimento primário) foi realizada uma revisão analítica de publicações relacionadas ao tema no período entre 2011 a 2021. A pesquisa foi conduzida a partir do protocolo PRISMA, aplicando uma série de etapas rigorosas para seleção das publicações pertinentes ao assunto abordado, assim sendo encontrados 25 artigos, de 11 países, notando a Espanha como o país com maior contribuição de trabalhos, sediando a instituição e os autores com maior quantidade de publicações. Como resultado da pesquisa originou-se a relação dos ensaios de caracterização físico-mecânicas quanto aos tipos de agregados reciclados utilizados por cada autor, em que apresentaram resultados satisfatórios para a utilização de RCC em camadas de pavimento, atendendo as normas vigentes para cada região, mostrando a viabilidade de uso de ARC em camadas de pavimento.

**Palavras-Chave:** Resíduos de construção, Pavimentação, Base, Sub-base.

#### ABSTRACT

To prove the feasibility of using construction waste (CW) in paving (base layers, sub-base, subgrade reinforcement and primary coating) an analytical review of publications related to the topic was carried out in the period between 2011 and 2021. The research was carried out from the PRISMA protocol, applying a series of rigorous steps for the selection of publications relevant to the subject addressed. It was found 25 articles, from 11 countries,

noting Spain as the country with the highest contribution of works, hosting the institution and the authors with greater number of publications. As a result of the research, the list of physical-mechanical characterization tests regarding the types of recycled aggregates used by each author was originated, in which they presented satisfactory results for the use of CW in pavement layers, meeting the current norms for each region.

**Keywords:** Construction waste. Pavement. Granular layer.

## 6.1 INTRODUÇÃO

Os resíduos da construção civil (RCC) são gerados dentro do ciclo de vida de obras civil ou de infraestrutura, especialmente durante a fase de demolição (Esin, 2007). Esses resíduos são globalmente reconhecidos como um dos maiores desafios para o poder público. Dentre os principais motivos, destacam-se as altas taxas de geração e sua composição heterogênea. A utilização de agregados reciclados de construção e demolição reduz o consumo de recursos não renováveis e evita o entupimento de aterros com resíduos de construção (Georgakellos, 2006).

As aplicações em construção de estradas utilizam quantidade considerável de agregados, sendo uma alternativa para a substituição do uso de materiais naturais pelo uso de resíduos reciclados de construção e demolição. Diversas pesquisas têm buscado avaliar o potencial dos agregados reciclados na pavimentação, e o presente trabalho se propõe a realizar a revisão sistemática de literatura dos principais estudos da área.

## 6.2 MÉTODOS

### 6.2.1 Enquadramento metodológico da pesquisa

Em se tratando de um estudo de revisão sistemática foi conduzido a partir da metodologia PRISMA (*Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analysis*). Este protocolo consiste em um conjunto de itens baseado em evidências que visa ajudar os autores científicos a relatar grande gama de artigos, melhorando e possibilitando a replicabilidade de revisões sistemáticas. O programa se inicia aplicando uma série de etapas, primeiramente pela geração de objetivos que respondam a uma pergunta de pesquisa, declaração das palavras-chave e aplicação de um conjunto de critérios de exclusão e inclusão. Na etapa de revisão, os artigos relevantes são selecionados, os irrelevantes são removidos. Os artigos são analisados de acordo com algumas categorias pré-definidas.

Para realização da busca de artigos relevantes sobre o tema estudado, foram utilizadas as bases de dados do Portal de Periódico CAPES e Google Acadêmico. O Portal de Periódico CAPES foi escolhido por incluir inúmeras bases de dados, como: Web of Science, Scopus, Journal Citation Reports, Engineering Village, MAS, ASTM International, SciFinder, ProQuest, Britannica Academic, Edition, Thomson Reuters, Eighteenth Century Collections Online, Begell House. Já o Google Acadêmico foi utilizado por ser uma plataforma mais abrangente, em que se pode obter resultados não alcançados pelas outras bases de dados.

As buscas foram conduzidas considerando trabalhos publicados entre os anos de 2011 e 2021, tendo como base a seguinte pergunta central: qual a viabilidade do emprego de resíduos de construção civil na execução de bases, sub-bases, e reforço de subleito em pavimentação?

A partir da pergunta e objetivo da pesquisa, foram definidos os descritores (palavras-chave) para as buscas e realizadas diferentes combinações com operadores booleanos “OR” ou “AND”, obtendo-se as expressões apresentadas na Tabela 1. Ressalta-se que as buscas foram direcionadas à identificação de trabalhos que tenham abordado, especificamente, o emprego de resíduos da construção civil em camadas granulares de pavimentos.

Tabela 1 – Resumo das combinações e operadores booleanos.

<p><b>Grupo 1</b></p> <p>Busca geral sobre o emprego de resíduos de construção civil em pavimentação</p>		<p>(“paving” OR “pavement*” OR “pavement layer*” OR “pavement foundation”) AND (“construction waste” OR “recycled construction and demolition waste” OR “RCDW” OR “Construction and Demolition Waste” OR “C&amp;D waste” OR “recycled construction waste” OR “recycled material*” OR “recycled unbound material*” OR “waste material*” OR “waste building material*”)</p>
	<p>Subgrupo 2a</p>	<p>(“base” OR “sub-base” OR “subbase” OR “subgrade” OR “capping”) AND (“construction waste” OR “recycled construction and demolition waste” OR “RCDW” OR “Construction and Demolition Waste” OR “C&amp;D waste” OR “recycled construction waste” OR “recycled material*” OR “recycled unbound material*” OR “waste material*” OR “waste building material*”)</p>
<p><b>Grupo 2</b></p> <p>Busca específica do emprego de resíduos de construção civil em camadas granulares de pavimento</p>	<p>Subgrupo 2b</p>	<p>(“base layer” OR “sub-base layer” OR “subbase layer” OR “capping layer”) AND (“construction waste” OR “recycled construction and demolition waste” OR “RCDW” OR “Construction and Demolition Waste” OR “C&amp;D waste” OR “recycled construction waste” OR “recycled material*” OR “recycled unbound material*” OR “waste material*” OR “waste building material*”)</p>
	<p>Subgrupo 2c</p>	<p>(“road material*” OR “unbound granular pavement” OR “granular material*” OR “unbound aggregate”) AND (“construction waste” OR “recycled construction and demolition waste” OR “RCDW” OR “Construction and Demolition Waste” OR “C&amp;D waste” OR “recycled construction waste” OR “recycled material*” OR “recycled unbound material*” OR “waste material*” OR “waste building material*”)</p>

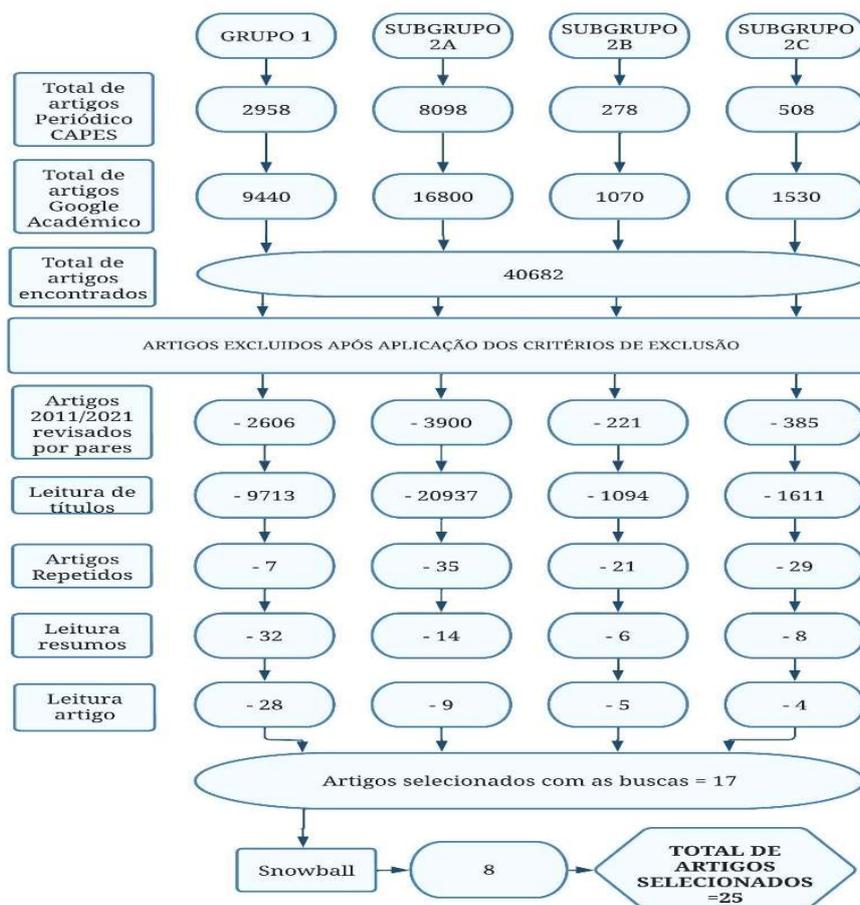
(\*) – Especifica um radial em que os termos descritos posteriormente devem complementar o mesmo.

## 6.2.2 Seleção do portfólio bibliográfico

Após a realização da busca inicial nas bases de dados, foram empregados os seguintes critérios de exclusão: artigos que não foram escritos nos idiomas português, inglês ou espanhol; artigos não pertinentes a área do conhecimento em pavimentação; artigos com Fator de Impacto menor que 0,3; artigos não revisados por pares; teses, dissertações e trabalhos de conclusão de curso. Executando o protocolo de exclusão, partiu-se então para leitura e análise de títulos e resumos, fazendo a exclusão de trabalhos sem relevância para o presente estudo, e eliminando artigos duplicados.

Buscando aumentar o portfólio de artigos relevantes ao tema e visando incorporar mais artigos não captados nas buscas anteriores, procedeu-se a realização de uma amostragem “bola de neve” (*snowball sampling*). Este procedimento consiste em uma busca e análise das referências bibliográficas dos artigos selecionados, permitindo identificar outros trabalhos relevantes ao tema do estudo proposto.

Figura 1 - Processo de seleção dos trabalhos.



### 6.3 RESULTADOS BIBLIOMÉTRICOS

Após selecionados os 25 artigos para revisão, procedeu-se à análise bibliométrica deles. Tais trabalhos foram desenvolvidos em 11 países, com a participação de 84 autores diferentes (incluindo coautores) e publicados em 12 periódicos distintos. Além desses números, também foram analisadas as quantidades de publicações por ano; quantidade de publicações por autores, quantidade de publicações por periódicos e as palavras-chave mais recorrentes. A Tabela 1 apresenta detalhes quanto aos periódicos, ano de publicação e quantidade, destacando o periódico *Construction and Building Materials* que concentrou maior parcela dos artigos analisados.

Tabela 1 - Relação dos artigos selecionados quanto aos periódicos, ano e quantidade.

Periódicos	Fator de impacto SJR	Número de artigos/ano	Subtot al	%
<b>Construction and Building Materials</b>	1,777	(2011/2) (2012/3) (2014/2) (2018/1)	8	32
<b>Journal of Materials in Civil Engineering</b>	1,055	(2011/1) (2013/1) (2014/1) (2015/1) (2018/1)	5	20
<b>Materials</b>	0,604	(2015/1) (2016/1) (2020/1)	3	12
<b>Advances in Materials Science and Engineering</b>	0,371	(2017/1)	1	4
<b>Road Materials and Pavement Design</b>	1,114	(2018/1)	1	4
<b>Advances in Civil Engineering</b>	0,420	(2019/1)	1	4
<b>Journal of Cleaner Production</b>	1,921	(2018/1)	1	4
<b>Journal of Civil Engineering and Management</b>	0,597	(2014/1)	1	4
<b>Sustainability</b>	0,664	(2020/1)	1	4
<b>Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements</b>	0,636	(2021/1)	1	4
<b>Ain Shams Engineering Journal</b>	0,680	(2013/1)	1	4
<b>Transportation Geotechnics</b>	1,175	(2015/1)	1	4

Fonte: Autor 2022

Nos artigos analisados foram identificadas 75 diferentes palavras-chave, resultando na nuvem de palavras apresentada na Figura 2. Foi verificado que o termo *construction and demolition* é o mais recorrente entre os artigos, tendo sido utilizado em oito dos vinte e cinco



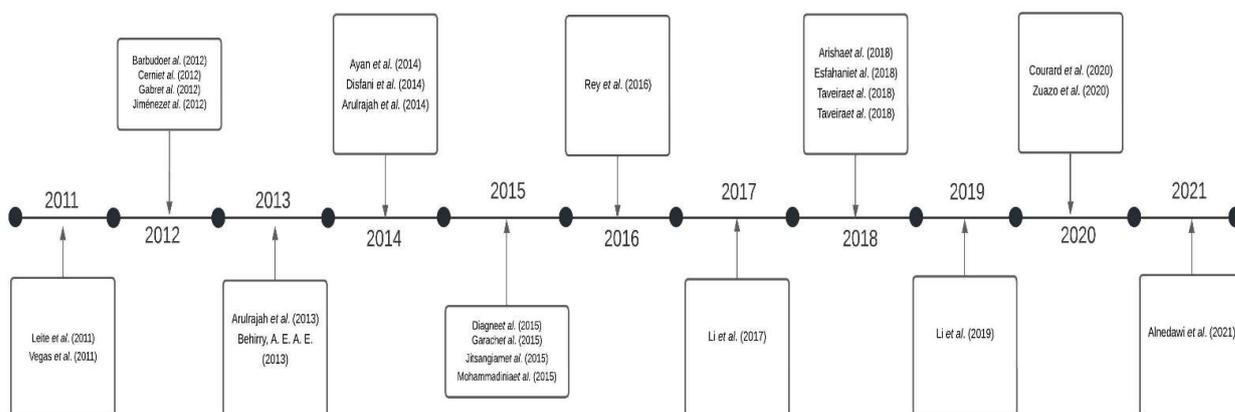
Figura 3 - Apresentação dos trabalhos selecionados quanto ao país de origem.



Fonte: Autor 2022.

Na Figura 4 está apresentada a linha do tempo das publicações analisadas, observando-se maior acúmulo de trabalhos nos anos 2012, 2015 e 2018 dentro do período considerado (2011-2021).

Figura 4 - Quantidade de publicações com relação aos anos.



Fonte: Autor 2022

Com relação aos principais pesquisadores, no rol dos artigos destacam-se: J. Ayuso (cinco trabalhos), J. R. Jiménez (quatro trabalhos), A. Arulrajah (quatro trabalhos), M.M. Disfani (quatro trabalhos), M. López (dois trabalhos), J. Tavira (dois trabalhos), F. Agrela (dois trabalhos), M.W. Bo (dois trabalhos), A. Mohammadinia (dois trabalhos), e os demais com apenas um trabalho. Já em termos de principais centros de pesquisa possuem maior

realce: Universidad de Córdoba (seis trabalhos), Swinburne University of Technology (três trabalhos), Chang'an University (dois trabalhos), Suranaree University Technology (dois trabalhos), e demais com apenas um trabalho. Importante notar que a Universidad de Córdoba, localizada na Espanha, além do maior número de publicações, também figura com os três principais pesquisadores, em termos de publicações.

## 6.4 DISCUSSÕES

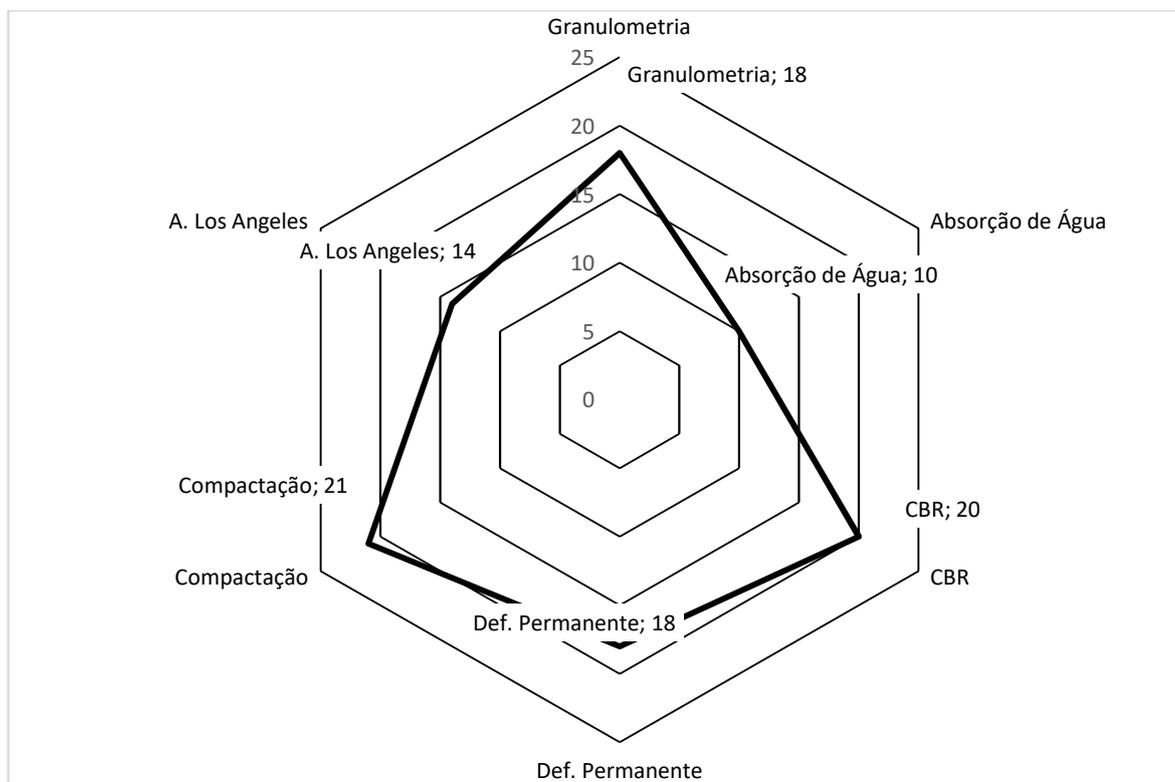
O objetivo principal da revisão sistemática é apresentar a sintetização e análise das informações dos artigos selecionados e revisados. Neste trabalho, cujo objetivo foi revisar trabalhos que avaliaram a viabilidade do emprego de resíduos da construção civil em pavimentação, fez-se uma análise detalhada dos ensaios conduzidos em cada trabalho e os resultados verificados. Na Tabela 2 estão apresentados os ensaios realizados em cada um dos artigos selecionados.

Tabela 2 - Relação dos ensaios realizados pelos autores.

Referência	Granulometria	Absorção de Água	CBR	Def. Permanente	Compactação	A. Los Angeles
Leite <i>et al.</i> , (2011)	X	X	X	X	X	X
Vegas <i>et al.</i> , (2011)	X		X		X	X
Barbudo <i>et al.</i> , (2012)	X	X	X		X	X
Cerni <i>et al.</i> , (2012)	X	X	X	X	X	
Gabr <i>et al.</i> , (2012)			X	X		X
Jiménez <i>et al.</i> , (2012)	X	X	X	X	X	X
Arulrajah <i>et al.</i> , (2013)				X	X	
Behirry, A. E. A. E. (2013)		X	X	X	X	
Arulrajah <i>et al.</i> , (2014)			X	X	X	X
Ayan <i>et al.</i> , (2014)						
Disfani <i>et al.</i> , (2014)	X		X	X	X	
Diagne <i>et al.</i> , (2015)	X			X		
Garach <i>et al.</i> , (2015)	X	X	X		X	X
Jitsangiam <i>et al.</i> , (2015)	X		X	X		
Mohammadinia <i>et al.</i> , (2015)	X	X		X	X	X
Rey <i>et al.</i> , (2016)	X	X	X	X	X	X
Li <i>et al.</i> , (2017)	X		X	X	X	
Arisha <i>et al.</i> , (2018)			X	X	X	X
Esfahani <i>et al.</i> , (2018)	X	X	X	X	X	X
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	X	X	X	X	X	
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	X		X		X	X
Li <i>et al.</i> , (2019)	X		X	X	X	
Courard <i>et al.</i> , (2020)	X				X	X
Zuazo <i>et al.</i> , (2020)	X		X		X	
Alnedawi <i>et al.</i> , (2021)			X	X	X	X

Fonte: Autor 2022.

Figura 5 – Ensaio realizados pelos autores.



Fonte: Autor 2022.

Na Figura 5 mostra a quantidade de autores que se propuseram a realizar os ensaios analisados para este trabalho, destacando o ensaio de compactação em que 21 dos trabalhos realizaram o ensaio, seguido pelo ensaio de CBR com 20 trabalhos.

#### 6.4.1 Materiais utilizados pelos trabalhos

Reciclar resíduos de construção civil abrange uma série de etapas, incluindo transporte, segregação de componentes, trituração, peneiramento e manutenção dos materiais (Esfahani, 2018). A reciclagem desse material para a obtenção do agregado reciclado exige procedimento de produção bem planejado, em que a triagem, a separação, a redução do tamanho e o peneiramento são etapas importantes em todo o processo (Leite *et al.*, 2011). Para melhorar a qualidade dos agregados reciclados e minimizar o impacto ambiental dos resíduos ao meio ambiente, a separação de materiais perigosos e outros componentes que são considerados impurezas (ou seja, gesso, madeira, vidro, metais, plástico e solo escavado) deve ser executada durante a seleção dos materiais.

Dois tipos de agregados reciclados podem ser gerados a partir dos resíduos de construção civil: agregados reciclados de concreto, que contêm partículas originadas, principalmente de concreto reciclado triturado (Poon *et al.*, 2009), e agregados reciclados mistos, que são produzidos a partir de alvenaria triturada reciclada e incluem tijolo, argamassa, concreto, asfalto e partículas de gesso (Barbudo *et al.*, 2012).

O agregado proveniente de resíduos reciclados de construção civil é um material alternativo atraente para bases e sub-bases por sua alta resistência e ao seu comportamento não expansivo (Kryckyj *et al.*, 2000; Melbouci *et al.*, 2009). No entanto, a qualidade dos materiais reciclados varia consideravelmente e é difícil de ser controlada, devendo ser observadas orientações e especificações normativas (Molenaar *et al.*, 2002).

Tendo em vista que o tipo e a qualidade dos resíduos de construção civil variam conforme a região (Barbudo *et al.*, 2012), foi feito o levantamento dos agregados provenientes dos resíduos de construção analisados para cada um dos trabalhos selecionados, como apresentado na Tabela 3.

Tabela 3 - Relação dos materiais utilizados pelos autores.

<b>Relação dos Autores e Materiais Analisados</b>		
<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Materiais Analisados</b>
Leite <i>et al.</i> , (2011)	Brasil	Agregado reciclado misto
Vegas <i>et al.</i> , (2011)	Espanha	Agregado reciclado de concreto, agregado reciclado misto e agregado de asfalto reciclado
Barbudo <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	Agregado natural, agregado reciclado misto e agregado de concreto reciclado
Cerni <i>et al.</i> , (2012)	Itália	Agregado reciclado misto
Gabr <i>et al.</i> , (2012)	Austrália	Agregado natural e agregado reciclado misto
Jiménez <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	Agregado reciclado misto
Arulrajah <i>et al.</i> , (2013)	Austrália	Agregado de concreto reciclado, agregado reciclado misto e agregado de resíduos de escavação (basalto)
Behiry, A. E. A. E. (2013)	Egito	Agregado reciclado de concreto e agregado natural
Arulrajah <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	Agregado reciclado de concreto, agregado reciclado mistos, agregado de materiais asfálticos, agregado de resíduos de escavação e agregado de vidro residual
Diagne <i>et al.</i> , (2015)	EUA	Agregado reciclado de concreto e agregado reciclado misto
Disfani <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	Agregado reciclado de concreto e agregado reciclado misto
Garach <i>et al.</i> , (2015)	Espanha	Agregado natural, agregado reciclado de concreto e agregado reciclado misto
Jitsangiam <i>et al.</i> , (2015)	Austrália	Agregado reciclado de concreto de alta resistência e agregado reciclado misto
Mohammadinia <i>et al.</i> , (2015)	Austrália	Agregado reciclado de concreto, agregado reciclado misto e agregado de materiais asfálticos tratados com cimento Portland
Rey <i>et al.</i> , (2016)	Espanha	Agregado reciclado misto
Li <i>et al.</i> (2017)	China	Agregado reciclado misto

Arisha <i>et al.</i> , (2018)	Egito	Agregado reciclado de concreto e agregado reciclado misto
M. A. Esfahani (2018)	Iran	Agregado reciclado misto
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	Agregado reciclado misto
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	Agregado reciclado misto
Li <i>et al.</i> , (2019)	China	Agregado reciclado misto
Courard <i>et al.</i> , (2020)	Bélgica	Agregado reciclado misto
Zuazo <i>et al.</i> , (2020)	Espanha	Agregado reciclado de concreto e agregado reciclado misto
Alnedawi <i>et al.</i> , (2021)	Austrália	Agregado reciclado de concreto reforçado com geogrelhas

Fonte: Autor 2022.

#### 6.4.2 Granulometria dos agregados

O ensaio de granulometria, principal para caracterização dos agregados, foi empregado em dezoito dos vinte cinco trabalhos analisados. Na Tabela 4 estão apresentados os trabalhos e respectivas especificações técnicas utilizadas para o ensaio.

Tabela 4 - Relação dos autores quanto aos ensaios de granulometria.

<b>Relação dos Autores que Realizaram Ensaios Relacionados a Granulometria dos Agregados Reciclados</b>		
<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Especificações Utilizadas</b>
Leite <i>et al.</i> , (2011)	Brasil	ASTM C136:2006
Vegas <i>et al.</i> , (2011)	Espanha	UNE-EN 933-1:2006
Barbudo <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE 103-101:1998 / a1: 2006
Cerni <i>et al.</i> , (2012)	Itália	EN 13285:2010
Jiménez <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE-EN 933-1:2006
Disfani <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	AS 1141.11.1:2009
Diagne <i>et al.</i> , (2015)	EUA	ASTMD 6836:2008
Garach <i>et al.</i> , (2015)	Espanha	UNE-EN 933-1:2006
Jitsangiam (2015)	Austrália	Main Roads Western Australia (MRWA:2011)
Mohammadinia <i>et al.</i> , (2015)	Austrália	AS 1141.11:1996
Rey <i>et al.</i> , (2016)	Espanha	UNE-EN 933-1:2012
Li <i>et al.</i> , (2017)	China	Não indicada
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	UNE 103102:1995
M. A. Esfahani (2018)	Iran	AASHTO. (1993a)
Li <i>et al.</i> , (2019)	China	JTG E40-2007
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	UNE-EN-933-1:2006
Courard <i>et al.</i> , (2020)	Bélgica	UNE-EN 933-1:2006
Zuazo <i>et al.</i> , (2020)	Espanha	UNE-EN 933-1:2006

Fonte: Autor 2022.

De forma geral, quase todos os estudos constataram por meio da análise granulométrica que os agregados reciclados eram bem graduados e uniformes, ou seja, não continham quantidades excessivas de partículas grossas ou finas, e que atenderam as especificações técnicas exigidas por suas respectivas normas regionais.

Del Rey *et al.*, (2016) obtiveram em uma de suas misturas um agregado que não passou pelas especificações técnicas pertinentes, assim como Zhe li (2019) que também obteve um

agregado mal graduado e reprovado por norma, a princípio, pela pequena quantidade finos existentes no material. Ainda assim, posteriormente, a compactação elevou o índice de material fino fazendo com que o agregado satisfizesse a norma vigente. Courard (2020) também citou o aumento do percentual de finos por materiais menos resistentes, como pasta de cimento e cerâmica.

Esfahani (2017) e Leite *et al.*, (2011) realizaram um procedimento diferente para obtenção dos agregados reciclados, ambos projetaram misturas, melhorando a granulometria. Cerni *et al.*, (2012) realizaram a separação de resíduos de concreto e resíduos cerâmicos, peneirando ambos para posterior mistura com diferentes proporções. Esfahani (2017) realizou a melhoria do agregado obtido, por meio da mistura com agregados naturais.

Assim, os ensaios de granulometria confirmaram a adequação dos agregados reciclados para emprego em camadas granulares de pavimento.

### 6.4.3 Absorção de água

O ensaio de absorção de água indica a quantidade de água que um agregado pode absorver, sendo uma das diferenças mais marcantes entre o agregado natural e o agregado reciclado. Na Tabela 5 estão apresentados os trabalhos que realizaram este ensaio, respectiva especificação técnica observada e resultados.

Tabela 5 - Relação dos autores quanto aos ensaios de absorção de água.

Relação dos Autores que Realizaram Ensaios Relacionados a Absorção de Água dos Agregados Reciclados			
Autores	País	Especificações Utilizadas	Valores Médios Encontrados (%)
Leite <i>et al.</i> , (2011)	Brasil	ASTM C127:2007	12,2
Barbudo <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE-EN 1097-6:2001	Agregado de Concreto reciclado = 8,5 Agregado reciclado misto = 12,7
Cerni <i>et al.</i> , (2012)	Itália	EN 13285:2010	7,72
Jiménez <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE-EN 1097-6:2001	9,00
Behiry, A. E. A. E. (2013)	Egito	-	2,25
Garach <i>et al.</i> , (2015)	Espanha	UNE-EN 1097-6:2001	5,01
Mohammadinia <i>et al.</i> , (2015)	Austrália	AS 1141.5:2000	Agregado de concreto reciclado = 7,02 Agregado reciclado misto = 6,05 Agregado reciclado revestimento asfáltico = 3,47
Rey <i>et al.</i> , (2016)	Espanha	Amending Certain Articles of the General Technical Specifications for Road and Bridge Works (PG-	9,4

		3):2015	
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	Amending Certain Articles of the General Technical Specifications for Road and Bridge Works (PG-3):2015	Material sem triagem = 8,0 Material com triagem = 8,9

Fonte: Autor 2022

Muitas propriedades dos agregados podem ser influenciadas pela absorção de água. A alta capacidade de absorção, por exemplo, pode implicar em queda na resistência mecânica por enfraquecimento das ligações intergranulares (Frazão, 2002).

Um dos motivos por trás dessa elevada taxa de absorção de água em agregados reciclados de RCC está relacionado a materiais porosos presentes em sua composição, como argamassa e cerâmica. Contudo, essa afirmação é confirmada por Leite *et al.*, (2011) e Cerni *et al.*, (2012).

Devido ao grande nível de absorção de água nos agregados reciclados, é necessário fornecer quantidade maior de água para atingir o nível de compactação necessário, garantindo a densidade seca máxima (Cerni *et al.*, 2012).

#### 6.4.4 Compactação

Os ensaios de compactação são geralmente realizados pelos autores com o intuito de determinar a densidade seca máxima e o teor de umidade ótima dos materiais. Na Tabela 6 estão apresentados os trabalhos que realizaram este ensaio, respectiva especificação técnica observada e resultados.

Tabela 6 - Relação dos autores quanto aos ensaios de compactação.

Relação dos Autores que Realizaram Ensaios Para Determinação da Compactação e Umidade Ótima dos Agregados Reciclados			
Autores	País	Especificações Utilizadas	Valores Médios Encontrados Densidade (g/cm <sup>3</sup> )/Umidade ótima (%)
Leite <i>at al.</i> , (2011)	Brasil	ASTM D1557	1,8 / 14,0
Vegas <i>at al.</i> , (2011)	Espanha	UNE 103501: 1994	1,93 / 8,4
Barbudo <i>at al.</i> , (2012)	Espanha	UNE 103501: 1994	Agregado de Concreto reciclado = 1,93 / 11,6 Agregado reciclado misto = 1,86 / 13,1
Cerni <i>at al.</i> , (2012)	Itália	EN 13285:2010	2,57 / 7,72
Jiménez <i>at al.</i> , (2012)	Espanha	UNE 103501:1994	1,83 / 13,0
Arulrajah <i>at al.</i> , (2013)	Austrália	AS 1289.5.2.1:2003	Agregado de concreto reciclado = 1,92 / 12,0 Agregado reciclado misto = 1,98 / 10,7
Arulrajah <i>at al.</i> , (2014)	Austrália	AS 1289.5.2.1:2003	Agregado reciclado de concreto = 1,96 / 12,0 Agregado reciclado mistos = 2,02 / 10,7
Disfani <i>at al.</i> , (2014)	Austrália	AS 1289.5.2.1:2003	Agregado de Concreto reciclado = 2,04 / 11,7 Agregado reciclado misto = 1,99 / 12,0
Mohammadinia <i>at al.</i> , (2014)	Austrália	AS 1289.5.2.1:2003	Agregado reciclado misto 1 = 2,13 / 7,7 Agregado reciclado misto 2 = 2,02 / 10,4
Garach <i>at al.</i> , (2015)	Espanha	UNE-EN 103501	Agregado de concreto reciclado = 2,08 / 10,18

			Agregado reciclado misto = 2,02 / 11,20
Rey <i>et al.</i> , (2016)	Espanha	UNE 103500: 1994	2,21 / 11,5
Li <i>et al.</i> , (2017)	China	JTG E40-2007	1,79 / 15,50
Arisha <i>et al.</i> , (2018)	Egito	AASHTO:1993	Agregado reciclado misto = 1,86 / 12,7 Agregado de concreto reciclado = 1,78 / 10,8
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	UNE 103500: 1994	Material sem triagem = 1,84 / 14,7 Material com triagem = 1,87 / 12,6
M. A. Esfahani (2018)	Irã	AASHTO T180-D:2015	2,10 / 12,4
Courard <i>et al.</i> , (2020)	Bélgica	CEN EN 13286	1,85 / 12,0
Zuazo <i>et al.</i> , (2020)	Espanha	UNE 103501:1994	Agregado de concreto reciclado = 1,99 / 10,6 Agregado reciclado misto = 1,861 / 12,1
Alnedawi <i>et al.</i> , (2021)	Austrália	ASTM D1557:2009	1,97 / 11,2%

Fonte: Autor 2022.

O ensaio de compactação fornece as curvas de densidade e de umidade que são indicação da sensibilidade da densidade em relação às variações do teor de umidade dos materiais. Materiais com curvas planas podem tolerar quantidade maior de variação no teor de umidade sem comprometer muito da densidade alcançada com a compactação. Por outro lado, os materiais com curvas acentuadas são muito sensíveis à mudança no teor de umidade e há necessidade de garantir que o teor de umidade esteja próximo do valor ideal durante a compactação (Poon *et al.*, 2006; Jiménez *et al.*, 2011).

Os agregados naturais têm a maior densidade máxima, e menor umidade ótima. Como a granulometria de cada agregado é semelhante, essa diferença é atribuída principalmente às propriedades físicas dos agregados naturais, que possuem a maior densidade de partículas e são menos porosos. O agregado reciclado de concreto tem maior teor de água e pode absorver quase o dobro da quantidade de água em comparação com o agregado natural. Essa absorção pode minimizar a quantidade de água acumulada sob as rodovias que usam agregado reciclado de concreto como material de base da estrada (Behiry, 2013). Este resultado também é confirmado pelos trabalhos Tavira *et al.*, (2018), Barbudo *et al.*, (2012), Arulrajah *et al.*, (2014) e Cerni *et al.*, (2012).

O aumento do teor de umidade ideal ao passo que a densidade seca máxima diminui está relacionado, principalmente, pela maior rugosidade e porosidade dos materiais que compõem os agregados reciclados, em que os materiais cerâmicos são os maiores responsáveis (Tavira *et al.*, 2018; Barbudo *et al.*, 2012; Cerni *et al.*, 2012). Garach *et al.*, (2015) reforça esta afirmação comparando os resultados obtidos através da compactação de dois tipos de agregados reciclados, um contendo somente resíduos de concreto, e o outro um agregado misto com incorporação de resíduos cerâmicos, chegando à conclusão de que a incorporação de tijolo aumentou o teor de umidade ideal e diminuiu a densidade seca

máxima, como resultado da alta absorção de água e da baixa densidade de partículas das partículas de tijolo triturado. Além dos materiais cerâmicos, outro responsável pelo aumento da umidade ideal e pela diminuição da massa seca ótima são as partículas de cimento não hidratado com baixa densidade que permanecem na argamassa (Ayan *et al.*, 2014).

Os ensaios de compactação realizados pelos autores apontam para a quebra dos agregados reciclados em partículas menores durante a compactação (Li *et al.*, 2017; Leite *et al.*, 2011 e Ayan *et al.*, 2014). Ayan *et al.*, (2014) indica que além dos materiais fracos como os materiais cerâmicos, o cimento não hidratado que permanece junto a argamassa, gera camada fraca, porosa e quebradiça, que também contribui na quebra de partículas durante a aplicação de energia de compactação. A geração de materiais finos provenientes dos esforços de compactação aplicados aos agregados reciclados pode implicar em aumento substancial da capacidade de carga do agregado conforme a energia aplicada na compactação dos mesmos. Isso indica que o conteúdo de material fino é muito aumentado após um tratamento, e o desempenho da estrada é melhorado (Leite *et al.*, 2011; Li *et al.*, 2017).

Em resumo, pode-se concluir que a composição, esforço de compactação e a quantidade de água aplicada durante a compactação dos agregados reciclados são fatores importantes no comportamento físico e mecânico dos agregados, e essas propriedades devem ser bem observadas e analisadas antes do emprego destes materiais na pavimentação.

#### 6.4.5 Abrasão “Los Angeles”

O ensaio de abrasão Los Angeles consiste em verificar a resistência ao desgaste superficial dos grãos dos agregados quando submetido ao atrito, também sendo importante meio de caracterização dos agregados. Na Tabela 7 estão apresentados os trabalhos que executaram este ensaio, bem como os resultados obtidos e especificações técnicas observadas.

Tabela 7 - Relação dos autores quanto aos ensaios de Abrasão “Los Angeles”

Relação dos Autores que Realizaram Ensaios Para Determinação da Abrasão "Los Angeles" dos Agregados Reciclados			
Autores	País	Especificações Utilizadas	Valores Médios Encontrados (%)
Leite <i>et al.</i> , (2011)	Brasil	ASTM C 535-2009	51,5
Vegas <i>et al.</i> , (2011)	Espanha	UNE-EN 1097-2: 1999 / a1: 2007	Agregado de concreto reciclado = 35,0 Agregado reciclado misto = 39 Agregado reciclado revestimento asfáltico = 15,0
Barbudo <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE-EN 1097-2: 1999 / a1: 2007	Agregado de Concreto reciclado = 34,0 Agregado reciclado misto = 38,0

Gabr <i>et al.</i> , (2012)	Austrália	AS 1141.23:2009	39
Jiménez <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE EN 1097-2: 2007	31
Arulrajah <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	ASTM Standard D4767-11:2009	Agregado reciclado de concreto = 28,0 Agregado reciclado mistos = 36
Mohammadinia <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	ASTM C131:2006	Agregado de concreto reciclado = 30,80 Agregado reciclado misto = 35,47 Agregado reciclado revestimento asfáltico = 20,81
Garach <i>et al.</i> , (2015)	Espanha	UNE EN 1097-2: 1999	Agregado de concreto reciclado = 32,9 Agregado reciclado misto = 36,4
Rey <i>et al.</i> , (2016)	Espanha	UNE-EN 1097-2:2010	43,5
Arisha <i>et al.</i> , (2018)	Egito	AASHTO:1993	Agregado reciclado misto = 83,8 Agregado de concreto reciclado = 47,2
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	UNE-EN 1097-2: 2010	Material sem triagem = 39,0 Material com triagem = NA
M. A. Esfahani (2018)	Irã	AASHTO T96: 2015	32,5
Courard <i>et al.</i> , (2020)	Bélgica	UNE-EN 1097-2:2010	41,7
Alnedawi <i>et al.</i> , (2021)	Austrália	ASTM C131:2006	Agregado reciclado misto = 33,1

• NA = Não se Aplica

Fonte: Autor 2022.

Garach *et al.*, (2015) encontrou o valor de 36,40% para agregados reciclados mistos que atende ao valor limite estabelecido pela regulamentação espanhola (40%) para agregados reciclados, já os agregados naturais apresentaram o menor coeficiente de Abrasão Los Angeles 24%. Ainda conforme os autores, o agregado reciclado do concreto apresentou valor de índice de descamação menor do que o índice dos agregados naturais e agregados reciclados mistos, por conter partículas mais arredondadas.

Vegas *et al.*, (2011) mostra que agregados reciclados mistos com percentagens cerâmicas entre 20% e 30% apresentam valores de resistência à fragmentação, na maioria dos casos, entre 35% e 40%. Os agregados reciclados de natureza mista com percentagens cerâmicas inferiores 5% e teores de asfalto acima de 8% apresentam valores de resistência à fragmentação abaixo de 35%, sendo o material cerâmico a fração com maior influência no desgaste e fragmentação do agregado reciclado. Por outro lado, Cerni *et al.*, (2012) também mostra que a geração de maior quantidade de finos cerâmicos tem efeito favorável na consolidação do material compactado, pois esses finos ajudam a promover a reação pozolânica.

Pode-se dizer também que os agregados reciclados de concreto apresentam menor índice de descamação e menor porcentagem de superfícies quebradas. O estudo realizado por Barbudo *et al.*, (2012) revela que dentre os agregados reciclados, os agregados de concreto apresentam maior resistência à abrasão. Além disso, embora os agregados mistos e

reciclados cerâmicos não sejam permitidos na regulamentação espanhola para uso em camadas de pavimentos, os resultados obtidos no ensaio de Los Angeles indicaram que 14 dos 23 materiais estudados (61%) atenderam aos requisitos impostos pela norma (coeficiente inferior a 40%).

#### 6.4.6 Deformação permanente

O módulo de resiliência é considerado fundamental para a análise e projeto de pavimentos, o qual é amplamente utilizado nos métodos de dimensionamento internacionais, sendo este parâmetro muito importante para o desempenho do pavimento ao longo de sua vida útil de projeto. O método parte de uma estrutura pré-dimensionada que é realizada a avaliação da relação tensão-deformação ocorrida nas camadas do pavimento pelas cargas de tráfego, obtendo-se os valores de deformação permanente dos materiais constituintes. A Tabela 8 mostra a relação dos trabalhos que executaram ensaios para determinação de deformação permanente dos agregados reciclados.

Tabela 8 - Relação dos autores quanto aos ensaios de deformação permanente.

<b>Relação dos Autores que Realizaram Ensaios Relacionados a Deformação Permanente dos Agregados Reciclados</b>			
<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Especificações Utilizadas</b>	<b>Valores Médios Encontrados</b>
Leite <i>et al.</i> , (2011)	Brasil	AASHTO TP46:1994	$4,283 \times 10^{-3}$ mm
Cerni <i>et al.</i> , (2012)	Itália	EN 13286-7:2006	-
Gabr <i>et al.</i> , (2012)	Austrália	DTEI TP183:2011	-
Arulrajah <i>et al.</i> , (2013)	Austrália	Austroads 2004	-
Behiry, A. E. A. E. (2013)	Egito	-	0,88mm
Arulrajah <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	ASTM D2166:2006	-
Disfani <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	AG:PT/T053:2007	-
Mohammadinia <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	AASHTO T 307-99:2007	-
Diagne <i>et al.</i> , (2015)	EUA	NCHRP (2004)	-
Jitsangiam <i>et al.</i> , (2015)	Austrália	AASHTO T307-99:2005	-
Rey <i>et al.</i> , (2016)	Espanha	NLT 357/98:1999	10,3 +/- 2,9 mm
Li <i>et al.</i> , (2017)	China	-	0,66mm
Arisha <i>et al.</i> , (2018)	Egito	AASHTO T307:2012	-
Tavira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	ASTM D4694 - 2003	9,00mm
M. A. Esfahani (2018)	Irã	AASHTO T 207:2003	-
Li <i>et al.</i> (2019)	China	-	-
Alnedawi <i>et al.</i> (2021)	Austrália	AASHTO T307-99:2017	-

Fonte: Autor 2022.

A densificação do tráfego é um dos principais fatores responsáveis pela deformação permanente de um pavimento, situação em que a passagem de veículos gera esforços no

pavimento e reduz o número de vazios do solo fazendo com que afunde (Almaali *et al.*, 2009).

Tendo isso em mente, Leite *et al.*, (2011) afirma que a deformação permanente de um pavimento está diretamente ligada aos níveis de energia utilizados na compactação do solo. Nesta linha de raciocínio, um solo contendo agregado reciclado compactado com energia maior, apresentará redução em sua deformação permanente.

Já a deformação instantânea, conforme Li *et al.*, (2019), é responsável por mais de 80% da deformação total, e a compactação do subleito deve ser rigorosamente verificada durante a construção. Isso ocorre pela natureza frágil dos agregados reciclados, os quais se quebram quando da aplicação de carga, gerando partículas mais finas e, assim diminuindo a quantidade de vazios no solo (Cerni *et al.*, 2012). Além disso, a mistura reciclada apresentou maior capacidade de acumular menor deformação permanente sob níveis de tensão específicos, em comparação com as misturas granulares naturais (Cerni *et al.*, 2012).

As reações de cimento residual também estão relacionadas ao bom desempenho dos agregados reciclados em camadas de pavimento frente as deformações permanentes (Arisha *et al.*, 2017). Então, com a combinação da energia de compactação e das reações provenientes dos resíduos de cimento, os agregados reciclados demonstram grande resistência à deformação permanente se tornando viável na execução de camadas de pavimento.

#### 6.4.7 Ensaio CBR

O ensaio CBR (*California Bearing Ratio*) permite avaliar a capacidade de carga de um solo ou agregado, sendo o mais utilizado para caracterização mecânica de materiais granulares na pavimentação. Vinte dos vinte e cinco estudos revisados empregaram o ensaio CBR, estando os resultados e especificações apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Relação dos autores quanto aos ensaios de CBR.

<b>Relação dos Autores que Realizaram Ensaio Relacionados a CBR dos Agregados Reciclados</b>			
<b>Autores</b>	<b>País</b>	<b>Especificações Utilizadas</b>	<b>Valores Médios Encontrados Expansão(mm)/CBR (%)</b>
Leite <i>et al.</i> , (2011)	Brasil	ASTM D1883:2010	Agregado reciclado misto = 0 / 73,0
Vegas <i>et al.</i> , (2011)	Espanha	UNE 103502:1995	Agregado reciclado de concreto = - / 197,5 Agregado reciclado misto = 0,095 / 105,4 Agregado de asfalto reciclado = - / 12,4
Barbudo <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE 103502: 1995	Agregado reciclado misto = - / 74,0 Agregado de concreto reciclado = - / 100,0
Cerni <i>et al.</i> , (2012)	Itália	EN 13285: 2010	Agregado reciclado misto = - / 90,0

Gabr <i>et al.</i> , (2012)	Austrália	AS 1289.6.1.1:1998	Agregado reciclado de concreto = - / 180,0 Agregado reciclado misto = - / 112,0
Jiménez <i>et al.</i> , (2012)	Espanha	UNE 103502:1995	Agregado reciclado misto = 0,01 / 62,0
Arulrajah <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	AS 1289.6.1.1:1998	Agregado reciclado de concreto = - / 160,0 Agregado reciclado mistos = - / 138,0 Agregado de materiais asfálticos = - / 35,0
Disfani <i>et al.</i> , (2014)	Austrália	AS 1289.6.1.1:1998	Agregado reciclado de concreto = - / 160,0 Agregado reciclado misto = - / 138,0
Garach <i>et al.</i> , (2015)	Espanha	UNE 103502:1995	Agregado reciclado de concreto = - / 58 Agregado reciclado misto = - / 25
Jitsangiam <i>et al.</i> , (2015)	Austrália	MRWA 501:2011	Agregado reciclado de concreto de alta resistência = - / 120% Agregado reciclado misto = - / 118
Rey <i>et al.</i> , (2016)	Espanha	UNE 103502:1995	Agregado reciclado misto = 0 / 63,7
Li <i>et al.</i> , (2017)	China	JTG D30-2004	Agregado reciclado misto = - / 34,7
Arisha <i>et al.</i> , (2018)	Egito	AASHTO T307:2012	Agregado reciclado de concreto = - / 152,9 Agregado reciclado misto = - / 105,4
Tavira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	UNE 103502:1995	Agregado reciclado misto = 0 / 78,7
Taveira <i>et al.</i> , (2018)	Espanha	UNE 103.502:1995	Agregado reciclado misto selecionado = 0,1 / 65,5 Agregado reciclado misto = 0,1 / 56,0
M. A. Esfahani (2018)	Irã	AASHTO T193: 1993	Agregado reciclado misto = - / 73,0
Li <i>et al.</i> , (2019)	China	JTG E40-2007	Agregado reciclado misto = 0,001 / 97,66
Zuazo <i>et al.</i> , (2020)	Espanha	UNE 103502:1995	Agregado reciclado de concreto = - / 193 Agregado reciclado misto = - / 164
Alnedawi <i>et al.</i> , (2021)	Austrália	ASTM D1883:2007	Agregado reciclado de concreto reforçado com geogrelhas = - / 195

Fonte: Autor 2022.

Podem considerar que a capacidade de carga do solo misturado com agregado reciclado aumenta conforme o esforço de compactação também aumenta (Leite *et al.*, 2011). Jiménez *et al.*, (2012) indica que o alto valor de CBR obtido está relacionado ao potencial de quebra das partículas dos agregados reciclados, uma vez que esta característica pode contribuir para melhor densificação das misturas recicladas com benefícios para as propriedades mecânicas.

Garach *et al.*, (2015) e Courard *et al.*, (2020) citam ganho na capacidade de carga, medida usando seu valor CBR, como sendo consequência das reações hidráulicas e/ou pozolânicas entre as várias fases minerais que compõem este tipo de material granular. O cimento remanescente na argamassa aderida dos agregados finos de agregado de concreto reciclado é a principal causa do efeito autocimentante observado nas sub-bases executadas com agregados reciclados.

Todos os autores que realizaram o ensaio CBR obtiveram valores aceitáveis, segundo suas normas regionais, para aceitação dos agregados reciclados como material de base, sub-base e/ou reforço de subleito de pavimento.

## 6.5 CONCLUSÕES

A revisão sistemática de literatura permitiu verificar os principais métodos e ensaios empregados para a avaliação de agregados reciclados e seus resultados, podendo ser destacadas as seguintes conclusões:

- Os resultados de granulometria obtidos pela maior parte dos trabalhos revelaram os agregados reciclados como materiais bem graduados e uniformes, e que atendem às especificações técnicas exigidas pelas respectivas normas regionais.
- Após a análise dos trabalhos constata-se que a maior diferença entre os agregados naturais e agregados reciclados é a absorção de água, em que os últimos apresentam elevada taxa de absorção de água pela existência de materiais porosos em sua composição, e que, pelo grande nível de absorção de água nos agregados reciclados, é necessário fornecer quantidade maior de água para atingir o nível de compactação necessário, garantindo a densidade seca máxima.
- Foi possível constatar que a composição, esforço de compactação e a quantidade de água aplicada durante a compactação dos agregados reciclados são fatores importantes no comportamento físico e mecânico dos agregados. A energia de compactação pode gerar materiais finos provenientes dos esforços de compactação aplicados aos agregados reciclados, implicando em aumento substancial da capacidade de carga do agregado, de acordo conforme a energia aplicada na compactação dos mesmos.
- Quanto aos ensaios de Abrasão Los Angeles, os autores estudados constataram que dentre os agregados reciclados, os agregados de concreto apresentam maior resistência à abrasão, e que os materiais cerâmicos são a fração que têm maior influência no desgaste e fragmentação do agregado reciclado. Por outro lado, os estudos também demonstraram que a geração de maior quantidade de finos cerâmicos após a fragmentação tem efeito favorável na consolidação do material compactado, pois esses finos ajudam a promover a reação pozolânica.

- Em relação à deformação permanente, os autores afirmam que a resistência do pavimento está diretamente ligada aos níveis de energia utilizados na compactação do solo, de modo que um solo contendo agregado reciclado compactado com energia maior apresentará redução em sua deformação permanente. Além disso, as misturas recicladas apresentaram maior capacidade de acumular menor deformação permanente sob níveis de tensão específicos, em comparação com as misturas granulares naturais. As reações de cimento residual também estão relacionadas com o bom desempenho dos agregados reciclados em camadas de pavimento diante das deformações permanentes.
- Os resultados do ensaio CBR indicaram que a capacidade de carga do solo misturado com agregado reciclado aumenta conforme o esforço de compactação também aumenta. Adicionalmente, os autores afirmam que o ganho na capacidade de carga, medida pelo CBR, é uma consequência das reações hidráulicas e/ou pozolânicas entre as várias fases minerais que compõem este tipo de material granular.

O objetivo deste trabalho foi revisar artigos e avaliar, por meio dos resultados analisados, a viabilidade do emprego de agregados reciclados de construção civil em camadas granulares de pavimentação. Ficou, portanto, confirmada a adequação do uso deste tipo de material em pavimentação, bem como o potencial para substituição parcial ou total dos agregados naturais, promovendo ganhos ambientais.

## 6.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alnedawi, A. e Rahman, M. A. (2020) Recycled Concrete Aggregate as Alternative Pavement Materials: Experimental and Parametric Study. *Journal of Transportation Engineering, Part B: Pavements, China*, v. 147, n. 1. DOI:<https://doi.org/10.1061/JPEODX.0000231>

Almaali, Y.A., Al-Busaltan, S., “Permanent deformation characteristics of modified thin overlay bitumen mixtures comprising waste polymers”, *Materials Today: Proceedings*, v. 42, pp. 2717–2724, 2021.

Arisha, A. M.; Gabr, A. R.; El-Badawy, S. M. e Shwally, S. A. (2018) Technical Papers Performance Evaluation of Construction and Demolition Waste Materials for Pavement Construction in Egypt. *Journal of Materials in Civil Engineering, Egypt*, v. 30, n. 2. DOI:[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0002127](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0002127)

Arulrajah, A.; Piratheepan, J.; Bo, M. W. e Sivakugan, N. (2013) Geotechnical characteristics of recycled crushed brick blends for pavement sub-base applications. *Canadian Geotechnical Journal*, v. 49, p. 796–811. <https://doi.org/10.1139/t2012-041>

Arulrajah, A.; Disfani, M. M.; Horpibulsu, S.; Suksiripattanapong, C. e Prongmanee, N. (2014) Physical properties and shear strength responses of recycled construction and demolition materials in unbound pavement base/subbase applications. *Construction and Building Materials, Spain*, v. 58, p. 245-257. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.02.025

Ayan, V.; Limbachiya, M. C.; Omer, J. R. e Nasr, S. M. (2014) Compaction assessment of recycled aggregates for use in unbound subbase application. *Journal of Civil Engineering and Management, United States*, v. 20, n. 2, p. 01. DOI:<https://doi.org/10.3846/13923730.2013.801882>

Barbudo, A.; Agrela, F.; Ayuso, J.; Jiménez, J. R. e Poon, C.S. (2012) Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials, Spain*, v. 28, p. 129–138. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035

Behiry, A. E. A. E. (2013) Utilization of cement treated recycled concrete aggregates as base or subbase layer in Egypt. *Ain Shams Engineering Journal, Egypt*, v. 4, n. 4, p. 661-673. DOI:10.1016/j.asej.2013.02.005

Cerni, G.; Cardone, F. e Bocci, M. (2012) Permanent deformation behaviour of unbound recycled mixtures. *Construction and Building Materials, Spain*, v. 37, p. 573–580. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.062

Courard, L.; Rondeux, M.; Zhao, Z. e Michel, F. (2020) Use of Recycled Fine Aggregates from C&DW for Unbound Road Sub-Base. *Materials, Belgium*, v. 13, n. 13, p. 2994. DOI:10.3390/ma13132994

Diagne, M.; Tinjum, J. M. e Nokkaew, K. (2015) The effects of recycled clay brick content on the engineering properties, weathering durability, and resilient modulus of recycled concrete aggregate. *Transportation Geotechnics, United States*, v. 3, p. 15-23. DOI:10.1016/j.trgeo.2014.12.003

Disfani, M. M.; Arulrajah, A.; Haguighi, H.; MOHAMMADINIA Mohammadinia, A. e Hurlpibulsuk, S. (2014) Flexural beam fatigue strength evaluation of crushed brick as a

supplementary material in cement stabilized recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, Spain, v. 68, p. 667-676. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2014.07.007

Esfahani, M. A. Evaluating the feasibility, usability, and strength of recycled construction and demolition waste in base and subbase courses. (2018) *Road Materials and Pavement Design*, Iran, v. 21, n. 1, p. 156-178. DOI:10.1080/14680629.2018.1483259

Esin, T. e Cosgun, N. (2007) A study carried out to reduce the generation of construction waste in Turkey. *Building and Environment*, 42 ( 2007 ) , pp . 1667-1674). DOI:10.1016/j.buildenv.2006.02.008

Garach, L.; López, M.; Agrela, F.; Ordóñez, J.; Alegre, J. e Moya, J. A. (2015) Improvement of Bearing Capacity in Recycled Aggregates Suitable for Use as Unbound Road Sub-Base. *Materials*, Spain, v. 8, n. 12, p. 8804–8816. DOI:10.3390/ma8125493

Gabr, A. R. e Cameron, D.A. (2012) Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Australia, v. 24, n. 6. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000447

Georgakellos, D. A. (2006) The use of the LCA polygon structure in waste management. *Management of Environmental Quality An International Journal*, 17 ( 4 ) ( 2006 ), pp. 490 – 507. DOI:10.1108/14777830610670544

Jiménez, J. R.; Ayuso , J.; Galvín, A.P.; López, M. e Agrela, F. (2012) Use of mixed recycled aggregates with a low embodied energy from non-selected CDW in unpaved rural roads. *Construction and Building Materials*, Spain, v. 34, p. 34-43. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.02.042

Jitsangiam, P.; Boonserm, K.; Phenrat, T.; Chummuneerat, S.; Chindapasirt, P. e Nikraz, H. (2015) Recycled Concrete Aggregates in Roadways: Laboratory Examination of Self-Cementing Characteristics. *Journal of Materials in Civil Engineering*, Australia, v. 27, n. 10. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001245

Leite, F. C.; Santos, R. M.; Vasconcelos, L. K. e Bernucci, L. (2011) Laboratory evaluation of recycled construction and demolition waste for pavements. *Construction and Building Materials*, Brazil, v. 25, p. 2972–2979. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.11.105

Li, Z.; Yan, S.; Liu, L. e YANG, J. (2019) Investigation into Creep Characteristics and Model of Recycled Construction and Demolition Waste Used in Embankment Filler. *Sustainability, China*, v. 12. DOI:10.3390/su12051924

Li, Y.; Zhou, H.; Su, L. e Hou, H. (2017) Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. *Advances in Materials Science and Engineering, China*, ano 2017, p. 1-12. DOI:10.1155/2017/9510212

Melbouci, B. (2009) Compaction and shearing behaviour study of recycled aggregates. *Constr Build Mater*, 23, pp. 2723-2730 DOI:10.1016/j.conbuildmat.2009.03.004

Mohammadinia, A.; Arulrajah, A.; Sanjayan, J.; Disfani, M. M.; Bo, M. W. e Darmawan, S. (2015) Laboratory Evaluation of the Use of Cement-Treated Construction and Demolition Materials in Pavement Base and Subbase Applications. *Journal of Materials in Civil Engineering, Austrália*, v. 7, n. 6. DOI:10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001148

Molenaar, A.A.A. e Niekerk, A.A. (2002) Effects of gradation, composition, and degree of compaction on the mechanical characteristics of recycled unbound materials. *Transportation Research Record Journal of the Transportation Research Board*, 1787, pp. 73-82. DOI:10.3141/1787-08

Poon, CS, Kou SC, Wan HW, Etxeberria M. Properties of concrete blocks prepared with low grade recycled aggregates. *Waste management*, 29 (8) (2009), pp. 2369-2377, 10.1016/j.wasman.2009.02.018

Rey, D. I.; Ayuso, J.; Galvín, P. A.; Jiménez, R. J. e Barbudo, A. (2016) Feasibility of Using Unbound Mixed Recycled Aggregates from CDW over Expansive Clay Subgrade in Unpaved Rural Roads. *Materials, Spain*, ano 2016, v. 9, n. 11, p. 931. DOI:10.3390/ma9110931

Taveira, J.; Jiménez, J. R.; Ayuso, J.; Sierra, M. J.; Ledesma, E. F. (2018) Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil. *Construction and Building Materials, Spain*, v. 164, p. 57-69. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.195

Taveira, J.; Jiménez, J. R.; Ayuso, J.; López-Uceda, A.; Ledesma, E. F. (2018) Recycling screening waste and recycled mixed aggregates from construction and demolition

waste in paved bike lanes. *Journal of Cleaner Production, Spain*, v. 190, p. 211-220. DOI:10.1016/j.jclepro.2018.04.128

Vegas, I.; Ibañez, J.A.; Lisboa, A.; Sáez de Cortazar, A. e Frías, M. (2011) Pre-normative research on the use of mixed recycled aggregates in unbound road sections. *Construction and Building Materials, Spain*, v. 25, p. 2674–2682. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2010.12.018

Zuazo, E. T. L.; Zamanillo, Á. V.; Pérez, M. Á. C.; Miguel, Á. R. (2020) Use of Recycled Aggregates Made from Construction and Demolition Waste in Sustainable Road Base Layers. *Sustainability, Spain*, v. 12, n. 6, p. 6663. DOI:10.3390/su12166663.

Gabr, A. R.; Cameron, D.A. Properties of Recycled Concrete Aggregate for Unbound Pavement Construction. *Journal of Materials in Civil Engineering, Australia*, v. 24, n. 6, jun. 2012.

Diagne, M.; Tinjun, J.M.; Nokkaew, K. The effects of recycled clay brick content on the engineering properties, weathering durability, and resilient modulus of recycled concrete aggregate. *Transportation Geotechnics, United States*, v. 3, p. 15-23, 1 jun. 2015.

## 7 CAPÍTULO 2

(Normas de acordo com o periódico TRANSPORTES – ISSN: 2237-1346)

**AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO DA USINA DE RCC DE RIO VERDE/GO: CARACTERIZAÇÃO E VERIFICAÇÃO NORMATIVA PARA FINS DE PAVIMENTAÇÃO**

**RECYCLED CONCRETE AGGREGATES FROM THE RIO VERDE/GO RCC PLANT: CHARACTERIZATION AND REGULATORY VERIFICATION FOR PAVEMENT PURPOSES**

Tendo a pavimentação como uma alternativa para o reaproveitamento dos resíduos produzidos pela indústria da construção civil no município de Rio Verde - GO, este trabalho tratara a respeito da qualificação dos materiais gerados pela usina de reciclagem de resíduos de construção civil (RCC) municipal. Sendo analisadas as propriedades físicas e mecânicas dos agregados reciclados de concreto (ARC) produzidos pela usina, através de parâmetros e ensaios pré-estabelecidos pelas GOINFRA-ES-PAV-005/2019, DER-SP-TE-DE-P00/013 e NBR 15115:2004, verificando o emprego do ARC como brita graduada simples (BGS), em camadas de pavimento e revestimento primário. Como resultado, concluiu-se que o ARC 100%BGS não obteve resultados satisfatórios para utilização em camadas de pavimento. Em contrapartida, quando realizadas misturas de BGS/Solo Argiloso o material apresentou características físico-mecânicas aceitáveis para a aplicação em camadas de pavimento.

**Palavras-chave:** Resíduos de construção. Pavimentação, Base, Sub-base, Pavimentação rural.

### ABSTRACT

Having paving as an alternative for the reuse of waste produced by the construction industry in the city of Rio Verde - GO, this work deals with the qualification of materials generated by the municipal civil construction waste recycling plant (RCC). The physical and mechanical properties of the recycled concrete aggregates (RCA) produced by the plant were analyzed, through parameters and tests pre-established by GOINFRA-ES-PAV-005/2019, DER-SP-TE-DE-P00/013 and NBR 15115:2004, verifying the use of RCA as single graded gravel (SGG), in pavement and primary coating layers. As a result, it was concluded that RCA 100%SGG did not obtain satisfactory results for use in pavement layers. On the other hand, when SGG/Clay Soil mixtures were performed, the material presented acceptable physical-mechanical characteristics for application in pavement layers.

**Keywords:** Construction waste. Paving, Base, Sub-base, Rural paving.

## 7.1 INTRODUÇÃO

Baseando nos instrumentos de gestão pública para os Resíduos de Construção Civil (RCC), é notável a importância da reciclagem destes resíduos como ferramenta aliada à sustentabilidade, capaz de satisfazer às necessidades da sociedade como um todo. Do ponto de vista, a reciclagem é a possibilidade de eliminação de RCC e, em simultâneo, gera grande influência sobre a conservação dos resíduos naturais, visto que evita a extração da matéria-prima e fornece substitutos aos materiais de construção convencionais que exigem quantidade e energia expressivas para produção (HUANG et al., 2002).

O uso de RCC em camadas dos pavimentos tem-se mostrado viável diante a disponibilidade deste material e da existência de uma tecnologia de reciclagem, que consiste em usinas de beneficiamento de resíduos de construção que transformam entulho em agregados reciclados. Assim, várias cidades do Brasil e do exterior têm utilizado agregados reciclados em pavimentos, visto que seus resultados são satisfatórios por serem alternativas interessantes para substituição de materiais naturais, não renováveis, principalmente na pavimentação de vias de baixo volume de tráfego (EVANGELISTA, 2010).

Cerni et al., (2012) investigou um RCC com caracterização física preliminar e observou uma mistura não ligada de qualidade aceita pelas especificações técnicas italianas para construção de estradas. Destaca também o acentuado potencial de quebra do agregado de RCC, e afirma que essa aparente característica pode contribuir para melhor densificação do agregado, beneficiando propriedades mecânicas, confirmado pelo alto valor CBR encontrado.

Tavira et al., (2018) cita a alta capacidade de carga obtida em seções construídas com agregados de RCC, atendendo aos requisitos mecânicos da normativa espanhola para construção de estradas para qualquer categoria de tráfego. Após estudos de deflexões realizados por ele ao longo de três anos na estrada experimental, observou-se valores inferiores aos valores teóricos; isso significa que a capacidade estrutural das seções estudadas obtiveram valores melhores que os esperados.

Barbudo et al., (2012) também faz considerações positivas quanto o emprego de agregados de RCC. O autor testou diferentes tipos de agregados reciclados, agregados de concreto reciclado, agregados mistos e agregados cerâmicos, o autor dá ênfase para a importância da seleção e composição do agregado para melhor comportamento mecânico, em que os

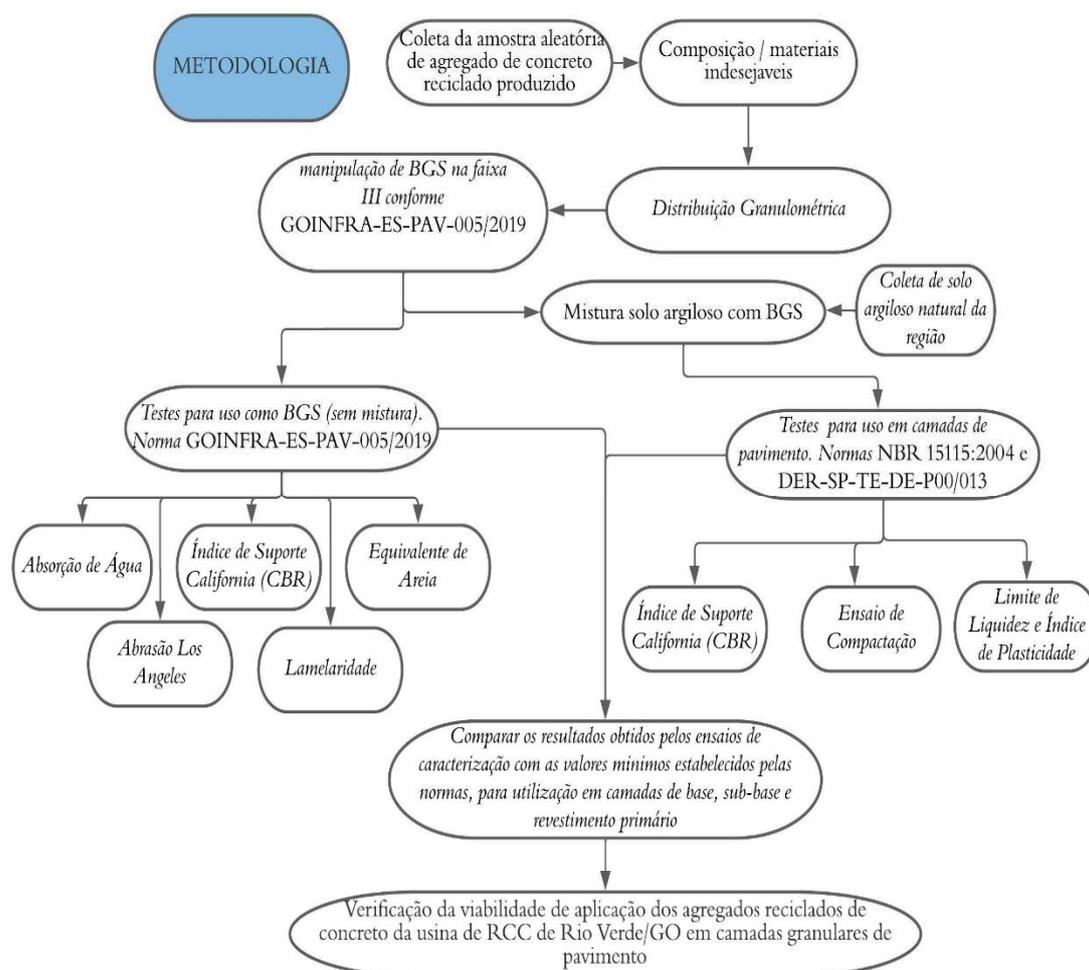
agregados com maior quantidade de concreto tiveram valores de CBR inferiores aos agregados mistos contendo cerâmica.

Dentro deste contexto, o presente trabalho tem como objetivo avaliar o potencial de aplicação de agregado reciclado de concreto (ARC) em base, sub-base, reforço de subleito ou revestimento primário de pavimento. Para tanto, uma amostra de ARC produzido em uma usina de reciclagem de RCC no município de Rio Verde/Goiás, que recebe os resíduos provenientes das obras da cidade, hoje com mais de 250 mil habitantes (IBGE, 2021) e ritmo pujante de construções e empreendimentos, foi manipulada para obtenção de Brita Graduada Simples (BGS) e submetida aos ensaios prescritos nas normas rodoviárias vigentes no país.

## 7.2 MATERIAIS E MÉTODOS

Para o desenvolvimento do trabalho foram executadas as seguintes etapas: i) coleta de amostra de ARC na Usina de Reciclagem de RCC do município de Rio Verde. Devido o não funcionamento da usina foi coletada somente uma amostra aleatória de ARC e o mesmo foi obtido através de um processamento teste do maquinário da usina; ii) triagem da amostra de ARC, sendo selecionados somente os agregados de concreto processados nos testes do maquinário da usina, com os quais foi realizada a manipulação granulométrica para atender a Faixa III de BGS estabelecida pela Norma Estadual GOINFRA-ES-PAV-005/2019; iii) caracterização físico-mecânica da amostra de ARC na condição de BGS, visando verificar a viabilidade do uso desses agregados em camadas de pavimentação através do cumprimento da norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019 referente à base e sub-base, da norma DER-SP-TE-DE-P00/013 referente ao revestimento primário e da norma NBR 15115:2004 para as diferentes camadas; iv) coleta de amostra de solo argiloso e mistura com BGS nas proporções: 75%BGS/25%Solo, 50%BGS/50%Solo e 25%BGS/75%Solo; v) caracterização físico-mecânica das amostras com diferentes proporções BGS/Solo conforme as normas GOINFRA-ES-PAV-005/2019, DER-SP-TE-DE-P00/013 e NBR 15115:2004. Na Figura 1 estão apresentadas de forma detalhada as etapas e testes realizados.

**Figura 1.** Fluxograma da metodologia a ser aplicada.



## 7.3 RESULTADOS

A caracterização físico-mecânica dos agregados tem grande importância, dado que seu comportamento mecânico está diretamente relacionado com suas propriedades físicas. Junto aos laboratórios de Solos e Pavimentação do Intitulo Federal Goiano em parceria com a Universidade de Rio Verde, foram conduzidos os seguintes ensaios de caracterização do ARC e das misturas BGS/Solo: i) composição do material; ii) materiais indesejáveis; iii) distribuição granulométrica; iv) absorção de água e massa específica; v) limites de liquidez e plasticidade; vi) lamelaridade; vii) equivalente de areia; viii) ensaio de compactação; ix) Índice de Suporte Califórnia (CBR); e x) abrasão Los Angeles.

### 7.3.1 Composição do material

A determinação da composição do ARC, que consiste na observação dos materiais (cimento, rochoso, cerâmico, asfáltico, solo ou materiais indesejáveis) que constituem o

agregado é essencial, uma vez que os diferentes materiais influenciam diretamente em muitas de suas propriedades, como resistência mecânica, absorção de água e massa específica (LIMA, 1999).

Para determinar o tipo e a concentração dos materiais que compõem o agregado reciclado, parte da amostra de ARC coletada na usina de reciclagem foi tomada e peneirada, obtendo 1 kg do material retido na peneira de 4,8 mm de abertura. Com esta fração, por meio de análise visual, cada grão retido foi separado por classes conforme a sua natureza: cimentícia, rochosa ou combinação das anteriores. Na Figura 2 estão apresentadas imagens dos resultados de composição.

**Figura 2.** Composição do agregado.



Fonte: Autor 2022

Como resultado da composição do material, verificou-se que a amostra tem composição de 42,6% de material rochoso, 21,4% de material cimentício e 36% de combinação de material rochoso e cimentício. O resultado era esperado, uma vez que a amostra de ARC coletada na usina era proveniente de resíduos de concreto.

### 7.3.2 Materiais Indesejáveis

Os RCC pertencentes às classes B, C e D da Resolução CONAMA nº 307/2002 são denominados pela NBR 15115:2004 (ABNT, 2004) como materiais indesejáveis. Estes materiais indesejáveis são contaminantes do agregado reciclado, tais como: madeiras, vidros, plásticos, gessos, forros, tubulações, fiações elétricas, papéis e outros.

A porcentagem destes materiais indesejáveis deve ser investigada para a utilização do agregado reciclado em pavimentação. De acordo com a NBR 15115:2005 (ABNT, 2004), a porcentagem máxima aceita de materiais indesejáveis de grupos distintos é de 3%, e de mesma característica, limita-se em até 2% em massa.

Para verificar se o ARC atende à recomendação normativa, a fração selecionada para a análise de composição do material também foi utilizada para a verificação da existência de materiais indesejáveis, não tendo sido observado nenhum tipo de material contaminante, conforme se observa na Figura 2.

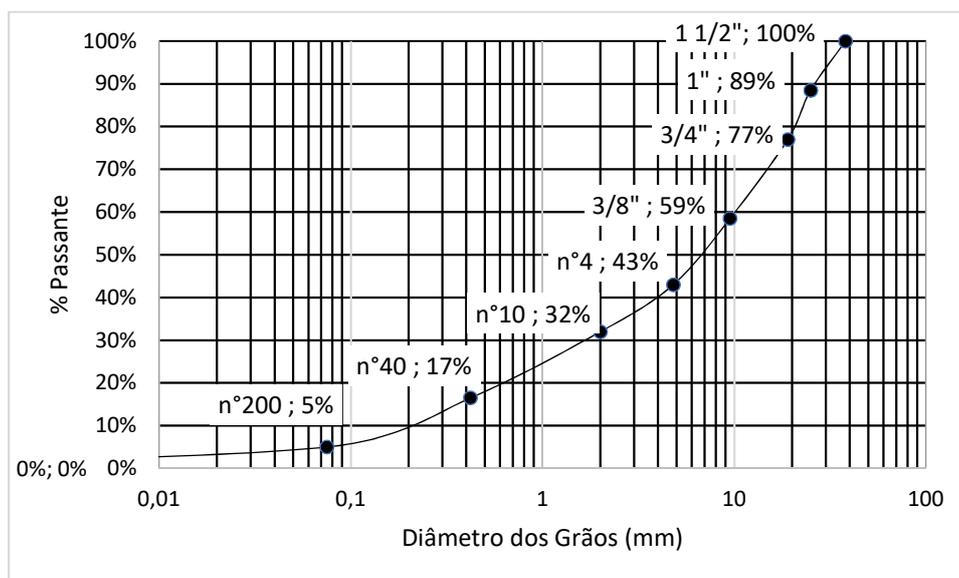
### 7.3.3 Distribuição Granulométrica

A granulometria do ARC foi determinada com o objetivo de atender as faixas granulométricas correspondentes à Brita Graduada Simples (BGS). Assim, os agregados reciclados foram misturados observando as especificações de uma das faixas granulométricas da norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019, conforme é visto na Tabela 1.

**Tabela 1.** Composição granulométrica da brita graduada.

Peneira de malha quadrada ASTM	Porcentagem passando, em peso			Tolerância (%)	
	Abertura (mm)	Faixa I	Faixa II		Faixa III
2"	50,8	100,00	-	-	± 7
1 ½"	38,1	90-100	100	100	± 7
1"	25,4	-	-	77-100	± 7
¾"	19,1	50-85	60-95	66-88	± 7
3/8"	9,5	35-65	40-75	46-71	± 7
Nº 4	4,8	25-45	25-60	30-56	± 5
Nº 10	2	18-35	15-45	20-44	± 5
Nº 40	0,42	8-22	8-25	8-25	± 5
Nº 200	0,074	3-9	2-10	5-10	± 2

Devido às características granulométricas originais do ARC, de modo a otimizar o material produzido na usina, fez o enquadramento deste material na Faixa III. Na Figura 4 está apresentada a curva granulométrica da BGS obtida.

**Figura 3.** Curva granulométrica BGS obtida.

Além de atender a faixa granulométrica mencionada, a BGS resultante dos agregados reciclados deve atender os parâmetros elencados na Tabela 1, que se confirmou.

**Tabela 2.** Parâmetros granulométricos.

Norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019	BGS obtida	Situação
% de material passante na peneira n° 200 $\leq$ 2/3 da % passante na peneira n° 40	A fração de material passante na peneira n° 200 foi de 5,0%	Aprovado
Percentagem passante na peneira n° 40 não deve ser inferior a 12%	17%	Aprovado
A diferença entre as percentagens passantes nas peneiras n° 4 e n° 40 deve estar compreendida entre 20 e 30%	26,50%	Aprovado
Norma NBR 15115:2004		
Cu (coeficiente de uniformidade) $\geq$ 10	47,5	Aprovado
percentagem que passa na peneira n° 40 deve ficar entre 10% e 40%	17%	Aprovado

O ARC também tem potencial para ser empregado como revestimento primário de estradas rurais não pavimentadas, e por isso, as características do material foram verificadas à luz das especificações da norma DER-SP-TE-DE-P00/013. Para tanto, a partir da BGS obtida, removeu-se a fração com diâmetro maior que 25 mm, conforme determina a norma.

Adicionalmente, a norma NBR 15115:2004, que regulamenta o uso de agregados reciclados de construção na execução de camadas de base, sub-base e reforço de subleito de pavimento, estabelece que o agregado reciclado deve ser bem graduado com Cu (coeficiente

de uniformidade)  $\geq 10$ , e a porcentagem que passa na peneira n° 40 deve ficar entre 10% e 40%. A BGS obtida neste estudo apresentou um  $C_u = 47,5$  e porcentagem passante na peneira n° 40 = 17%, satisfazendo os requisitos da norma para aplicação em camadas de pavimentação.

Constatou-se, portanto, que a BGS obtida e a mistura para revestimento primário atenderam plenamente os requisitos estabelecidos pelas normas vigentes quanto à sua granulometria.

#### 7.3.4 Absorção de Água e Massa Específica

O ensaio foi conduzido conforme indicado na NBR 6458:2016 (ABNT, 2016), e uma fração de aproximadamente 1,35 kg da BGS obtida sem mistura de solo argiloso foi mantida imersa em água por 24 horas. Após este tempo, o material submerso foi pesado, fez-se a remoção da água através de um pano levemente úmido, e em seguida, os agregados foram pesados novamente. O passo seguinte foi levar o material à estufa, com temperatura aproximada de 100°C, até a secagem do mesmo e nova pesagem. Assim que todos os dados foram coletados, procedeu-se com os cálculos para a obtenção da massa específica e absorção de água do material.

**Figura 4.** Ensaio de absorção de água.



O peso específico das partículas grossas da BGS obtida foi de 2,434 g/cm<sup>3</sup>, enquanto o valor encontrado para o coeficiente de absorção de água foi de 4,7%. Estes elevados valores estão associados ao fato de os materiais de concreto reciclado apresentarem textura superficial mais rugosa, menor massa específica e maior absorção de água quando comparados com agregados naturais de mesmo tamanho (Evelio Teijón-López-Zuazo, 2020). E ainda, conforme Cardoso et al., (2016), a característica de alta capacidade de absorção de água, modifica o comportamento dos materiais reciclados provenientes de concreto quando compactados, pois, esta condição está diretamente ligada a umidade ótima.

### 7.3.5 Limite de Liquidez e Índice de Plasticidade

O Limite de Liquidez (LL) é o teor de umidade do solo com que se unem, em um centímetro de comprimento, as bordas inferiores de uma canelura feita em uma massa de solo colocada na concha de um aparelho normalizado (Aparelho de Casagrande), sob a ação de 25 golpes da concha sobre a base desse aparelho. O LL marca a transição do estado plástico ao estado líquido e é expresso em porcentagem.

Já o de Limite de Plasticidade (LP) é definido como o menor teor de umidade com o qual se consegue moldar um cilindro com 3 mm de diâmetro, rolando-se o solo com a palma da mão. O LP marca a transição do estado semiplástico ao estado plástico e é expresso em porcentagem.

Os ensaios de LL e LP foram realizados para as misturas BGS/Solo nas proporções: 75%/25%, 50%/50% e 25%/75%. Os resultados deste ensaio, conforme se vê na Tabela 3, permitiram verificar se as misturas atendem aos requisitos estabelecidos pela DER-SP-TE-DE-P00/013 para emprego como revestimento primário, e o LL deve ser inferior a 35% e o Índice de Plasticidade (LL - LP) máximo de 7%.

**Tabela 3.** Resultados referentes aos limites de liquidez e índices de plasticidade das misturas solo/BGS.

Proporção BGS / Solo (%)	Limite de Liquidez (%)	Índice de Plasticidade (%)
25% / 75%	42	16
50% / 50%	29,3	7
75% / 25%	28,8	-
100% / 0%	-	-

Conforme a Tabela 3, somente a mistura 50%BGS/50%Solo atende a especificação técnica para aplicação em camadas de revestimento primário. Cabe ressaltar que a amostra de 100% BGS não é elegível para os ensaios referidos, por ser arenosa. Analogamente, para a amostra 75%BGS/25%Solo também não foi possível realizar o ensaio de LP.

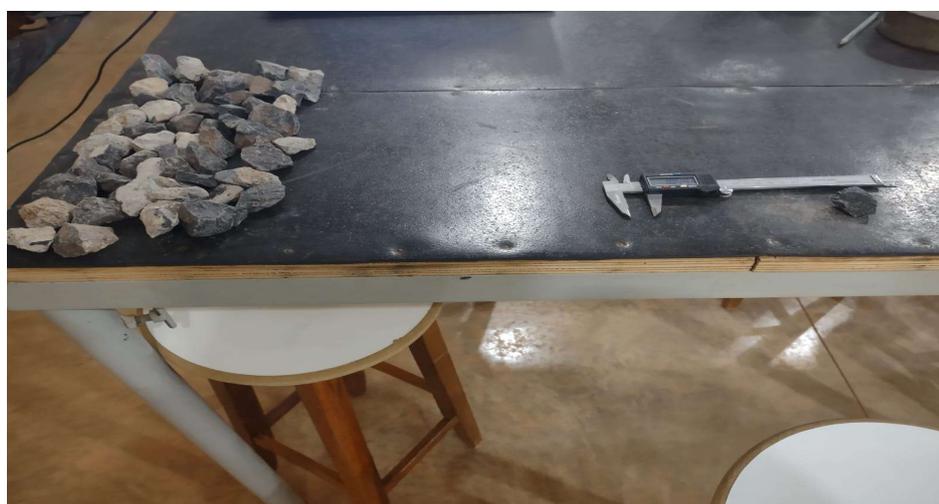
### 7.3.6 Lamelaridade

A norma DNIT 425/2020 - ME estabelece o método para a determinação do índice de forma de agregados graúdos, utilizando o paquímetro, em que se mede o comprimento e a

espessura da partícula, sendo o índice de forma obtido pela média da relação entre o comprimento e a espessura dos grãos do agregado, ponderada pelas proporções de cada fração granulométrica que compõe o agregado ensaiado.

Para verificar a adequação da BGS (sem mistura de solo) para emprego em camadas de base e sub-base, a norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019 estabelece que o agregado precisa ter a percentagem de grãos de forma defeituosa, obtida no ensaio de lamelaridade, inferior a 20%. No ensaio realizado, obteve-se percentual de grãos de forma defeituosa de aproximadamente 2%, sendo assim o material aprovado para o uso em base e sub-base de pavimentos.

**Figura 5.** Ensaio de equivalente de areia realizado.



### 7.3.7 Equivalente de Areia

A norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019 estabelece que a fração do agregado passante na peneira nº 4 deve apresentar o equivalente de areia, determinado pelo método DNER-ME 54/97, superior a 40% para o material BGS ser admitido no uso em base e sub-base de pavimentos.

O ensaio de equivalente de areia determina a proporção relativa de materiais do tipo argila ou pó em amostras de agregados miúdos, com tamanhos de partículas menores do que 4,8 mm. Para isto, inicialmente o volume foi medido a partir de uma cápsula padrão; em seguida, o material da cápsula foi transferido para uma proveta contendo uma solução de cloreto de cálcio-glicerina-formaldeído e mantido em repouso por 20 minutos. Após este período, a proveta foi agitada por 30 segundos e, completada a proveta com a solução até

um nível pré-determinado, deixou-se em repouso por mais 20 minutos. Depois foi determinada a altura de material em suspensão e, com um bastão padronizado introduzido na proveta, foi determinada a altura de agregado depositado por sedimentação. Após a realização do procedimento do ensaio e coleta dos dados, obteve-se valor médio de 79,9% de areia, que, embora elevado, atende ao parâmetro normativo. A grande proporção de areia era esperada, uma vez que se trata de agregado reciclado de concreto.

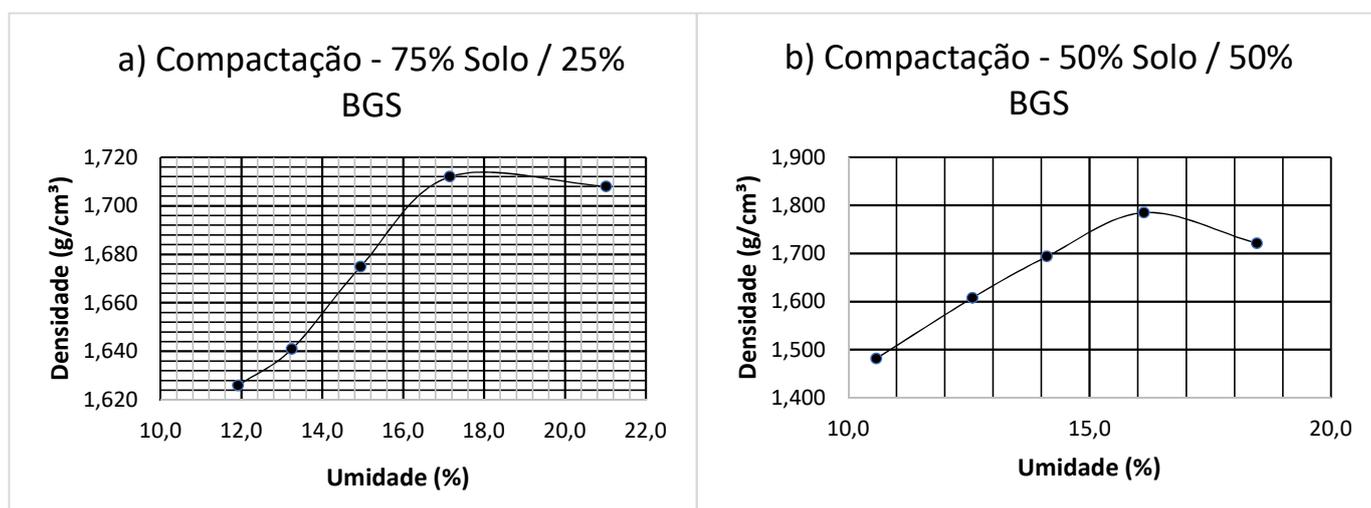
**Figura 6.** Ensaio de equivalente de areia realizado.

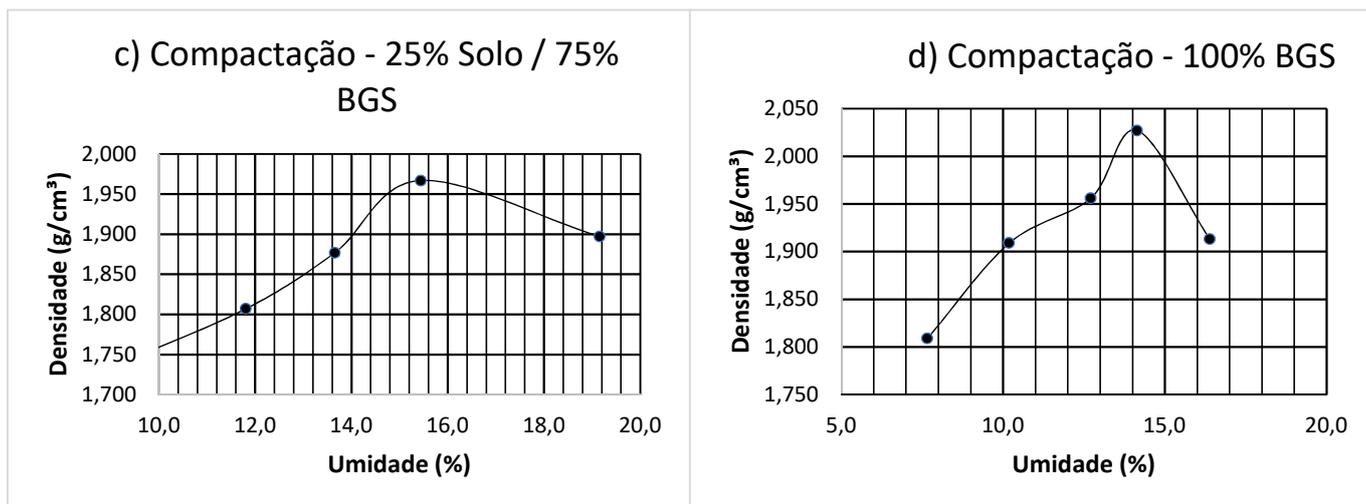


### 7.3.8 Ensaio de Compactação

As amostras de BGS e misturas BGS/Solo foram submetidas ao ensaio de compactação, de acordo com a NBR 7182:2016 (ABNT, 2016), empregando-se energia intermediária. Para a realização do ensaio foram moldados cinco corpos de prova para cada proporção de mistura – com reúso do material –, obtendo-se, a partir dos cinco pontos, a curva de compactação. Na Figura 7 a), b), c) e d) estão apresentadas as curvas de compactação para cada mistura ensaiada.

**Figura 7.** Curvas de compactação das misturas de BGS/Solo.





Analisando a Figura X, observa-se claramente a influência da proporção BGS/Solo na curva de compactação resultante. Nota-se que conforme é aumentada a proporção de BGS em relação ao solo, a densidade da mistura também aumenta e a sua umidade ótima diminui.

Garach (2015) chegou à conclusão de que a incorporação de tijolo junto ao agregado de concreto reciclado aumentou o teor de umidade ideal e diminuiu a densidade seca máxima. Por meio desta conclusão, também se infere que, no presente estudo, a incorporação de BGS ao solo argiloso diminuiu o teor de umidade ideal e aumentou a densidade seca máxima do solo.

### 7.3.9 Índice de Suporte Califórnia (CBR)

O CBR, empregado neste estudo, define o valor da capacidade de suporte de solos e materiais granulares empregados em pavimentação e por meio dele é possível fazer o dimensionamento de pavimentos por métodos empíricos. Este também é o parâmetro básico para verificação de adequação mecânica do uso de materiais em pavimentação, de acordo com as normas NBR 15115:2004 e GOINFRA-ES-PAV-005/2019. Apesar disso, é importante referir que outros parâmetros importantes no dimensionamento e análise de pavimentos são as relações tensão-deformação de cada material (Prado et al., 2020), advindas de ensaios de módulo de resiliência (MR), e deformação permanente (DP).

O ensaio CBR consiste na determinação da relação entre a pressão necessária para produzir a penetração de um pistão em um corpo de prova de solo, e a pressão necessária para produzir a mesma penetração num material granular padrão de referência (DNIT, 2016). A Figura 6 mostra a fase final de execução do ensaio.

**Figura 8.** Execução da penetração do pistão no corpo de prova.



As normas GOINFRA-ES-PAV-005/2019, DER-SP-TE-DE-P00/013 e NBR 15115:2004 apontam os parâmetros mínimos para admissibilidade de agregados como componentes das camadas granulares de pavimentos. A síntese destes parâmetros normativos está apresentada na Tabela 4.

**Tabela 4.** Valores mínimos de ISC e Expansão.

Tipo de agregado	Norma	CBR (%)	Expansão (%)
BGS	GOINFRA-ES-PAV-005/2019	$\geq 80\%$	$\leq 0,3\%$
Revestimento Primário	DER-SP-TE-DE-P00/013	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
	NBR 15115:2004		
Agregados reciclados para uso em camadas de pavimento	Reforço de Subleito	$\geq 12\%$	$\leq 1\%$
	Sub-base	$\geq 20\%$	$\leq 1\%$
	Base	$\geq 60\%$	$\leq 0,5\%$

Os ensaios para a determinação do CBR da BGS e misturas BGS/Solo foram conduzidos conforme o método DNIT 172/2016 (DNIT, 2016), estando os resultados apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5.** Resultados de CBR e expansão.

<b>Ensaio de CBR</b>			
<b>Misturas</b>			
<b>BGS</b>	<b>Solo</b>	<b>CBR</b>	<b>Expansão</b>
25%	75%	43%	0,11%
50%	50%	75%	0,10%
75%	25%	114%	0,03%
0%	100%	67%	0,08%

Diferente do que pode se esperar, a BGS não apresentou o maior valor de CBR, tendo sido a mistura 75%BGS/25%Solo foi a responsável pelo maior valor. Isso é razoável, uma vez que o BGS (materiais rochosos e cimentícios) possui maior resistência que o solo, mas também grande volume de vazios, devido à ausência de finos. Quando ocorre a mistura em proporções adequadas de BGS e solo argiloso, ocorre o preenchimento dos vazios e maior acomodação dos grãos e, no conjunto, um ganho de resistência. Neste raciocínio, se a mistura possuir maior proporção de solo, também será verificada a redução da resistência, já que além do preenchimento dos vazios, o solo passou a predominar e, por ter menor resistência, também reduziu a resistência da mistura.

A mistura 75%BGS/25%, além de figurar com a maior resistência, atende todos os requisitos estabelecidos para emprego em qualquer camada do pavimento (base, sub-base e reforço do subleito). Ela também requer baixa proporção de solo incorporado, permitindo a otimização dos agregados reciclados produzidos na usina de reciclagem de Rio Verde.

À luz da NBR 15115:2004, todas as misturas podem ser empregadas nas camadas de sub-base e reforço de subleito de pavimento. Além disso, as misturas 50%BGS/50%Solo, 75%BGS/25%Solo e 100%BGS também podem ser utilizadas em camada de base.

Comparando os resultados obtidos com as especificações da norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019, observa-se que o agregado 100%BGS não atende ao parâmetro normativo para emprego em base e sub-base de pavimento, uma vez que obteve CBR = 67% e o valor mínimo é CBR = 80%.

Já para a utilização do agregado reciclado como revestimento primário, todas as misturas de BGS/Solo atendem ao especificado na norma DER-SP-TE-DE-P00/013, e exige-se valor de CBR superior 20% e expansão inferior a 1,0%. Logo, é possível a substituição dos agregados naturais (cascalho) por agregados de concreto reciclado.

Li (2017) afirma que os valores de CBR podem variar muito, a depender da região, natureza e composição do resíduo, como verificado neste estudo. O autor analisou uma amostra de agregado reciclado misto, contendo resíduos de construções residenciais e encontrou valor médio de CBR igual a 34,7%. Já Tavira (2018), também analisando agregados reciclados mistos, obteve valor médio de CBR de 74%. E, ainda, Garach (2015) verificou valores de CBR bastante superiores para agregados reciclados de concreto em relação aos agregados reciclados mistos, indicando que a grande quantidade de material cerâmico moído foi o motivo para redução de resistência.

#### **7.3.10 Abrasão Los Angeles**

O ensaio de Abrasão Los Angeles mede o desgaste sofrido pelo agregado, quando colocado na máquina “Los Angeles” juntamente com carga abrasiva, submetido a determinado número de revoluções desta máquina à velocidade de 30 rpm a 33 rpm. O desgaste do material é expresso pela porcentagem, em peso, das partículas que passam pela peneira de malha quadrada de 1,7 mm de abertura após o ensaio.

O resultado obtido no ensaio de abrasão foi de 15,7%, bem inferior ao limite máximo de 55%, atendendo a norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019 para BGS empregada em base e sub-base de pavimento, e DER-SP-TE-DE-P00/013 para emprego do agregado reciclado em revestimento primário.

Autores como Tavira (2018) e Garach (2015) observaram valores maiores para o ensaio de Abrasão Los Angeles em agregados mistos, que se deve a grande proporção de material cerâmico e frágil, que gera maior desgaste do material. No presente estudo, por se tratar de agregados reciclados de concreto, o valor de desgaste verificado foi bem inferior aos referidos para o caso de agregados reciclados mistos.

### **7.4 CONCLUSÕES**

De forma a sintetizar os resultados do trabalho, na Figura 9 estão indicadas a conformidade ou não conformidade dos parâmetros normativos para cada uma das misturas ensaiadas.

**Figura 9.** Resumo dos ensaios realizados.

SITUAÇÃO ENSAIOS REALIZADOS	GOINFRA-ES-PAV-005/2019 (BGS)	DER-SP-TE-DE-P00/013 (REVESTIMENTO PRIMÁRIO)				NBR 15115:2004 (CAMADAS DE BASE, SUB BASE E REFORÇO DE SUBLEITO)			
	100%BGS	25%BGS/ 75%Solo	50%BGS/ 50%Solo	75%BGS/ 25%Solo	100%BGS	25%BGS/ 75%Solo	50%BGS/ 50%Solo	75%BGS/ 25%Solo	100%BGS
CONFORME	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS	COMPOSIÇÃO / MATERIAIS INDESEJÁVEIS
	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA	COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA
	LAMELARIDADE	CBR	LIMITE DE LIQUIDEZ (LL)	CBR	CBR	CBR	CBR	CBR	CBR
	EQUIVALENTE DE AREIA		ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)			Reforço de subleito e base	Todas as camadas	Todas as camadas	Todas as camadas
	ABRASÃO LOS ANGELES		CBR						
NÃO CONFORME	CBR	LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)	LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)	LIMITE DE LIQUIDEZ (LL) ÍNDICE DE PLASTICIDADE (IP)					

Fonte: Autor 2022.

Com base na figura anterior, nos ensaios conduzidos e análises normativas, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- Os testes estabelecidos pela GOINFRA-ES-PAV-005/2019 foram feitos para a caracterização do material de concreto reciclado estabelecido na Faixa III de BGS e o mesmo apresentou resultados satisfatórios quanto a sua granulometria, equivalente de areia com valor de 79,9% e a norma específica valores maiores que 40%, os valores de desgaste no ensaio de Abrasão Los Angeles e a porcentagem de grãos defeituosos também atenderam a norma, observando valores de 15,7% para abrasão e 2% para grãos defeituosos. Por outro lado, o ensaio de CBR para a fração estudada de 100% de agregado reciclado de concreto na faixa de BGS obteve valor de ISC de 67%, e a norma cita valores maiores que 80%, inviabilizando o uso do material puro para este fim.
- As características mínimas para o emprego do agregado reciclado de concreto no formato de BGS foram estabelecidas pela norma DER-SP-TE-DE-P00/013, e todas as frações estudadas atenderam os limites granulométricos, matéria orgânica, Abrasão Los Angeles abaixo de 55% e ensaios de CBR. Porém quanto aos ensaios de limite de liquidez e índice

de plasticidade somente a mistura de 50% de solo natural adicionado com 50% de agregados de concreto reciclado na faixa de BGS foi aprovado pela norma, tendo valores aceitáveis menores ou iguais a 35% para o limite de liquidez e 7% para o índice de plasticidade, desta forma, a única mistura estudada que poderia ser aplicada como revestimento primário.

- E, por fim, levando em consideração a norma para aplicação de resíduos de construção junto a camadas de pavimento a NBR 15115:2004, todas as misturas de solo / BGS podem ser utilizadas em alguma das camadas de pavimento, reforço de subleito, sub-base e base, sendo as frações de 50%, 75% e 100% de BGS composto por agregados reciclados de concreto são aceitas para a execução das três camadas, somente a fração de 25% não foi aceita para a camada de base. Pode-se verificar também que a melhor resistência obtida foi a da fração de 75%, sendo a melhor opção para o emprego dos agregados reciclados de concreto, além de ter melhor resistência, ainda proporciona a aplicação de grande quantidade de agregado reciclado, tendo boa aplicação e viabilidade.

O presente trabalho conclui que o emprego de agregados reciclados de concreto em camadas de pavimento pode ser satisfatório como reforço de subleito, sub-base, base e revestimento primário, isoladamente ou quando misturado nas proporções adequadas com solo natural da região. Isso se mostra como importante resultado para auxílio na gestão de resíduos de construção civil do município de Rio Verde, que gera anualmente aproximadamente 67 680 toneladas, e que poderá utilizar parte destes resíduos para beneficiamento e obtenção de agregados reciclados para pavimentação.

## 7.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 6458: **Grãos de pedregulho retidos na peneira de 4,8 mm – determinação da massa específica, da massa específica aparente e da absorção de água**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7182: **Solo – ensaio de compactação**. Rio de Janeiro, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 10007: **Amostragem de resíduos**. Rio de Janeiro, 2004.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15116: **Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil – Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos**. Rio de Janeiro, 2004.

BARBUDO, A; AGRELA, F; AYUSO, J.; JIMÉNEZ J. R. e POON, C.S. (2012) Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. *Construction and Building Materials*, Spain, v. 28, p. 129–138. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2011.07.035

CARDOSO, R.; SILVA, R.V., BRITO, J., DHIR, R. (2016) Use of recycled aggregates from construction and demolition waste in geotechnical applications: A literature review. *Waste Management*, v.9, p. 131-145.

CERNI, G.; CARDONE, F. e BOCCI, M. (2012) Permanent deformation behaviour of unbound recycled mixtures. *Construction and Building Materials*, Spain, v. 37, p. 573–580. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2012.07.062

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA) – Resolução CONAMA número 307, de 05 de julho de 2002.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. Solos – **Determinação do Índice de Suporte Califórnia utilizando amostras não trabalhadas – Método de ensaio**. Rio de Janeiro, 2016.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRA-ESTRUTURA DE TRANSPORTES. **Manual de Pavimentação**. 3ed. Rio de Janeiro, 2006.

EVANGELISTA, P.A.; COSTA, D.B.; ZANTA, V. M. Alternativa sustentável para destinação de resíduos de construção classe A: sistemática para reciclagem em canteiros de obras. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 10, n. 3, p. 23-40, jul./set. 2010.

GATACH, L.; LÓPEZ, M.; AGRELA, F.; ORDÓÑEZ, J.; ALEDRE, J. e MOYA, J. A. (2015) Improvement of Bearing Capacity in Recycled Aggregates Suitable for Use as Unbound Road Sub-Base. *Materials*, Spain, v. 8, n. 12, p. 8804–8816.

HUANG, Wen-Ling; CHANG, Ni-Bin; LIN, Keun-Song. Recycling of construction and demolition waste via a mechanical sorting process. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 37, n. 1, p. 23-37, 2002.

TAVEIRA, J.; JIMÉNEZ, J. R.; AUYSO, J.; SIERRA, M. J.; LEDESMA, E. F. (2018) Functional and structural parameters of a paved road section constructed with mixed recycled aggregates from non-selected construction and demolition waste with excavation soil. *Construction and Building Materials*, Spain, v. 164, p. 57-69. DOI:10.1016/j.conbuildmat.2017.12.195

Li, Y.; ZHOU, H.; SU, L. e HOU, H. (2017) Investigation into the Application of Construction and Demolition Waste in Urban Roads. *Advances in Materials Science and Engineering*, China, ano 2017, p. 1-12.

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

PINTO, T.P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia da Construção Civil. 1999. 189 p.

TAVEIRA, J.; JIMÉNEZ, J. R.; AYUSO, J.; LÓPEZ-UCEDA, A.; LEDESMA, E. F. (2018) Recycling screening waste and recycled mixed aggregates from construction and demolition waste in paved bike lanes. *Journal of Cleaner Production*, Spain, v. 190, p. 211-220.

ZUAZO, E. T. L.; ZAMANILLO, Á. V.; PÉREZ, M. Á. C.; MIGUEL, Á. R. (2020) Use of Recycled Aggregates Made from Construction and Demolition Waste in Sustainable Road Base Layers. *Sustainability*, Spain, v. 12, n. 6, p. 6663.

## 8 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Primeiramente os resultados encontrados na revisão bibliográfica, serviram de embasamento para o delineamento da pesquisa, que através de uma revisão sistemática da literatura existente sobre o tema, pode-se obter os desfechos de pesquisas já realizadas que também serviram como base de comprovação da eficácia do emprego de RCC na pavimentação, apresentando resultados estudados pelo mundo, que servem de comparação com os resultados encontrados por esse trabalho.

E, tendo em vista que a indústria construção civil é uma das maiores consumidoras de matéria-prima e geradoras de resíduos no mundo, causando diversos impactos ambientais pela extração desenfreada de matéria-prima ou pela deposição irregular os resíduos gerados por essa indústria. Este projeto teve como objetivo viabilizar o uso destes resíduos na substituição de agregados naturais normalmente utilizados na pavimentação por meio da aplicação de agregados de concreto reciclados provenientes do beneficiamento dos RCC em camadas de base, sub-base, reforço de subleito e revestimento primário de pavimentos, contribuindo com o meio ambiente, diminuindo a extração de matéria-prima e promovendo o descarte sustentável destes resíduos através da aplicação do agregado de concreto reciclado em pavimento. Descartando a possibilidade da utilização do resíduo de concreto reciclado como BGS, pois ele não apresentou os requisitos mínimos estabelecidos pela norma GOINFRA-ES-PAV-005/2019. Porém, por outro lado o resíduo de concreto quando misturado com o solo nas proporções corretas pode ser utilizado em qualquer camada do pavimento, base, sub-base, reforço de subleito e revestimento primário estando tecnicamente aprovado perante as especificações técnicas estabelecidas pelas normas DER-SP-TE-DE-P00/013 e NBR 15115:2004 referentes a utilização de agregados para utilização em base, sub-base e revestimento primário de pavimentos, e além de promover a sustentabilidade também fornecerá desempenho e economia.

## 9 TRABALHOS FUTUROS

Como trabalhos futuros a serem desenvolvidos a partir deste, podem ser sugeridos os seguintes:

(1) Realização do ensaio de Módulo de Resiliência de agregados reciclados, uma vez que permite análises mecânicas que envolvem a estimativa das tensões e deformações na estrutura do pavimento e no seu subleito, quando da ação do tráfego.

(2) Realização da caracterização e verificação normativa para maior quantidade de amostras, tomando amostras de diferentes lotes de materiais produzidos pela usina.

(3) Execução dos ensaios e análises para agregados reciclados mistos que serão produzidos na Usina de RCC de Rio Verde.

(4) Aplicação do material *in loco*, mediante execução de um trecho experimental, observando as características e propriedades do pavimento perante o tráfego, ao tempo e intempéries.