

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
Escola de Engenharia
Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos

Maria Clara Alves Ferreira Ramos

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO REICLADOS PARA APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO
UTILIZANDO GABIÕES**

Belo Horizonte
2022

Maria Clara Alves Ferreira Ramos

**CARACTERIZAÇÃO TECNOLÓGICA DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO RECICLADOS PARA APLICAÇÃO EM ESTRUTURAS DE CONTENÇÃO
UTILIZANDO GABIÕES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre/Doutor em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos.

Área de concentração: Meio Ambiente

Linha de pesquisa: Gerenciamento de Resíduos Sólidos

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Ferreira Simões

Belo Horizonte
2022

R175c	<p>Ramos, Maria Clara Alves Ferreira. Caracterização tecnológica de resíduos de construção e demolição reciclados para aplicação em estruturas de contenção utilizando gabiões [recurso eletrônico] / Maria Clara Alves Ferreira Ramos. – 2022. 1 recurso online (128 f. : il., color.) : pdf.</p> <p>Orientador: Gustavo Ferreira Simões.</p> <p>Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.</p> <p>Apêndices: f. 126-128.</p> <p>Bibliografia: f. 114-125. Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.</p> <p>1. Engenharia sanitária - Teses. 2. Saneamento - Teses. 3. Resíduos da construção civil - Teses. I. Simões, Gustavo Ferreira. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.</p> <p>CDU: 628(043)</p>
-------	---



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
[ESCOLA DE ENGENHARIA]
COLEGIADO DO CURSO DE GRADUAÇÃO / PÓS-GRADUAÇÃO EM [SANEAMENTO, MEIO AMBIENTE E RECURSOS
HÍDRICOS]

FOLHA DE APROVAÇÃO

"Caracterização Tecnológica de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados para Aplicação em Estruturas de Contenção Utilizando Gabiões"

MARIA CLARA ALVES FERREIRA RAMOS

Dissertação defendida e aprovada pela banca examinadora constituída pelos Senhores:

Prof. Gustavo Ferreira Simões

Profa. Terezinha de Jesus Espósito Barbosa

Prof. Alexandre Duarte Gusmão

Prof. Petrucio José dos Santos Junior

Aprovada pelo Colegiado do PG SMARH

Versão Final aprovada por

Profa. Priscilla Macedo Moura

Prof. Gustavo Ferreira Simões

Coordenadora

Orientador

Belo Horizonte, 30 de agosto de 2022.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Ferreira Simoes, Professor do Magistério Superior**, em 30/08/2022, às 17:55, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Terezinha de Jesus Esposito Barbosa, Usuária Externa**, em 31/08/2022, às 10:02, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Alexandre Duarte Gusmão, Usuário Externo**, em 31/08/2022, às 10:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Petrucio José dos Santos Junior, Usuário Externo**, em 05/09/2022, às 11:39, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Priscilla Macedo Moura, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 16/11/2022, às 14:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1707374** e o código CRC **985108E3**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais. A minha mãe por ter sido meu exemplo de estudo, além de ser uma mãe que sempre me apoiou em todas minhas decisões. Ao meu pai que sempre foi meu modelo de dedicação, honestidade e trabalho, e que mesmo sem compreender e conhecer o ambiente acadêmico não mediu esforços pra me ajudar nos afazeres da parte experimental. As minhas irmãs e irmão, agradeço especialmente minha irmã mais velha, por todo apoio nos momentos de angústia e pelas risadas que estão guardadas na minha memória.

Para o meu companheiro Arthur meu eterno obrigado. Obrigado por se fazer presente, por me acolher nos momentos de irritação e por sempre me lembrar do meu propósito. Agradeço por ter se disponibilizado em me ajudar, principalmente na reta final. Aos meus amigos que acompanharam toda a minha trajetória e a tornaram mais leve. Principalmente as amigas que também estão no mestrado, só vocês conseguem compreender com clareza a angústia de enfrentar os desafios da pós graduação na pandemia. As minhas amigas de infância, agradeço por terem me apoiado e escutado, além de compreender a minha ausência nos últimos meses.

A minha terapeuta, que me orientou inúmeras vezes sobre como lidar com os imprevistos de forma leve, além de me fazer enxergar a importância que o mestrado tem para mim como projeto pessoal.

A minha equipe de trabalho que sempre me apoiou nessa trajetória, principalmente a minha chefe. As minhas alunas de iniciação científica, Alanna e Bennie, sem vocês esse trabalho não seria possível. Agradeço especialmente ao meu orientador, Prof. Gustavo Simões, por ter me ajudado a construir esse trabalho, por compartilhar as angustias dos desafios de fazer um projeto experimental durante a pandemia e por acreditar na minha capacidade.

Também expresso minha gratidão aos professores do Departamento de Engenharia de Minas, Cláudio Lúcio, Michel Melo, Roberto Galéry e ao professor Rodrigo Caldas do Departamento de Engenharia de Estruturas por permitiram que os ensaios fossem realizados nos seus respectivos laboratórios e aos técnicos de laboratório Heron, José, Geraldo, Alberto, Ricardo e Enderson que me auxiliaram e me ensinaram. À

equipe da CTRS da BR 040 da SLU, especialmente aos funcionários da triagem dos RCD. À Empresa Maccaferri por ter confeccionado e enviado os gabiões utilizados nesse trabalho. A UFMG por ter possibilitado a execução deste trabalho, além de ter sido minha morada nos últimos meses.

RESUMO

O setor da construção civil apresenta importância econômica nacional, mas possui como principal passivo ambiental a geração dos Resíduos de Construção e Demolição (RCD), que podem corresponder a cerca de 50 a 70% do volume total dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. Nesse contexto, observa-se um movimento global que visa reduzir a geração dos RCD, minimizar o desperdício dos materiais de construção civil, bem como encontrar novas aplicações. Considerando que a fração inerte dos RCD (RCC Classe A conforme Resolução CONAMA 307/2002) é a que constitui a maior massa nos resíduos gerados e se aproxima das características dos agregados naturais, observa-se um grande potencial de sua utilização em substituição total ou parcial dos agregados naturais para diversos fins. Desta forma, o trabalho visa avaliar as características físicas e mecânicas da fração inerte dos RCD, objetivando analisar seu desempenho como material de enchimento em estruturas de contenção utilizando gabiões. Foram estudadas as frações cinza (materiais cimentícios e rochas ornamentais), vermelha (materiais cerâmicos) e mista dos agregados reciclados oriundos da usina de reciclagem de RCD da SLU-PBH (ERE BR-040), mais especificamente a fração denominada rachão (dimensões características entre 5 e 20 cm). O programa experimental envolveu a realização de ensaios de caracterização (composição gravimétrica, teor de umidade, massa unitária, índice de forma e absorção de água) e ensaios de desempenho mecânico (abrasão Los Angeles e resistência à compressão pontual). A composição gravimétrica indicou predominância da fração cinza, com 77%, seguido de 13,2% de agregados mistos e 8,5% de fração vermelha. A massa unitária obtida variou entre 1213 a 1097 kg/m³ e a Abrasão Los Angeles entre 57 e 62% para as amostras da fração cinza e compostas (50% cinza - 50% vermelha). Os resultados de absorção de água variaram entre 8,8 a 18%, para as frações cinza e vermelha, respectivamente. Os índices de resistência à compressão pontual variaram entre 10,11 a 0,012 MPa, correspondendo a materiais rochosos e cerâmicos. Quanto à durabilidade, ensaio que simula o intemperismo, a fração vermelha obteve desgaste de 95,0%, a fração cinza de 95,5% e a fração mista de 96,3%, considerando dois ciclos. A fração cinza obteve o melhor resultado de compressão não confinada com tensão média de 38,0 kPa, enquanto a fração vermelha obteve 25,4 kPa. Os resultados sugerem que a fração cinza dos RCD reciclados apresentam maior potencial para a utilização pretendida.

Palavras chave: Resíduos de construção e demolição, valorização de resíduos, estruturas de contenção, gabião

ABSTRACT

The civil construction sector has national economic importance, but its main environmental liability is the generation of Construction and Demolition Waste (CDW), which can correspond to about 50 to 70% of the total volume of urban solid waste in Brazil. In this context, there is a global movement that aims to reduce the generation of CDW, minimize the waste of construction materials, as well as find new applications. Considering that the inert fraction of CDW (RCC Class A according to CONAMA Resolution 307/2002) is the one that constitutes the largest mass in the generated waste and is close to the characteristics of natural aggregates, there is a great potential for its use in total or partial replacement of natural aggregates for various purposes. In this way, this work aims to evaluate the physical and mechanical characteristics of the inert fraction of CDW, aiming to analyze its performance as a filling material in containment structures using gabions. Gray fraction (cement materials and ornamental rocks), red fraction (ceramic materials) and mixed fraction of recycled aggregates from the SLU-PBH CDW recycling plant (ERE BR-040) were studied, more specifically the fraction called "rachão" (characteristic dimensions between 5 and 20 cm). The experimental program involved carrying out characterization tests (gravimetric composition, moisture content, unit mass, shape index and water absorption) and mechanical performance tests (Los Angeles abrasion and point compressive strength). The gravimetric composition indicated a predominance of gray fraction, with 77%, followed by 13.2% of mixed aggregates and 8.5% of red fraction. The unit mass obtained varied between 1213 and 1097 kg/m and the Los Angeles Abrasion, between 57 and 62%, for the gray and composite samples (50% gray - 50% red). The water absorption results ranged from 8.8 to 18% for the gray and red fractions, respectively. The point compressive strength index ranged from 10.11 to 0.012 MPa, corresponding to rocky and ceramic materials. As for durability, a test that simulates weathering, the red fraction obtained wear of 95.0%, the gray fraction of 95.5% and the mixed fraction of 96.3%, considering two cycles. The gray fraction obtained the best unconfined compression result with an average stress of 38.0 kPa, while the red fraction obtained 25.4 kPa. The results suggest that the gray fraction of recycled CDW has greater potential for its intended use.

Keywords: Construction and demolition waste, waste recovery, earth retaining structures, gabion

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Estimativas referentes à geração per capita de RCD em alguns municípios brasileiros.....	32
Figura 3.2 - Geração per capita (kg/hab/dia) por porte do município.....	33
Figura 3.3 - Série temporal da implementação de usinas de reciclagem (privadas e públicas) de RCD no Brasil.....	36
Figura 3.4 - Aplicações propostas pelos trabalhos analisados.....	41
Figura 3.5 - Contenção das margens do Rio Reno, após o seu transbordamento, em Casalecchio, Itália.....	45
Figura 3.6 - Representação de um muro de gabião.....	47
Figura 3.7 - Tipos de gabiões (a) Gabião tipo caixa, (b) Gabião tipo saco, (c) Gabião tipo colhão Reno.....	49
Figura 3.8 - Elementos do gabião tipo caixa.....	49
Figura 3.9 - Composição do MacSoil®.....	51
Figura 3.10 - Contato ponto a ponto das rochas.....	53
Figura 3.11 - Etapas de enchimento de um gabião do tipo caixa.....	54
Figura 4.1 - Britador da ERE BR 040.....	56
Figura 4.2 - Fluxograma dos RCD dentro da ERE-BR 040.....	57
Figura 4.3 - Dimensões do rachão.....	58
Figura 4.4 - Quarteamento e frações selecionadas (marcadas com o ícone verde).....	60
Figura 4.5 - Separação por tipologia durante ensaio de composição gravimétrica (a) Rejeito; (b) Azulejos; (c) Cerâmicos; (d) Rochas Ornamentais; (e) Misto Cinza; (f) Misto Cerâmico e (g) Concretos.....	61
Figura 4.6 - (a) Início da montagem destacando o encaixe dos AR e (b) Caixa totalmente preenchida com a amostra.....	64
Figura 4.7 – (a) Inserção da amostra no recipiente plástico; (b) Amostras submersas e liberação de bolhas e (c) Amostras sem excesso de água e retirada do excesso de água.....	65
Figura 4.8 – (a) Proveta plástica preenchida apenas com água; (b) Proveta após inserção de uma amostra.....	67
Figura 4.9 - (a) Amostra seca; (b) Esferas utilizadas; (c) inserção das amostras na máquina de Los Angeles e (d) amostra peneirada após o ciclo.....	68
Figura 4.10 - Formato e raio da ponta de compressão.....	70

Figura 4.11 - Formato da amostra necessário para o ensaio irregular lump	71
Figura 4.12 – Etapas do ensaio (a) Amostra fixada pelas ponteiros, (b) Amostra fraturada, (c) Seção basal do plano de fratura	72
Figura 4.13 - Croqui do equipamento de durabilidade	75
Figura 4.14 - (a) gabião vazio; (b) início da montagem do gabião e (c) gabião preenchido.....	77
Figura 4.15 - Elementos que constituem a montagem para o ensaio de compressão não confinado de um módulo de gabião	78
Figura 5.1 - Série temporal da amostragem e execução dos ensaios.....	80
Figura 5.2 - Resultados composição gravimétrica.....	82
Figura 5.3 - Resultado médio composição gravimétrica.....	82
Figura 5.4 - Diagrama de caixa da composição gravimétrica.....	83
Figura 5.5 - Diagrama de caixa do Teor de Umidade.....	85
Figura 5.6 – Diagrama de caixa do Massa unitária	86
Figura 5.7 – Variação de massa durante o ensaio de absorção de água	87
Figura 5.8 – Diferença na turbidez da água após a retirada da amostra (a) e após 24 horas de sedimentação das partículas (b)	88
Figura 5.9 – Diagrama de caixa da absorção de água.....	89
Figura 5.10 – Correlação entre massa específica e absorção e água	91
Figura 5.11 – (a) Amostra antes do ensaio (b) amostra retida na peneira de 1,7 mm	92
Figura 5.12 – Diagrama de caixa dos resultados de Abrasão Los Angeles	93
Figura 5.13 – Diagrama de caixa dos resultados de resistência à carga pontual.....	94
Figura 5.14 – Variação do $I_s(50)$ em diferentes tipos de rochas	95
Figura 5.15 – (a) amostra seca; (b) amostra seca retida após o 1º ciclo e (c) amostra seca retida após 2º ciclo	97
Figura 5.16 – Índice de forma médio para os gabiões com 25% em massa de vermelho, 25% em massa de misto e compostos apenas por AR cinza	100
Figura 5.17 – (a) G5 no início do ensaio, sem aplicação e carga e (b) G5 no fim do ensaio.....	101
Figura 5.18 – (a) Inclinação das chapas superiores antes da aplicação de cargas e (b) Inclinação das chapas em função dos vértices mais bem acabados	102
Figura 5.19 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras cinza.....	105

Figura 5.20 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de misto.....	105
Figura 5.21 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de Vermelho.....	106
Figura 5.22 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras.....	106
Figura 5.23 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de vermelho.....	109
Figura 5.24 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de misto.....	109
Figura 5.25 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras cinza.....	110
Figura 5.26 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras.....	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Relação dos 10 maiores geradores de RCD no mundo.	28
Tabela 3.2 – Tipos de agregados reciclados e sua aplicação.	40
Tabela 4.1 – Classificação do índice de forma.....	63
Tabela 4.2 – Classificação da durabilidade das rochas	76
Tabela 5.1 – Relação de massa de RCD para cada ensaio.....	81
Tabela 5.2 – Teor de umidade médio por tipologia de rachão	84
Tabela 5.3 – Perda de massa após ensaio de absorção por amostra	88
Tabela 5.4 – Massa específica e absorção de água das amostras.....	89
Tabela 5.5 – Massa específica das rochas	90
Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de resistência à carga pontual corrigida $I_{s(50)}$	94
Tabela 5.7 – Classificação de resistência à carga pontual.....	95
Tabela 5.8 – Resultados do ensaio de durabilidade.....	96
Tabela 5.9 – Classificação da durabilidade das rochas	98
Tabela 5.10 – Índices físicos dos gabiões ensaiados	99
Tabela 5.11 – Cargas máximas e variação da altura	103
Tabela 5.12 – Estágio de carga máximo e variação da altura.....	104

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABRAMAT - Associação Brasileira da Indústria de Materiais de Construção

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

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

AR - Agregados Reciclados

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DNER - Departamento Nacional de Estradas e Rodagem

ERE - Estações de Reciclagem de Entulho

UE - União Europeia

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

ISRM - *International Society for Rock Mechanics*

NBR - Norma Brasileira

PBH - Prefeitura de Belo Horizonte

PERS - Política Estadual de Resíduos Sólidos

PEV - Pontos de Entrega Voluntária

PIB - Produto Interno Bruto

PLT - *Point Load Test*

PNRS - Política Nacional de Resíduos Sólidos

RCC - Resíduo de Construção Civil

RCD - Resíduos de Construção e Demolição

RSU - Resíduos Sólidos Urbanos

SNIS - Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

SUDECAP - Superintendência de Desenvolvimento da Capital

SLU - Superintendência de Limpeza Urbana

URBEL - Companhia Urbanizadora e de Habitação de Belo Horizonte

URPV - Unidade de Recebimento de Pequenos Volumes

USEPA - *United States Environmental Protection Agency*

A - Massa inicial da amostra mais cilindro

A_b - Absorção de água

A_s - Menor área da seção transversal do plano de carregamento

B - Massa após do ciclo da amostra mais cilindro

C - Massa do cilindro seco

D_e - Diâmetro equivalente

F - Fator de correção

$I_{a(50)}$ - Índice de resistência à compressão não corrigido

I_D - Índice de durabilidade do material

$I_{s(50)}$ - Índice de resistência de amostras à compressão pontual

I_s - Índice de resistência de carga pontual

M_E - Massa específica da estrutura

m_s - Massa da amostra na condição saturada superfície seca

m - Massa ao ar da superfície seca

n - Porosidade

rpm - Revoluções por minuto

$V_{deslocado}$ - Volume deslocado pela amostra

w - Teor de umidade

γ - Massa unitária

ρ - Massa específica natural da estrutura

ρ_s - Massa específica do material de enchimento

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	OBJETIVOS	22
2.1	Objetivo Geral	22
2.2	Objetivos Específicos	22
3	REVISÃO DA LITERATURA	23
3.1	Resíduos da construção e demolição: classificações e definições	23
3.1.1	Nível Federal	23
3.1.2	Nível estadual	26
3.2	Geração de RCD no mundo	27
3.3	Geração de RCD no Brasil	30
3.4	Impactos da disposição inadequada	34
3.5	Reciclagem de RCD	35
3.6	Usos e aplicações	40
3.6.1	Pavimentação	41
3.6.2	Confecção de concretos	42
3.6.3	Novas aplicações	43
3.7	Estruturas de contenção do tipo gabião	44
3.7.1	História	44
3.7.2	Características	45
3.7.3	Tipos de Gabião	48
3.8	Propriedades do material de enchimento	52
4	MATERIAL E MÉTODOS	54
4.1	Descrição dos resíduos de construção e demolição utilizados	54
4.2	Coleta do material	56
4.3	Preparação da amostra	57
4.4	Ensaio Realizados	59
4.4.1	Composição Gravimétrica	59
4.4.2	Teor de Umidade	61
4.4.3	Índice de Forma	62
4.4.4	Massa Unitária	63
4.4.5	Absorção de Água	65
4.4.6	Massa específica do rachão	66
4.4.7	Abrasão Los Angeles	67
4.4.8	Resistência à compressão pontual	69
4.4.9	Durabilidade	74

4.5	Ensaio de resistência a compressão não confinada de um módulo de gabião	76
4.5.1	Montagem das células.....	76
4.5.2	Ensaio de compressão não confinada.....	77
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	80
5.1	Composição gravimétrica.....	81
5.2	Teor de umidade	83
5.3	Massa unitária.....	85
5.4	Absorção de água	86
5.5	Massa específica do rachão	89
5.6	Abrasão Los Angeles	91
5.7	Resistência à compressão pontual	94
5.8	Durabilidade.....	96
5.9	Ensaio de resistência a compressão não confinada de um módulo de gabião	98
5.9.1	Montagem do Gabião	98
5.9.2	Ensaio de compressão não confinada.....	101
6	CONCLUSÕES	111
7	RECOMENDAÇÕES.....	113
	REFERÊNCIAS.....	114
	APÊNDICE A – Amostras com 25% de vermelho no início e fim do ensaio	126
	APÊNDICE B – Amostras com 25% de misto no início e fim do ensaio.....	127
	APÊNDICE C - Amostras com fração cinza no início e fim do ensaio.....	128

1 INTRODUÇÃO

No Brasil, a construção civil é um segmento importante da indústria, visto que está associada com o crescimento econômico-social. Contudo, essa atividade também causa impactos ambientais na extração de recursos naturais, gasto de energia, emissão de poluentes e gases de efeito estufa e, principalmente, na geração de resíduos (IPEA, 2012; CHEN et al., 2016). Dentre os setores produtivos, a construção civil é o maior consumidor de recursos naturais, pois à medida em que os materiais são extraídos, há a alteração da paisagem e também a geração de resíduos (AGOPYAN e JOHN, 2011).

A exploração excessiva de tais recursos naturais se iniciou durante o desenvolvimento industrial no Brasil, quando houve um intenso desenvolvimento de centros urbanos, ocasionando consequências nas cidades, como a demanda por infraestrutura, gerenciamento dos recursos naturais, e também o aparecimento de problemas ambientais, como a má gestão de resíduos sólidos (OSSA, GARCIA e BOTERO, 2016.). A disposição inadequada de resíduos sólidos acarreta passivos ambientais e problemas de saúde pública. Dessa forma, a destinação adequada dos resíduos sólidos minimiza os impactos ambientais e também evita a disseminação de doenças (FONSECA e NAMEN, 2021).

Segundo o último levantamento do IPEA realizado em 2012, os Resíduos de Construção e Demolição (RCD) correspondiam a cerca de 50% a 70% de toda a massa dos resíduos sólidos urbanos gerados no Brasil, sendo os geradores: executores de reformas, ampliações e demolições; construtores de edificações novas e construtores de novas residências individuais (IPEA, 2012). Tradicionalmente, a gestão dos RCD esteve sob responsabilidade do poder público, visto que a sua coleta, transporte e destinação, que deveria ser responsabilidade dos geradores, acaba ficando a cargo do poder público quando estes são depositados em locais inadequados como áreas públicas, canteiros, ruas, praças e margens de rios, acarretando numa sobrecarga do sistema de limpeza urbana (BRASIL, 2005; CORDOBA, 2014 apud CORDOBA et al., 2019).

No Brasil não há dados oficiais com quantitativos de geração de RCD, apenas sobre a quantidade coletada pelos serviços públicos de limpeza urbana de alguns

municípios (MATIAS, 2020). É importante destacar que os RCD que são coletados pelo setor público comumente advêm de pequenos geradores, sendo os valores de geração subestimados, pois não englobam os grandes geradores. De acordo com as estimativas realizadas pela Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2021), em 2020 foram coletados pelos sistemas de limpeza pública dos municípios 47 milhões de toneladas de RCD, causando uma taxa de geração de 221,2 kg/hab.ano. Apesar de alguns municípios realizarem a limpeza dos locais popularmente conhecidos como “bota-foras”, a disposição inadequada de RCD ainda é uma realidade presente nos municípios brasileiros (CORDOBA et al., 2019).

Objetivando empregar diretrizes e mecanismos para a redução, reaproveitamento e reciclagem dos RCD, em 2002 o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) aprovou a Resolução nº 307/02, que “estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil”. Essa Resolução correspondeu a um avanço técnico, estabelecendo que o gerador é o responsável pelo gerenciamento desses resíduos, além de determinar a segregação dos resíduos em diferentes classes e sua disposição adequada (BRASIL, 2002).

Antes mesmo desse marco regulatório, diversos estudos foram desenvolvidos no Brasil a fim de encontrar formas alternativas de destinação final dos RCD, visto que a fração inerte desses resíduos se aproxima das características dos agregados naturais (MATIAS, 2020). Os primeiros estudos com utilização alternativa de RCD coincidem com a Segunda Guerra Mundial uma vez que cidades se depararam com um quantitativo enorme de escombros e com a necessidade de reconstruir as cidades europeias (SILVA, BRITO e DHIR, 2019).

Há um movimento global que visa reduzir a geração dos RCD e minimizar o desperdício dos materiais de construção civil. A ação se dá por meio de legislações ambientais mais restritivas e políticas públicas, bem como pela conscientização (AKHTAR e SARMAH, 2018). Além disso, a reciclagem e reutilização dos RCD é uma forma de tornar o setor mais sustentável, a partir do processamento e reintrodução dos resíduos na construção civil ou em outras aplicações (CHEN et al., 2016).

Encontram-se na literatura vários estudos que comprovam a segurança da utilização dos RCD como base e sub-base para pavimentação e como agregados reciclados na produção de concreto. Tais aplicações são utilizadas em larga escala em países europeus, que inclusive possuem normas técnicas que definem o limite de substituição dos agregados para alguns usos (SILVA, BRITO e DHIR, 2019). Atualmente, são encontradas linhas de pesquisas que objetivam demonstrar a viabilidade do uso dos RCD na confecção de compósitos, placas e blocos de isolamento térmico e acústico, assim como adsorventes de contaminantes, dentre outras aplicações (REIS et al., 2019; MASSOUDINEJAD et al., 2019; HYVARINEN, RONKANEN e KARKI, 2019).

No final da década de 1990 iniciaram-se estudos precursores no Brasil sobre a utilização de RCD em obras geotécnicas, com a utilização de agregados reciclados na pavimentação e para confecção de blocos de concreto (LIMA, 1999). Nos anos seguintes outros estudos com a aplicação do RCD foram realizados, conforme apresentado por Pereira et al. (2015) em seu trabalho sobre as aplicações de RCD em obras geotécnicas no Brasil. As linhas de pesquisa mais relevantes foram na utilização do RCD como camadas drenantes de aterros sanitários, material alternativo para sistema de cobertura de aterros sanitários, material de preenchimento de estruturas de solos reforçado e estabilização dos solos.

Estruturas de contenção do tipo gabião são utilizadas para solucionar problemas geotécnicos, hidráulicos e no controle de erosão. De forma geral, o gabião pode ser definido como uma estrutura flexível, formado por elementos metálicos, preenchidos por material pétreo de granulometria adequada. A principal vantagem das estruturas de contenção de gravidade é sua simplicidade de execução, além de não necessitar obrigatoriamente de mão-de-obra especializada, se destacando das demais estruturas de contenção (BARROS, 2015).

Diante do volume de RCD gerado anualmente, dos impactos das disposição inadequada, dos gastos públicos com a limpeza corretiva de áreas clandestinas, bem como da semelhança dos RCD Classe A, conforme definido pela Resolução CONAMA 307/2002 (Brasil, 2002), com os agregados naturais, o presente trabalho propõe a caracterização física e mecânica dos agregados reciclados de RCD, a fim de investigar a viabilidade e limitações do seu uso como material de enchimento de

estruturas de contenção do tipo gabião, fundamentando-se na comparação das propriedades físicas e mecânicas desse material alternativo com os materiais naturais normalmente utilizados.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

Avaliar a viabilidade técnica de utilização de resíduos de construção e demolição reciclados como material de enchimento na construção de estruturas de contenção utilizando gabiões..

2.2 Objetivos Específicos

- Determinar a composição gravimétrica dos RCD utilizados provenientes da ERE BR-040;
- Caracterizar os Agregados Reciclados (AR) em função das suas propriedades e índices físicos para comparar com o material pétreo comumente utilizado;
- Verificar o desempenho mecânico de cada fração de AR para posterior comparação com rochas comumente utilizadas;
- Determinar a resistência à compressão não confinada de células de gabião preenchidas com 100% em massa de RCD da fração cinza, 25% em massa de fração vermelha e 25% em massa de fração mista, bem como sua deformabilidade, visando avaliar o desempenho mecânico da estrutura.

3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Resíduos da construção e demolição: classificações e definições

3.1.1 Nível Federal

No Brasil, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004) os resíduos sólidos são definidos como sendo “os resíduos nos estados sólido e semissólido, resultantes de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. De acordo com a referida norma, os resíduos podem ser categorizados quanto à sua periculosidade e solubilidade em água. Fundamentado nestes critérios, os resíduos são classificados em:

Resíduos classe I - Perigosos

Aqueles que apresentam periculosidade, conforme definido em 3.2, ou uma das características descritas em 4.2.1.1 a 4.2.1.5, ou constem nos anexos A ou B

periculosidade de um resíduo: Característica apresentada por um resíduo que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou infecto-contagiosas, pode apresentar:

- a) risco à saúde pública, provocando mortalidade, incidência de doenças ou acentuando seus índices;
- b) riscos ao meio ambiente, quando o resíduo for gerenciado de forma inadequada.

Resíduos classe II A - Não inertes

Aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B - Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.

Resíduos classe II B - Inertes

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

A classificação dos resíduos visa que seu o gerenciamento seja feito de forma adequada, ou seja, é fundamental ter ciência das características dos resíduos gerados nos diversos setores para que não haja contaminação, e para que o manejo seja realizado de forma a preservar a saúde do trabalhador e minimizar os impactos ambientais, bem como seja dada uma destinação adequada em função da classificação do resíduo.

A Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010, institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), a qual apresenta objetivos e instrumentos relativos aos resíduos, bem como diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis. Além disso, a Lei também categoriza os resíduos em função das suas características, apresentando a classificação dos resíduos de duas formas: quanto à origem e à periculosidade (BRASIL, 2010).

A PNRS define, em seu artigo 13 (p 08) os resíduos da construção civil (RCC) em relação a sua origem como: “os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis”. Percebe-se que esta definição é muito abrangente, não havendo diferenciação das diferentes tipologias de resíduos dentro do RCD. A PNRS também instituiu no Artigo 20 (p. 10) que as empresas de construção civil estão sujeitas à elaboração do plano de gerenciamento de resíduos sólidos, assim as empresas devem apresentar no documento que será realizada uma gestão ambientalmente adequada dos resíduos.

Em nível federal também foi regulamentada a Resolução 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA, 2002, p. 01), que adota a seguinte definição para os resíduos de construção civil (RCC):

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

A Resolução também propõe a classificação dos resíduos de construção civil, seguindo a seguinte subdivisão:

I - Classe A - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados, tais como: a) de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos

provenientes de terraplanagem; b) de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto; c) de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meio-fio etc.) produzidas nos canteiros de obras; II - Classe B - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e outros; III - Classe C - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação, tais como os produtos oriundos do gesso; IV - Classe D - são resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como tintas, solventes, óleos e outros ou aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais e outros, bem como telhas e demais objetos e materiais que contenham amianto ou outros produtos nocivos à saúde. (CONAMA, 2002, p.3).

Como detalhado na Resolução CONAMA 307/2002, os RCD possuem características singulares, uma vez que podem ser constituídos de diferentes materiais. Em geral, pode-se dizer que os RCD se apresentam na forma sólida, heterogênea e com dimensões e geometrias variadas e irregulares, podendo ser constituídos por qualquer material que faça parte da edificação e infraestrutura, além de restos de embalagens e outros materiais (SILVA, 2007). Em sua maioria, são materiais que se assemelham aos agregados naturais, mas podem incluir tintas, solventes e óleos, caracterizados como substâncias químicas que podem ser tóxicas ao ambiente ou à saúde humana (IPEA, 2012). Dessa forma, a segregação por classe dos RCD desde o momento de geração é fundamental para evitar a contaminação dos resíduos inertes com os RCD que são classificados como perigosos.

A Resolução também define a destinação final adequada dos RCD de acordo com uma classificação própria. Os RCD Classe A devem ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados ou encaminhados a aterro de reservação de material para usos futuros. Já os RCD Classe B também deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados a áreas de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura. Por fim, a destinação dos RCD Classe C e D deve ser realizada em conformidade com normas técnicas específicas.

A Resolução CONAMA 307/2002 (Nova redação dada pela Resolução nº 448/12), em seu Artigo 5º estabeleceu diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC, disciplinando as ações necessárias de forma a minimizar os impactos ambientais causados pelas deposições irregulares. Devendo a implementação das diretrizes ser realizada através do Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil, que deve ser elaborado pelos municípios e Distrito Federal, disciplinando as ações necessárias de forma a priorizar a não geração de resíduos e minimizar os impactos ambientais causados pelas deposições irregulares (BRASIL, 2012).

Objetivando incluir os grandes geradores de RCC nas diretrizes da Resolução CONAMA 307/2002, em seu Artigo 8º, estabelece que os grandes geradores devem elaborar e implementar Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil – PGRCC, documento em que são estabelecidas as ações necessárias ao adequado gerenciamento de resíduos da construção civil, contemplando, de forma detalhada, as etapas de caracterização, triagem, acondicionamento, transporte e destinação final, devendo este ser apresentado junto com o projeto do empreendimento aos órgãos de licenciamento ambiental.

No âmbito federal ainda há algumas Normas da Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT, relacionadas ao gerenciamento dos resíduos da construção civil e volumosos, quais sejam: NBR 15112 (ABNT, 2004b) das áreas de transbordo e triagem; NBR 15113 (ABNT, 2004c) dos aterros; NBR 15114 (ABNT, 2004d) das áreas de reciclagem; 15115 (ABNT, 2004e) e NBR 15116 (ABNT, 2004f) dos agregados reciclados de RCC.

3.1.2 Nível estadual

A Lei nº 18.031, de 12 de janeiro de 2009, institui a Política Estadual de Resíduos Sólidos (PERS) em Minas Gerais e define princípios e diretrizes, objetivos e instrumentos para a gestão integrada e compartilhada de resíduos sólidos (MINAS GERAIS, 2009). A PERS também apresenta os princípios de não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento e por último a disposição final ambientalmente adequada em consonância com a PNRS, todavia, no Artigo 29 inclui a valorização dos resíduos por meio da comercialização dos recicláveis e reciclados.

Tendo em vista a necessidade de disciplinar a destinação adequada dos resíduos provenientes das atividades da construção civil e dos resíduos volumosos, a Deliberação Normativa DN COPAM 155 de 25 de agosto de 2010 foi promulgada para incluir na listagem "E" da DN COPAM 74/2004 (Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, bem como os critérios locacionais a serem utilizados para definição das modalidades de licenciamento ambiental) o empreendimento: "I - E-03-09-3 - Aterro e/ou área de reciclagem de resíduos classe "A" da construção civil, e/ou áreas de triagem, transbordo e armazenamento transitório de resíduos da construção civil e volumosos."

De forma mais recente, a DN COPAM 232/2019 institui o Sistema de Transporte de Resíduos que objetiva controlar a movimentação e destinação de resíduos sólidos e rejeitos no estado de Minas Gerais. A partir de 09/10/2019 tornou-se obrigatória a utilização do Sistema de Manifesto de Transporte de Resíduos pelos geradores, transportadores, armazenadores temporários e destinadores de resíduos e rejeitos industriais, da mineração, de serviços de saúde, de estabelecimentos comerciais e prestadores de serviços, dos serviços públicos de saneamento básico e de serviços de transportes, exigindo o registro das movimentações de resíduos no estado. Porém, a Deliberação se tornou obrigatória para os resíduos de construção e demolição gerados por pessoas jurídicas somente a partir de 4 de dezembro de 2020, estando prevista a aprovação de uma portaria para iniciar o controle da movimentação dos RCD também por pessoa física.

3.2 Geração de RCD no mundo

A geração de resíduos na produção de materiais de construção civil, bem como durante a construção de edificações e reformas é inevitável. Considerando que os materiais de construção são bens não renováveis, há um movimento global que visa reduzir a geração de RCD, bem como minimizar o desperdício dos materiais de construção civil. Essa movimentação se dá por meio de legislações ambientais mais restritivas, políticas públicas, bem como por meio da conscientização por diferentes meios visando a diminuição de impactos das atividades humanas no meio ambiente (AKHTAR e SARMAH, 2018).

Em sua pesquisa, Akhtar e Sarmah (2018) fizeram um panorama sobre a situação do gerenciamento dos RCD nos diferentes continentes, utilizando materiais disponibilizados pelos órgãos ambientais dos países e também da União Europeia. Na Tabela 3.1, são apresentadas as estimativas de geração de RCD para os 10 maiores geradores mundiais por ano base.

Tabela 3.1 – Relação dos 10 maiores geradores de RCD no mundo.

Ranking	País	Quantidade	
		(Milhões de toneladas)	Ano Base
1º	China	1.020,0	2012
2º	Índia	530,0	2013
3º	EUA	519,0	2012
4º	França	246,7	2012
5º	Alemanha	201,3	2012
6º	Reino Unido	100,2	2012
7º	Japão	75,4	2011
8º	Coreia do Sul	68,0	2012
9º	Itália	39,7	2012
10º	Espanha	27,7	2012

Fonte: Adaptado de AKHTAR e SARMAH, 2018

A China é o maior gerador de RCD, seguida pela Índia e EUA, sendo que a China produz sozinha mais de 1 bilhão de toneladas de RCD, tal quantitativo está vinculado ao rápido crescimento em infraestrutura e centro financeiro para muitos empreendimentos de rápido crescimento em todo país. Apesar de grande parte dos RCD estar na forma de solo escavado e rochas, dados consolidados sobre as taxas de reciclagem não foram encontrados na literatura (LU, 2014). No sudoeste asiático, foi verificada uma escassez de definições e informações sobre os RCD, como quantidade gerada, quem são os responsáveis pela gestão destes resíduos e até mesmo regulamentos (HOANG, *et al.*, 2019).

Na Índia, há estudos que apontam um foco limitado quanto à utilização dos RCD reciclados na forma de agregados, sendo que as normas do país não permitem a utilização de agregados reciclados (AR) na confecção do concreto para nenhum fim. Além disso, não há dados relativos ao quantitativo de RCD que são encaminhados para a reciclagem, o que dificulta as projeções para possíveis usos dos AR no país e

sustenta a disposição dos RCD em aterros (CENTRE FOR SCIENCE AND ENVIRONMENT INDIA, 2014).

Nos Estados Unidos da América, em 2015 a Agência de Proteção Ambiental, USEPA, apresentou em seu relatório que a maior parte dos RCD advém do concreto de cimento Portland (67%) variando de 348 a 352 milhões de toneladas seguido de concreto asfáltico (18%). Do total de RCD gerados, apenas 4,6% do total está relacionada a construção de novas edificações, e quase metade do quantitativo, cerca de 45,91% provém da demolição de pontes e estradas (USEPA, 2015). Apesar de haver muitos dados sobre o quantitativo e composição dos RCD nos EUA, dados referentes às taxas de reciclagem ainda não foram apresentados pelo órgão. Contudo, segundo Townsend *et al.* (2014), no ano de 2012 85% dos RCD foram reciclados na forma de agregado, tal fato culminou na economia de energia equivalente a 85 milhões de barris de petróleo.

Na Europa a geração de RCD corresponde a um terço do volume total de resíduos produzidos, variando enormemente de um país membro para outro, sendo distintas também as taxas de reciclagem. Como ilustração, França e Alemanha possuem quantidades de geração de RCD similares, contudo, a França possui uma taxa de reciclagem de 45,11% (CALVO *et al.*, 2014), enquanto a taxa de recuperação dos RCD na Alemanha ultrapassa os 80% (LI *et al.* 2013; BRAVO, *et al.* 2015). Em 2016 a União Europeia elaborou um Protocolo de Resíduos de Construção e Demolição da EU, que possuía como meta para 2020 aumentar as taxas de reciclagem dos RCD para 70% em todos estados membros, contudo, em 2010 a taxa de reciclagem de RCD na EU era de cerca de 55% (MERINO *et al.*, 2010).

A Oceania também possui medidas que visam incentivar a reciclagem dos RCD. Na Nova Zelândia em 2008 o governo aumentou o imposto para a destinação de resíduos para aterro sanitário, por meio do aumento das taxas para disposição em aterro (FARRELLY e TUCKER, 2014). Segundo Anthony (2015), 20% dos RCD eram destinados a aterros sanitários, e os 80% restantes iam para aterros de inertes, assim, o dinheiro arrecadado com as taxas mais elevadas foram direcionados para a construção de usinas de reciclagem de RCD.

De acordo com o levantamento realizado por Akhtar e Sarmah (2018), Brasil e México categorizam os RCD em classes de forma semelhante, com a exceção de que no Brasil especifica a Classe D para os RCD Perigosos. Além disso, apesar de ambos países possuírem legislações sobre reciclagens de resíduos, somente o México possui metas de reciclagem dos RCD.

3.3 Geração de RCD no Brasil

A construção civil além de ser uma atividade ancestral e compor um dos setores industriais de qualquer país (PEREIRA e VIEIRA, 2013), possui uma significativa importância econômica e social no Brasil, tendo representado, em 2020, 5,9% do Produto Interno Bruto (PIB) do país. Além disso, a cadeia produtiva da construção civil foi responsável pela geração de 692.220 empregos, incluindo funcionários com e sem carteira de trabalho, trabalhadores por conta própria e proprietários (ABRAMAT, 2021).

Contudo, a atividade gera resíduos desde a extração de matéria-prima, passando pela produção e transporte de materiais, concepção de projetos, construção (execução do projeto), práticas de uso e manutenção, até a etapa de demolição. Ademais, todas as etapas da cadeia produtiva envolvem a exploração de recursos ambientais e econômicos, apresentando impactos sociais e ambientais, ambos diretos e indiretos, abrangendo cidadãos, empresas e órgãos governamentais (AGOPYAN e JOHN, 2011).

A geração dos RCD está relacionada à falta de padronização dos elementos construtivos; baixa qualidade e pouco detalhamento técnico dos projetos e inexistência de gestão adequada na aquisição, transporte, estocagem, manuseio e qualidade dos materiais, bem como falta de planejamento para execução da obra (LEITE, 2001; NAGAPAN *et al.*, 2013). Contudo, é possível reduzir os índices de perdas e geração de RCD por meio de políticas de apoio e ferramentas relacionadas à prevenção de geração de resíduos como boas práticas no canteiro de obras, além do reaproveitamento do RCD na própria obra promovendo a economia circular (DELOITTE, 2017).

No Brasil, não há dados oficiais com quantitativos de geração de RCD, apenas sobre a quantidade coletada pelos serviços públicos de limpeza urbana de alguns municípios. Segundo o Panorama Anual de Resíduos Sólidos no Brasil da ABRELPE, em 2020 foram coletados aproximadamente 47 milhões de toneladas de RCD, o que gera um índice de 221,2 kg por habitante/ano. Dentre todas as regiões do país, a região Sudeste contribui com 52% do total de RCD gerado no país. Relacionando o montante de Resíduos Sólidos Urbanos – RSU gerado em 2020, 82.477.300 ton, com o total de RCD coletado, encontra-se que os RCD correspondem a 57% do total de RSU. Este resultado confirma as estimativas sugeridas por Pinto (1999), de que a massa dos RCD pode representar de 50 a 70% dos RSU.

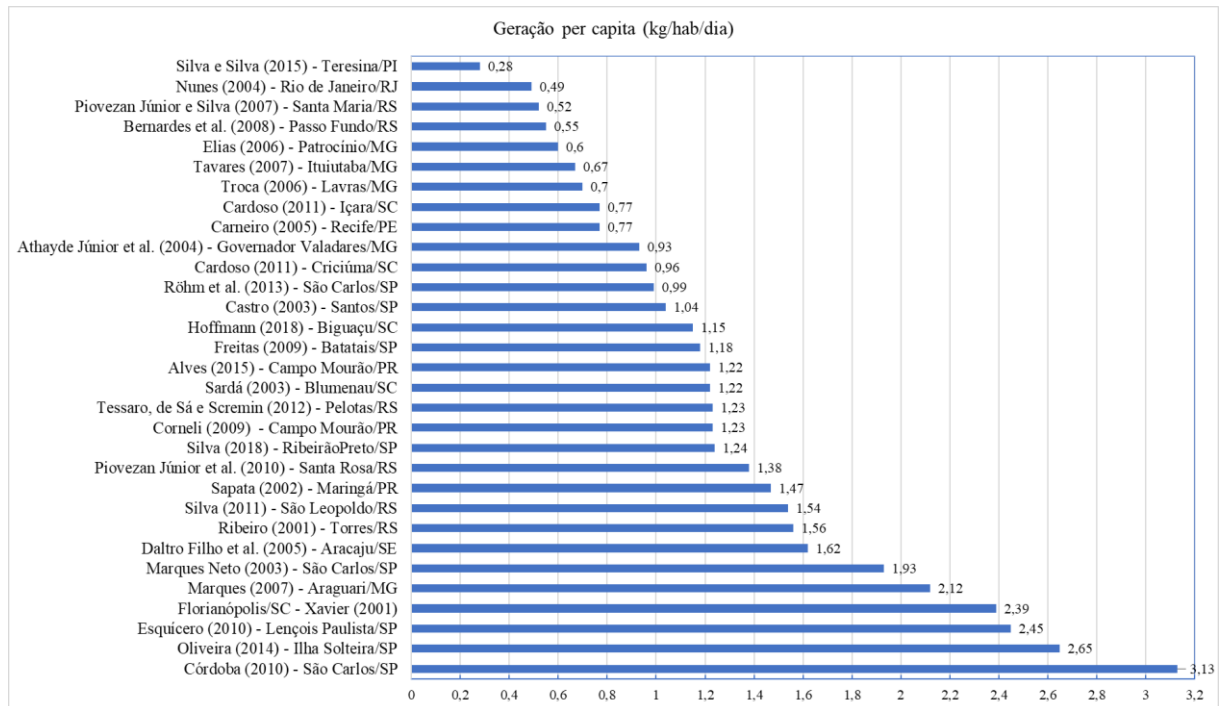
Durante as últimas duas décadas inúmeros trabalhos foram realizados em diversos municípios brasileiros buscando caracterizar e quantificar a geração dos RCD. Os resultados obtidos nas diferentes pesquisas evidenciam que os maiores quantitativos de geração são dos RCC Classe A, com percentuais próximos de 80% para todos os estudos apresentados (MATIAS, 2020). Contudo, as etapas e localização da obra influenciam diretamente na composição do RCD (BRAVO *et al.*, 2015). A variabilidade das estimativas de geração de RCD por diferentes fontes também esbarra na metodologia utilizada. Pesquisadores afirmam que os dados nacionais precisam ser validados por meio de uma metodologia única (LÚCIO, 2013).

As reformas, demolições e ampliações são responsáveis por 59% da massa gerada de RCD, seguido de edificações novas com contribuição de 41% (20% correspondem a residências novas e 21% a edificações acima de 300 m²). Apesar da maior geração estar nas reformas, é nesse segmento da cadeia produtiva de RCD que há uma menor reutilização e reciclagem dos materiais, bem como maior dificuldade de aquisição de dados (I&T INFORMAÇÕES E TÉCNICAS, 1991 apud PINTO; GONZÁLES, 2005; CHAHUD, 2007). Esses dados estão relacionados ao fato de que obras de reformas, ampliações e demolições são atividades que muitas vezes não necessitam de aprovação de órgãos municipais, assim, a sua estimativa a partir de alvarás fica subestimada (PINTO e GONZÁLES, 2005). Estudos sugerem taxas de geração 0,47 t de RCD por m² para reformas (MORALES, MENDES e ANGULO, 2006).

Matias (2020) em sua pesquisa fez o levantamento dos trabalhos que estimaram a geração per capita de RCD em alguns municípios brasileiros. A Figura 3.1 apresenta

a compilação dos dados. Percebe-se que as estimativas variam de 0,28 a 3,3 kg/hab./dia, possuindo média de 1,29 e mediana de 1,22 kg/hab./dia. As diferenças podem estar relacionadas à localização dos municípios, data da pesquisa, além do porte do município, situação econômica do país, bem como a metodologia empregada (RECESA, 2008; LÚCIO, 2013). Tais fatores podem explicar porque o município de São Carlos (SP) apresentou valores diferentes nas pesquisas.

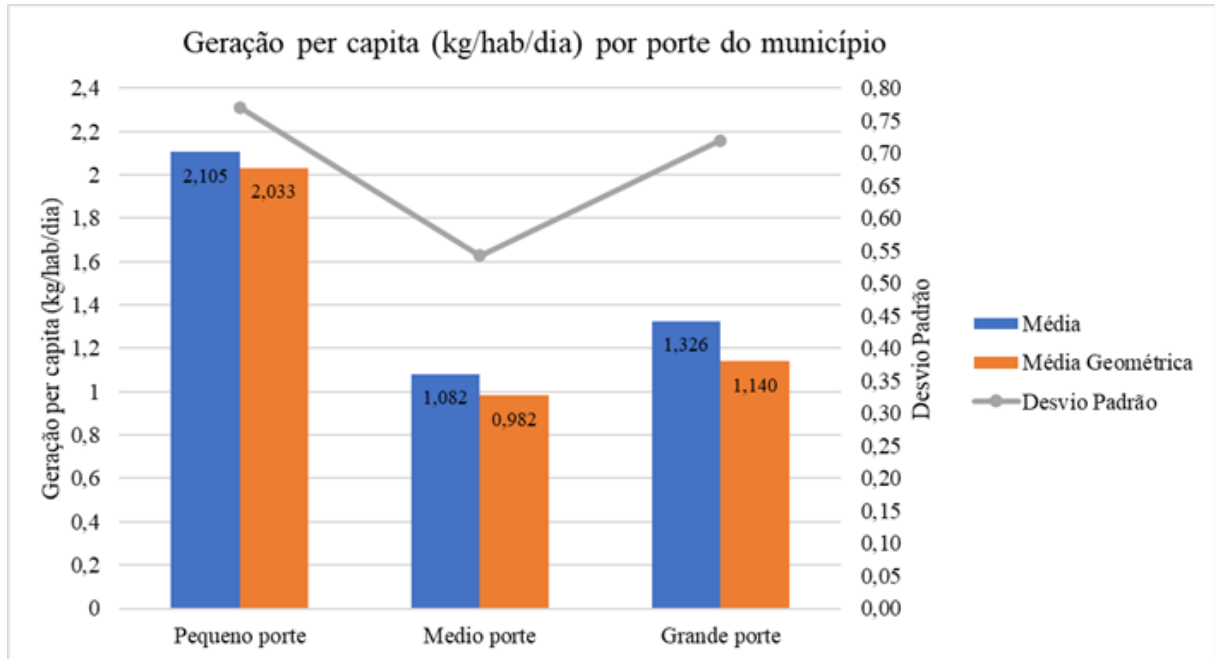
Figura 3.1 - Estimativas referentes à geração per capita de RCD em alguns municípios brasileiros



Fonte: Adaptado de MATIAS, 2020.

Analisando os resultados de geração per capita de RCD de cada município levantados por Matias (2020) com o porte da população no ano de publicação da pesquisa (Figura 3.2), percebe-se que os municípios de menor porte apresentaram a maior geração per capita de RCD e desvio padrão, enquanto que os de médio porte apresentaram a menor geração e menor desvio padrão. É importante ressaltar que não há uma metodologia única de quantificação dos RCD nas pesquisas, isso dificulta a comparação dos resultados.

Figura 3.2 - Geração per capita (kg/hab/dia) por porte do município



Fonte: Adaptado de MATIAS, 2020.

Em relação à destinação dos RCD, o SNIS-RS 2020 fez o levantamento sobre todas as unidades de processamento de RSU (incluindo unidades de processamento dos RCD) em 2.500 municípios, que correspondem a 54,5% dos municípios brasileiros. A investigação demonstrou que há 64 unidades de transbordo e triagem de RCC, 44 áreas de reciclagem de RCC e 78 aterros de RCC Classe A no país, totalizando 186 empreendimentos. Contudo, a ABRECON estimou a existência de 360 unidades de reciclagem de RCC Classe A em 2021 (ABRECON, 2022). A diferença entre as quantidades levantadas pelo SNIS e ABRECON deve-se provavelmente às diferenças nas metodologias utilizadas, assim autores sugerem que o processo metodológico dessas contabilizações seja unificado (NUNES e MAHLER, 2020).

Considerando que todos os municípios brasileiros geram RCD e foram levantados pelo SNIS apenas 186 empreendimentos, nota-se uma estrutura precária de empreendimentos que destinam esta tipologia de resíduo e evidencia que os RCD são enviados a aterros sanitários, encurtando a vida útil dos mesmos, ou são dispostos em locais inadequados (Banias *et al.*, 2011; NUNES e MAHLER, 2020; PAZ, LAFAYETTE e SOBRAL, 2018).

3.4 Impactos da disposição inadequada

O descarte inadequado dos RCD causa diversos impactos, como a poluição visual, da água e do solo, além de inundações causadas pelo estreitamento das margens dos rios, assim como o incentivo o depósito de outras tipologias de resíduos (IKAU *et al.*, 2016). Apesar dos RCD serem constituídos majoritariamente por material inerte, a deposição inadequada de RCD pode culminar no depósito de resíduos não inertes, como material orgânico, embalagens que podem reter água e até resíduos perigosos, proporcionando a poluição do solo e ameaça à saúde pública (ARAUJO e GÜNTHER, 2007).

Esse cenário, que comumente ocorre em terrenos baldios, fornece água, alimento e abrigo para animais, tornando-se nicho ecológico de espécies de vetores patogênicos que podem ser responsáveis pela transmissão de doenças respiratórias, epidérmicas e intestinais (SCHNEIDER, 2003; RECESA, 2008). Há o consenso de que a profilaxia é a melhor forma de evitar o aparecimento de doenças, e nessa situação a limpeza dessas áreas torna desfavorável a proliferação de vetores.

Dessa forma, os pontos continuados de disposição clandestina demandam um processo contínuo de limpeza corretiva pelas Prefeituras, pois após o recolhimento, em pouco tempo essa mesma área recebe novamente entulho, dificultando a erradicação dos vetores (RECESA, 2008; SÃO PAULO, 2014). Contudo, a limpeza constante não é suficiente, e trabalhos de conscientização da população do entorno dessas áreas juntamente com a limpeza corretiva, alcançam resultados mais duradouros (RECESA, 2008).

Estudos realizados em municípios de grande porte, como Belo Horizonte e São Paulo, concluíram que os custos de limpeza corretiva são superiores aos de manutenção dos Pontos de Entrega Voluntária (PEV) e também da disposição final dos RCD. Segundo Silva *et al.* (2006), os gastos da Superintendência de Limpeza Urbana de Belo Horizonte (SLU) com a coleta de RCD de locais clandestinos seriam de R\$12,00/m³, enquanto as despesas da coleta de RCD nas Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes (URPV) giravam em torno de R\$8,00/m³. Em São Paulo, no ano de 2012 foram retiradas cerca de 532 mil toneladas de RCD de 4.500 pontos de disposição

clandestina, resultando em gasto de R\$ 50,8 milhões aos cofres públicos municipais (SÃO PAULO, 2014).

3.5 Reciclagem de RCD

Historicamente, a reciclagem dos RCD coincide com o período da Segunda Guerra Mundial, quando alguns países europeus se depararam com grandes quantidades de escombros em função dos bombardeios, e também da necessidade imediata de reconstrução das cidades (PEREIRA e VIEIRA, 2013). Esses fatores, associados à escassez de recursos e da semelhança dos RCD com os agregados naturais, resultaram no desenvolvimento dos primeiros métodos de reciclagem de RCD (LEITE, 2001).

Tendo em vista que a cadeia produtiva da construção civil depende da exploração de recursos naturais e que estes são recursos não renováveis, a reciclagem é uma ação necessária para minimizar os impactos causados pela extração de matéria-prima, tornando o setor mais sustentável. Além disso, a reciclagem pode reduzir a quantidade de RCD destinada a aterros sanitários e aterros de reservação, bem como os transtornos advindos da disposição incorreta, promovendo a economia circular (MATIAS, 2020; LÚCIO, 2013).

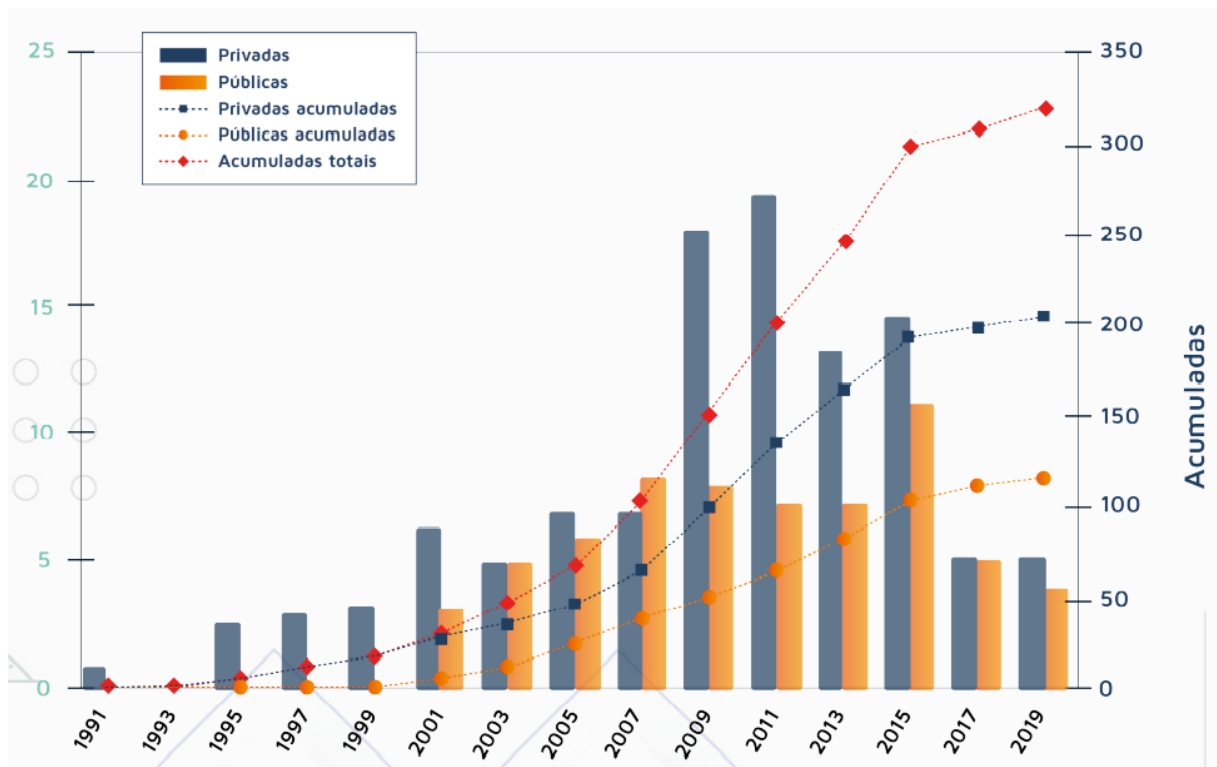
O processamento dos RCD na reciclagem baseia-se na britagem dos resíduos, podendo o equipamento ser móvel ou fixo (CÓRDOBA, 2010; ABRECON, 2022). A reciclagem e reutilização de RCD é consolidada em diversos países da UE, como Dinamarca, Estônia, Alemanha, Irlanda, Reino Unido e Holanda. Nesses países o índice de RCD reciclado ou reutilizado varia de 75% a 98%. Segundo Santos (2011), três fatores intensificaram a reciclagem dos resíduos: a escassez de matéria prima, a dificuldade de encontrar áreas para aterros e as medidas legais e econômicas.

No Brasil, a reciclagem dos RCD vem se dando de forma lenta. Embora alguns estudos demonstrem que em 1986 já existiam usinas de reciclagem de RCD no Brasil, sendo os municípios pioneiros na implantação de usinas de reciclagem Belo Horizonte, Ribeirão Preto, Londrina, São Paulo (CARNEIRO *et al.*, 2001 apud OLIVEIRA, 2020). O crescimento do número de usinas particulares foi intensificado após a Resolução CONAMA 307/2002 ter sido publicada, tendo em vista que a

Resolução estabelece que os geradores devem adotar como objetivo prioritário a não geração de resíduos e, em segundo plano, a redução, a reutilização, a reciclagem e a destinação final (ANGULO *et al.*, 2009).

Com o crescimento do número de usinas de reciclagem, e no sentido de fortalecê-lo, em 2011 foi criada a ABRECON - Associação Brasileira para a Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição. Um dos objetivos da ABRECON é levantar informações sobre a reciclagem dos RCD por meio das pesquisas setoriais que são feitas com os transportadores e destinadores de RCD, principalmente os recicladores. Na última pesquisa publicada foi apresentada uma série temporal da quantidade usinas de reciclagem no Brasil desde 1991 até 2019. Analisando a Figura 3.3 é possível notar que há um crescimento na quantidade de usinas instaladas, porém durante a primeira década esse crescimento se dá de forma suave, intensificando-se após a publicação da Resolução CONAMA 307/2002.

Figura 3.3 - Série temporal da implementação de usinas de reciclagem (privadas e públicas) de RCD no Brasil



Fonte: ABRECON, 2022.

De acordo com o Pesquisa Setorial de 2020 realizada pela associação, havia cerca de 360 usinas de reciclagem espalhadas pelo Brasil, sendo 320 usinas associadas e

destas 33% são públicas e 67% privadas. Do total, cerca de dois terços são usinas fixas, compostas normalmente por britadores de mandíbula, peneiras e esteiras, o restante correspondem a usinas móveis. Ressalta-se que há incertezas relacionadas ao real número de usinas em operação, uma vez que há um número significativo de usinas móveis, ou seja, os britadores operam somente durante o período da execução da obra.

As usinas de reciclagem concentram-se na região sudeste, principalmente por ser a região que gera a maior quantidade de RCD e por possuir municípios com maiores restrições legais quanto à destinação dos RCD (ABRECON, 2022). Também foi correlacionada a quantidade de usinas em função do porte do município, evidenciando que as usinas estão concentradas nos municípios com população de 50 a 400 mil habitantes (médio e grande porte segundo o IBGE). A associação sugere que para que seja viável economicamente a implantação de usinas de reciclagem em municípios de pequeno porte, a estruturação de consórcios públicos é a melhor alternativa.

O levantamento também detectou que as usinas não operam com sua capacidade máxima, a média é de que as estações de reciclagem operam com 48% da sua capacidade máxima instalada. A região Sudeste, possui capacidade para reciclar 70% dos RCD gerados, porém atualmente recicla apenas 25%, seguida da região Sul que tem capacidade para processar 30% dos RCD e recicla apenas 20%. A média de reciclagem de RCD no Brasil nos últimos anos oscilou entre 15 a 20%, havendo uma redução em função da crise econômica em 2016.

A diferença entre capacidade instalada e taxa de reciclagem está relacionada a problemas de funcionamento do maquinário, chuvas, dificuldade de aquisição de matéria prima adequada, além de legislações que obriguem os geradores a reciclar os RCD, bem como promover o consumo de agregados reciclados (ABRECON, 2022). É fundamental que se busque melhorar cada vez mais a qualidade dos RCD que chegam nas estações, ou seja, quanto maior for a excelência na triagem e separação na fonte dos RCD menor será quantidade de rejeito e maior a quantidade de agregado reciclado.

Segundo a pesquisa setorial, 75% das usinas receberam em 2020 até 20% de rejeitos. A elevada quantidade de rejeitos é consequência da não separação no momento de geração dos RCD ocasionando a contaminação dos RCC Classe A com as outras classes dos RCC e podendo inviabilizar o envio dos RCD para as estações de reciclagem (LÚCIO, 2013). Diversos autores evidenciam que processos mais aprimorados de triagem e tecnologias mais avançadas de demolição, como a demolição seletiva, diminuem de forma significativa o pré-processamento antes do envio ao britador, refletindo assim em um aumento da reciclagem desses resíduos (GÁLVEZ-MARTOS *et al.*, 2018; DAHLBO *et al.*, 2015; AKHTAR e SARMAH, 2018; HUANG *et al.*, 2018).

A própria Resolução CONAMA 307/2002 apresenta a definição de agregado reciclado (AR) e delimita algumas aplicações dos AR na aplicação em obras de edificação, de infraestrutura, em aterros sanitários ou outras obras de engenharia. De acordo com a ABRECON, em 2020 os AR foram utilizados em 26% pelas pessoas físicas provavelmente para a autoconstrução, 22% por órgãos públicos (que possui usos múltiplos), 20% por construtoras, 14% na pavimentação e 17% são para outros usos não mencionados (ABRECON, 2022).

Quanto ao preço de venda dos agregados, de forma geral os valores cobrados pelos agregados reciclados são inferiores aos dos agregados naturais, com variações dentro de uma unidade da federação, bem como região, sendo que em alguns estados o preço dos AR e AN chega a ser próximo. O valor médio de comercialização dos agregados reciclados graúdos em 2020 foi de R\$ 21,39/m³, enquanto para os agregados naturais foi de R\$ 69,13/m³. Quanto aos agregados miúdos, os AR foram comercializados por R\$ 21,69/m³, ao passo que os AN foi R\$ 71,79/m³. Esses dados evidenciam que a compra dos AR é atrativa economicamente, pois os preços são muito inferiores aos agregados naturais (ABRECON, 2022).

Apesar dos agregados reciclados reduzirem a quantidade de RCD na disposição final, estes não podem ser empregados para todas as finalidades que os agregados naturais são utilizados. Pelo fato de os RCD serem constituídos de resíduos heterogêneos, os agregados reciclados apresentam alterações em alguns parâmetros como porosidade, absorção e granulometria, além da diminuição na resistência à

compressão axial (SINDUSCON-MG, 2016). Dessa forma, os AR não podem ser utilizados na produção de concretos para fins estruturais, conforme estabelecido na norma NBR 15116 (ABNT, 2004). Todavia, existem países como Alemanha e Singapura que já utilizam os agregados reciclados em obras estruturais, principalmente na construção de edifícios há mais de uma década (SILVA, BRITO e DHIR, 2019).

É de suma importância que seja realizada uma caracterização, determinando a composição e propriedades físicas dos AR, a fim de compreender o comportamento do material e buscar o seu melhor desempenho, comprovando a segurança do uso para determinada finalidade (SILVA, BRITO e DHIR, 2019). Ademais, a utilização de AR na construção civil permite, para além de uma destinação sustentável, a possibilidade de uma mineração segura (CHEN *et al.*; 2016). É importante frisar que além dos benefícios da não destinação final dos RCD, a reciclagem também apresenta benefícios econômicos e sociais, como a geração de empregos. Em Belo Horizonte, a natureza social da gestão dos RCC, permitiu a criação de postos de trabalho e renda, principalmente para carroceiros e empregados da empresa Ecobloco (projeto de inclusão social destinado a pessoas com trajetória de rua) (RESENDE, 2016).

Em sua pesquisa Kulaif (2001 apud OLIVEIRA, 2020) indicou quais as principais aplicações dos diferentes AR produzidos nas estações de reciclagem de RCD em função da sua granulometria. A Tabela 3.2 apresenta o tipo de agregado e as possíveis aplicações.

Tabela 3.2 – Tipos de agregados reciclados e sua aplicação.

Tipo de agregado reciclado	Utilização
Rachão	Fabricação de muros de contenção e bases de pavimentos
Bica corrida	Produção de pavimentação asfáltica, lajotas, blocos, lajes e acabamentos em geral
Brita 0	Fabricação de concreto com inúmeras aplicações
Brita 1	Fabricação de concreto que exija maior resistência, principalmente em formas pesadas
Brita 2	Também denominada pedra de lastro que pode ser utilizada em bases para linhas férreas
Brita 3	Produto destinado a obras de drenagem
Areia Reciclada	Assentamento de blocos, tubulações em geral, tanques, podendo entrar na composição de concretos e asfalto

Fonte: KULAIF, 2002.

3.6 Usos e aplicações

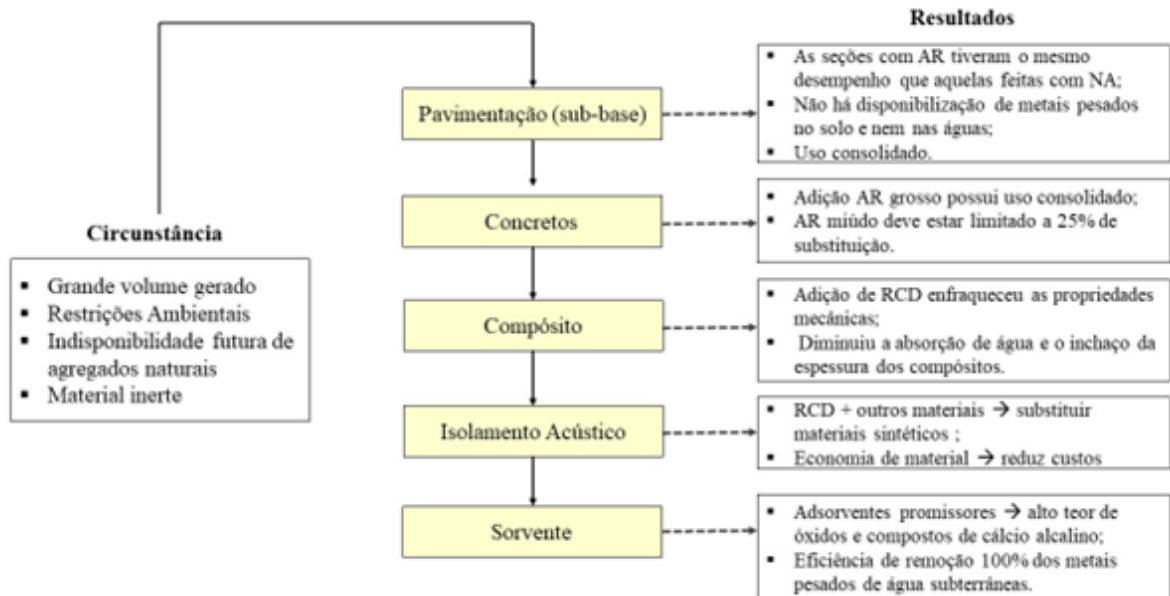
Durante a revisão de literatura da pesquisa, foi realizada uma análise bibliométrica sobre os principais usos e aplicações dos RCD nos últimos 6 anos utilizando a metodologia *ProKnow-C*. A técnica consiste em buscar palavras chave em determinada base de dados. Foram escolhidos os termos de busca “*construction and demolition waste*” ou “*demolition waste*” e “*use*” na plataforma *Web of Science*. Foram selecionados filtros que exigissem que os termos supracitados aparecem nos títulos dos artigos científicos publicados entre 15/03/2016 e 15/03/2022.

De posse do resultado, a metodologia de análise bibliométrica *ProKnow-C* foi aplicada, sendo utilizadas uma série de critérios para a seleção dos artigos. Inicialmente, os títulos de todos os trabalhos são lidos, em seguida, o número de citações de cada trabalho é classificado em ordem decrescente, sendo estabelecido um fator de representatividade. Também são realizadas duas análises em paralelo para definir se o trabalho é considerado relevante ou não, considerando o fator de representatividade e o ano de publicação do trabalho (LACERDA, ENSSLIN e ENSSLIN, 2012).

Após a leitura dos trabalhos selecionados foram encontradas diferentes aplicações para os RCD, que serão discutidas a seguir, sendo algumas consolidadas e outras inovadoras. Também foi verificado que na análise bibliométrica foram selecionados artigos de revisão de literatura, proposição de norma técnica e também artigos com

aparato experimental robusto. Dessa forma, uma compilação das principais aplicações, resultados de caracterização e resultados encontrados pelos autores serão apresentados a seguir. As aplicações propostas pelos diferentes trabalhos selecionados são apresentadas no fluxograma representado pela Figura 3.4.

Figura 3.4 - Aplicações propostas pelos trabalhos analisados



Fonte: Dados da pesquisa.

3.6.1 Pavimentação

Dentre as cinco aplicações encontradas para os RCD, a utilização do resíduo na pavimentação, principalmente como base e sub-base, já possui linhas de pesquisa desde o fim do século 20 (SILVA, BRITO e DHIR, 2019). Os resultados dos trabalhos evidenciam que o desempenho mecânico dos pavimentos, como a deflexão e índice de rugosidade, quando utilizados AR na construção de pavimentos, é próximo ou equivalente à construção convencional (LEE *et al.*, 2011 apud HO *et al.*, 2008). Também foi apontado que as propriedades auto cimentícias do AR ocasionaram um aumento da capacidade de carga da rodovia (SILVA, BRITO e DHIR, 2019 apud ETN, 2000). Além disso, a economia da utilização de AR também foi objeto de estudo. Segundo WRAP (2004), a substituição de 35% de AR ofereceu uma economia de £0,50/m² quando comparado ao NA, uma vez que os custos com a aquisição e transporte dos agregados é reduzido ((SILVA, BRITO e DHIR, 2019 apud WRAP, 2005).

De forma geral, essa aplicação tem se mostrado viável econômica e ambientalmente (LI *et al.*, 2020). Por esse motivo, as pesquisas atuais com essa aplicação visam responder a outros questionamentos, como o risco de disponibilização de metais pesados presentes nos AR no solo e em águas superficiais e subterrâneas (CHEN e ZHOU, 2019); qual a influência do comportamento da estrutura quando são utilizadas diferentes proporções de três tipologias de RCD (concreto, tijolo e argamassa) (LI *et al.*, 2020); bem como qual o desempenho em outras aplicações viárias que possuem menor intensidade de tráfego pesado, como estradas urbanas, ciclovias, estacionamentos e calçada de pedestres (ZUAZO *et al.*, 2020).

3.6.2 Confeção de concretos

A utilização de agregados reciclados (AR) na produção de concretos também já é utilizada em larga escala em locais como Alemanha, Hong Kong, Singapura e Reino Unido, sendo que a fração de substituição do AR pelo agregado natural (AN) pode variar de 20 a 100% (SILVA; BRITO e DHIR, 2019). Segundo Sadati e Khayat (2016), a substituição de até 40% de AR resultou na diminuição em 12% da resistência à compressão do concreto, ou seja, o desempenho mecânico do concreto estrutural foi afetado, contudo estudos que utilizaram até 20% de substituição de AR grosso, atestaram que não houve diferenças significativas no desempenho do concreto (POON e CHAN, 2007). Outra consequência da utilização de AR na preparação do concreto é o aumento do consumo de água, pelo fato de os AR possuírem maior porosidade e conseqüentemente absorverem mais água que os AN ((SILVA, BRITO e DHIR, 2014). Na tentativa de evitar adicionar mais água à mistura, Ho *et al.* (2015) compensaram essa absorção usando aditivos redutores de água, e como resultado obtiveram misturas com desempenho mecânico e durabilidade equivalentes ao do concreto controle.

Com a comprovação da utilização segura dos AR na confeção de concretos, linhas de pesquisa que objetivam encontrar lacunas nesse tipo de aplicação foram desenvolvidas nos últimos cinco anos. Algumas objetivaram desenvolver tecnologias de classificação para melhorar a qualidade do AR (WHITTAKER, 2019); além da produção de materiais alcalinos ativados a partir da mistura de resíduos de concreto, cerâmica e argamassa (SALAZAR, SAAVEDRA e GUTIÉRREZ, 2020), e também desenvolver uma norma técnica para a utilização de AR miúdos na produção de

concreto, sendo estabelecido por Bravo *et al.* (2020) que a substituição dos AR para taxas de incorporação de até 25% não gera alterações no desempenho do concreto.

3.6.3 Novas aplicações

De forma mais recente, linhas de pesquisa utilizando RCD, mais especificamente a fração cinza desses materiais, como sorventes para diferentes contaminantes foram levantadas na bibliometria. Por possuírem elevado teor de óxidos e compostos de cálcio alcalino na sua composição química, os RCD apresentam potencial para serem usados como adsorventes (REIS *et al.*, 2019). Diferentes contaminantes foram alvo das pesquisas. Na primeira, o RCD foi utilizado como adsorvente na remoção de fosfato presentes em efluentes de ETE's, apresentando resultados satisfatórios, sendo proposto pelos autores que após seu uso, o resíduo RCD + fosfato pudesse ser aplicado no solo com fertilizantes (REIS *et al.*, 2019). De forma similar, Ali e Ali (2020), utilizaram os RCD como sorvente numa barreira reativa permeável de bancada para avaliar a remoção de metais pesados em água subterrânea contaminada. Os resultados foram muito promissores, apresentando eficiência de remoção de 100%. Contudo, o tempo de execução do aparato experimental de bancada não foi suficiente para traçar a curva de ruptura. O ponto de ruptura corresponde ao limite de capacidade de adsorção com maior remoção do poluente (adsorvato), o que pode causar resultados de remoção superestimados (MCCABE, SMITH e HARRIOT, 2005).

Outras aplicações do RCD com outros resíduos também foram encontradas. Uma delas apresentava a utilização de resíduos sólidos urbanos (RSU), resíduos agrícolas, industriais e os RCD para a confecção de blocos leves e painéis de isolamento acústico e térmico. Os resultados foram promissores, entretanto estudos sobre a otimização na fabricação dos blocos devem ser realizados (MASSOUDINEJAD *et al.*, 2019). Uma outra fração dos RCD como madeira, filmes plásticos, papelão e frações de lã mineral foram utilizados para a fabricação de compósitos do tipo madeira-plástico. Porém, a utilização dos resíduos como insumo prejudicou o desempenho mecânico do compósito (HYVARINEN, RONKANEN e KARKI, 2019).

3.7 Estruturas de contenção do tipo gabião

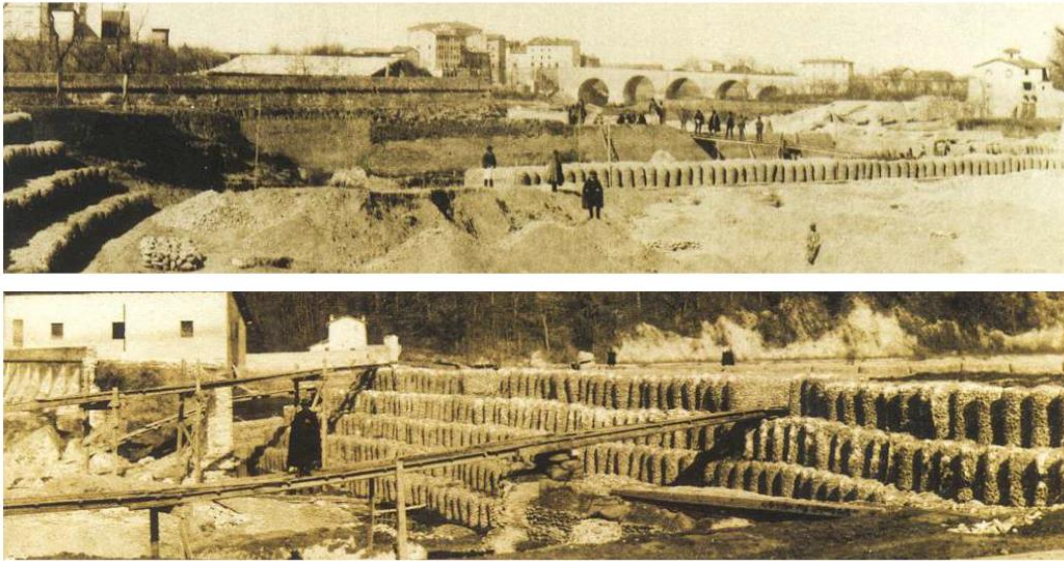
A estrutura de gravidade de contenção em gabião pode ser definida como um muro flexível, formado por elementos metálicos produzido com tela de malha hexagonal de dupla torção, preenchidos por material pétreo, de granulometria adequada. São estruturas utilizadas na solução de problemas geotécnicos, hidráulicos e no controle de erosão (BARROS, 2005).

3.7.1 História

Historicamente, a utilização de cestos ou gaiolas cheios de pedra pelos egípcios, com a finalidade de proteger a margem dos rios, data de 7000 anos. Há também indícios do uso da técnica de pedras entrelaçadas com fibras vegetais, na forma de diques para proteger uma região de enchentes no Peru, com cerca de 2627 anos, bem como na construção de fundações de edifícios na Europa, ao longo da Idade Média. O uso das “cestas” para confinar algum material como pedras e solo foi utilizado em diversas situações no mundo, seja para suportar a pressão da água ou como fundações e barricadas (SANTOS JUNIOR, 2018) (MACAFERRI, 2017). Contudo, a etimologia da palavra “gabião” advém da Itália.

No século XIX, a confecção artesanal de gaiolas de ferro que objetivavam conter trechos de estradas que poderiam desmoronar, foi intitulada de “*gabbione*”, que pode ser traduzido como o aumentativo de gaiola em italiano, na língua portuguesa conhecido como gabião. Foi em 1853 que os gabiões começaram a ser utilizados como estruturas de contenção de grande relevância, como a obra de engenharia utilizada na contenção das margens do Rio Reno, no norte da Itália, depois do rio transbordar (SANTOS JUNIOR, 2018). A Figura 3.5 exibe a magnitude da obra, que, até os dias atuais, apresenta-se funcional. Tendo em vista o êxito da obra, em 1913 foi emitida a patente do gabião pelo *Ufficio Federale della Proprietà intellettuale della Confederazione Svizzera*.

Figura 3.5 - Contenção das margens do Rio Reno, após o seu transbordamento, em Casalecchio, Itália



Fonte: MACAFERRI, 2017

Depois da Primeira Guerra Mundial, a produção do muro de gabião passou por aprimoramentos tecnológicos, o mais significativo foi mudança do formato da malha, que deixou de ter formato romboidal e passou a ser hexagonal em dupla torção. Além disso, o gabião ganhou um novo formato, a configuração do tipo caixa. Tal conformação facilitou a estocagem e transporte do material, além de tornar a técnica mais versátil. Após a Segunda Guerra Mundial, o gabião tornou-se uma referência em obras relacionadas à estabilização fluvial, e durante a década de 1950 são criados gabiões com os arames revestidos de plástico PVC, para proteger o aço da abrasão do contato com a água e locais poluídos (SANTOS JUNIOR, 2018).

Uma década depois, em 1970, surgiram os gabiões em malha eletrosoldada ou malha rígida. A malha metálica do gabião foi confeccionada em formato retangular, soldando os pontos de contato, apresentando uma maior rigidez de face e maior fraqueza nos pontos de contato e nos nós da solda. Desde então, o uso dos gabiões se tornou mais frequente, sendo que no Brasil o uso das estruturas de gabião iniciou na década de 70 (BARROS, 2005).

3.7.2 Características

Estruturas que utilizam o peso próprio para manter sua estabilidade frente ao empuxo exercido pelo solo são denominadas de estruturas à gravidade. Os gabiões são estruturas de contenção flexíveis, compostos por materiais deformáveis, que se

adaptam às acomodações e movimentos do terreno, sem perder sua estabilidade. Sua maior qualidade está na simplicidade de execução, uma vez que muitas vezes não é necessária mão de obra especializada (BARROS, 2005).

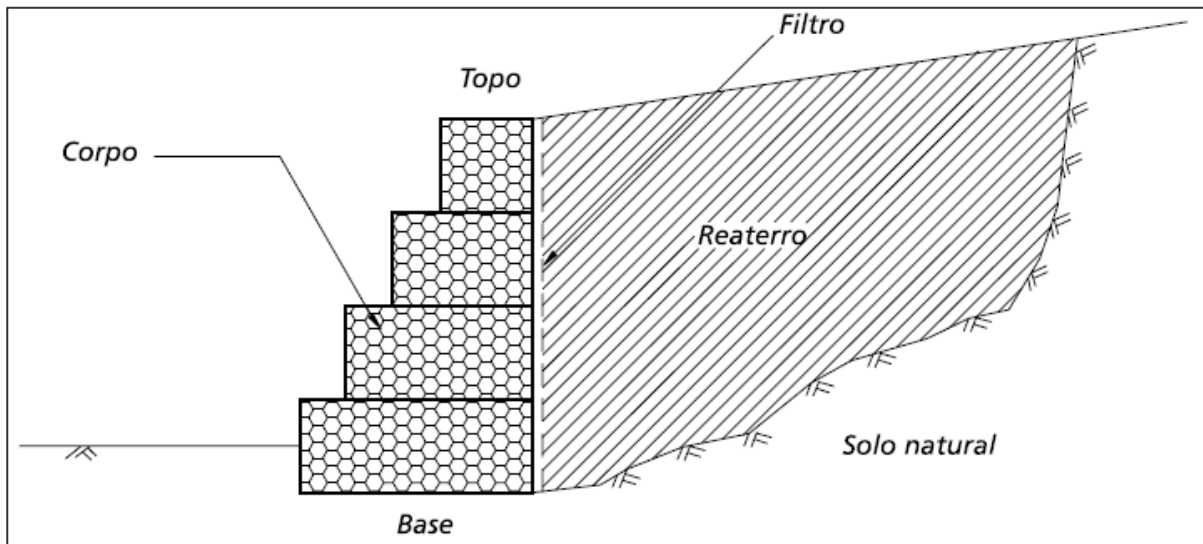
A Figura 3.6 exibe a representação de um muro de gabião. Cada unidade é firmemente unida a outra por meio de arames, que são costurados na estrutura das caixas, objetivando formar uma estrutura monolítica. Os elementos metálicos utilizados tanto da malha quanto dos arames de costura, bem como o material de enchimento, devem possuir as características apresentadas por Barros (2005):

- Elevada resistência mecânica;
- Elevada resistência à corrosão;
- Boa flexibilidade;
- Não se desfazer com facilidade.

No que se refere a malha, o autor afirma que a malha que melhor atende a tais requisitos é a hexagonal e de dupla torção, com arames de baixo teor de carbono revestidos com liga de zinco 95%, alumínio 5% e terras raras (Zn 5Al MM = Galfan®) (BARROS, 2005). Há também empresas que produzem malhas para os gabiões em material plástico, utilizando PEAD – Polietileno de Alta Densidade, contudo tal utilização não é uma prática comumente usada. Além disso, pesquisas referentes à aplicação desses materiais nesse tipo de estrutura não foram encontradas.

Da perspectiva técnica e econômica, as estruturas de gabião possuem um conjunto de elementos que as tornam funcionais, se destacando das demais estruturas de contenção. As estruturas são monolíticas, isto é, após a união dos gabiões o resultado é um bloco homogêneo resistente. Apesar da malha parecer ser uma estrutura frágil, as telas metálicas possuem elevada resistência mecânica e vida útil. A malha promove a distribuição uniforme dos esforços, possuindo resistência a tração. Para aumentar a durabilidade dos arames, é utilizada uma liga que reveste os mesmos, e no caso de ambientes quimicamente agressivos, como regiões litorâneas, é necessário o emprego de materiais plásticos na liga de revestimento, tornando o arame inerte (BARROS, 2005).

Figura 3.6 - Representação de um muro de gabião



Fonte: BARROS, 2005

Além disso, a armadura metálica dos gabiões possui como função manter o material pétreo dentro da estrutura, bem como suportar e distribuir os esforços à tração que atuam no muro. Pelo fato de a estrutura sofrer adaptações em função de acomodações e movimentos de terra, sem perder sua estabilidade, os gabiões são caracterizados como estruturas flexíveis. Devido a essa propriedade, o muro de gabião dispensa fundações profundas, permitindo que a estrutura se deforme antes de entrar em colapso, assim, a detecção de problemas antecipadamente é factível, possibilitando ações de recuperação (BARROS, 2005).

Considerando que a maior causa de instabilidade em estruturas de contenção é o acúmulo indevido de água, causado por um sistema de drenagem ineficaz, o muro de gabião apresenta um diferencial nesse aspecto, pelo fato destas estruturas serem autodrenantes. Devido a sua estrutura permeável, a própria obra alivia o empuxo hidrostático sobre a estrutura. Ademais, sua composição não interfere nas linhas de fluxo, por isso a estrutura é muito utilizada em obras de proteção hidráulica, causando o mínimo impacto ambiental na fauna e flora aquáticas locais. O muro de gabião é bastante utilizado em projetos que necessitam de harmonização paisagística, tornando a obra visualmente agradável (BARROS, 2005).

Por apresentarem facilidade construtiva e não exigirem mão de obra especializada, essas estruturas podem ser construídas em diversas condições. Podendo ser realizada com ou sem equipamento mecânico, em locais de difícil acesso, e trazendo

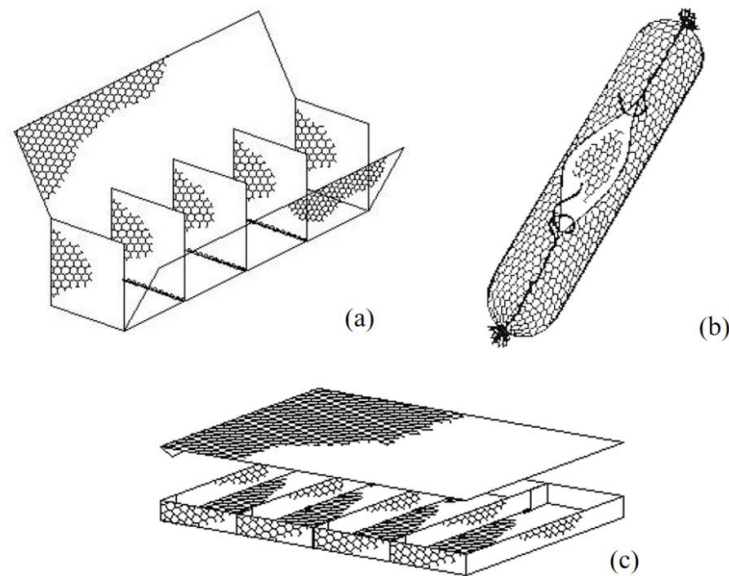
diversos benefícios para comunidades locais, pois a estrutura requer basicamente a malha, pedras e tábuas de madeira. Além disso, o enchimento pode ser realizado em mutirão ou no caso de enchimento mecânico com maquinário de obras de escavação e terraplanagem. Portanto, a sua versatilidade e facilidade construtiva a torna uma obra de baixo custo direto e indireto (BARROS, 2005).

Cálculos e análises de estabilidade que objetivam comprovar a segurança de utilização da estrutura de contenção são fundamentais. As análises de estabilidade para estruturas de contenção do tipo gabião, partem do princípio de que o muro é um bloco inteiriço (comportamento monolítico) que reage às forças externas aplicadas sobre ele. Como mencionado anteriormente, o gabião é uma estrutura dita flexível, que tem a capacidade de se acomodar ao absorver as forças externas. Essa característica, está relacionada ao tipo de material de enchimento utilizado, sendo que a análise contra a ruptura interna é função do material, porém há uma significativa participação da malha metálica. O desenvolvimento deste trabalho está centrado no desempenho do material de enchimento.

3.7.3 Tipos de Gabião

As estruturas de contenção à gravidade podem ser utilizadas nas seguintes conformações, do tipo caixa, do tipo saco e colchão do tipo Reno®, como apresentado na Figura 3.7.

Figura 3.7 - Tipos de gabiões (a) Gabião tipo caixa, (b) Gabião tipo saco, (c) Gabião tipo colhão Reno

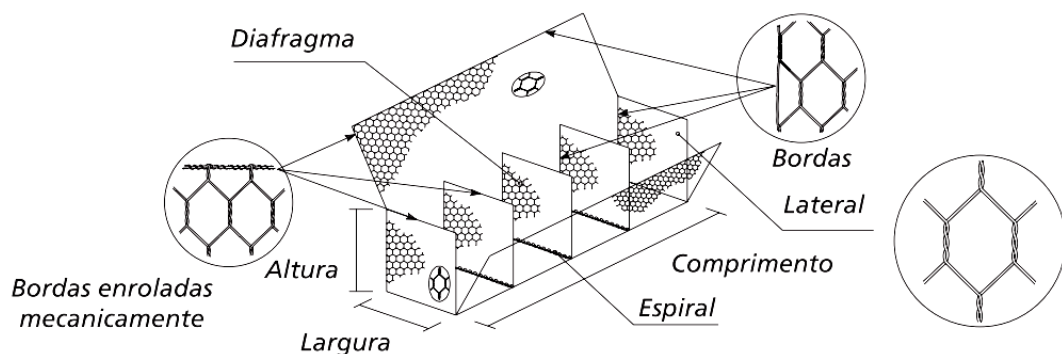


Fonte: Adaptado de BARROS, 2005

3.7.3.1 Gabião tipo caixa

O gabião tipo caixa consiste numa estrutura metálica na configuração de um paralelepípedo (caixa), que ao ser desdobrada, a malha forma um paralelepípedo com bases, tampa, paredes frontais e traseiras. Além desses elementos, que se assemelham a um paralelepípedo, internamente são inseridos diafragmas, que são basicamente recortes da malha hexagonal que dividem as partes do gabião, como apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Elementos do gabião tipo caixa



Fonte: BARROS, 2005

Depois de montar a malha (paralelepípedo) com o auxílio do arame de amarração e de um torquês, os módulos do gabião são amarrados, ainda vazios, aos gabiões

adjacentes. É recomendado a utilização de um tirfor ou um gabarito para manter a estética esperada antes do preenchimento. Em seguida, o gabião é preenchido com pedras, cujo diâmetro não deve ser inferior à menor dimensão da malha hexagonal. As dimensões dos gabiões tipo caixa são padronizadas, possuindo largura fixa de 1 metro, altura variando de 0,5 a 1 metro, e comprimento variando entre 1 a 5 metros (BARROS, 2005; CAMELO, 2019). Este tipo é muito utilizado em obras de contenção de erosões e contenção de taludes, sendo esta aplicação o foco deste trabalho.

3.7.3.2 Gabião tipo saco

Os gabiões do tipo saco, são estruturas versáteis, com estrutura metálica em formato cilíndrico, sendo que em cada borda apresenta um arame especial que passa alternadamente pela malha costurando a estrutura. A montagem e enchimento do gabião são realizados na obra, para posterior instalação, necessitando de equipamentos mecânicos, como o guindaste na última etapa. A etapa de enchimento não necessita de uma disposição criteriosa das pedras, nem da amarração entre os gabiões, como ocorre no gabião tipo caixa, contudo as pedras devem possuir dimensão superior a abertura da malha metálica. Possuem dimensões padronizadas de diâmetro de 0,65 metros e comprimento variando de 1 a 6 metros.

São muito utilizados em estruturas de contenção com presença de água ou sobre solos de baixa capacidade de suporte (BARROS, 2005). Como a primeira aplicação mencionada tem contato frequente com a água, que pode estar poluída ou não, a malha é confeccionada de forma que os arames são revestidos com material plástico a fim de evitar sua corrosão.

3.7.3.3 Gabião tipo colchão Reno®

Os gabiões do tipo colchão Reno®, também se apresentam na configuração de paralelepípedo, contudo são módulos de grande área e pequena espessura, sendo formados por uma base, uma tampa e diagramas. Após ser montado, os gabiões tipo colchão Reno® são costurados aos elementos adjacentes, ainda vazios, por fim são preenchidos com material pétreo de dimensão superior às da malha.

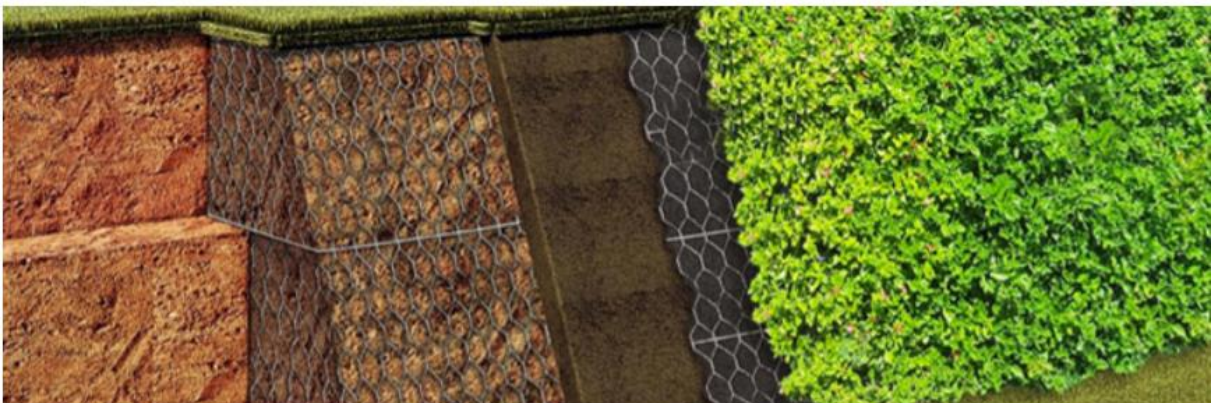
São estruturas apropriadas para obras de canaletas de drenagem, revestimento flexível de margens e fundo de curso d'água, entre outros usos, por esse motivo a

malha também é confeccionada de forma que os arames são revestidos com material plástico para evitar seu desgaste. As dimensões de altura do colchão Reno variam de 0,17 a 0,30 metros, largura fixa de 2 metros e comprimento variando de 3 a 6 metros.

3.7.3.4 Macsoil®

De forma mais recente, foi desenvolvido pela Maccaferri a solução MacSoil® para a recomposição de taludes e margens, por meio da construção de estruturas de contenção e revestimento frontal vegetado. A Figura 3.9 apresenta os elementos que constituem o MacSoil®, que de forma geral, apresenta uma forma prismática constituída pela malha hexagonal de dupla torção, preenchidas com solo vegetal, RCD ou qualquer outro material de elevado peso específico, contidas por um geocomposto, que evita a saída de material fino, fornecendo também um ambiente propício para o desenvolvimento vegetal.

Figura 3.9 - Composição do MacSoil®



Fonte: MACAFERRI, 2022

Assim como os gabiões tipo caixa, o MacSoil® também é interligado com o arame de costura aos módulos adjacentes e possui diafragmas internos. Quanto aos RCD, é recomendado que seja utilizada a fração cinza dos RCD, uma vez que o peso específico desses elementos se aproxima de agregados naturais (MACAFERRI, 2017). Por possibilitar a reinserção dos RCD no setor construtivo, o MacSoil® é considerado uma estrutura ecologicamente correta, de menor impacto ambiental, com integração ao meio ambiente devido à possibilidade de utilizar vegetação ornamental na face da estrutura (MACAFERRI, 2017; CAMELO, 2019).

3.8 Propriedades do material de enchimento

Segundo Barros (2005), o material de enchimento dos gabiões pode ser qualquer material pétreo, desde que este satisfaça as exigências técnicas, de durabilidade e funcionalidade estabelecidas para a obra. De forma complementar, Santos Júnior (2018) especifica que as partículas devem ter dimensões variadas (desde que não seja inferior à abertura da malha), resistência e mineralogia apropriadas, não devem conter poeira adesiva e não serem solúveis em água.

Preferencialmente, o material de enchimento deve possuir um elevado peso específico, uma vez que o gabião é uma estrutura de gravidade, e seu comportamento depende do peso específico do material, e conseqüentemente do peso da própria estrutura. São comumente usados pedras britadas e seixos rolados, contudo, quando estes materiais não são encontrados próximo à área de execução do gabião, outros materiais podem ser utilizados como “sacos preenchidos com areia e cimento, entulho, escória de alto-forno, blocos de cimento etc., mesmo que estas soluções possam ocasionar a redução das características do muro como, por exemplo, a flexibilidade e a permeabilidade (BARROS, 2005).

Há também os requisitos para o uso do material de enchimento que constam na Norma Rodoviária do Departamento Nacional de Estradas e Rodagens - DNER. Segundo esta, há condições específicas para a pedra de mão utilizada na estrutura de gabião como exposto no trecho a seguir (DNER, 1997).

“A pedra de mão utilizada deverá ser originária de rocha sã e estável, apresentando os mesmos requisitos qualitativos exigidos para a pedra destinada à confecção de concreto com granulometria uniforme. Excluem-se materiais friáveis e aconselha-se a utilização de material resistente e de elevado peso específico.”

De forma geral, o material pétreo deve ser constituído por elementos de tamanhos variados, desde que estes possuam dimensão superior à abertura da malha, sendo adequadas pedras que variam entre 1,5 e 2 vezes a dimensão “D” da malha da rede, incluindo poucas pedras alongadas e planas (BARROS, 2005; SANTOS JUNIOR, 2018). Caso opte-se por utilizar elementos de menor diâmetro, desde que não sejam inferiores ao da malha, obtém-se uma melhor distribuição do material, bem como

melhor distribuição de cargas atuantes, além de maior flexibilidade da estrutura (BARROS, 2005).

Além disso, pedras solúveis, friáveis e com pouca dureza não podem ser utilizadas como material de enchimento (BARROS, 2005). É fundamental que as rochas possuam angularidade, uma vez que essa característica possibilita um agrupamento e interligação das mesmas, o contato ponto a ponto entre as superfícies dos elementos deve ser mantido, para que haja transferência de carga de um elemento para outro, distribuindo assim as forças na estrutura (SANTOS JUNIOR, 2018). A Figura 3.10 exibe uma representação do contato dos elementos.

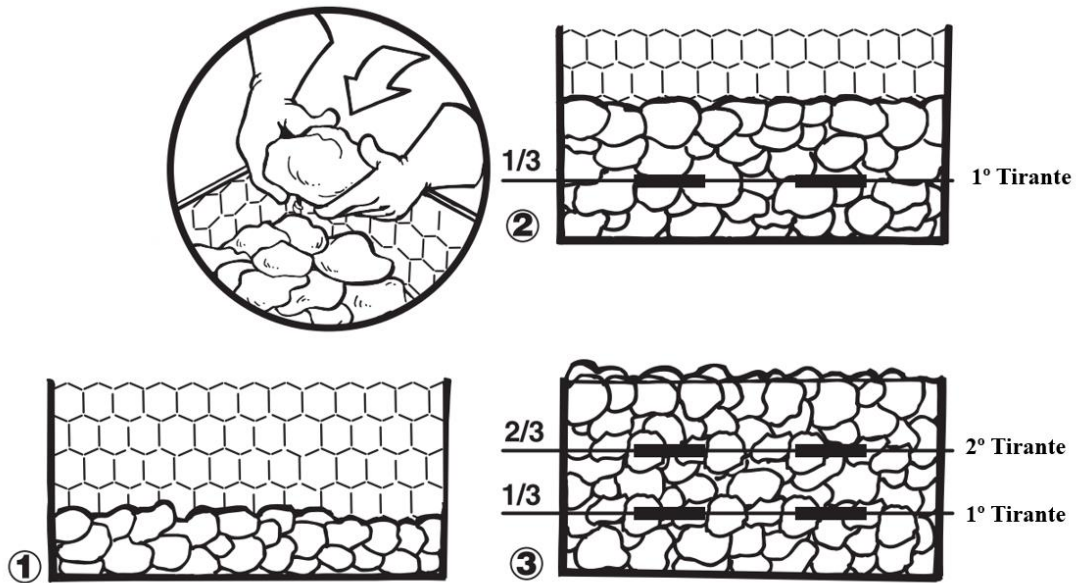
Figura 3.10 - Contato ponto a ponto das rochas



Fonte: SANTOS JUNIOR, 2018

O preenchimento do gabião deve ser realizado de tal forma que os elementos sejam dispostos minimizando o volume de vazios, com a porosidade da estrutura devendo estar entre 30% a 40%. O enchimento dos gabiões tipo caixa, foco deste trabalho, é realizado de duas formas, manualmente ou com o auxílio de equipamentos mecânicos. A acomodação das pedras é realizada até que um terço da altura do gabião seja alcançada, em seguida, são instalados na estrutura tirantes horizontais (arames tensores), estes são amarrados a duas torções da face frontal da estrutura. Depois, deve ser preenchido o outro terço da célula, e o procedimento anterior é repedido. Estas etapas estão representadas na Figura 3.11.

Figura 3.11 - Etapas de enchimento de um gabião do tipo caixa



Fonte: Adaptado de BARROS, 2005

Finalmente, o preenchimento do módulo termina quando a célula exceder a sua altura em cerca de 5 centímetros, a tampa é puxada sobre a caixa e o fechamento da célula é realizado manualmente por amarração de arame com o auxílio de um alicate ou torquês ao longo das bordas superiores (BARROS, 2005; SANTOS JUNIOR, 2018).

4 MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Descrição dos resíduos de construção e demolição utilizados

Os RCD utilizados para este trabalho são os provenientes das Estações de Reciclagem de Entulho (ERE) da Superintendência de Limpeza Urbana (SLU) da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH), MG, especificamente da usina da BR-040, localizada na Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (CTRS) da BR-040. Atualmente, nessa unidade são recebidos entulhos provenientes das Unidades de Recebimento de Pequenos Volumes (URPV), contudo, são recebidos somente resíduos inertes minimamente segregados, ou seja, são aceitos na ERE BR-040 os RCC Classe A, conforme classificação da Resolução CONAMA 307/2002.

A Estação de Reciclagem de Entulho da BR-040 foi inaugurada em 08 de junho de 2006, porém na data a ERE Pampulha já operava desde 1996 (PBH, 2017). O município de Belo Horizonte já chegou a possuir 3 ERES, a ERE Pampulha, ERE BR-040 e a ERE Estoril, porém a última foi desativada em 2013 e nos dias de hoje operam

apenas a ERE BR-040 com RCD proveniente das URPV's e a ERE Pampulha, com RCD resultantes de entregas voluntárias de grandes ou pequenos geradores.

A ERE BR-040 produz Agregados Reciclados (AR) de diferentes granulometrias, são eles:

- Bica corrida, finos ($F < 3/16''$);
- Rachão ($F < 4,5''$);
- Brita 0 ($3/16'' < F < 3/8''$);
- Brita 1 ($3/8'' < F < 3/4''$);
- Areia (pó de brita) ($F < 3/8''$).

Segundo informações prestadas pela SLU, no presente, os AR são utilizados exclusivamente pela PBH, mais especificamente pela Superintendência de Desenvolvimento da Capital (SUDECAP) e Companhia Urbanizadora e de Habitação de Belo Horizonte (URBEL) para a construção de base e sub-base de pavimentação de vias, drenos e camadas drenantes. Destaca-se que os AR também podem ser utilizados em reaterro de valas de instalações subterrâneas, como redes de saneamento básico (esgoto e água), em gabiões Terramesh® (formados pela associação de um reforço metálico em malha hexagonal de dupla torção, associado a um paramento frontal em gabiões caixa) (MACAFERRI, 2022) e como material de enchimento de rip-rap.

No passado o excedente dos AR que não eram utilizados pela PBH eram comercializados para empresas privadas, principalmente para empreendimentos que prestam serviço para a por extenso (COPASA). O valor dos AR é regulamentado conforme Tabela de Preços Públicos de Serviços Extraordinários de Limpeza da Superintendência de Limpeza Urbana, Decreto Nº 16.217, de 26 de janeiro de 2016, publicada no Diário Oficial do Município (BELO HORIZONTE, [2016]). A partir de 2017 os preços foram reajustados conforme proposta de Centralização de Receitas, com a emissão dos boletos, por meio dos dispositivos legais que divulgam o percentual de atualização aplicável aos tributos, multas e demais valores fixados na legislação municipal. Atualmente o preço dos AR é de R\$ 45,99/m³ ou R\$ 28,74/ton. para bica corrida e rachão, e de R\$ 100,02/m³ ou R\$ 62,52/ton, para areia, brita 0 e brita 1.

4.2 Coleta do material

O material que chega na Usina é inicialmente depositado em grandes pilhas e em seguida com o auxílio de uma retroescavadeira, os RCD são dispostos em leiras para serem segregados manualmente por funcionários da SLU. Esta etapa visa remover resquícios de outras materiais que podem danificar o britador, principalmente embalagens plásticas e de papel, vigas metálicas e fragmentos de tubulações. Em seguida o material já segregado é encaminhado para o britador (Figura 4.1). Este equipamento brita os RCD em diferentes granulometrias, que variam desde a bica corrida - material sem graduação definida obtido diretamente do britador, sem separação por peneiramento - até areia.

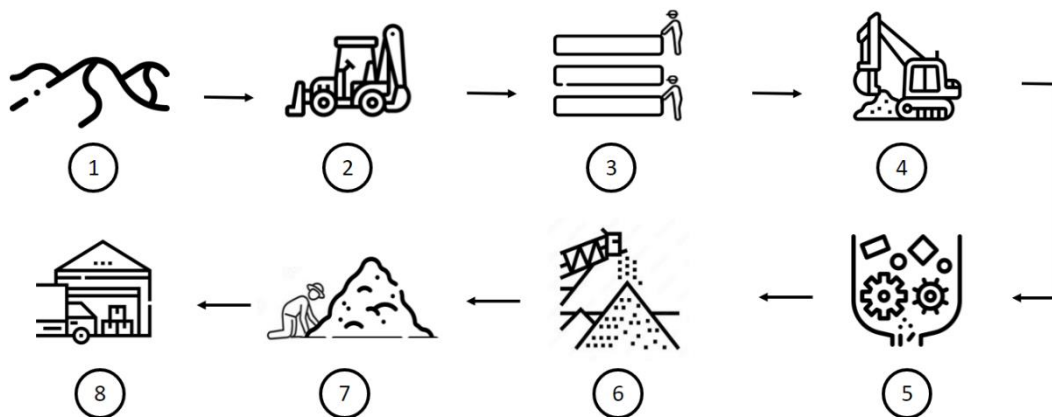
Figura 4.1 - Britador da ERE BR 040



Dentre os RCD reciclados produzidos pelo britador, o escolhido para o desenvolvimento deste trabalho foi o rachão, devido à sua maior dimensão, visto que como destacado anteriormente, o material de enchimento do muro de gabião não deve ser inferior à menor abertura da malha hexagonal. Foram realizadas quatro coletas nas datas 17/02/2022, 17/03/2022, 15/06/2022 e 20/07/2022. É importante destacar que na data e nas semanas anteriores a primeira coleta, estava sendo britado apenas bica corrida e rachão, em função do tempo chuvoso, que dificulta e danifica a parte do maquinário responsável pela cominuição e peneiramento dos RCD em AR. Nos dias que antecederam a primeira coleta, entre 09/02/2022 a 16/02/2022, foi registrado um volume pluviométrico acumulado de 123,4 mm, dessa forma as amostras da primeira coleta estavam úmidas (INMET,2022).

Finalmente, para a realização dos ensaios foi realizada uma catação manual do rachão, de forma a representar todos os diferentes materiais que compõe os agregados reciclados, sendo retirada apenas a fração que possuía dimensão menor que 8 cm, em função da dimensão da malha do gabião. Todo o processo, desde a chegada do material até a seleção das amostras podem ser observados no fluxograma da Figura 4.2 A amostra foi armazenada em recipientes plásticos de 30 litros e 50 litros e em seguida transportada até a Escola de Engenharia da UFMG.

Figura 4.2 - Fluxograma dos RCD dentro da ERE-BR 040



1- RCD provenientes do descarregamento de caçambas e entregas voluntárias em pequenos veículos; 2- retroescavadeira para concepção das leiras; 3- triagem manual nas leiras para retirada de componentes indesejados; 4- RCD triado é transportado com auxílio de retroescavadeira; 5- RCD é inserido no britador; 6- pilhas de RCD são formadas em função da granulometria britada; 7- e na base da pilha do rachão são selecionados manualmente os agregados 8- agregados selecionados são armazenados e transportados até o laboratório.

4.3 Preparação da amostra

Como indicado anteriormente, na data anterior a primeira coleta (17/02/2022) foi registrada precipitação em todo o município de Belo Horizonte, inclusive na área da CTRS da BR 040, dessa forma as amostras apresentavam uma quantidade significativa de água em função das chuvas. Idealmente, a coleta deveria ser realizada com um intervalo de no mínimo 3 dias seguidos sem chuva para que as condições naturais de umidade dos agregados fossem mantidas. Contudo, devido ao curto prazo e as condições meteorológicas de janeiro e fevereiro não foi possível fazer todas as coletas em tais condições. Isto posto, foi necessário secar as amostras em estufa por 24 horas a 105°C para que os ensaios fossem iniciados e fosse mantida a mesma condição para as amostras ensaiadas no laboratório. O teor de umidade médio das

amostras obtido na primeira coleta realizada em 17/02/2022 foi de 9,46%, enquanto que na segunda coleta, feita em 17/03/2022, o parâmetro indicou média de 5,85%.

As dimensões do rachão variam, como pode ser observado na Figura 4.3, mas para este trabalho foi utilizado o rachão variando sua maior dimensão de 20 cm a 8 cm. Essa escolha advém da premissa de que o material de enchimento deve possuir dimensões superiores à da malha da tela do gabião.

Figura 4.3 - Dimensões do rachão



No preenchimento dos gabiões normalmente são usadas pedras limpas, compactas, não friáveis e não solúveis em água, para que tais elementos sejam capazes de garantir a resistência requerida nas obras as quais se destinam. As dimensões destas pedras deverão ser limitadas entre uma a duas vezes e meia a distância entre os trechos de torção da malha. Dimensões fora desses limites podem ser permitidas, desde que seja justificado e especificado em projeto.

Os agregados reciclados foram divididos em três frações em função das suas características, contudo, para alguns ensaios, as rochas ornamentais foram avaliadas separadamente para não mascarar os resultados. A fração cinza é composta por argamassas, concretos e rochas ornamentais; a fração vermelha é composta por materiais cerâmicos, como azulejos, telhas e tijolos; por fim, a fração mista corresponde aos agregados que possuem frações cinza e vermelha.

Em função de não haver disponível uma norma técnica que oriente a caracterização do material de enchimento, indicando limites de desempenho desejáveis, o programa experimental apresentado foi proposto utilizando como base ensaios de caracterização de agregados para confecção de concretos e pavimentação asfáltica, além de ensaios de propriedades físicas e mecânicas de rochas.

4.4 Ensaios Realizados

4.4.1 Composição Gravimétrica

Objetivando caracterizar os AR utilizados, foi realizada uma composição gravimétrica. Considerando a escala e a magnitude da pilha de rachão, foram coletados com o auxílio de uma pá carregadeira, cerca de 3m³ de amostra que foi disposta em uma leira, cuja largura equivale à largura da pá. Em seguida, o material já descarregado foi quarteado, sendo dividido em oito partes, sendo descartadas quatro partes e selecionadas outras quatro. A Figura 4.4 apresenta parte das divisões e as frações escolhidas e rejeitadas.

Figura 4.4 - Quarteamento e frações selecionadas (marcadas com o ícone verde)



Em seguida foi realizada a segregação manual dos agregados reciclados. A Figura 4.5 mostra os montes já separados. Os RCD foram classificados em sete subconjuntos, quais sejam:

- Concretos (concretos e argamassas)
- Cerâmicos (tijolos, telhas e tubos cerâmicos)
- Misto Cerâmico (agregados que possuem fração cinza e vermelha)
- Rochas ornamentais
- Misto Cinza (agregados que possuem fração cinza e rocha ornamental)
- Azulejos
- Rejeitos (plástico, gesso, telha de amianto, isopor, madeira, tubos de PVC, compensados, fiação elétrica etc.).

Figura 4.5 - Separação por tipologia durante ensaio de composição gravimétrica (a) Rejeito; (b) Azulejos; (c) Cerâmicos; (d) Rochas Ornamentais; (e) Misto Cinza; (f) Misto Cerâmico e (g) Concretos.



Após a separação, cada subconjunto foi acondicionado em caixas plásticas e pesada com o auxílio de uma balança manual. De posse da massa total e da massa de cada fração foi calculada a porcentagem de cada tipologia.

4.4.2 Teor de Umidade

A fim de determinar o teor de umidade do rachão, as amostras foram separadas em cinza, vermelho, rocha ornamental e misto¹, prontamente pesadas, e em seguida foram submetidas a estufa a 105°C por 24 horas. Após a secagem, as amostras permaneceram 1 hora esfriando até atingir a temperatura ambiente e foram novamente pesadas. É importante ressaltar que esse processo se repetiu para as duas amostras coletadas em 17/02/2022 e 17/03/2022.

O teor de umidade das amostras foi calculado conforme Equação (4.1).

$$w = \frac{M_w}{M_s} \quad (4.1)$$

¹ Agregados que possuem fração vermelha e cinza

Em que:

w é o teor de umidade (%)

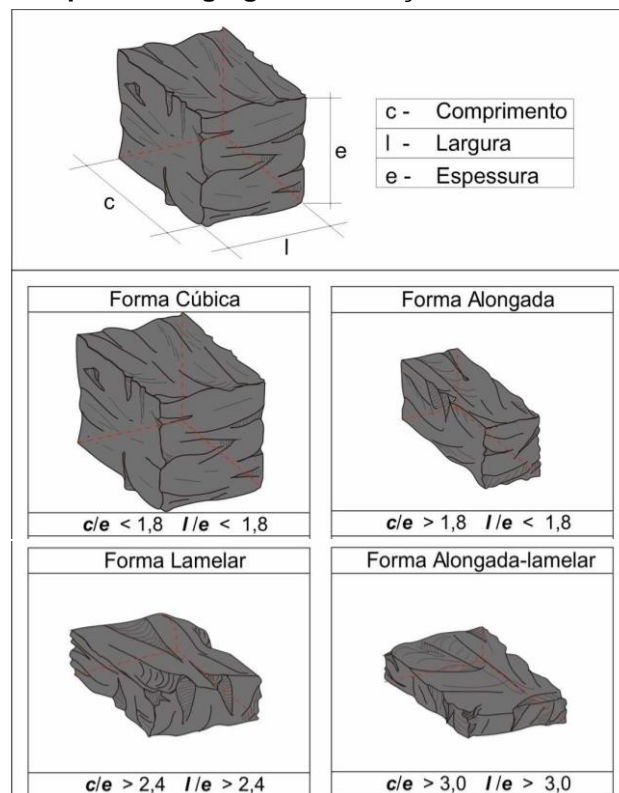
M_w é a massa de água (kg)

M_s é a massa da amostra seca (kg)

4.4.3 Índice de Forma

Para a execução desse ensaio, foram utilizadas amostras compostas pelos diferentes componentes dos RCD (concretos, argamassas tijolos, azulejos e rochas ornamentais) e suas diferentes dimensões e formas. O ensaio foi realizado conforme instruções da NBR 7809 (ABNT, 2019). O índice de forma é obtido pela relação das três dimensões da amostra, possibilitando a classificação do agregado em função da sua forma cúbica, lamelar, alongada e alongada-lamelar, como exemplificado na Figura 4.6. A Tabela 4.1 apresenta as classificações em função das relações entre largura e espessura e comprimento e espessura.

Figura 4.6 -Aspecto do agregado em função do seu índice de Forma



Fonte: SILVA e GEYER, 2018

Tabela 4.1 – Classificação do índice de forma

Forma	Razão	Índice
Cúbica	$c/e < e/l <$	1,8
Alongada	$c/e > e/l <$	1,8
Lamelar	$c/e > e/l >$	2,4
Alongada-Lamelar	$c/e > e/l >$	3,0

Fonte: SILVA e GEYER, 2018

Para os concretos, a forma do agregado graúdo influencia nas propriedades mecânicas do mesmo. Agregados contendo partículas inadequadas são prejudiciais, agregados com graus mais elevados de cubicidade apresentam resistência mais elevada e propiciam melhor trabalhabilidade do concreto (SILVA, GEYER e PANTOJA, 2020). Apesar de não ser especificada uma forma ideal para o material pétreo utilizado no preenchimento de gabiões, é importante que haja uma certa angularidade, uma vez que essa característica possibilita um agrupamento e interligação das mesmas. O contato ponto a ponto entre as superfícies dos elementos deve ser mantido, para que haja transferência de carga de um elemento para outro (SANTOS JUNIOR, 2018).

O ensaio foi executado em dois momentos. O primeiro, utilizando um paquímetro digital, com o objetivo de avaliar se as amostras atendiam aos requisitos para a realização do ensaio de resistência à compressão pontual (PLT), detalhado no item 4.4.8, e o segundo, utilizando uma régua graduada, para a caracterização do material utilizado no preenchimento dos módulos de gabião a serem submetidos ao ensaio de compressão não confinada, conforme apresentado no item 4.5.

4.4.4 Massa Unitária

A fim de estimar qual seria a relação entre massa e volume do rachão, incluindo os vazios, de forma que o rachão fosse disposto como é realizado o enchimento de uma caixa de gabião, a massa unitária foi calculada. A NBR 16972 (ABNT, 2021) que objetiva determinar a massa unitária e do índice de vazios para agregados graúdos e miúdos para concretos norteou a execução do ensaio. É importante destacar que, por questões logísticas e de escala, a execução desse ensaio foi realizada em campo, assim as amostras utilizadas não puderam ser secas em estufa como preconizado na

norma, por isso ressalta-se que as amostras estavam com seu teor de umidade natural considerando o período de estiagem.

Foram ensaiadas em triplicata três grupos de amostras, quais sejam, apenas fração cinza, 50% em massa de cinza e vermelhos e 50% em massa de cinza e mistos. Os materiais utilizados para as aferições foram duas caixas plásticas de 50 litros (57x41x35 cm) e uma balança manual. A Figura 4.7 exemplifica como foi efetuado o preenchimento manual das caixas.

Figura 4.7 - (a) Início da montagem destacando o encaixe dos AR e (b) Caixa totalmente preenchida com a amostra



A massa unitária foi calculada conforme Equação (4.2).

$$\gamma = \frac{M}{V} \quad (4.2)$$

Em que:

M é a massa da amostra (kg)

V é o volume do recipiente (dm³)

γ é a massa unitária (kg/dm³)

4.4.5 Absorção de Água

A absorção de água se torna uma propriedade de interesse pelo fato de estruturas de contenção do tipo gabião serem estruturas drenantes, e pelo fato dos RCD possuírem uma maior absorção de água em função da sua maior porosidade, principalmente os AR vermelhos. Dessa forma, foram utilizadas as disposições da NBR 53 (ABNT, 2003), que estabelece a determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Para este trabalho somente a absorção de água foi determinada, com base na Equação 4.1 (ABNT, 2003). Para a realização do ensaio foram utilizadas três caixas plásticas de 30 litros, água, estufa e balança digital.

Para a execução desse ensaio as amostras foram divididas em três grupos: Vermelho, Cinza e Misto. Assim, foi possível determinar a absorção por tipologia. Inicialmente foram selecionadas três amostras de massa de aproximadamente de 16,6 quilogramas, que já haviam sido secas para a determinação do teor de umidade, e foram submersas em água por 24, 48 e 72 horas, a fim de que a água penetrasse nos macroporos dos AR e de que não houvessem mais bolhas de ar na caixa. Para mensurar a massa saturada da superfície seca, o excesso de água foi retirado com o auxílio de pano de algodão, para que então a amostra fosse pesada. Por fim, após as 72 horas as amostras permaneceram em estufa por 24 (+2) e após resfriarem até atingir a temperatura ambiente, foram pesadas. A Figura 4.8 apresenta algumas etapas do processo.

Figura 4.8 – (a) Inserção da amostra no recipiente plástico; (b) Amostras submersas e liberação de bolhas e (c) Amostras sem excesso de água e retirada do excesso de água



A absorção de água é calculada pela Equação (4.3).

$$A = \frac{m_s - m}{m} \times 100 \quad (4.3)$$

Em que:

A é a absorção de água em porcentagem (%)

m_s é a massa da amostra na condição saturada superfície seca (kg)

m é a massa ao ar da superfície seca (kg)

4.4.6 Massa específica do rachão

Os agregados reciclados são constituídos por diversos materiais e estes apresentam as mais diferentes formas. A fim de comparar qual seria a massa específica dos RCD, que são heterogêneos, foi realizado um ensaio para determinar a massa específica desses materiais, para depois comparar essa propriedade com os materiais pétreos comumente utilizados como material de enchimento.

O ensaio foi realizado seguindo as proposições da NBR 53 (ABNT, 2003), com a adaptação de que não foi utilizada a balança hidrostática e o tempo de imersão em água foi maior que o recomendado. Foram utilizados doze agregados reciclados (quatro amostras vermelhas, quatro cinzas e 4 mistas), uma proveta graduada de polipropileno, com capacidade de 2000 ml e 9 cm de diâmetro. O critério para a escolha das amostras foi de que estas pudessem ser inseridas dentro da proveta, assim amostras com dimensões iguais ou superiores a 9 cm de espessura não foram ensaiadas. Salienta-se que as amostras foram escolhidas de forma a representar os RCD reciclados (tijolos, concretos leves e pesados, argamassa e mistos de tijolo e azulejo).

Inicialmente, as amostras permaneceram 24 horas em estufa, para garantir que estivessem secas, após resfriarem foram pesadas. Em seguida, as mesmas amostras permaneceram 72 horas submersas em água, a fim de que os macro e microporos fossem preenchidos com água. Para a determinação do volume de cada amostra foi utilizado o princípio da hidrostática. As amostras, que já estavam submersas foram introduzidas, uma por vez, em uma proveta com um volume conhecido de água, e a variação do volume da proveta foi medido e assim o volume da amostra foi estimado. A Figura 4.9 exemplifica a execução do ensaio utilizando a proveta graduada.

A massa específica foi calculada conforme Equação (4.4):

$$\rho_s = \frac{M_s}{V_d} \quad (4.4)$$

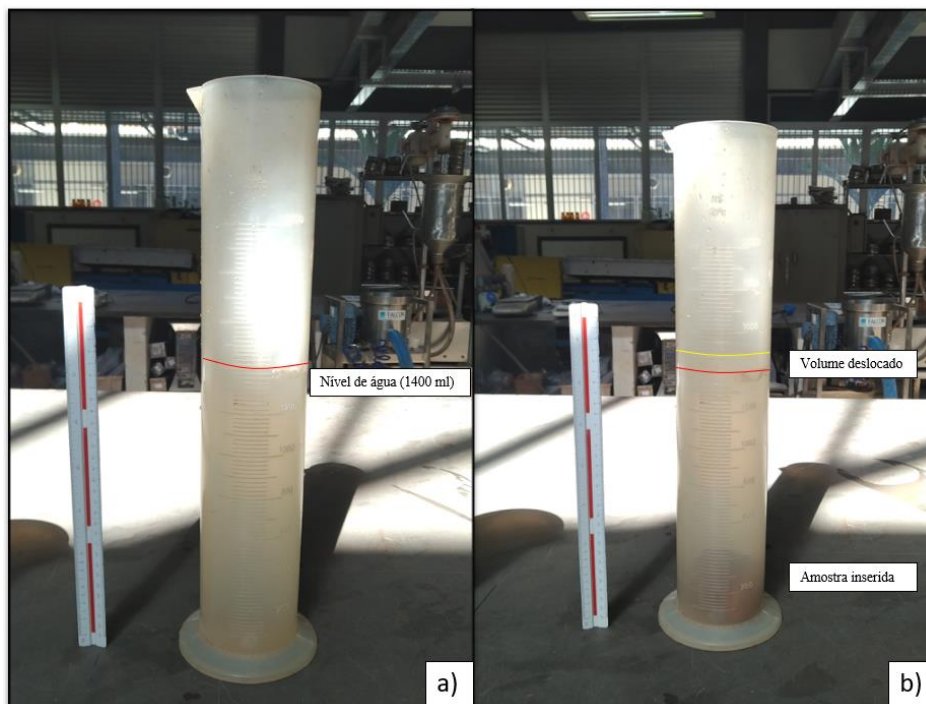
Em que:

ρ_s é a massa específica da amostra (g/cm^3)

M_s é a massa da amostra seca (g)

V_d é o volume deslocado pela amostra (cm^3)

Figura 4.9 – (a) Proveta plástica preenchida apenas com água; (b) Proveta após inserção de uma amostra



4.4.7 Abrasão Los Angeles

É um ensaio que objetiva mensurar a capacidade do agregado não se quebrar, desagregar e desintegrar, por meio de simulações de desgaste e abrasão. É comumente utilizado para classificar os agregados para a fabricação de concretos, pavimentação e lastros ferroviários (Ok *et al.*, 2020).

O ensaio de Abrasão “Los Angeles” é realizado inserindo a amostra na máquina “Los Angeles” juntamente com uma carga abrasiva, sendo submetida a um determinado

número de revoluções. O desgaste é determinado pela porcentagem do material passante, em peso, na peneira com abertura de 1,7 mm (DNER-ME 035/98). Em função da dimensão do rachão, a norma recomenda que sejam utilizados 10 quilogramas de amostra, 12 esferas de aço e um ciclo de 1000 rotações.

Para a execução do ensaio as amostras não foram lavadas, tendo em vista que o RCD vermelhos poderia desagregar em contato com a água. Assim, o material foi inserido na estufa, onde permaneceu por 24 horas, após atingir a temperatura ambiente, o material seco em estufa é pesado e colocado no cilindro (máquina *Los Angeles*) juntamente com esferas de aço (ou de ferro fundido), que irão rotacionar sobre seu eixo a velocidade de 30 a 33 rpm, promovendo a abrasão entre as partículas e as esferas de aço. Ao final das rotações, o material foi passado na peneira de abertura 1,7 mm, sendo a fração retida nessa peneira lavada, a fim de retirar o pó que fica aglomerado na superfície das amostras, e seca à 110 °C por 24 (+- 2h) horas para posterior pesagem. A Figura 4.10 apresenta algumas etapas da execução do ensaio.

Figura 4.10 - (a) Amostra seca; (b) Esferas utilizadas; (c) inserção das amostras na máquina de Los Angeles e (d) amostra peneirada após o ciclo.



A Abrasão *Los Angeles* é calculada pela Equação (4.5).

$$A_n = \frac{m_n - m'_n}{m_n} \quad (4.5)$$

Em que:

A_n é a Abrasão *Los Angeles* (%);

m_n é a Massa total da amostra seca inserida no cilindro (kg)

m'_n é a Massa da amostra lavada e seca, após o ensaio (retida na peneira de malha 1,7 mm) (kg)

Para a execução deste ensaio os RCD foram divididos em 3 amostras, a primeira contando somente fração cinza (concretos, argamassas e rochas ornamentais), a segunda com 50% em massa de fração cinza e fração vermelha (cerâmicos) a terceira com 50% em massa da fração mista com fração cinza. O ensaio foi realizado em triplicada para cada amostra, porém a fração mista foi ensaiada cinco vezes, sendo um resultado eliminado, pois foi constatada perda de parte da amostra durante a retirada do tambor. Assim, foram obtidos 13 resultados válidos (3 de fração cinza, 3 de 50% fração cinza e vermelha e 4 de 50% de fração cinza e mista). Todas as amostras foram ensaiadas no Laboratório de Concreto do Departamento de Engenharia de Materiais e Construção da UFMG.

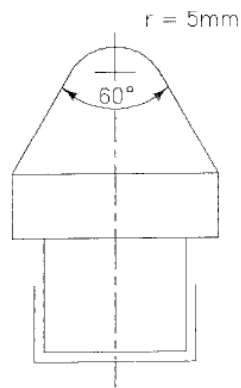
Segundo a Norma 031 do Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2004), o valor de abrasão *Los Angeles* deve ser inferior ou igual a 50% para aplicações em pavimentos flexíveis. A Norma recomenda que a fração das massas devem ser obtidas por meio do peneiramento e separação por frações do agregado, contudo conforme exposto anteriormente a composição granulométrica não foi realizada, pois partiu-se do princípio de que o ração já possui dimensão pré-definida.

4.4.8 Resistência à compressão pontual

O ensaio de resistência à compressão pontual (PLT = *point load test*) é utilizado na determinação do índice de resistência de materiais rochosos, correlacionando o parâmetro de força com a tensão uniaxial e força compressiva. O ensaio determina o índice de resistência de amostras à compressão pontual ($I_{s(50)}$), bem como o índice de resistência à compressão não corrigido ($I_{a(50)}$). O índice é obtido submetendo a amostra a um carregamento pontual concentrado, aplicado por um par de placas cônicas esféricas, até que ocorra o rompimento da amostra. Podem ser utilizadas amostras na configuração de testemunhos de sondagem, blocos e *lumps* (blocos irregulares).

O ensaio é utilizado como um teste índice, para caracterizar a classificação de resistência à compressão de uma rocha, o qual é fortemente influenciado pela anisotropia da amostra. O equipamento utilizado consiste numa bomba hidráulica, ligada a um manômetro, conectado a uma armação de compressão, que contém um par de ponteiros cónicas com ângulos internos de 60° e raio de 5 mm, como apresentado na Figura 4.11. Também é necessário a utilização de um paquímetro para obter as dimensões das amostras.

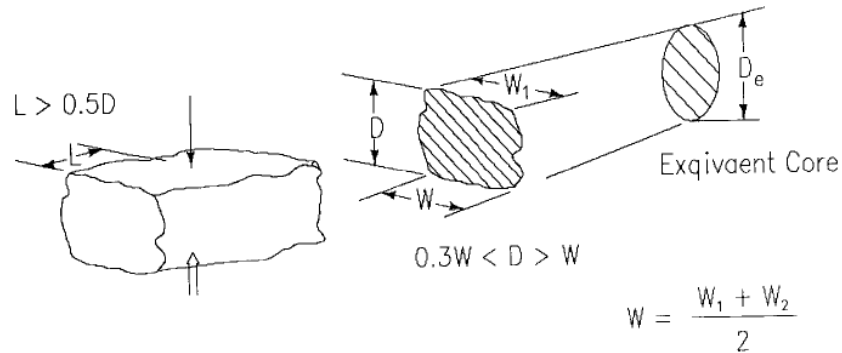
Figura 4.11 - Formato e raio da ponta de compressão



Fonte: ISRM, 1985

Para este trabalho, foi utilizado o ensaio com amostras do tipo *lump* irregular, uma vez que as amostras utilizadas são provenientes da usina de reciclagem da SLU, assim não foi realizado nenhum corte nas amostras a fim de padronizar as suas dimensões. Para o ensaio são recomendados *lumps* de tamanho variando de 50 ± 35 mm e de formato como o exibido na Figura 4.12. Ademais, a razão entre a altura (D) e a largura (W) deve possuir relação variando de 0,3 a 1,0. É fundamental que a altura (D) deve ser a menor dimensão do bloco e a largura (W) a menor dimensão perpendicular à altura do bloco. A aplicação da força deve ser de no mínimo a metade da largura da amostra, como indicado na Figura 4.12. Caso o *lump* possua larguras diferentes, é necessário calcular a largura média, utilizando a menor e maior largura.

Figura 4.12 - Formato da amostra necessário para o ensaio irregular lump



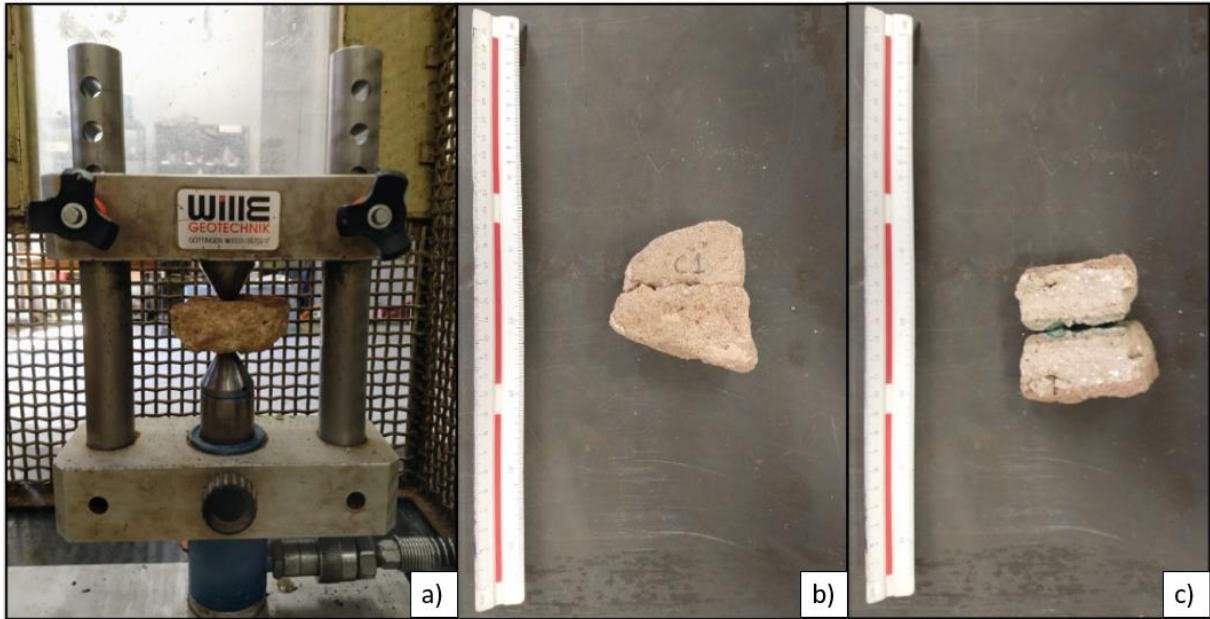
Fonte: ISRM, 1985

Legenda: L = distância, W = largura, D = altura, e D_e = diâmetro equivalente.

A norma ASTM 5731 (ASTM, 1995) recomenda o uso mínimo de dez amostras por litotipo, e um número superior no caso de material com litotipo heterogêneo ou anisotrópico. Dessa forma, para este trabalho foram utilizadas um total de 119 amostras (40 cinzas, 45 vermelhas, 26 mistos e 8 rochas ornamentais). O ensaio foi realizado no Laboratório de Tecnologia de Rochas do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

A execução do ensaio se dá com a inserção da amostra na armação metálica sob uma das pontas cônicas, de forma que o contato das pontas esteja sobre a menor dimensão do *lump*, ou seja, a altura (D). Além disso, a posição da amostra em relação às ponteiros devem ser correspondentes à metade do comprimento e à metade da largura de cada. Em seguida, o sistema é bombeado pela bomba hidráulica até que a amostra permaneça fixa pelas duas pontas. O manômetro então é zerado, e inicia-se o bombeamento, aumentando a carga sobre a amostra até que ocorra a ruptura desta, as etapas da execução do ensaio estão representadas na Figura 4.13.

Figura 4.13 – Etapas do ensaio (a) Amostra fixada pelas ponteiras, (b) Amostra fraturada, (c) Seção basal do plano de fratura



Imediatamente é registrada a medida fornecida pelo manômetro. Para as amostras com menor resistência, foi necessário utilizar um transdutor, pois as medições registradas pelo manômetro eram menores que seu limite de detecção, circunstância que impossibilitava a leitura.

O transdutor é um instrumento que converte a pressão em um sinal elétrico. Para o registro do sinal elétrico foi utilizado um sistema de aquisição de dados (*data logger*) SPIDER 8 (interligado ao computador) que adquire o sinal elétrico e o armazena no computador. O software CATMAN 4.5 foi utilizado como interface para o sistema *data logger*, sendo possível visualizar as curvas de pressão em função do tempo em tempo real, além de exportar os dados em formato Excel.

O teste é considerado inválido quando a fratura da amostra não passa simultaneamente pelos pontos de aplicação do carregamento. Com o auxílio do paquímetro são estimadas a altura da amostra bem como largura, de posse desses dados é estimada a área da seção fraturada. A partir da Equação (4.6) é calculado o diâmetro equivalente do *lump*.

$$D_e = \sqrt{\frac{4 A_s}{\pi}} \quad (4.6)$$

Em que:

D_e é o diâmetro equivalente (mm)

$A_s = WD$ é a menor área da seção transversal de um plano que passa pelos pontos de carregamento (mm²)

Pelo fato de o índice variar em função do diâmetro equivalente no caso de amostra do tipo irregular *lump*, é necessário fazer uma correção do tamanho a fim de se obter um valor único de resistência à compressão para cada amostra, sendo este um valor que possa ser utilizado para classificar a resistência do material ensaiado. A correção do índice se dá pelo fato de que o teste foi desenvolvido para amostras com diâmetros iguais ou próximos de 50 mm, assim a correção do tamanho (F) ser necessária, a Equação (4.7) apresenta o fator de correção.

$$F = \left(\frac{D_e}{50}\right)^{0,45} \quad (4.7)$$

Em que:

F é o fator de correção (mm)

D_e é o diâmetro equivalente (mm).

A partir do índice de resistência à compressão puntiforme I_s Equação (4.8), calcula-se a resistência à carga pontual padronizado das amostras por meio da Equação (4.9).

$$I_s = \left(\frac{P}{(D_e)^2}\right) \times 10^3 \quad (4.8)$$

Em que:

D_e é o diâmetro equivalente (mm)

I_s é o índice de resistência à compressão puntiforme,

P é a pressão de ruptura (MPa).

$$I_{s(50)} = F \times I_s \quad (4.9)$$

Em que:

F é o fator de correção (mm)

I_s é o índice de resistência de carga pontual (MPa)

$I_{s(50)}$ é a resistência de carga pontual medida em amostra de 50 mm de diâmetro (Mpa)

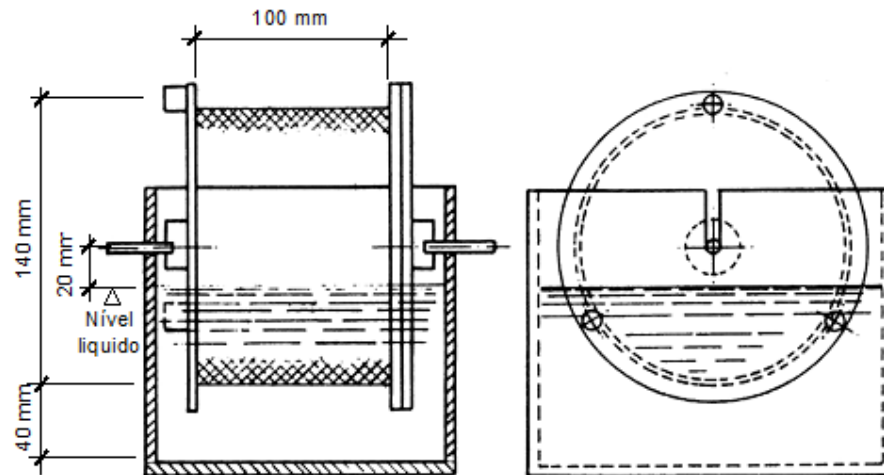
4.4.9 Durabilidade

A durabilidade das rochas em relação à abrasão na presença de água e ciclos de secagem pode ser mensurada pelo ensaio denominado *slake durability test*. O ensaio objetiva prever a deterioração potencial da durabilidade dos materiais, sob influência dos processos intempéricos (SILVA, 2010). É importante salientar que as estruturas de contenção de gabião ficam expostas ao intemperismo durante sua vida útil, ou seja, os materiais pétreos utilizados no enchimento de gabiões ficam sujeitos a exposição constante às intempéries, estando sob influência do meio por reações físico-químicas. Diante disso, estudos envolvendo a durabilidade são fundamentais para a caracterização os RCD, podendo apontar limitações.

O ensaio consiste em submeter dez fragmentos de rochas, com cada elemento possuindo massa entre 40 e 60 gramas, a ciclos padronizados de secagem, umidificação e ação mecânica. Inicialmente, as amostras permanecem na estufa a 105 °C por 24 horas, a fim de que o teor de água no material seja nulo, após esse período e atingirem a temperatura ambiente, as amostras são pesadas, e a massa seca é determinada. Em seguida, os fragmentos são colocados dentro de um cilindro metálico vazado, cuja malha possui 2mm de abertura, e esta estrutura está parcialmente imersa em água, girando a uma velocidade de 20rpm, em torno do eixo horizontal durante dez minutos (ASTM D4644-08, 1990).

O choque dos fragmentos de rocha entre si e o contato com a água favorecem a sua desagregação e desgaste, acarretando numa perda de massa do material que fica retido na malha de 2 mm. Ao fim do ciclo, os elementos que ficam retidos na malha são secos em estufa, até que não haja umidade, e posteriormente, a amostra é novamente pesada (ASTM D4644-08, 1990). A Figura 4.14 apresenta a conformação do equipamento, e suas respectivas dimensões.

Figura 4.14 - Croqui do equipamento de durabilidade



Fonte: SILVA, 2010

Para este trabalho, o equipamento foi construído com duas adaptações, a primeira está relacionada à dimensão da malha do cilindro vazado. A tela utilizada possuía diâmetro de 4 mm e as bases do mesmo foram confeccionadas em acrílico. O ensaio foi realizado considerando dois ciclos completos (200 revoluções por ciclo). Foram ensaiadas um total de 12 amostras, 4 de cada fração, quais sejam, amostras da fração cinza amostras vermelhas e amostras mistas. O ensaio foi realizado no Laboratório de Tratamento de Minérios do Departamento de Engenharia de Minas da UFMG.

O índice de durabilidade (I_D) corresponde à razão entre a massa seca depois de um ou dois ciclos e a massa inicial da amostra, conforme Equação (4.10).

$$I_D = \left(\frac{b-c}{a-c} \right) \times 100 \quad (4.10)$$

Em que:

I_D é o índice de durabilidade do material (%);

a é a massa inicial da amostra mais cilindro (g);

b é a massa após do ciclo da amostra mais cilindro (g);

c é a massa do cilindro seco (g).

A classificação da durabilidade do material está definida na norma ASTM D4644-08, 1990, como exibido na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Classificação da durabilidade das rochas

I_D (%)	Classificação da durabilidade
0 - 25	Muito baixa
26 - 50	Baixa
51 - 75	Média
76 - 90	Alta
91 - 95	Muito alta
96 - 100	Extremamente alta

Fonte: ASTM D4644-08, 1990

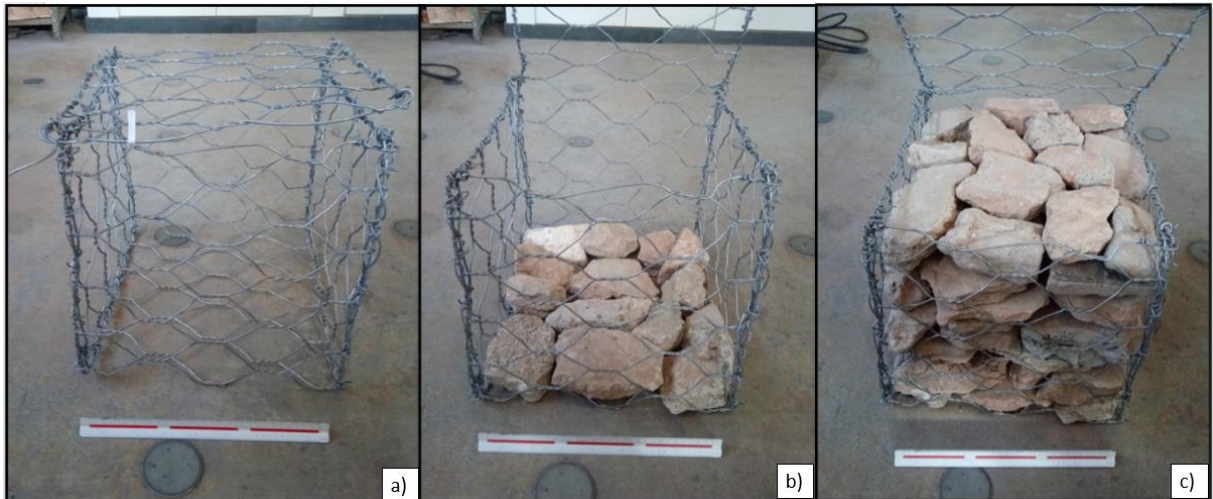
4.5 Ensaio de resistência a compressão não confinada de um módulo de gabião

Objetivando estimar a resistência a compressão não confinada do gabião foram ensaiados gabiões com malha de dupla torção de abertura de 8cm x 10cm, confeccionados em menor escala cuja dimensão teórica era 0,4m x 0,4m x 0,4m. O ensaio foi realizado em escala inferior a de um módulo de gabião convencional, para proporcionar a comparação com estudos semelhantes. Três diferentes amostras foram ensaiadas em triplicata, quais sejam: somente fração cinza, amostras compostas em 25% de massa de fração vermelha e 25% em massa de fração mista.

4.5.1 Montagem das células

A montagem dos gabiões foi realizada manualmente seguindo as recomendações mencionadas no item 3.8. Inicialmente todos os gabiões vazios foram pesados, e etiquetados, em seguida, as dimensões do rachão como largura, comprimento e espessura foram medidos com o auxílio de uma régua graduada e por fim o preenchimento manual foi realizado. A Figura 4.15 apresenta as etapas de montagem da célula de gabião, destaca-se que os AR foram inseridos de forma que fosse minimizado o volume de vazios, otimizando o contato ponto a ponto. Após o preenchimento do gabião, o módulo foi fechado com o arame de amarração e auxílio de um torquês. Em seguida, cada célula foi pesada e conhecida a massa de cada gabião vazio, foi possível mensurar a massa de RCD dentro de cada célula.

Figura 4.15 - (a) gabião vazio; (b) início da montagem do gabião e (c) gabião preenchido



A princípio, os gabiões contendo apenas a fração cinza foram preenchidos, conhecendo a massa utilizada para completar um módulo foi possível mensurar a massa de vermelho e misto que equivaleria a 25% da massa. Dessa forma, para a montagem dos módulos contendo fração vermelha e mista, antes de iniciar a montagem, as frações (vermelha e mista) foram pesadas, de forma que ao preencher o gabião a proporção de 25% fosse mantida.

Durante a montagem dos gabiões buscou-se utilizar os diferentes RCD que compõe cada fração de forma a representar a heterogeneidade de cada fração no gabião, além de distribuí-los de forma aleatória. Desta forma, foram montados 9 gabiões, 3 contendo apenas fração cinza, 3 com 25% em massa de fração vermelha e 3 com 25% em massa de fração mista. Ao fim de cada montagem as dimensões de cada gabião foi aferida, a fim de conhecer o volume real de cada gabião.

4.5.2 Ensaio de compressão não confinada

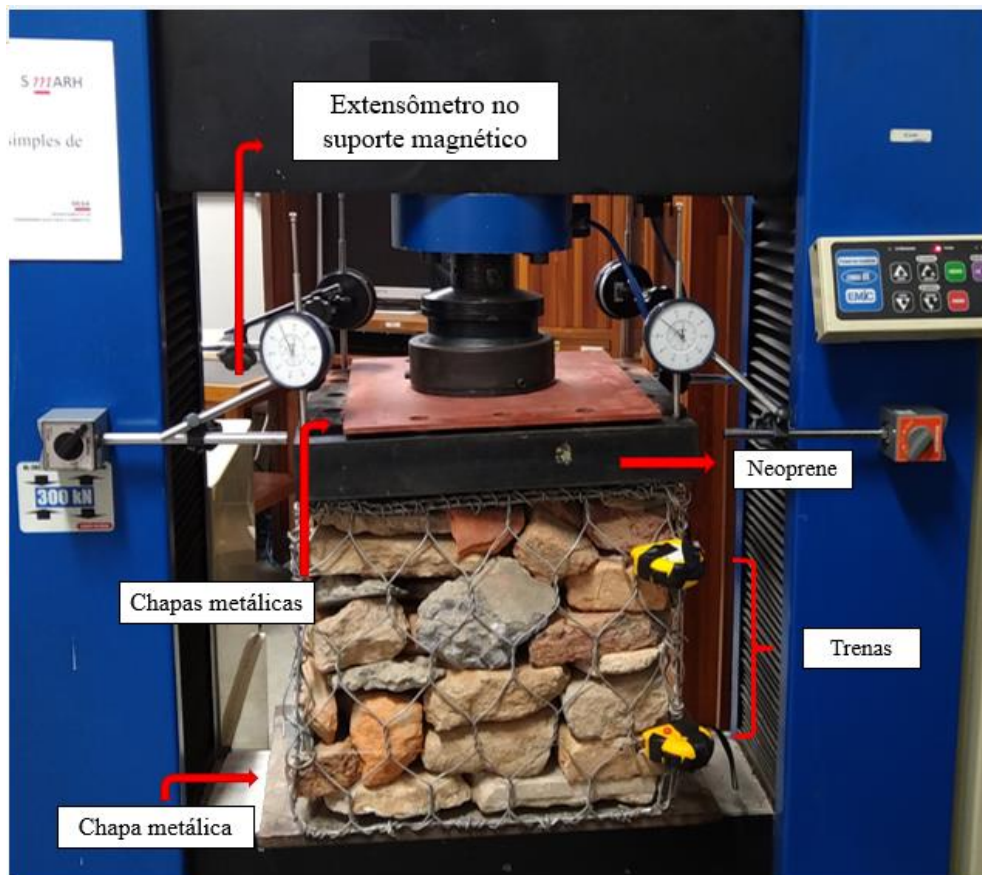
Todos os ensaios de compressão simples de um módulo de gabião foram realizados no Laboratório de Análise Experimental de Estruturas do Departamento de Engenharia de Estruturas da UFMG. O equipamento utilizado foi a prensa de compressão EMIC com capacidade máxima de 300 kN de carga vertical, além de:

- 3 chapas metálicas;
- Placa de Neoprene;
- 4 extensômetros analógicos de curso 50mm, sensibilidade 0,01mm;
- 4 suportes magnéticos para extensômetros;

- 2 trenas de 3 metros;
- Fio de nylon de 1mm de espessura.

A Figura 4.16 exemplifica a montagem do ensaio. A chapa metálica com maior dimensão foi utilizada como base para apoiar cada módulo na prensa, a fim de distribuir de forma uniforme a aplicação da carga e evitar que a deformação do gabião danificasse a base da prensa. Em seguida o gabião foi posicionado de forma centralizada na chapa e a placa de Neoprene e as duas chapas metálicas (colocadas perpendicularmente) foram colocadas no topo do módulo, para melhor distribuir a carga. A prensa foi acionada até que os elementos mencionados anteriormente estivessem firmes.

Figura 4.16 - Elementos que constituem a montagem para o ensaio de compressão não confinado de um módulo de gabião



Logo depois, os extensômetros foram fixados em cada extremidade da placa de Neoprene para medir o deslocamento vertical do gabião durante a aplicação das cargas. Por fim, duas trenas foram fixadas na lateral distando 10 cm da base e topo do gabião, na ponta de cada trena foi fixado um fio de nylon, de forma que o perímetro do gabião fosse circundado, e a outra ponta do fio foi fixada na outra extremidade de

trena. Isto é, à medida que a estrutura metálica do gabião se deformasse seria possível medir o novo perímetro após a aplicação de carga.

A aplicação de carga pela prensa foi realizada manualmente, e aproximadamente a cada 100N de incremento de carga, os extensômetros eram aferidos, em seguida o deslocamento das trenas, além do deslocamento registrado pela máquina e a carga final registrada após as leituras também foram registradas. De posse da variação da altura média, indicada pelos 4 extensômetros e do perímetro do gabião em cada aplicação de carga, o volume foi recalculado. O critério utilizado para determinar o fim do ensaio foi o limite de medição dos extensômetros, ou seja, quando os 4 extensômetros perdiam o contato com o Neoprene o ensaio era finalizado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Objetivando a compreensão das campanhas de coleta de material e da execução dos ensaios, bem como da quantidade de RCD utilizada em cada ensaio foi elaborada a Figura 5.1 representando a série temporal de execução dos ensaios, e a Tabela 5.1 que representa a relação de massa de RCD utilizada em cada ensaio.

Figura 5.1 - Série temporal da amostragem e execução dos ensaios

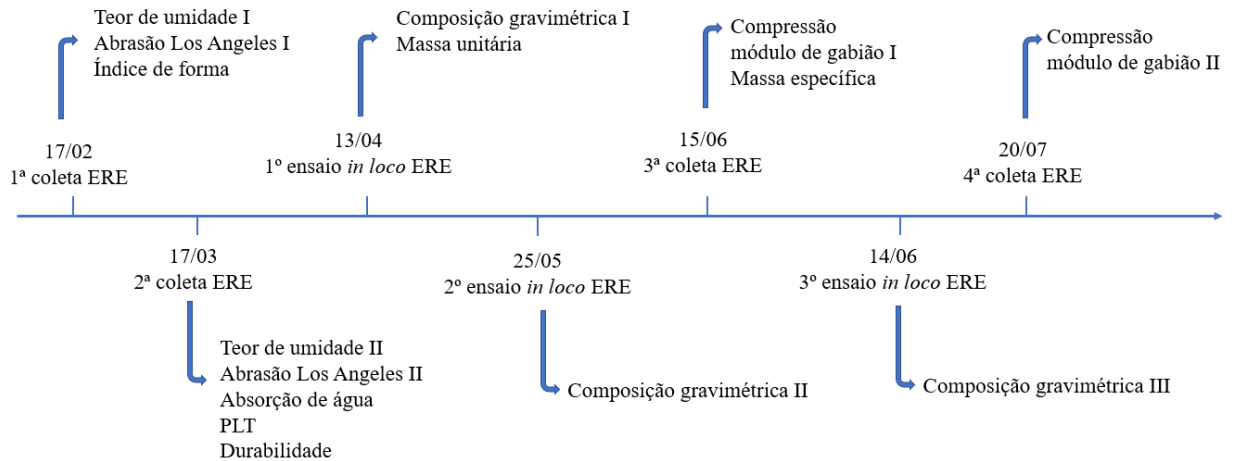


Tabela 5.1 – Relação de massa de RCD para cada ensaio

Ensaio realizado	Massa utilizada (kg)	Número de amostras	Coleta	Ensaio in loco	Data de execução
Composição gravimétrica I	650	NA	NA	Sim	13/04/2022
Composição gravimétrica II	853	NA	NA	Sim	25/05/2022
Composição gravimétrica III	591	NA	NA	Sim	14/07/2022
Índice de forma*	44	126	2 ^a	Não	28/04 a 03/06
Índice de forma I**	564	253	3 ^a e 4 ^a	Não	28/06 a 18/07
Teor de umidade I	78	13	1 ^a	Não	17/02 a 18/02
Teor de umidade II	85	17	2 ^a	Não	18/03 a 21/03
Massa unitária	521	9	NA	Sim	13/04/2022
Massa específica	5,1	17	3 ^a	Não	04/07/2022
Absorção de água	50	3	2 ^a	Não	28/03 a 31/03
Abrasão LA	110	11	1 ^a e 2 ^a	Não	09/02 a 05/04
PLT	44	119	1 ^a e 2 ^a	Não	28/04 a 23/06
Durabilidade	8	11	2 ^a	Não	25/05 a 09/06
Compressão célula gabião I	251	NA	3 ^a	Não	07/07 a 25/07
Compressão célula gabião II	313	NA	4 ^a	Não	20/07 a 27/07

* medição realizada com paquímetro

** medição realizada com régua graduada

5.1 Composição gravimétrica

Os resultados das três composições gravimétricas realizadas nos dias 13/04, 25/05 e 14/07 na ERE BR-040 podem ser verificados na Figura 5.2 e na Figura 5.3 é apresentada o valor médio das três composições. De forma geral, pode-se dizer que 74,3% dos RCD são cinzas (concretos, rochas e misto cinza), 14,2% são mistos e 10,16% são compostos pela fração vermelha (cerâmicos e azulejos).

Figura 5.2 - Resultados composição gravimétrica

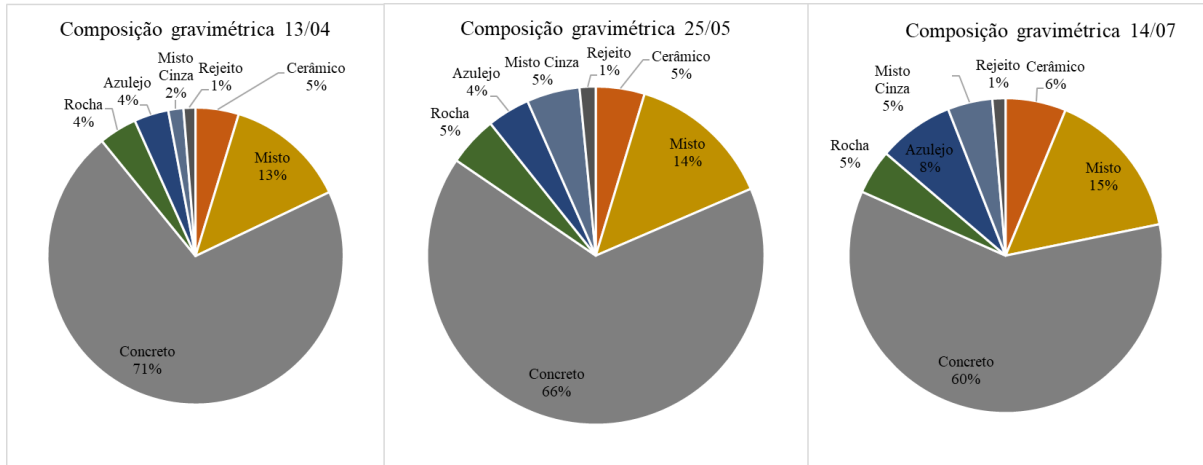
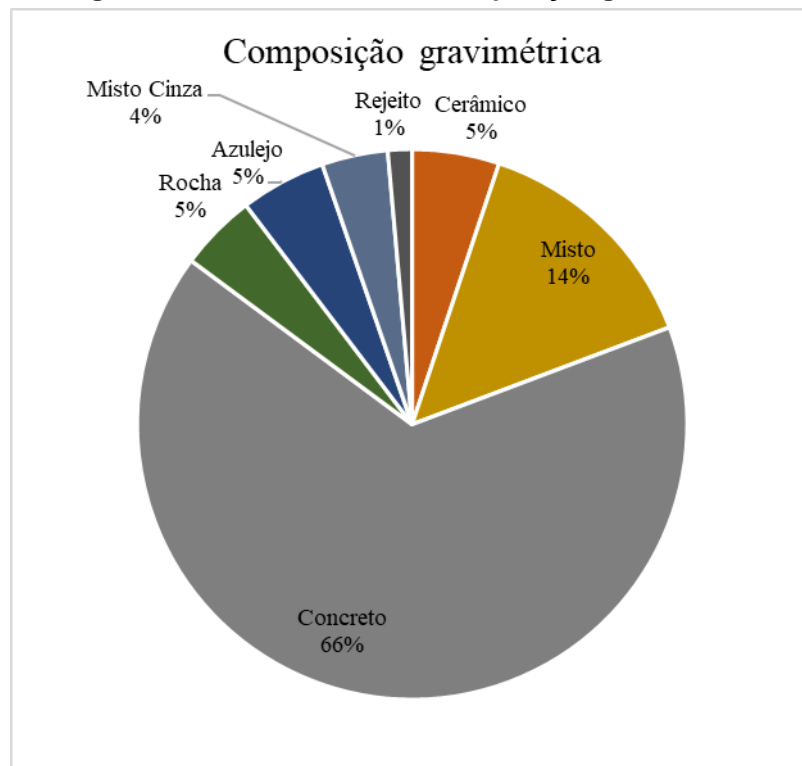
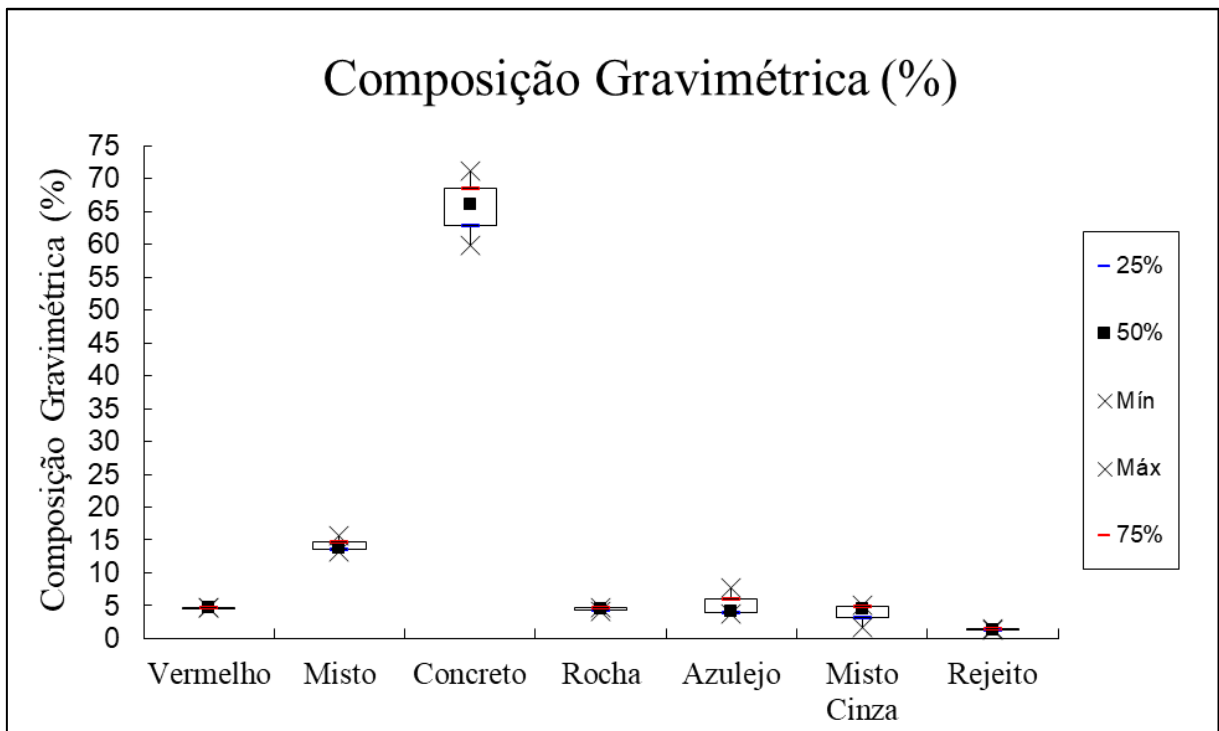


Figura 5.3 - Resultado médio composição gravimétrica



Dentre as tipologias, a que apresentou a maior variação nas composições foi o concreto, resultando no maior desvio padrão, de 5,7%, seguida da fração de azulejos com 2,4%, em contrapartida, o RCD vermelho obteve o menor desvio de 0,03%. Destaca-se que mesmo com um pré-tratamento antes do envio dos RCD ao britador ainda é registrada uma fração de 1% de rejeitos. A Figura 5.4 evidencia na forma do diagrama de caixas a distribuição de cada tipologia e sua contribuição na composição gravimétrica.

Figura 5.4 - Diagrama de caixa da composição gravimétrica



5.2 Teor de umidade

Conforme esperado, o Teor de Umidade (w) das amostras coletadas no período de intensas chuvas na RMBH, em 17/02/2022, apresentaram teor de umidade médio de 9,46%, valor superior à segunda coleta executada no período de estiagem (17/03/2022) que foi de 5,85%. Apesar dessa diferença, analisando o teor de umidade para as diferentes tipologias percebe-se um comportamento semelhante, como pode ser verificado na Tabela 5.2.

Considerando que as diferentes tipologias estavam nas mesmas condições climáticas, percebe-se que as rochas ornamentais obtiveram um menor teor de umidade, resultado que já era esperado tendo em vista que as rochas normalmente são menos porosas que os RCD (Ok *et al.*, 2020). Já os vermelhos, obtiveram o maior teor de umidade em função da maior porosidade dessa tipologia, enquanto os agregados cinzas (concretos e argamassas) resultaram no menor valor para os RCD (BRAVO *et al.*, 2015 p.61 apud DE BRITO; PEREIRA; CORREIA, 2005, p. 432). Por fim, a fração

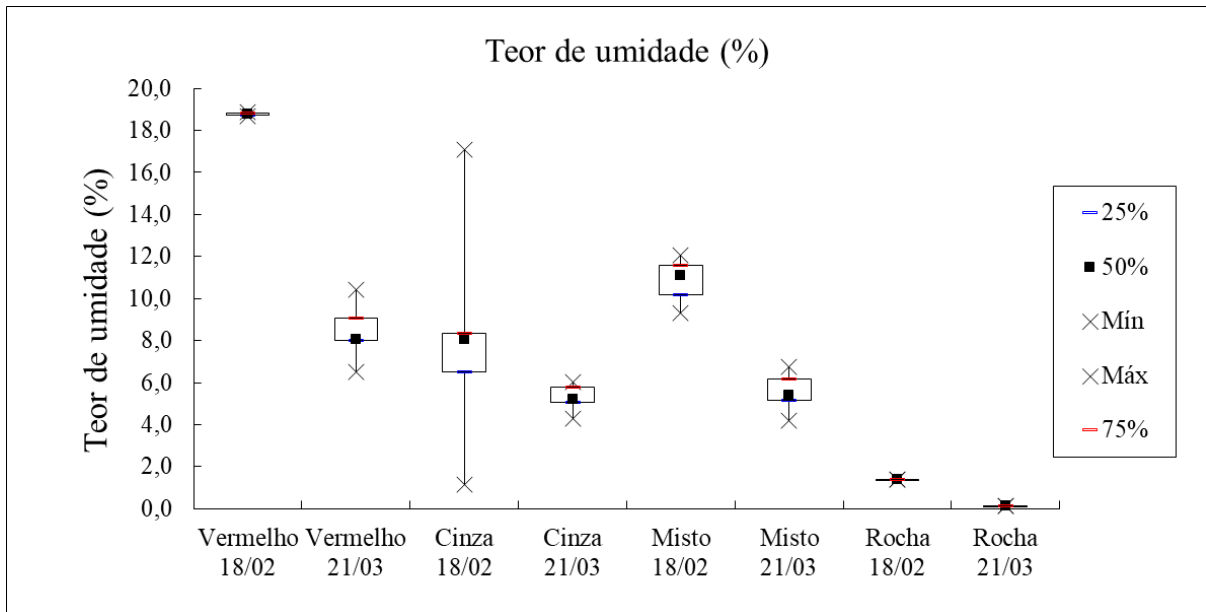
mista obteve um valor intermediário quando comparada com os valores dos da fração cinza e vermelha (cerâmicos).

Tabela 5.2 – Teor de umidade médio por tipologia de rachão

Tipologia Rachão	w (%) w (%)	
	17/02	17/03
Concreto e argamassa	7,7	5,3
Vermelha	18,8	8,4
Misto	10,6	5,5
Rocha Ornamental	1,4	0,15

A Figura 5.5 evidencia a variabilidade nos valores de TU para as diferentes datas de coleta, bem como a sua distribuição de frequência. Evidencia-se que a fração cinza de 18/02 foi a que apresentou o maior desvio padrão (4,7), como pode ser notado na Figura 5.5. As amostras de cada tipologia foram agrupadas nas bandejas de forma que apresentassem características próximas, desta forma o valor mínimo do teor de umidade foi atribuído à amostra que reunia concretos pesados, ou seja, concretos com presença de agregados graúdos e menos porosos, enquanto que o teor de umidade máximo foi referido à bandeja com concretos leves e argamassas constituídos de agregados miúdos.

Figura 5.5 - Diagrama de caixa do Teor de Umidade



Além disso, é possível notar a disparidade entre os valores de teor de umidade da fração vermelha nas diferentes datas de coleta: a diferença da média registrada de uma data para outra é de 2,2 vezes maior comparando o período chuvoso com o período de estiagem. Mas de forma geral, e como esperado, todas as amostras apresentaram maior teor de umidade no período chuvoso do que no período de estiagem.

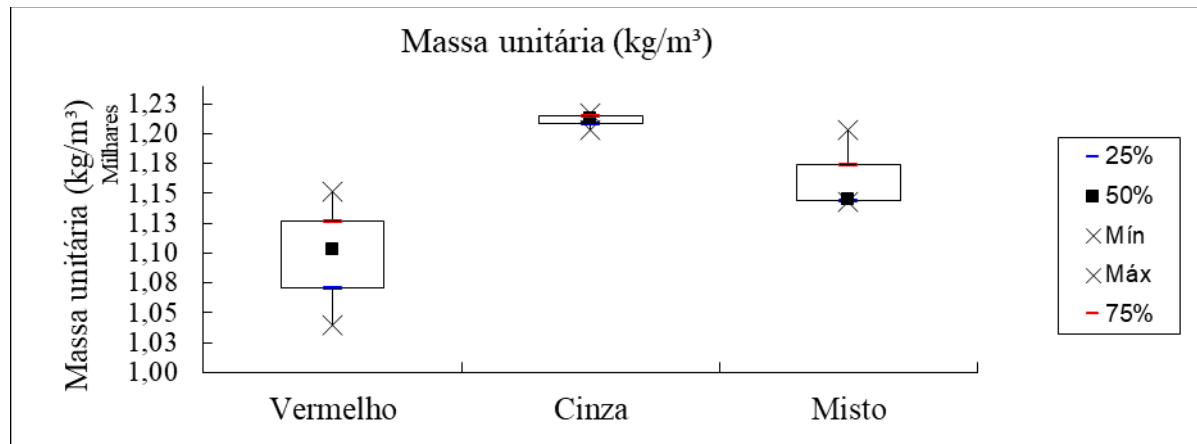
5.3 Massa unitária

A média dos resultados de massa unitária foi de 1.211 kg/m³ para a amostra contendo apenas fração cinza, 1.164 kg/m³ para amostra composta de misto e de 1.098 kg/m³ para a amostra composta vermelha. Como pode ser visto o maior resultado de massa unitária é referente a amostra cinza, seguida da amostra com 50% em massa e misto.

Os resultados obtidos após tratamento estatístico indicaram que a amostra cinza apresentou a menor variabilidade, com desvio padrão de 7,2 kg/m³, enquanto que a amostra com 50% de vermelho apresentou desvio de 56,2 kg/m³. A maior variabilidade da fração vermelha está relacionada as suas diferentes formas e densidades que são função da tipologia que os agregados vermelhos possuem, isto é, os fragmentos de telhas, azulejos, tijolos furados, tijolos maciços e tubulações cerâmicas possuem densidades diferentes, e conseqüentemente, amostras com maior quantidade de AR

vermelhos de menor densidade resultaram num menor resultado de massa unitária. O comportamento das amostras é mostrado na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Diagrama de caixa da Massa unitária

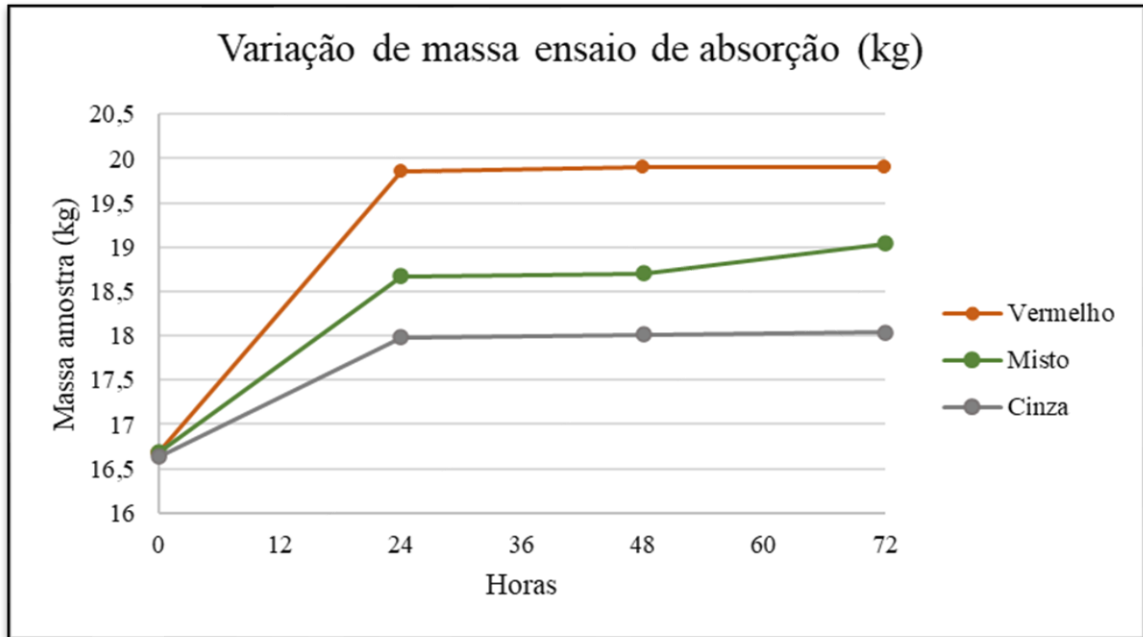


5.4 Absorção de água

Durante a execução do ensaio foi observado que com o passar do tempo a quantidade de bolhas de ar liberadas foi diminuindo, apesar da NM 53:2003 estabelecer o prazo de 24 (\pm 4 h.) para Agregados Naturais (AN) as amostras permaneceram submersas até que nenhuma bolha fosse liberada, a fim de garantir que todos os poros (macro e microporos) fossem saturados com água. A Figura 5.7 apresenta as medições da massa das amostras antes de serem submersas, após 24 h, 48 h e 72 horas.

Destaca-se um aumento de massa mais significativo nos AR vermelhos nas primeiras 24 h, resultado que já era esperado em função da maior porosidade dessa tipologia de AR. Também é possível notar um leve declínio entre as medições de 48 h e 72 h, a redução da massa muito provavelmente está relacionada a fragmentação de parte dos AR no momento de manusear as amostras para pesagem. Após o fim dos ensaios foi encontrado no fundo das caixas plásticas certa quantidade fragmentos que foram secos e pesados.

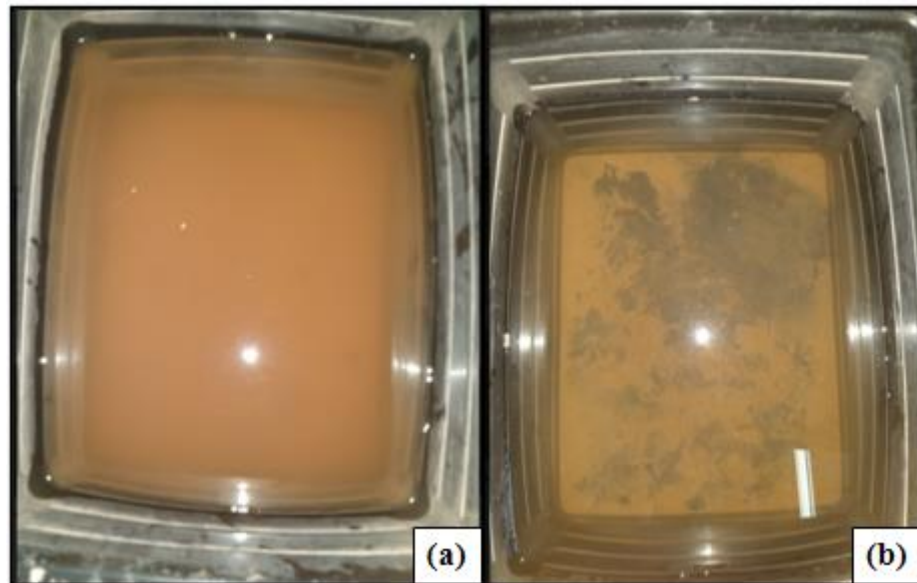
Figura 5.7 – Variação de massa durante o ensaio de absorção de água



É importante salientar que ao manusear todas as amostras (Vermelho, Misto e Cinza) era possível notar que pequenos fragmentos eram desagregados, porém a quantidade de fragmentos cerâmicos era maior, como pode ser visto na Tabela 5.3. O mesmo raciocínio aplica-se à turbidez da água após as 72 horas de imersão, em que a caixa com a fração vermelha era a mais turva visualmente, seguida da caixa de AR misto e a caixa com AR cinza a menos turva. É importante destacar que para pesar o material que foi desagregado foram aguardadas algumas horas para que as partículas mais finas sedimentassem, a Figura 5.8 destaca a condição antes e após a sedimentação das partículas da amostra vermelha.

Tabela 5.3 – Perda de massa após ensaio de absorção por amostra

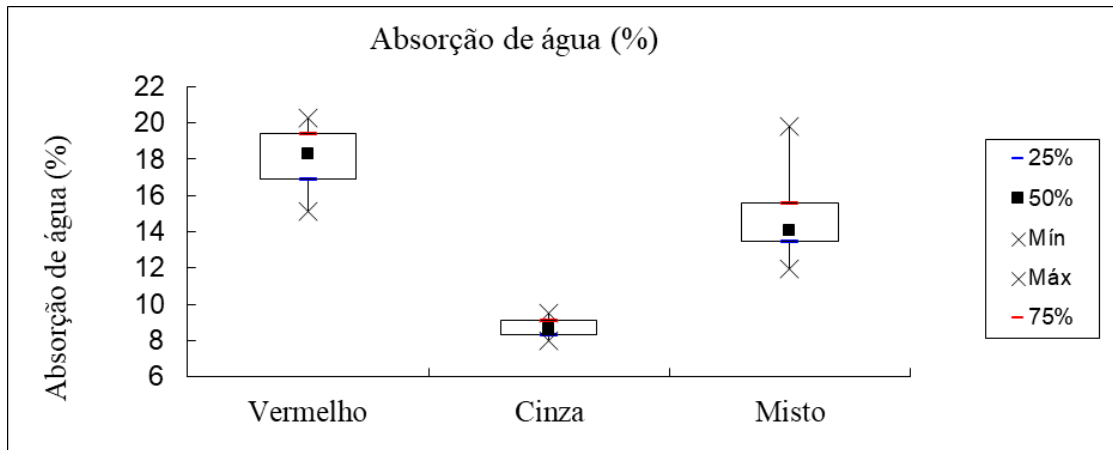
Amostra	Perda de massa (g)
Vermelha	0,116
Misto	0,078
Cinza	0,024

Figura 5.8 – Diferença na turbidez da água após a retirada da amostra (a) e após 24 horas de sedimentação das partículas (b)

Quanto aos resultados de absorção de água foi constatado que a fração vermelha obteve a maior média, com 18%, seguido do misto com 13% e, como esperado, a fração cinza obteve a menor absorção com 8,8%. Apesar da fração cinza apresentar a menor absorção, o valor obtido é muito superior, mais de duas vezes para a fração cinza, ao dos agregados naturais comumente utilizados, que tem absorção inferior a 4% (Ok *et al.*, 2020; IDAHO TRANSPORTATION DEPARTMENT, 2018). A Figura 5.9 apresenta a diferença da resposta da absorção de água das amostras.

Como as estruturas de gabião são drenantes e por isso não acumulam água, a elevada absorção não interfere negativamente no desempenho da estrutura, contudo os ensaios de durabilidade podem indicar se o processo de umedecimento e secagem interferem na resistência do material, prejudicando o desempenho mecânico da estrutura.

Figura 5.9 – Diagrama de caixa da absorção de água



5.5 Massa específica do rachão

Devido a heterogeneidade dos RCD classe A que chegam à usina de reciclagem, e a fim de representar tal situação neste ensaio, foram escolhidas amostras de diferentes materiais (concreto leve e pesado, argamassa, tijolo maciço, telha cerâmica, misto cerâmico com azulejo e com tijolo) para a determinação da massa específica dos grãos.

O resultado do ensaio de massa específica está apresentado na Tabela 5.4, bem como a estimativa de absorção de água de cada amostra. Percebe-se que há uma variabilidade significativa nos valores encontrados. A média de massa específica das amostras vermelhas foi de 1,498 g/cm³, 1,799 g/cm³ para as mistas os mistos e 1,999 g/cm³ para Fração cinza?, evidenciando que a natureza do material influencia fortemente no valor de massa específica obtido, bem como há a comprovação da heterogeneidade dos RCD. Analisando o desvio padrão obtido para cada tipologia, foi observado que a fração vermelha apresentou o maior desvio 0,22, enquanto a fração cinza obteve o menor desvio 0,11.

Tabela 5.4 – Massa específica e absorção de água das amostras

Amostra	Vermelho	Misto	Cinza
Massa específica (g/cm ³)	1,50	1,80	2,00
Desvio padrão (g/cm ³)	0,22	0,12	0,14
Absorção de água** (%)	22,01	10,59	7,81
Desvio padrão (%)	3,61	3,23	1,59

*A Equação 4.3 foi utilizada no cálculo da absorção de água

A fim de comparar os valores encontrados da massa específica com materiais rochosos, foi obtido na literatura a massa específica de rochas ornamentais, comumente utilizadas na construção civil (quartzito, arenito e granito), bem como rochas utilizadas como material de enchimento em gabiões (basalto e granito). A Tabela 5.5 apresenta os valores obtidos na literatura.

Tabela 5.5 – Massa específica das rochas

Rocha	Massa específica (g/cm³)	Intervalo de variação (g/cm³)
Basalto	2,80	2,6 – 3,0
Granito	2,69	2,6 – 3,0
Arenito	2,69	2,6 – 2,9
Calcário	2,66	2,5 – 2,8
Quartzito	2,62	2,6 – 2,7

Fonte: Adaptado de Neville, 1997

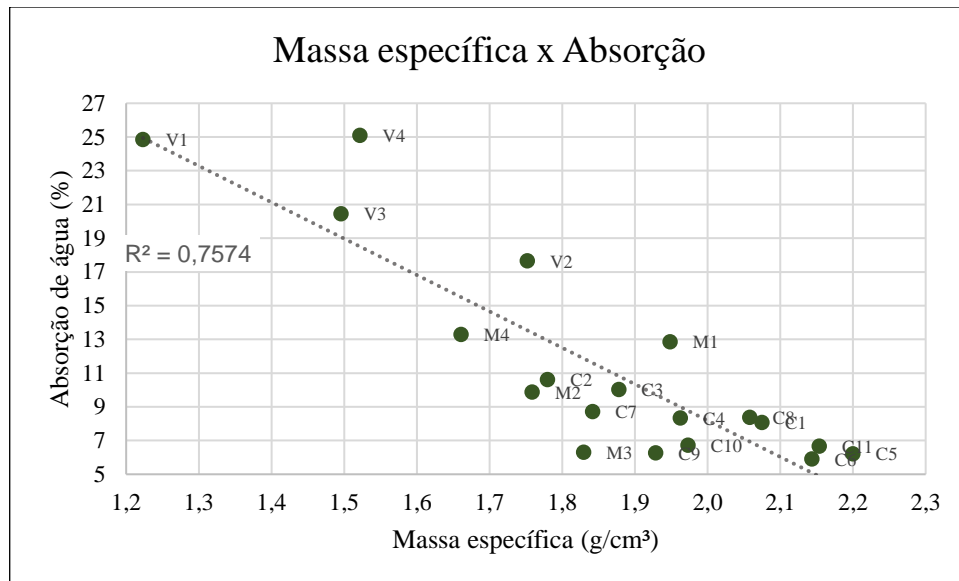
Comparando os valores de massa específica obtidos para cada tipologia de RCD com a Tabela 5.5, observa-se que apesar da fração cinza ter obtido os maiores valores de massa específica, nota-se uma desigualdade, que se torna ainda maior quando se comparam os resultados da fração vermelha com as rochas. Essa propriedade dos RCD poderá limitar a sua aplicação, tendo em vista que as estruturas de contenção do tipo gabião são estruturas de gravidade e estão diretamente relacionadas à massa específica do material de enchimento.

Considerando que o RCD possui uma heterogeneidade na sua composição, denota-se que há elementos com massa específica elevada, como a fração cinza e mista, e também há aqueles com valores menores, como a fração vermelha. Como a fração cinza somada à fração mista, representam 89% dos RCD e possuem uma média de massa específica próxima dos seixos rolados, que são um dos materiais pétreos utilizados no gabião, verifica-se a viabilidade de aplicação desses agregados reciclados em estruturas de contenção do tipo gabião.

Observa-se que as amostras vermelhas, que apresentaram menor massa específica como tijolos e telhas, possuem maior taxa de absorção de água, tendo em vista que essa tipologia possui maior quantidade de poros. O raciocínio inverso pode ser feito para as amostras com maior massa específica, a Figura 5.10 correlaciona as duas

propriedades para as amostras ensaiadas, evidenciando o raciocínio mencionado anteriormente.

Figura 5.10 – Correlação entre massa específica e absorção e água



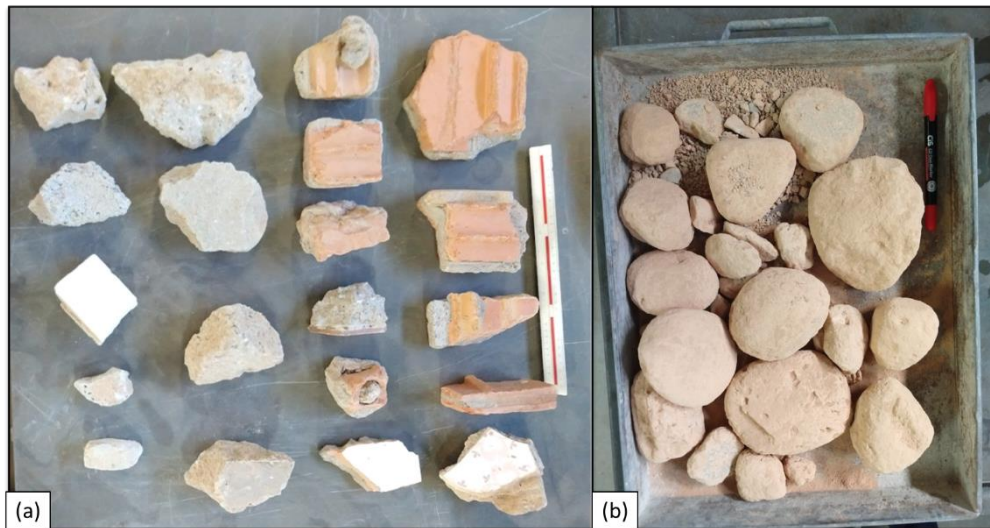
Para analisar se há correlação significativa entre a massa específica e a absorção de água, foi aplicado o teste de correlação de *Spearman*, em função da sua maior robustez da análise à presença de outliers. A avaliação pelo coeficiente de correlação para postos de Spearman foi realizada com o auxílio do software RStudio. Inicialmente o teste de correlação foi realizado e, em seguida, um teste de hipóteses para o nível de significância da correlação de 5% ($\alpha = 0,05$) foi aplicado objetivando verificar uma relação entre as propriedades já mencionadas. Com a aplicação do teste, foi encontrado um p-valor de 0,0066, confirmando a correlação significativa entre massa específica e absorção de água. Ademais, o rho (correlação de Spearman) igual $-0,755$, sugere uma correlação negativa de intensidade forte para as propriedades, ou seja, quanto maior o peso específico menor a absorção de água (Callegari-Jaches, 2003).

5.6 Abrasão Los Angeles

Após a execução do ensaio foi constatado o arredondamento da amostra e perda da angularidade em função do desgaste sofrido durante o teste, como pode ser verificado na Figura 5.11. Nenhuma das amostras ensaiadas atingiu as especificações brasileiras para utilização de agregados em camadas de base e sub-base de pavimentos, uma vez que todos os resultados de abrasão LA foram superiores a 50%.

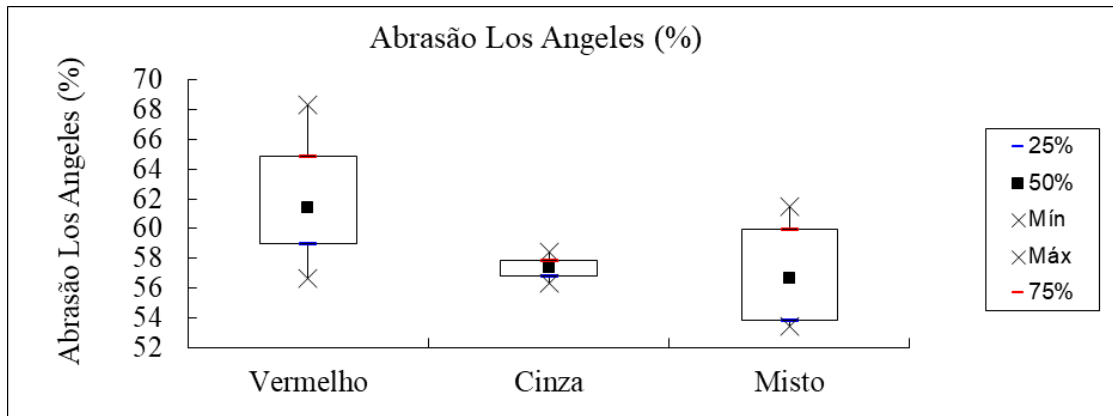
Contudo, deve-se lembrar que não há recomendações de um limite máximo de abrasão LA para a aplicação em estruturas de contenção do tipo gabião. Diante disso, outros ensaios de desempenho mecânico irão apontar se as frações cinza e mista, que resultaram em menores perdas, também resultarão num maior potencial de utilização.

Figura 5.11 – (a) Amostra antes do ensaio (b) amostra retida na peneira de 1,7 mm



Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 5.12. Percebe-se que para todas as amostras os valores de abrasão foram superiores a 50%. Como esperado os resultados obtidos sugerem que a resistência a abrasão mecânica dos RCD é inferior aos agregados naturais, destacando a menor resistência da amostra vermelha com perda de 61,4%, seguido da amostra contendo apenas cinza 57,4% e a amostra com composta de misto com 56,7%.

Figura 5.12 – Diagrama de caixa dos resultados de Abrasão Los Angeles



Um resultado inesperado foi o de que as amostras com misto apresentaram resultado de abrasão menor que as amostras contendo apenas a fração cinza. Provavelmente a qualidade dos concretos na amostra de misto era superior, também há de considerar que os azulejos, que compõe os mistos, possuem elevada resistência mecânica. Entretanto, a amostra de cinza foi a que apresentou o menor desvio padrão (1,06) dentre as amostras ensaiadas, essa menor variabilidade é nítida ao analisar a Figura 5.12.

Quando comparamos os resultados obtidos com as rochas utilizadas como material de enchimento, a disparidade da propriedade de abrasão é nítida, tendo em vista que a abrasão LA destas rochas não ultrapassa 30% (OK *et al.*, 2020). Remédio (2017) calculou a abrasão para diferentes granitos de sete pedreiras, sendo que a maior perda de abrasão LA foi de 31,3% para o granito Itu e a menor perda de 12,2% para granito Cantareira. As diferenças nos valores para uma mesma rocha (granito) segundo o autor estão vinculadas à composição mineralógica, que são diferentes para cada qualidade de granito.

O autor também obteve a abrasão LA para pedreiras de basalto e de gnaiss. A amostra de basalto obteve uma perda de 13,4%, enquanto a de gnaiss apresentou um valor de abrasão de 16,2% (REMÉDIO, 2017). Paiva (2017) também realizou o ensaio de abrasão para uma pedreira de brita de basalto e chegou a um resultado de perda de 12,5%. Diante dos resultados obtidos pelos autores supracitados, e dos valores obtidos na pesquisa, denota-se que os RCD possuem menor resistência à abrasão mecânica que as rochas comumente utilizadas, contudo, as frações cinza e mista apresentaram menores perdas.

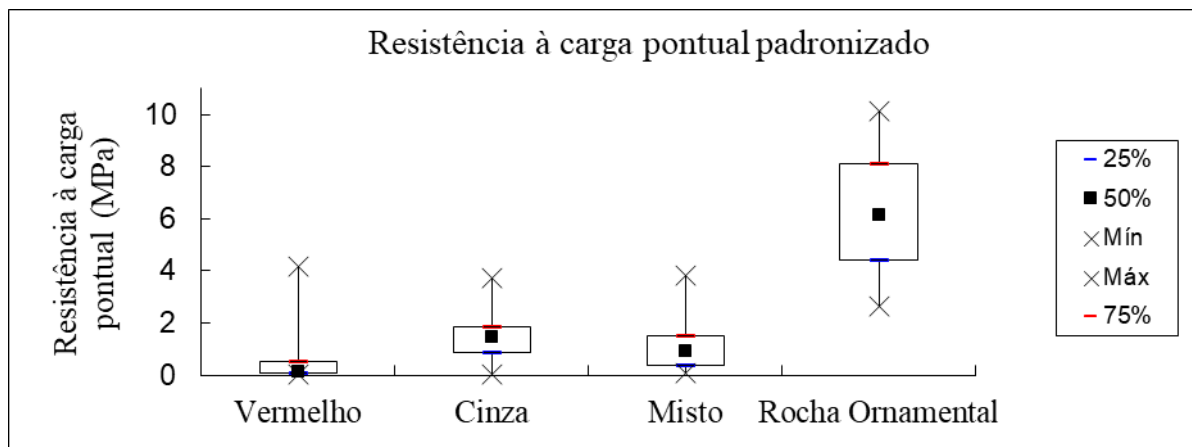
5.7 Resistência à compressão pontual

A fração vermelha apresentou os menores valores de ($I_{s(50)}$), em seguida os RCD mistos, fração cinza e as rochas ornamentais com os maiores valores. Os resultados são exibidos na Tabela 5.6 e na Figura 5.13. Destaca-se que a desvio padrão foi maior para as rochas ornamentais, resultado que difere dos outros ensaios. Esse maior desvio observado pode estar associado ao fato de que as rochas coletadas são de gênese distinta, podendo apresentar diferentes resistências devido à sua estruturação natural, podendo ser mais ou menos resistentes. Além disso, a fração vermelha apresentou o menor desvio padrão. Destaca-se que não foi possível realizar o teste em azulejos, devido ao fato de sua espessura ser inferior à aproximação máxima das ponteiras. Portanto, apenas tijolos e algumas telhas foram ensaiadas.

Tabela 5.6 – Resultados do ensaio de resistência à carga pontual corrigida $I_{s(50)}$

	Vermelho	Misto	Cinza	Rocha Ornamental
Média	0,51	1,17	1,52	6,30
Desvio padrão	0,92	1,02	0,99	4,38

Figura 5.13 – Diagrama de caixa dos resultados de resistência à carga pontual



Para comparar os valores obtidos com a classificação de resistência do material, foi utilizada a Tabela 5.7, que apresenta as faixas de resistência à carga pontual associada à classificação de resistência do material. Pela classificação, a fração vermelha possui resistência baixa, enquanto os RCD cinzas e mistos são enquadrados com alta resistência e as rochas ornamentais com muito alta resistência.

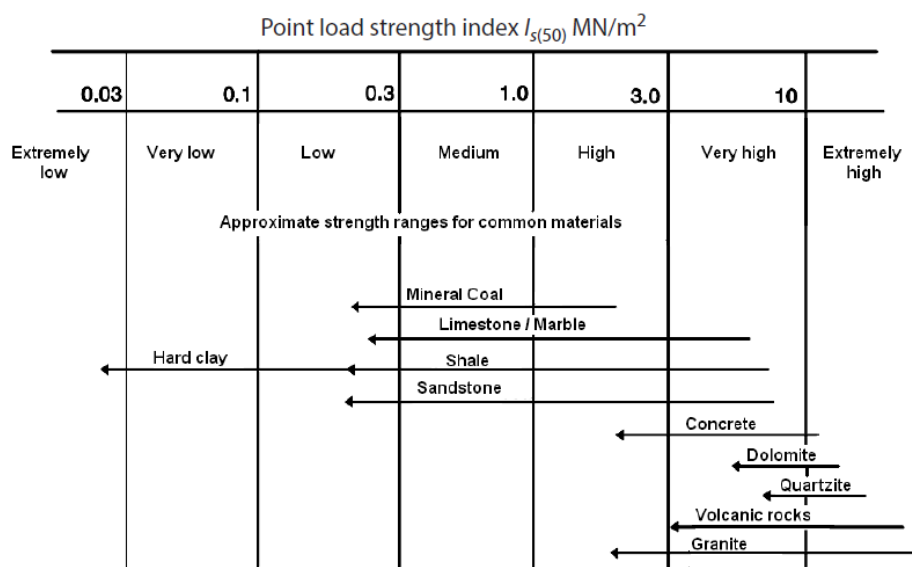
Tabela 5.7 – Classificação de resistência à carga pontual

Classificação resistência	Extremamente alta	Muito Alta	Alta	Média	Baixa	Muita Baixa	Extremamente baixa
$I_{s(50)}$ MPa	(10-30)	(3-10)	(1-3)	(0.3-1.0)	(0.1-0.3)	(0.03-0.1)	(<0.03)

Fonte: BROCH e FRANKLIN, 1972

Remédio (2017) executou o ensaio de resistência a carga pontual com *lumps* irregulares de rochas provenientes de pedreiras da região de Campinas e São Paulo. Das nove tipologias de rochas, a menor resistência foi de 6,24 MPa para o Granito Taipas e o maior índice foi de 10,7 MPa para o Granito Morungaba, ambos classificados como muito alta resistência e extremamente alta. Galván, Preciado e Serón (2014) apresentam uma diversidade de rochas ensaiadas em corpos de provas com resistências inferiores e semelhantes às obtidas para as frações de RCD.

Na Figura 5.14 são apresentadas diferentes rochas ensaiadas, tendo os arenitos, folhelhos, calcários e carvão mineral com variação entre baixa e muito alta resistência. São rochas sedimentares que naturalmente possuem resistência menor que rochas metamórficas e ígneas como o gnaiss e o granito. Entre a alta e extremamente resistente estão o dolomito, quartzito, rochas vulcânicas e granito junto do concreto, que ao fim da sua vida útil torna-se RCD cinza, objeto de estudo do trabalho.

Figura 5.14 – Variação do $I_{s(50)}$ em diferentes tipos de rochas

Fonte: Galván, Preciado e Serón., 2014.

Os resultados obtidos sugerem que a utilização dos RCD, principalmente da fração vermelha, como material de enchimento pode ser limitada à estruturas de gabião de menor complexidade, apesar de não haver um valor mínimo de $I_{s(50)}$ para o material de enchimento, a resistência dos RCD chega a ser seis vezes menor que a das rochas usualmente utilizadas, mesmo assim atinge padrões de alta resistência. Apesar do contraste entre os RCD e as rochas ornamentais, o cinza tem resistência suficiente para ser tratado como material aplicável em estruturas de gabião. Objetivando mensurar quais seriam as restrições de uso, ensaios de compressão de uma célula de gabião em tamanho reduzido serão fundamentais para avaliar o comportamento dos RCD quando submetidos a cargas extremas.

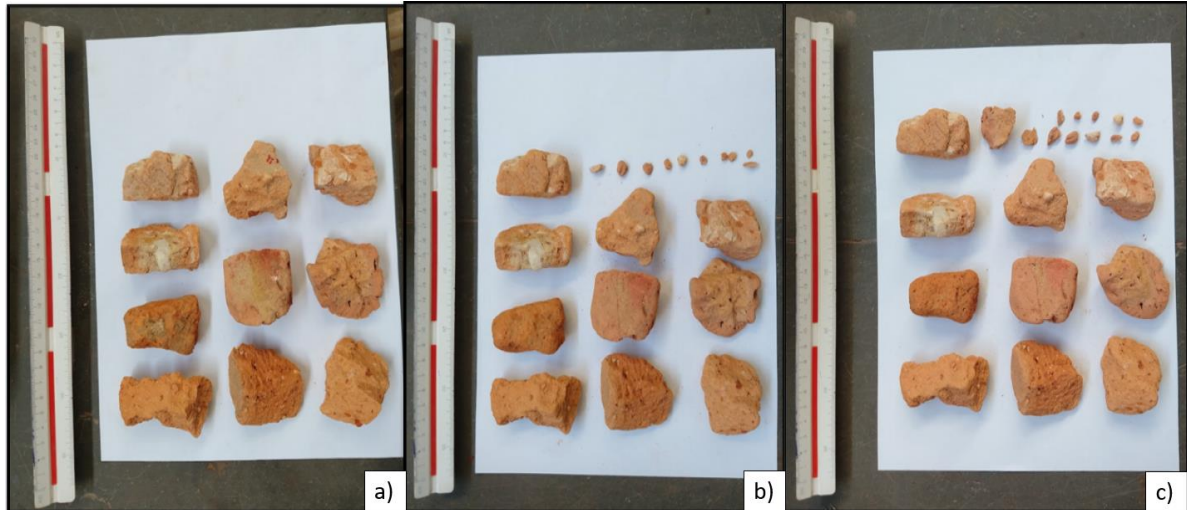
5.8 Durabilidade

Foram realizados doze ensaios de durabilidade com 2 ciclos de secagem e umedecimento (4 amostras contendo apenas fração cinza; 4 de fração vermelha e 4 de mistos) os resultados são apresentados na Tabela 5.8. A Figura 5.15 exibe a perda de angularidade das amostras, bem como a fragmentação dos RCD após 1 e 2 ciclos. Dentre as frações ensaiadas, a desagregação da amostra vermelha foi visualmente maior que a fração cinza e mista, tal observação foi manifestada na turbidez da água. Os resultados de I_D para todas as frações mostraram desempenho próximo, de modo que o desvio padrão para o resultado das três frações foi de 0,86.

Tabela 5.8 – Resultados do ensaio de durabilidade

	Cinza	Misto	Vermelho
Média após 1 ciclo (%)	97,90	97,88	97,60
Desvio Padrão	1,49	1,25	0,59
Média após 2 ciclo (%)	95,52	96,26	95,01
Desvio Padrão	2,22	1,53	0,90

Figura 5.15 – (a) amostra seca; (b) amostra seca retida após o 1º ciclo e (c) amostra seca retida após 2º ciclo



As frações de RCD são classificadas conforme ASTM D4644 de 2016 (Tabela 5.9) quanto aos graus de alteração e resistência com durabilidade muito alta para a fração vermelha e o misto e cinza com durabilidade extremamente alta. Rochas como gnaisse, granito e gabro também são classificados com durabilidade extremamente alta, mesmo após a execução de 5 ciclos de umedecimento e secagem (DIAS FILHO, XAVIER e MAIA, 2013; SANTOS, 2021). Contudo, é importante frisar que o ensaio de durabilidade é dirigido às rochas brandas com argilominerais na sua constituição, de modo que alguns autores recomendam uma nova classificação de durabilidade para materiais rochosos mais resistentes (FERREIRA e ANTÃO, 2006).

Os resultados obtidos para 2 ciclos, indicam que o índice de durabilidade dos RCD é semelhante ao das rochas comumente utilizadas, assim, dentre os RCD aquele que apresenta o pior desempenho em relação a umedecimento e secagem é a fração vermelha. Todavia, considerando que uma maior quantidade de ciclos diminui o I_D do material, sugere-se que ensaios seja realizado com 5 ciclos, a fim de expor o material as condições extremas e avaliar novamente o comportamento deste em relação à abrasão em água, podendo ser evidenciado um maior desgaste da fração vermelha, por ser constituída predominantemente por argilominerais, bem como da fração mista que também possui constituição cerâmica.

Tabela 5.9 – Classificação da durabilidade das rochas

ID (%)	Classificação da durabilidade
0 - 25	Muito baixa
26 - 50	Baixa
51 - 75	Média
76 - 90	Alta
91 - 95	Muito alta
96 - 100	Extremamente alta

Fonte: ASTM D4644-08, 1990

5.9 Ensaio de resistência a compressão não confinada de um módulo de gabião

5.9.1 Montagem do Gabião

De posse do volume e da massa de cada gabião após preenchimento e da massa específica média de cada fração obtida no Item 5.5, foi calculada a massa específica aparente (kg/m^3), a massa específica da mistura (g/cm^3) e a porosidade (%) de cada gabião, e juntamente com percentual do índice de forma dos agregados utilizados. Os resultados são apresentados na Tabela 5.10. Para o Gabião (G8) o índice de forma dos agregados não foi aferido.

A Tabela 5.10 mostra as características de cada gabião, como diferentes valores de massa e volume, para tornar a comparação adequada foram calculados os índices físicos. O resultado médio de densidade aparente de cada fração foi de $1160,5 \text{ kg/m}^3$ para os gabiões com fração vermelha, $1253,7 \text{ kg/m}^3$ para os mistos e $1276,3 \text{ kg/m}^3$ para os cinzas, os resultados mostram que as amostras compostas por materiais cerâmicos atingiram o menor valor para esse índice físico, enquanto que as frações mista e cinza manifestaram valores próximos. Estes resultados também foram exibidos para densidade da mistura, onde a fração vermelha obteve média de $1,72 \text{ g/cm}^3$, enquanto a fração mista e cinza resultaram em $1,81 \text{ g/cm}^3$.

Tabela 5.10 – Índices físicos dos gabiões ensaiados

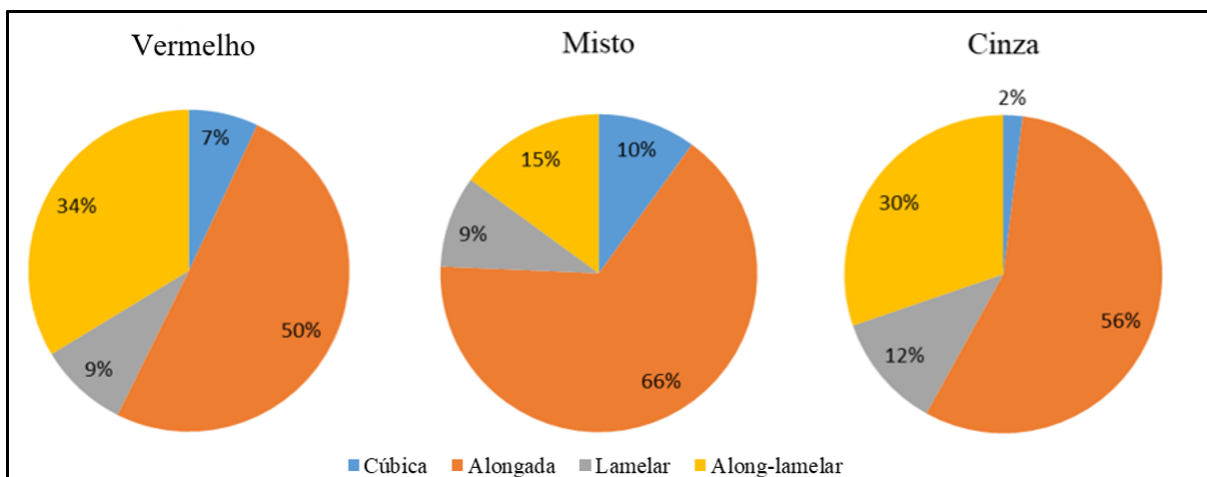
Amostra	Condição	Massa cinza (kg)	Massa misto (kg)	Massa vermelho (kg)	Massa total (kg)	Percentual de cinza (%)	Percentual de misto (%)	Percentual de vermelho (%)	Volume gabião (m ³)	Massa específica aparente seca (kg/m ³)	Massa específica da mistura (g/cm ³)	Porosidade (%)	Índice de forma (%)			
													Cúbica	Alongada	Lamelar	Along-lamelar
G8	Cinza	61,49	0,00	0,00	61,49	100,0%	0,0%	0,0%	0,0463	1328,14	1,999	33,58	1	57	12	35
G10	Cinza	60,38	0,00	0,00	60,38	100,0%	0,0%	0,0%	0,0468	1289,31	1,999	35,52	-	-	-	-
G5	Cinza	62,07	0,00	0,00	62,07	100,0%	0,0%	0,0%	0,0512	1211,50	1,999	39,41	3	58	12	27
G4	Vermelho	44,76	0,00	15,64	60,40	74,1%	0,0%	25,9%	0,0503	1200,13	1,840	34,78	6	58	9	27
G13	Vermelho	42,24	0,00	15,10	57,34	73,7%	0,0%	26,3%	0,0508	1129,31	1,837	38,54	9	38	11	42
G9	Vermelho	46,91	0,00	14,22	61,13	76,7%	0,0%	23,3%	0,0531	1151,90	1,855	37,91	6	55	7	32
G3	Misto	49,51	15,70	0,00	65,21	75,9%	24,1%	0,0%	0,0521	1251,90	1,947	35,71	16	58	10	16
G6	Misto	45,71	15,24	0,00	60,95	75,0%	25,0%	0,0%	0,0492	1237,93	1,945	36,37	7	67	11	15
G11	Misto	44,43	15,66	0,00	60,09	73,9%	26,1%	0,0%	0,0473	1271,16	1,943	34,58	7	72	7	14

Os resultados de massa específica aparente seca e massa específica da mistura, sugerem uma semelhança entre os gabiões preenchido apenas de AR cinza e os compostos com AR cinza e misto, além de destacar a diferença das amostras compostas por AR vermelho. Quanto a porosidade, todos os gabiões exibiram valores inferiores a 40%, limite sugerido por Barros (2005), com média de 37,1% para os vermelhos, 35,6% para os mistos e 36,2% para os cinzas. O resultado da maior porosidade para os vermelhos decorre de sua menor massa específica quando comparado com as demais frações.

De forma geral, os resultados sugerem que os índices físicos dos gabiões constituídos de AR cinza e 25% de misto, são semelhantes, diferindo das amostras com 25% de vermelho.

Em relação ao índice de forma, a Figura 5.16 apresenta os resultados médios de índice de forma para os três tipos de gabião montados. A variabilidade do índice de forma em cada gabião é maior, pois o preenchimento dos gabiões foi realizado de forma aleatória, isto é, os AR não foram segregados em função do seu formato, somente por fração, e foram adicionados seguindo apenas o critério de dimensão superior à abertura da malha hexagonal.

Figura 5.16 – Índice de forma médio para os gabiões com 25% em massa de vermelho, 25% em massa de misto e compostos apenas por AR cinza



Os gráficos sugerem que a maior parte dos AR utilizados possui forma alongada, seguida da forma alongada-lamelar, lamelar e em menor proporção forma cúbica. Santos Júnior (2018) recomenda minimizar a utilização de elementos planos e alongados ao preencher o gabião, com o intuito de evitar que a malha seja danificada

em função da dureza e geometria das rochas. Contudo as características dos AR de maiores dimensões da ERE BR-040 são as que estão mostradas na Figura 5.16.

5.9.2 Ensaio de compressão não confinada

A Figura 5.17 exibe o gabião G5 no início do ensaio, ou seja, antes da aplicação de carga vertical, e após os extensômetros se desconectarem do Neoprene, sinalizando o fim do ensaio. Analisando a Figura 5.17 nota-se o aumento do perímetro do gabião, causado pela deformação das laterais, principalmente da lateral esquerda, o que é evidenciado pelo deslocamento da régua das trenas. Além disso, é constatado a fragmentação dos AR que preenchem o gabião, bem como a inclinação horizontal do Neoprene para a lateral esquerda. O comportamento de cada gabião ensaiado pode ser verificado no Apêndice 1, 2 e 3.

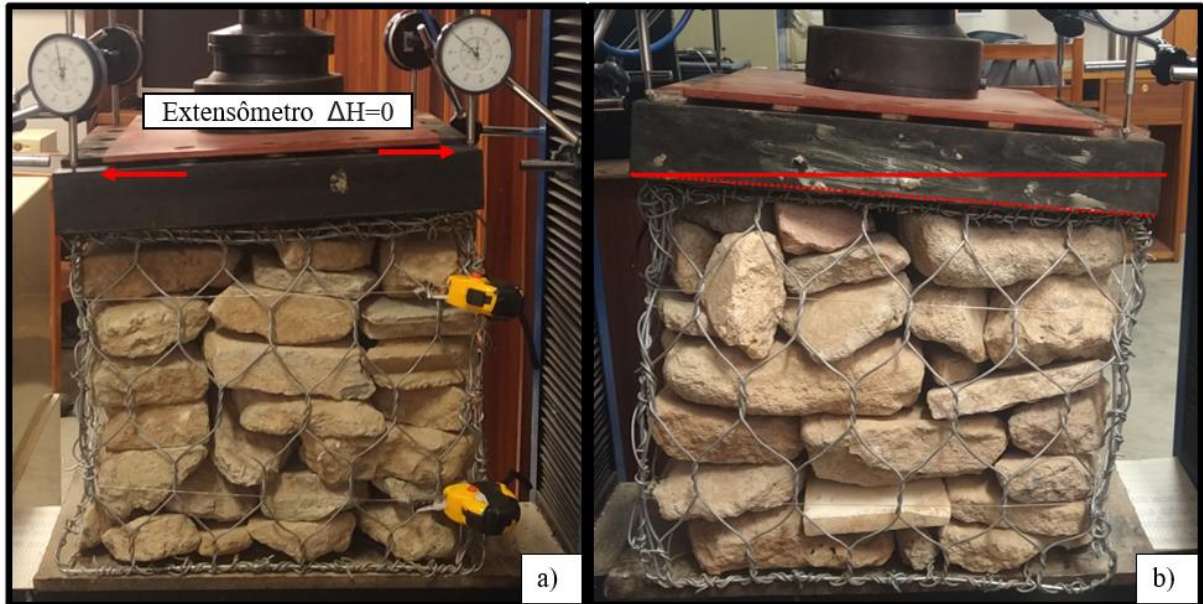
Figura 5.17 – (a) G5 no início do ensaio, sem aplicação e carga e (b) G5 no fim do ensaio



No decorrer do ensaio foram encontradas algumas adversidades, uma delas está relacionada ao fechamento do gabião antes do seu preenchimento. Como os gabiões foram fabricados em menor escala, as faces não estavam simétricas, conseqüentemente ao fechar o gabião o paralelepípedo formado não tinha arestas ortogonais e por isso alguns desníveis foram constatados após a montagem do ensaio, como mostrado na Figura 5.18 (a). Além disso, os vértices da tampa de alguns gabiões possuíam bordas com costura de amarração mais bem acabadas, característica que refletiu na resposta destas arestas às cargas aplicadas,

ocasionando a deformação desigual do gabião em função da sua maior resistência, situação exibida na Figura 5.18 (b).

Figura 5.18 – (a) Inclinação das chapas superiores antes da aplicação de cargas e (b) Inclinação das chapas em função dos vértices mais bem acabados



Durante os incrementos de carga foi possível escutar o ruído dos AR se acomodando, até que os ajustes chegam ao limite e a compressão de um elemento ao outro conduz à sua fragmentação, acarretando num ruído intenso. Este comportamento também é previsto para as rochas utilizadas como material de enchimento. Segundo Agostini *et al.* (1987 apud SANTOS JUNIOR, 2018) num primeiro momento ao aplicar carga no gabião há a acomodação das rochas até deformações de 10%, em seguida, o aumento de tensão na malha e nas rochas periféricas na região perimetral restringem os elementos centrais, acarretando a fragmentação das rochas.

Os resultados do ensaio para as 9 amostras estão apresentados na Tabela 5.11 indicando a carga máxima suportada, altura inicial e a deformação vertical. Vale ressaltar, que o ensaio da amostra G3 foi eliminado, uma vez que o teste foi finalizado antes que todos os extensômetros desconectassem do Neoprene, pois havia risco de danificar o equipamento. E também pelo fato do Neoprene estar desalinhado horizontalmente, mascarando o deslocamento vertical do gabião registrado pelo extensômetros, fato que foi intensificado com o aumento da carga.

A deformação volumétrica chegou a ser calculada, contudo o material de enchimento não acompanhou a deformação perimetral da gaiola, ou seja, houve o “embarrigamento” apenas da malha metálica em alguns ensaios. Ademais, os resultados de $\Delta V/V_0$ destoaram dos obtidos para a deformação vertical, por isso optou-se em não apresentar tais dados.

Tabela 5.11 – Cargas máximas e variação da altura

Amostra	Condição	Altura inicial (cm)	$\Delta H_i/H_0$ (%)	Carga Máx (kN)
G8	Cinza	33,3	14,7	40,2
G10	Cinza	34,3	14,2	42,4
G5	Cinza	36,5	13,4	31,3
G4	Vermelho	35,9	13,6	33,8
G13	Vermelho	35,3	13,8	22,8
G9	Vermelho	36,2	13,6	19,6
G3*	Misto	36,9	11,9	39,8
G6	Misto	35,3	13,1	29,9
G11	Misto	34,8	14,1	25,2

* O ensaio G3 foi eliminado

Analisando os resultados médios para cada grupo, obtêm-se que a fração cinza foi a que obteve o menor desvio padrão para as variações de altura destacadas na Tabela 5.12, além de ter suportado a maior aplicação de carga de 42,4 kN, com valor médio de 37,95 kN. Já as amostras vermelhas apresentaram o pior desempenho no ensaio, ou seja, estes gabiões não suportaram mais de 34 kN, obtendo uma média de 25,43 kN. Apesar das amostras contendo fração mista exibirem índices físicos semelhantes aos dos gabiões cinza, a média de carga máxima foi de 29,9 kN, resultado inferior à média para os gabiões cinza.

Tabela 5.12 – Estágio de carga máximo e variação da altura

	$\Delta H_t/H_0$ (%)		Carga Máx (kN)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
Cinza	14,12	0,66	37,95	5,88
Vermelho	13,65	0,13	25,43	7,46
Misto*	13,03	0,07	27,57	3,34

* O ensaio G3 foi desconsiderado para o cálculo estatístico

O comportamento das amostras durante a execução do ensaio de compressão não confinada é apresentado nas Figura 5.19, Figura 5.20, Figura 5.21 e Figura 5.22. Objetivando comparar o desempenho dos AR com rochas comumente utilizadas, foi inserida uma série de dados do trabalho de Camelo (2019), obtido para a compressão de um módulo de gabião teórico de 40x40x40 cm com malha hexagonal de dupla torção de 8x10 cm preenchido com basalto. Salienta-se que o teste de Camelo (2019) foi finalizado com a carga máxima de 38,3 kN.

Para a melhor visualização do comportamento de cada fração, os gráficos foram plotados por tipo de fração (cinza, 25% mista e 25% vermelha) e um com todas as séries de dados. Optou-se por plotar a variação da altura (deformação vertical) para facilitar a comparação de um ensaio com outro. Ademais, foi adicionado aos gráficos de Carga x Variação de Deformação Vertical o intervalo de confiança de 95% para os resultados obtidos neste trabalho, a partir de um ajuste polinomial do terceiro grau, indicado apenas de forma ilustrativa. A estimativa do intervalo de confiança pode ser interpretada como se todas as amostras possíveis de um mesmo tamanho n fossem retiradas, 95% delas iriam conter a verdadeira média da população. Para além do parâmetro estatístico, o intervalo de confiança evidencia o comportamento das amostras no decorrer do ensaio.

Figura 5.19 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras cinza

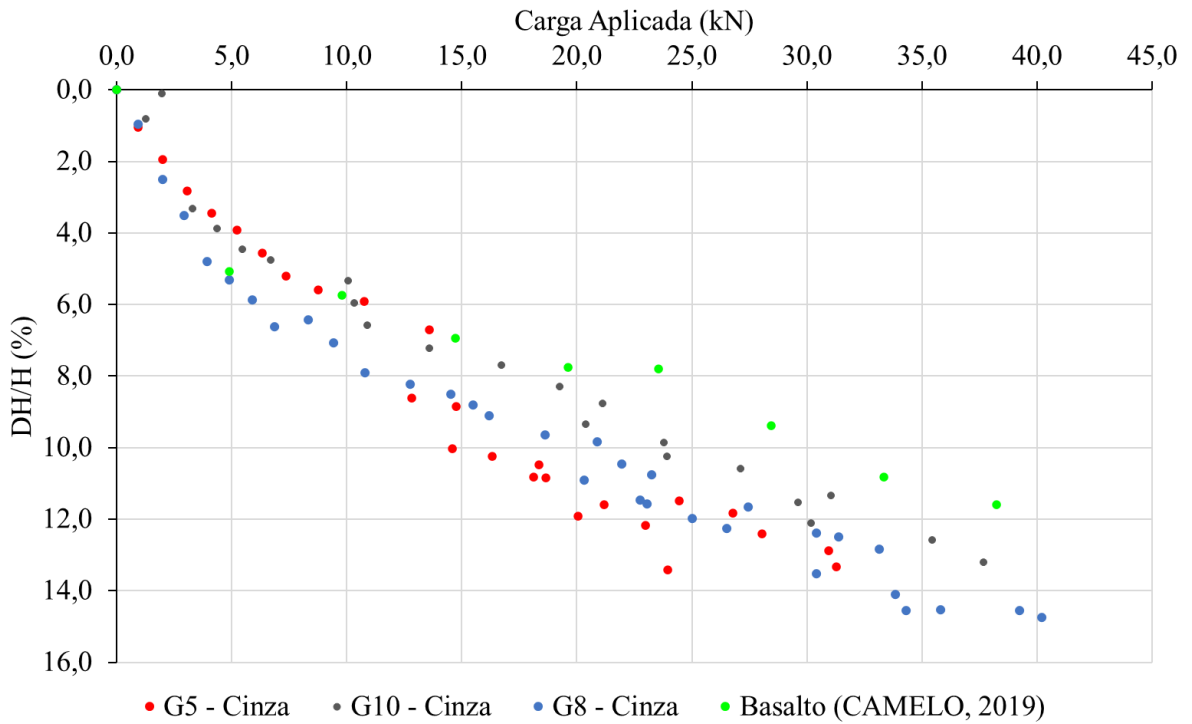


Figura 5.20 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de misto

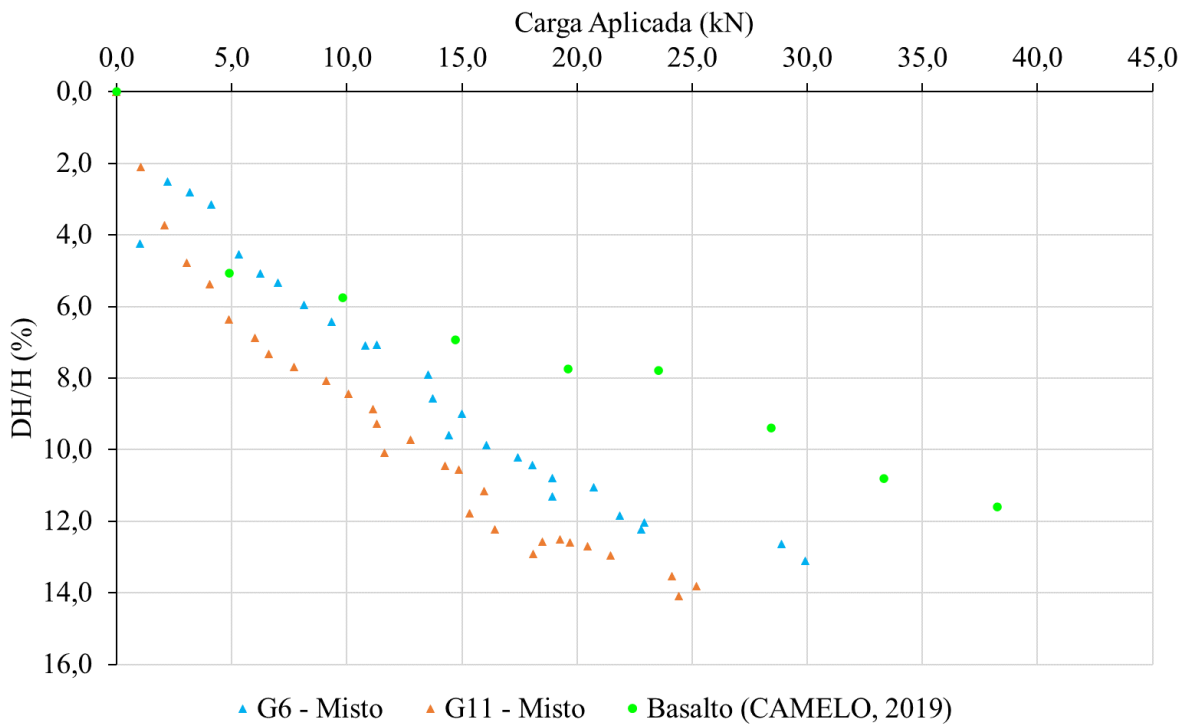


Figura 5.21 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de Vermelho

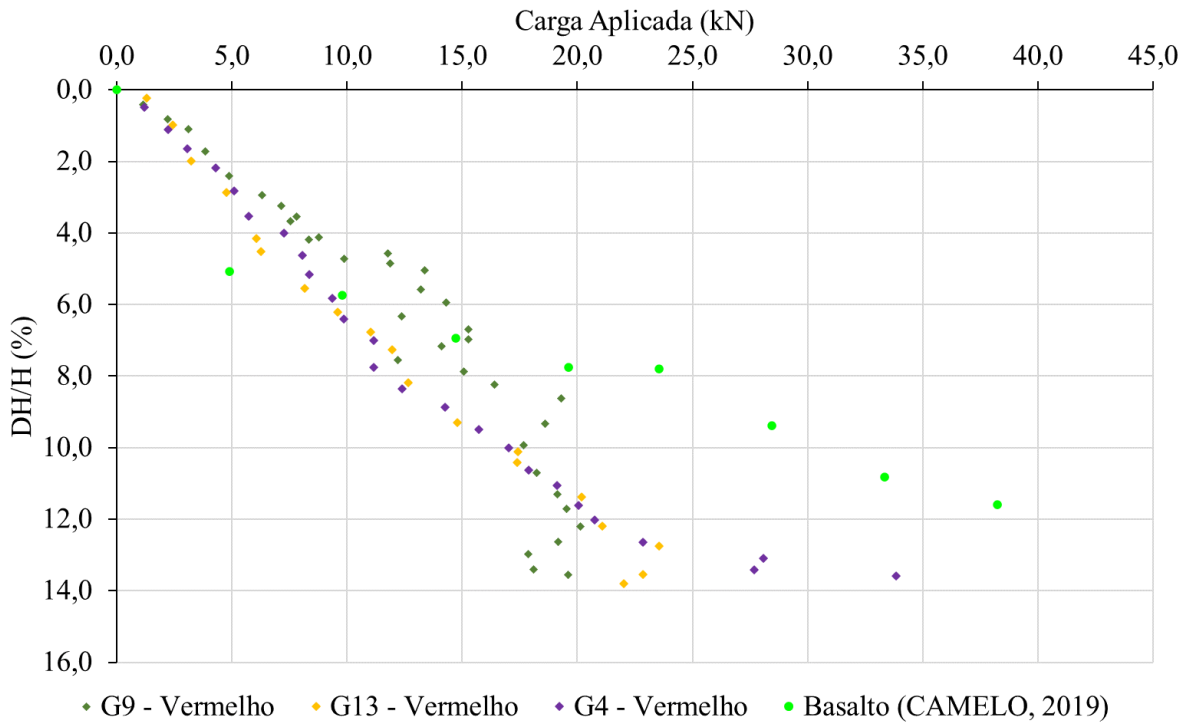
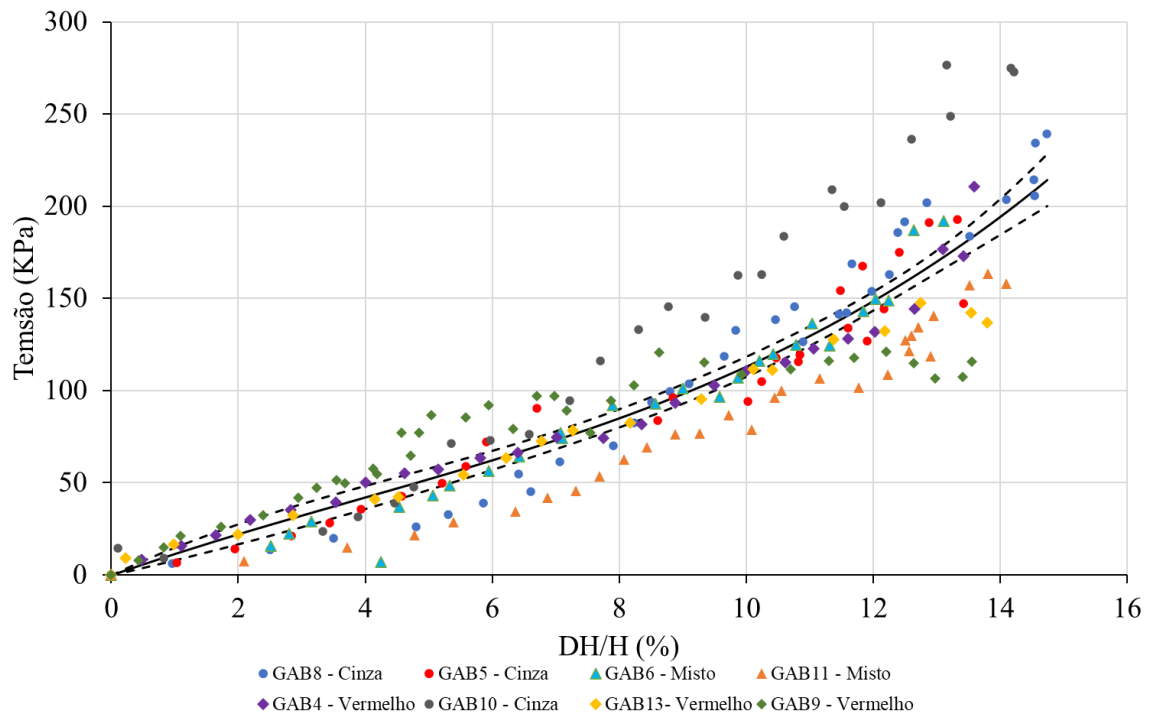


Figura 5.22 – Curvas carga versus variação da deformação vertical das amostras



Observando a Figura 5.19 denota-se as amostras G5 e G8 apresentaram comportamentos mais próximos, com valores de carga x deformação semelhantes. O mesmo raciocínio é verificado na Figura 5.21 com as amostras G4 e G13. As amostras

compostas por 25% de fração mista, apresentara menor homogeneidade, como exibido na Figura 5.20. Comparando todos os ensaios realizados com o ensaio de basalto obtido por Camelo (2019), nota-se a menor deformação vertical do gabião preenchido com rocha para maiores cargas, resultado esperado tendo em vista a maior robustez das propriedades mecânica desta rocha.

Os resultados apontam que o gabião composto pela fração cinza suporta uma capacidade de carga média de 38 kN para um deslocamento vertical de 14%, enquanto o gabião com 25% de misto chegou a uma carga média de 28 kN para uma deformação vertical de 13%. Por fim, a amostra com 25% de vermelho suportou a menor carga, de 25 kN e chegou a deformações de quase 14%. Somente para as amostras cinza foi sugerido que o menor valor de carga foi atribuído ao gabião com maior porosidade. O raciocínio não é análogo para as outras frações. Camelo (2019) obteve uma carga máxima de 32 kN e 28 kN ao ensaiar gabiões de mesmas dimensões preenchidos com fração cinza, resultado inferior aos desta pesquisa. Tal diferença pode estar vinculada à montagem do gabião e à qualidade dos RCD utilizados, uma vez que as características e execução do ensaio foram semelhantes.

A tensão vertical foi calculada a partir das cargas aplicadas e da área corrigida, obtida de duas formas. A primeira a partir da análise dos deslocamentos perimetrais medidos, e a segunda a partir da área inicial e da deformação vertical. A partir da média das duas áreas corrigidas foram determinadas as tensões verticais. As Figura 5.23 a Figura 5.26 apresentam os gráficos de Tensão x Deformação Vertical.

Novamente, os resultados foram apresentados junto com o intervalo de confiança e por tipo de amostras. A Figura 5.23 apresenta a relação entre tensão e deformação para as amostras com 25% de vermelhos, a Figura 5.24 para as amostras com 25% de misto, a Figura 5.25 para a amostra contendo apenas fração cinza, e, por fim, a Figura 5.26 com todas as séries de dados. Considerando o limite de deformação dos ensaios, em torno de 15%, as curvas sugerem uma tendência de endurecimento por deformação, contudo algumas amostras de fração vermelha começaram a mostrar um limite e diminuição de suportar cargas mais intensas. Já para as amostras de gabião cinza e misto, a curva indicou comportamento semelhante, apresentando

desenvolvimento crescente, sem manifestar tendência de manter a deformação vertical com o incremento de tensão.

Os resultados de tensão vertical obtidos foram comparados com os de Santos Júnior (2018), que realizou o ensaio de compressão não confinada para uma célula de gabião preenchida com granito de dimensões de 1,0x1,0x1,0 m com a mesma malha hexagonal. A tensão máxima obtida Santos Júnior (2018) foi de 290,6 kPa. Comparando este valor com valor máximo de tensão registrado nas 9 amostras, de 272,9 kPa para o GAB 10, observa-se uma semelhança nos resultados e confirmam a potencialidade da utilização da fração cinza. No entanto, a deformação vertical é desigual, enquanto o gabião de granito atinge uma deformação máxima vertical de 9,2%, o GAB 10 reduziu sua altura em 14,2%.

Para as amostras vermelhas a diferença é maior, a deformação máxima foi de 12,7% para uma tensão de 158,9 kPa, e as amostras mistas chegaram a alcançar uma tensão de 177,9 kPa e reduzir em 13,7% sua altura. É importante considerar que os gabiões ensaiados neste trabalho possuíam dimensões menores do que os de Santos Júnior (2018). Essa característica influenciou nos resultados obtidos, uma vez que os gabiões ensaiados têm maior área de tela por quilograma de material de enchimento.

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, observa-se que mesmo sem atingir uma ruptura física do gabião, os elevados níveis de deformações observados já sugerem um estado limite de utilização. Em linhas gerais, os resultados sugerem que os gabiões compostos apenas pelos AR cinza são promissores por apresentarem o melhor desempenho mecânico.

Figura 5.23 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de vermelho

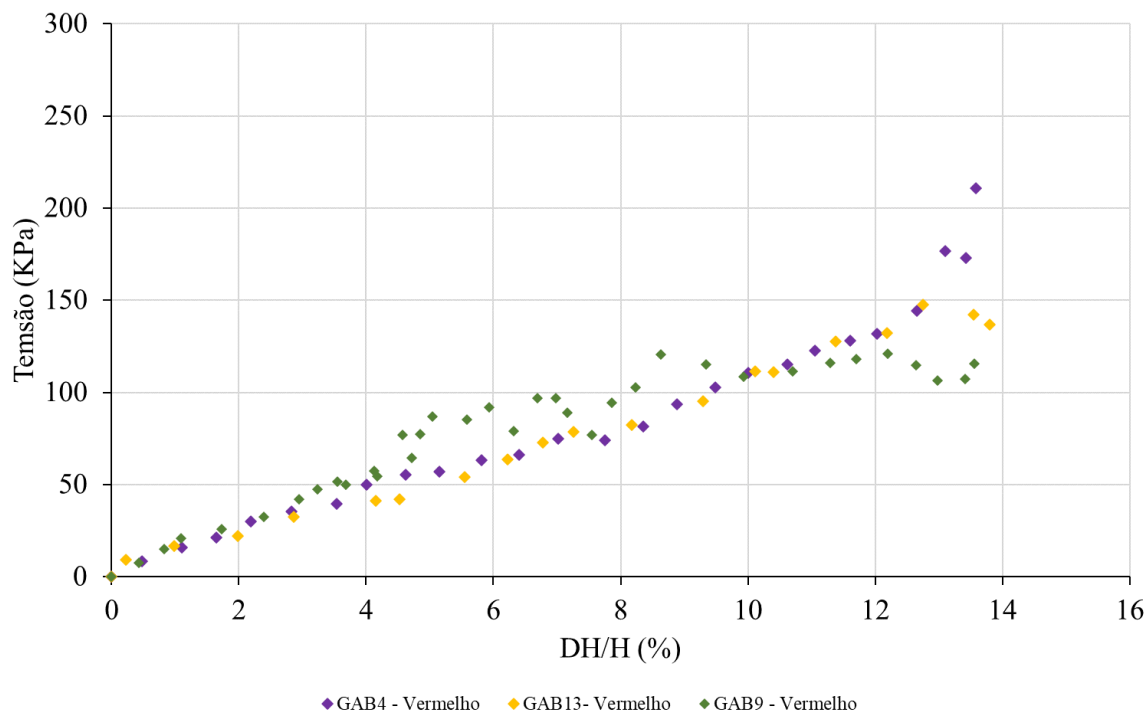


Figura 5.24 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras de 25% de misto

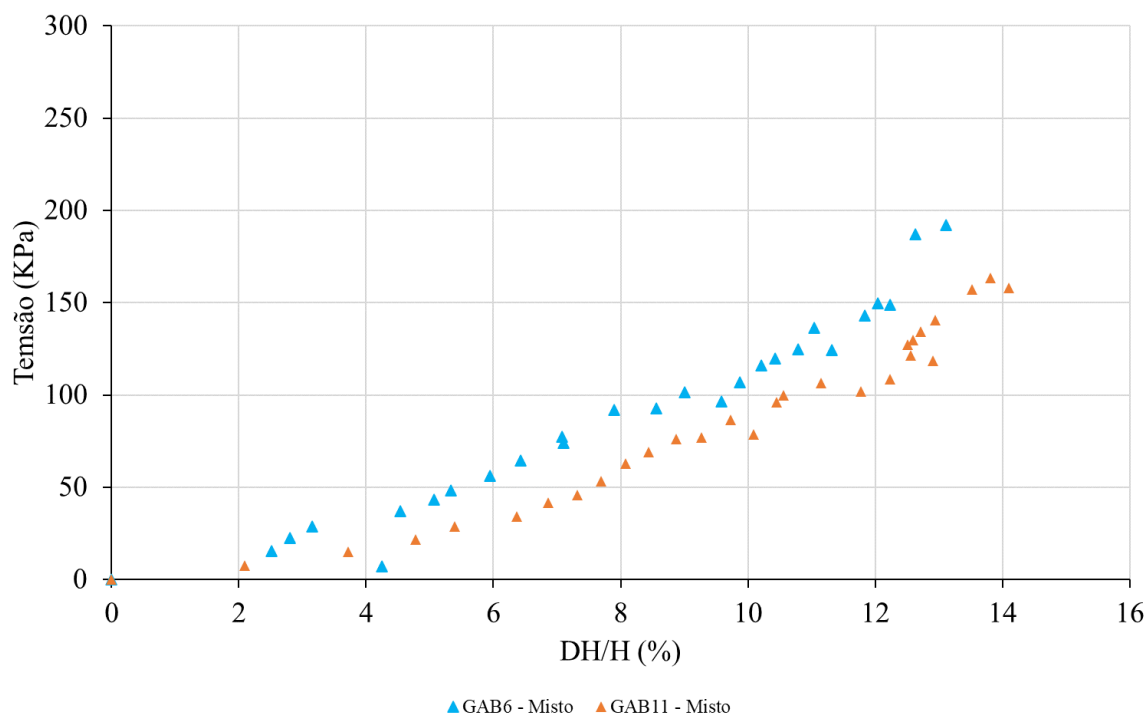


Figura 5.25 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras cinza

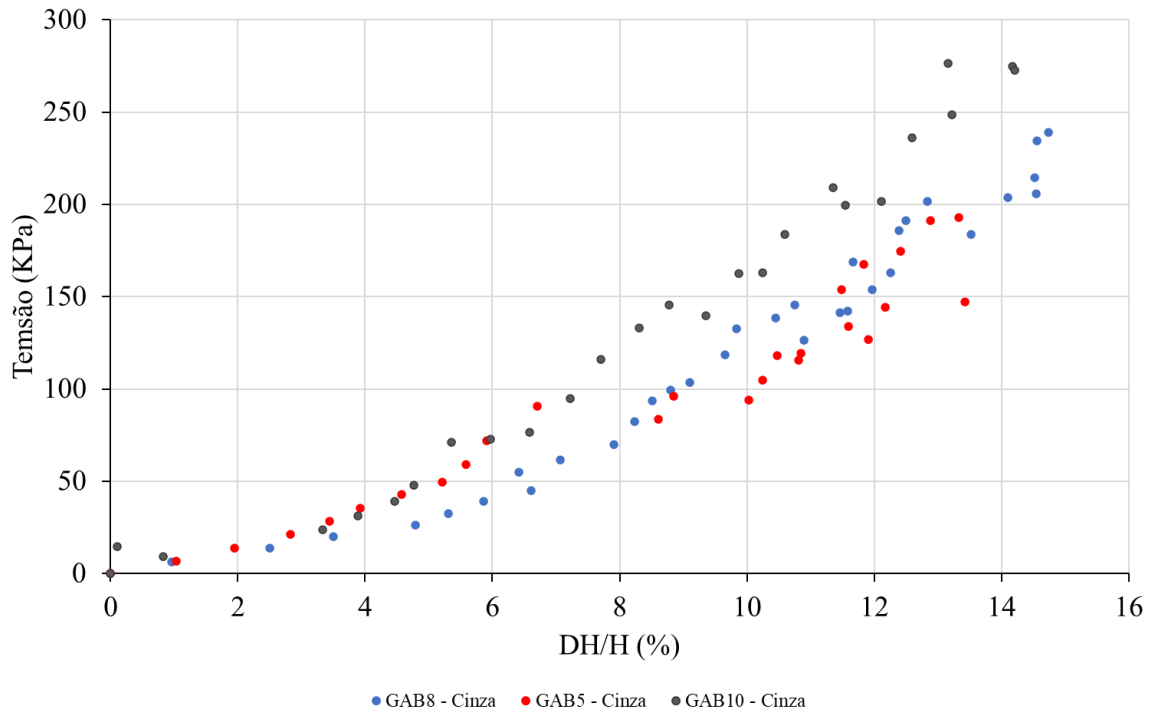
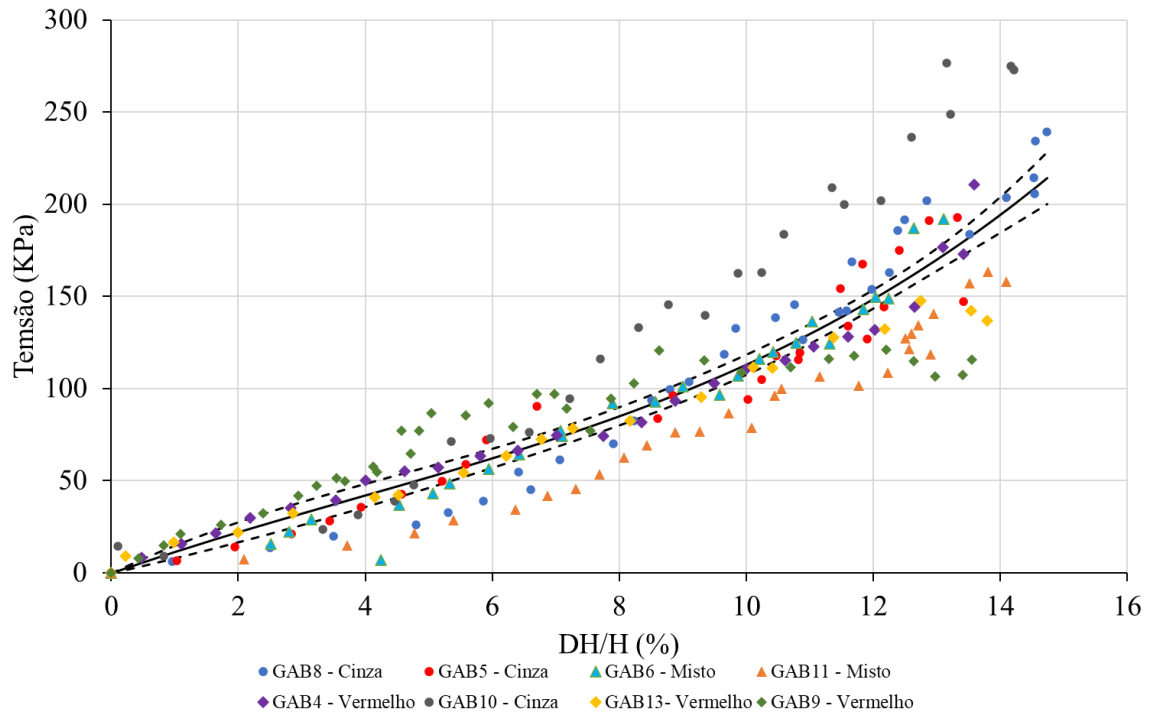


Figura 5.26 – Curvas tensão vertical versus variação da deformação vertical das amostras



6 CONCLUSÕES

O resultado da composição gravimétrica indicou que a maior parte dos AR provenientes da ERE BR-040, cerca de 75%, são compostos pela fração cinza dos RCD, que apresentou características mais próximas do material de enchimento pétreo. Por outro lado, a fração vermelha, que corresponde a 14% dos AR, obteve desempenho inferior. A maior porosidade dos RCD vermelhos refletiu nos índices físicos, resultando num maior teor de umidade que variou de 18,8 a 8,4%, maior absorção de água (18%), e menor massa específica (1,5 g/cm³). Em contrapartida, a fração cinza obteve menor teor de umidade (7,7 e 5,3%), menor absorção de água (8,8%) e maior massa específica (2,0 g/cm³). A fração mista obteve resultados intermediários comprada às frações cinza e vermelha.

O desempenho mecânico dos AR foi avaliado inicialmente pela abrasão Los Angeles, e os resultados indicaram que a amostra com 50% em massa de AR misto e apenas fração cinza obtiveram a menor perda por abrasão, com 57%. Enquanto a amostra com 50% em massa de vermelho alcançou perdas de 61%. Quanto à resistência à compressão pontual, a fração cinza resultou numa média de 1,5 kPa, 1,2 kPa para a mista e 0,5 kPa para a fração vermelha. Apesar do maior valor da fração cinza, a resistência obtida é seis vezes inferior àquela das rochas comumente utilizadas para essa finalidade. Por fim, a durabilidade foi estimada e os resultados para 2 ciclos de umedecimento e secagem não demonstraram diferença significativa entre as frações cinza, mista e vermelha.

Quanto às características dos gabiões, a porosidade apresentou resultados dentro da faixa recomendada (entre 30 a 40%) para todas as amostras. O ensaio de compressão não confinada sugeriu que a fração cinza se aproxima do comportamento do material pétreo normalmente utilizado, chegando à carga máxima média de 38 kN, e de 25 kN para a amostra com 25% de fração vermelha. Apesar dos resultados promissores, é fundamental que sejam ensaiados gabiões preenchidos com RCD em escala real, a fim de que a proporção tela/material de enchimento não influencie no resultado.

Dessa forma, evidencia-se o potencial uso dos RCD, principalmente da fração cinza, como material de enchimento do gabião. Pois além de valorar parte dos RCD na forma de agregados, evita a exploração de recursos naturais e a sua disposição

inadequada e em aterros, além de estimular a reciclagem e a reutilização dos resíduos conforme preconizado pela Lei 12.305/2010. Contudo, estudos em escala real são essenciais para comprovar a segurança de utilização e definir precisamente quais são as limitações do uso desse material de enchimento.

7 RECOMENDAÇÕES

Apresentam-se, a seguir, as recomendações para trabalhos futuros:

- Evidencia-se que a busca por métodos mais eficientes para a segregação da fração cinza dos RCD é fundamental para que sua aplicação seja mais simples;
- Recomenda-se que nos próximos estudos sejam realizados ensaios de durabilidade com no mínimo 5 ciclos de secagem e umedecimento, a fim de submeter o material a situações extremas de desgaste;
- Realizar o ensaio de abrasão Los Angeles somente com a fração vermelha e mista dos RCD, visto que amostras cinza podem mascarar o desempenho das frações menos resistentes;
- Efetuar o ensaio de compressão não confinada da célula de gabião em escala real, principalmente para definir se a tensão suportada será maior ou menor do que os módulos ensaiados em menor escala, além de ensaiar o teste na modalidade confinada, pois desta forma é possível prever o comportamento da estrutura de uma forma mais próxima à situação real de campo;
- Além de conceber todos os ensaios com a rocha comumente utilizada para possibilitar a comparação do desempenho dos RCD com o material pétreo.

REFERÊNCIAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 53: Agregado graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2002.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR : Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro 2021.

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro 2019.

ABRELPE - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2020. 18. ed. São Paulo: -, 2021. 54 p.

AGOPYAN, V.; JOHN, V. M. **O desafio da sustentabilidade na construção civil**. Goldemberg, J. (Coord.). São Paulo: Blucher, 2011. v. 5.

AGOSTINI, R.; CESARIO, L.; CONTE, A.; MASETTI, M.; AND PAPETTI, A. Flexible gabion structures in earth retaining works, Officine Maccaferri S.p.A., Bologna, Italy, 1987.

AKHTAR, A.; SARMAH, A. K. Construction and demolition waste generation and properties of recycled aggregate concrete: a global perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 186, p. 262–281, 2018. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.03.085>.

ALI, A. F.; ALI, Z. T. A. Sustainable Use of Concrete Demolition Waste as Reactive Material in Permeable Barrier for Remediation of Groundwater: Batch and Continuous Study. **Journal of Environmental Engineering**, p. 04020048-1, 18 abr. 2020. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%29EE.1943-7870.0001714>. Acesso em: 1 mar. 2022.

ANGULO, S. C.; JOHN, V. M.; ULSEN, C.; KAHN, H.; MUELLER, A. Separação óptica do material cerâmico dos agregados mistos de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, v.13, n.2, p.61-73, 2009.

Angulo; L. S. Oliveira, L. Machado – São Paulo: Epusp, 2022. Disponível em: https://abrecon.org.br/pesquisa_setorial/. Acesso em: 26 mai. 2022.

Anthony, J., 2015. Recycling Plant Will Take Waste of Industry. *Waikato Times*.

ARAUJO, Joyce Maria de; GÜNTHER, Wanda Maria Risso. Caçambas coletoras de resíduos da construção e demolição no contexto do mobiliário urbano: uma questão de saúde pública e ambiental. **SciELO**, São Paulo, v. 16, n. 1, p.1-10, jan/abr de 2007. DOI <https://doi.org/10.1590/S0104-12902007000100013>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DA INDÚSTRIA DE MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO – ABRAMAT. Perfil da cadeia produtiva da construção e da indústria de materiais e equipamentos. 2021. Disponível em: <https://abramat.org.br/wp->

content/uploads/2022/03/ABRAMAT-Perfil-da-Cadeia-Produtiva-da-Construcao-e-Industria-de-Materiais-2021-Resumo.pdf. Acesso em: 07 mai. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro, 2004a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15112: Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004a. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15113: Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004a. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15114: Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004c. 7p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15115: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004d. 10p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 15116: Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos. Rio de Janeiro, 2004e. 12p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). NBR 16972: Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Rio de Janeiro, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO (ABRECON). Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil / organizadores S. C.

ASTM D4644-16, Standard Test Method for Slake Durability of Shales and Other Similar Weak Rocks, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

ASTM D5731-16, Standard Test Method for Determination of the Point Load Strength Index of Rock and Application to Rock Strength Classifications, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, www.astm.org.

BANIAS G. *et al.* A web-based decision support system for the optimal management of construction and demolition waste. **Waste Management**, v. 31, n. 12, p. 2.497-2.502, 2011. DOI <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.07.018>.

BARROS, P. L. A. Manual técnico de obras de contenção. 1. ed. São Paulo: Maccaferri do Brasil, 2005.

BELO HORIZONTE. **DECRETO Nº 17.542, de 10 de fevereiro de 2021**. Atualiza a tabela de preços públicos de serviços extraordinários de limpeza da superintendência de limpeza urbana de Belo Horizonte. Belo Horizonte: Câmara Municipal, [2016]. Disponível em: <http://portal6.pbh.gov.br/dom/iniciaEdicao.do?method=DetalheArtigo&pk=1157142>. Acesso em: 22 mar. 2022.

BRASIL, Resolução CONAMA nº307, de 05 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. Publicado no D.O.U. de 17 de julho de 2002.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS): diagnóstico do manejo de resíduos sólidos urbanos – 2020. Brasília: SNS/MDR, 2021. Disponível em: http://www.snis.gov.br/downloads/diagnosticos/rs/2020/DIAGNOSTICO_TEMATICO_VISAO_GERAL_RS_SNIS_2021.pdf. Acesso em: 23 mai 2022.

BRAVO, M. *et al.* Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 99, p. 59-74, 11 mar. 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.03.012>.

BRAVO, M., BRITO, J., PONTES, J. e EVANGELISTA, L. Mechanical performance of concrete made with aggregates from construction and demolition waste recycling plants. **Journal of Cleaner Production**, v. 99, n. 8, p. 59–74, mar. 2015.

BRAVO, Miguel; DUARTE, António P. C; BRITO, Jorge; EVANGELISTA, Luis; PEDRO, Diogo. On the Development of a Technical Specification for the Use of Fine Recycled Aggregates from Construction and Demolition Waste in Concrete Production. **Materials**, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1944/13/19/4228> Acesso em 23 de março de 2022.

Broch, E.; Franklin, J.A (1972): “The point-load strength test”. Intl. Rock Mech. Min. Sci. Geomech. Abstr., v.9, p.669 – 697.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. Bioestatística: princípios e aplicações. Porto Alegre: Artmed, 2003.

Calvo, N., Varela-Candamio, L., Novo-Corti, I., 2014. A dynamic model for construction and demolition (C&D) waste management in Spain: driving policies based on economic incentives and tax penalties. **Sustainability**. Times 6, 416e435. <https://doi.org/10.3390/su6010416>

CAMELO, D. G. **Estudo da utilização de resíduos de construção civil para preenchimento de gabiões caixa**. 2019. 205 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Nove de Julho, [S. l.], 2019. Disponível em: <https://bibliotecatede.uninove.br/handle/tede/2111>. Acesso em: 12 abr. 2022.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E. C.; OLIVEIRA, A. M. V. de; BRUM, I. A. S. de; SAMPAIO, T. S.; ALBERTE, E. P. V.; COSTA, D. B. Características do entulho e do agregado reciclado. In:CASSA, J. C. S.; CARNEIRO, A. P.; BRUM, I. A. S. de.

Reciclagem de entulho para produção de materiais de construção. Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001. p.142-187

Centre for Science and Environment India, 2014. Construction and Demolition Waste. Disponível em: <http://www.cseindia.org/userfiles/Constructionand-demolition-waste.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2022.

CHAHUD, E. (Org.). Reciclagem de resíduos para a construção civil. Belo Horizonte: Universidade FUMEC - Faculdade de Engenharia e Arquitetura, 2007. 450 p.

CHEN, Yuyun; ZHOU, Yiqiang. The contents and release behavior of heavy metals in construction and demolition waste used in freeway construction. **Environmental Science and Pollution Research**, dez. 2019. Disponível em: <https://sci-hub.mkksa.top/10.1007/s11356-019-07067-w>. Acesso em: 08 de março 2022.

chen, Z. *et al.* Recycling and reuse of construction and demolition waste in concrete-filled steel tubes: A review. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 641–660, nov. 2016. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0950061816315021>. Acesso em: 16 mar. 2022.

CONSELHO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE. Deliberação nº 292, de 27 de fevereiro de 2019. Institui o Sistema Estadual de Manifesto de Transporte de Resíduos e estabelece procedimentos para o controle de movimentação e destinação de resíduos sólidos e rejeitos no estado de Minas Gerais e dá outras providências. Diário Oficial do Estado de Minas Gerais: Poder Executivo, Belo Horizonte, 09 mar. 2019.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 09 de setembro de 2004. Estabelece critérios para classificação, segundo o porte e potencial poluidor, de empreendimentos e atividades modificadoras do meio ambiente passíveis de autorização ambiental de funcionamento ou de licenciamento ambiental no nível estadual, determina normas para indenização dos custos de análise de pedidos de autorização ambiental e de licenciamento ambiental, e dá outras providências. .

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 155, de 25 de agosto de 2010. Altera dispositivos da Deliberação Normativa COPAM nº 74, de 9 de setembro de 2004, incluindo na listagem E códigos de atividade para manejo e destinação de resíduos da construção civil e volumosos, e dá outras providências.

CONSELHO ESTADUAL DE POLÍTICA AMBIENTAL – COPAM. Deliberação Normativa COPAM nº 232, de 27 de fevereiro de 2019. Institui o Sistema Estadual de Manifesto de Transporte de Resíduos e estabelece procedimentos para o controle de movimentação e destinação de resíduos sólidos e rejeitos no estado de Minas Gerais e dá outras providências.

CÓRDOBA, E. R. **Estudo do Sistema de Gerenciamento Integrado de Resíduos de Construção e Demolição no município de São Carlos – SP.** 2010. 372p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

CORDOBA, R. E. **Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação**. Orientador: Valdir Schalch. 2014. 340 p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2014. DOI 10.11606/T.18.2014.tde-26052015-162328.

CÓRDOBA, R. E. *et al.* Alternative construction and demolition (C&D) waste characterization method proposal. **Revista Engenharia Sanitária Ambiental**, [S. l.], v. 24, p. 199-212, 25 abr. 2019. DOI <https://doi.org/10.1590/S1413-41522019179720>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/esa/a/ymsPxK6G6ZgG8Z6rQLcbvHH/?lang=en>. Acesso em: 2 maio 2022.

DAHLBO, H.; BACHÉR, J.; LÄHTINEN, K.; JOUTTIJÄRVI, T.; SUOHEIMO, P.; MATTILA, T.; SI-RONEN, S.; MYLLYMAA, T.; SARAMÄKI, K. Construction and demolition waste management – a holistic evaluation of environmental performance. **Journal of Cleaner Production**, v. 107, p. 333–341, 2015.

DE BRITO, J.; PEREIRA, A.S.; CORREIA, J.R. Mechanical behaviour of non-structural concrete made with recycled ceramic aggregates. **Cement and Concrete Composites**, [S. l.], v. 27, p. 429-433, 11 abr. 2005. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2004.07.005>.

DELOITTE, **Resource Efficient Use of Mixed Wastes Improving Management of Construction and Demolition Waste**. Directorate-General for Environment: European Commission, out. 2017. Disponível em: <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/78e42e6c-d8a6-11e7-a506-01aa75ed71a1/language-en>. Acesso em: 2 jul. 2022.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE ESTRADAS DE RODAGEM (DNER). 1998. DNER-ME 035/98: Agregados – Determinação da abrasão “Los Angeles”. Rio de Janeiro: DNER.

Departamento nacional de Estradas e Rodagem (1997). DNER-ES 343/97. Proteção do corpo estradal – estruturas de arrimo com gabião. Rio de Janeiro, RJ. Disponível em: http://www1.dnit.gov.br/arquivos_internet/ipr/ipr_new/normas/dner-es343-97.pdf. Acesso em 10 de jun. de 2022.

Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes – DNIT 0312004 – ES (2004). Pavimentos flexíveis – Concreto asfáltico – Especificações de serviço. Departamento Nacional de Infra-Estrutura de Transportes, Rio de Janeiro.

DIAS FILHO, J. L. E.; XAVIER, G. C.; MAIA, P. C. A. Análise da durabilidade de gnaiss através de ensaio de desgaste. **VÉRTICES**, [S. l.], v. 15, n. 3, p. 7-16, 24 set. 2013. DOI <https://doi.org/10.5935/1809-2667.20130025>.

DOS REIS, G. S. *et al.* Adsorption and recovery of phosphate from aqueous solution by the construction and demolition wastes sludge and its potential use as phosphate-based fertiliser. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, [S. l.], v. 8, p. 103605, 11 dez. 2019. DOI 10.11606/T.18.2014.tde-26052015-162328.

Farrelly, T., Tucker, C., 2014. Action research and residential waste minimisation in Palmerston North, New Zealand. *Resources, Conservation and Recycling*. set. 2014 91, 11e26. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2014.07.003>.

FERREIRA, M. Q.; ANTÃO, A. Utilização do “Slake Durability Test” na caracterização da alteração de granitos. In: Actas do VII Congresso Nacional de Geologia. [s.l.] Sociedade Geológica de Portugal e Universidade de Évora, 2006. p. 763–766.

FONSECA, F. L. C.; NAMEN, A. A. Characteristics and patterns of inappropriate disposal of construction and demolition waste in the municipality of Cabo Frio, Brazil. *Revista Brasileira de Gestão Urbana*, [S. l.], v. 13, p. 1-19, 9 jul. 2021. DOI <https://doi.org/10.1590/2175-3369.013.e20200091>.

GALVÁN, M.; PRECIADO J.; SERÓN J. Correlation between the point load index, $is(50)$, and the resistance to unconfined compression in limestone from the comunidad valenciana, Spain. *Acta geotechnica Slovenica*, v. 11, p. 34-45, 12 jan. 2014. Disponível em: http://www.fg.uni-mb.si/journal-ags/pdfs/ags_2014-2_article_3.pdf. Acesso em: 2 julho 2022.

GÁLVEZ-MARTOS, J.-L.; STYLES, D.; SCHOENBERGER, H.; ZESCHMAR-LAHL, B. Construction and demolition waste best management practice in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, v.136, p.166–178, 2018.

Ho, N.Y., Lee, Y.P.K., Tan, J.Y. Beneficial Use of Recycled Concrete Aggregate for Road Construction in Singapore. 6th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology, Sapporo, Japan, p. 8. 2008.

HO, Nyok Yong; LEE, Yang Pin Kelvin; LIM, Wee Fong; CHEW, Keat Chuan; LOW, Giau Leong; TING, Seng Kiong. Evaluation of RCA concrete for the construction of Samwoh Eco-Green Building. *Magazine of Concrete Research*. pp. 633-644, 01 set. 2015. DOI <https://doi.org/10.1680/mac.14.00212>.

HOANG, N. H. *et al.* A review of construction and demolition waste management in Southeast Asia. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 22, n. 2, p. 315–325, 16 set. 2019. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10163-019-00914-5>. Acesso em: 2 jul. 2022

HUANG, B.; WANG, X.; KUA, H.; GENG, Y.; BLEISCHWITZ, R.; REN, J. Construction and demolition waste management in China through the 3R principle. *Resources, Conservation and Recycling*, v. 129, p. 36–44, 2018.

HYVÄRINEN, M.; RONKANEN, M.; KÄRKI, T. The effect of the use of construction and demolition waste on the mechanical and moisture properties of a wood plastic composite. *Composite Structures*, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S026382231831242X>. Acesso em 25 de março de 2022.

IDAHO TRANSPORTATION DEPARTMENT. 2018 ITD **Standard Specifications for Highway Construction**. [S. l.: s. n.], 2018. Disponível em: <https://apps.itd.idaho.gov/apps/manuals/specbook/specbook18.pdf>. Acesso em: 29 maio 2022.

IKAU, R.; JOSEPH, C.; TAWIE, R. Factors influencing waste generation in the construction industry in Malaysia. **Procedia - Social and Behavioral Sciences**, v. 234, p. 11–18, out. 2016. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187704281631463X?via%3Dihub>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

INMET - Instituto Nacional de Meteorologia. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. *In: DADOS HISTÓRICOS ANUAIS*. 1 abr. 2022. Disponível em: <https://portal.inmet.gov.br/dadoshistoricos>. Acesso em: 10 abr. 2022.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil. Relatório de Pesquisa. Brasília, 2012.

ISRM. International Society of Rock Mechanics Commission on Testing Methods, Suggested Method for Determining Point Load Strength, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. and Geomech. Abstr.* 22, 1985, pp.51-60.

KULAIF, Y; LIMA, J.R.B. Análise dos mercados de matérias-primas minerais: estudo de caso da indústria de pedras britadas do Estado de São Paulo. 2002. Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

LACERDA, Rogério Tadeu de Oliveira; ENSSLIN, Leonardo; ENSSLIN, Sandra Rolim. Uma análise bibliométrica da literatura sobre estratégia e avaliação de desempenho. **Gest. Prod.**, São Carlos, v. 19, n. 1, p. 59-78, 2012. Disponível em: <https://www.scielo.br/pdf/gp/v19n1/a05v19n1.pdf>. Acesso em: 23 de março de 2022.

Lee, Y.P.K., Ho, N.Y., Tan, J.Y., Lee, K.K., Foo, S.Y., Ang, S.S.M. Beneficial Use of Recycled Concrete Aggregate for Utility Trench Reinstatement. Em: 7th International Conference on Road and Airfield Pavement Technology. Bangkok, Thailand, p. 8. 2011.

LEITE, Mônica Batista. Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. 2001. 290 f. Tese (Doutorado) -Programa de Pós Graduação de Engenharia Civil, Ufrgs, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <https://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/21839>>. Acesso em: 14 março 2022.

LI, Zhe; YAN, Shihao; LIU, Lulu; YANG, Jia. Investigation into Creep Characteristics and Model of Recycled Construction and Demolition Waste Used in Embankment Filler. **Construction and Building Materials**, março, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/5/1924>. Acesso em: 13 de Março de 2022.

LIMA, José Antônio Ribeiro de. **Proposição de Diretrizes Para Produção e Normalização de Resíduo de Construção Reciclado e de suas Aplicações em Argamassas e Concretos**. 1999. 240f. Tese (Doutorado) - Curso de Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999. Disponível em: . Acesso em: 14 maio 2022.

LU, W., 2014. Estimating the amount of building-related construction and demolition waste in China. *Proc. 18th Int. Symp. Adv. Constr. Manag. Real Estate* 3599, 539–548.

LÚCIO, Retana. Franco. **Diagnóstico do sistema de gerenciamento de resíduos de construção e demolição no município de Belo Horizonte – MG. 2013.** . Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Belo Horizonte-MG. 2013. f. 137. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUBD-EFE8E/1/vers_o_digital_final_disserta__o_renata_franco_l_cio_n_469.pdf. Acesso em: 1 mai. 2022.

MACAFERRI. **Terramesh®.** 2022. Disponível em: <https://www.maccaferri.com/br/produtos/terramesh/>. Acesso em: 19 abr. 2022.

MACAFERRI. **Manual Técnico MacSoil - Módulo 1: Dimensionamento e considerações gerais,** 2015. Disponível em: <https://www.maccaferri.com/br/documentos/manual-tecnico/?wpdmc=technical-manual-pt-br>. Acesso em: 19 abr. 2022.

MACAFERRI. **Proteção de rios com soluções MACAFERRI.,** 2017. Disponível em: https://intranet.maccaferri.com.br/newsletter/livro_fracassi/proteccao-de-rios-com-solucoes-maccaferri-DEG.pdf. Acesso em: 19 abr. 2022.

MASSOUDINEJAD, Mohamadreza; AMANIDAZ, Nazak; SANTOS, Rafael M.; BAKHSHOODEH, Reza. Use of municipal, agricultural, industrial, construction and demolition waste in thermal and sound building insulation materials: a review article. **Journal of Environmental Health Science and Engineering.** jul. 2019. Disponível em: <https://sci hub.mkksa.top/10.1007/s40201-019-00380-z>. Acesso em: 09 de Março de 2022.

MATIAS, Alessandra Natiele. **Resíduos de construção e demolição à luz da Política Nacional de Resíduos Sólidos. 2020.** Dissertação de Mestrado - Universidade Federal da Integração Latino-Americana. Instituto Latino-Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Foz do Iguaçu-PR, 2020. f. 205. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/5932>. Acesso em: 1 mar. 2022.

MCCABE, W.L.; SMITH, J.C.; HARRIOT, P. Unit Operations of Chemical Engineering, 7th ed., New York: **McGraw-Hill**, p. 1130, 2005.

Merino, R., Gracia, P.I., Salto, I., Azevedo, W., 2010. Sustainable construction : construction and demolition waste reconsidered. **Waste Management & Research.** Set. 2009 28, 118e129. <https://doi.org/10.1177/0734242X09103841>

MIGUEL PEREIRA, P.; SILVA VIEIRA, C. Resíduos de Construção e Demolição. Um estado de arte visando a sua valorização em Trabalhos Geotécnicosv. [s.l.] Faculdade de Engenharia Universidade do Porto, 1 out. 2013. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/75471/2/44679.pdf>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

MINAS GERAIS. **Lei 18.031, de 12 de Janeiro de 2009.** Dispõe sobre a política estadual de resíduos sólidos. Minas Gerais: Assembleia Legislativa, [2009]. Disponível em:

<https://www.almg.gov.br/consulte/legislacao/completa/completa.html?num=18031&ano=2009&tipo=LEI>. Acesso em: 22 mar. 2022.

MINISTÉRIO DAS CIDADES. Secretaria Nacional de Saneamento Ambiental (Org.). Resíduos sólidos : gerenciamento de resíduos da construção civil : guia do profissional em treinamento : nível 2. Belo Horizonte: ReCESA, 2008.

MORALES, G; MENDES, T.; ANGULO, S.C. Índices de geração de RCD provenientes de obras de construção, reforma e demolição na cidade de Londrina/PR In: II Congresso Internacional na Recuperação, Manutenção e Restauração de Edificações. Rio de Janeiro: 2006. v.1.

NAGAPAN, S. *et al.* Study of Site's Construction Waste in Batu Pahat, Johor. **Procedia Engineering**, v. 53, p. 99–103, 2013. Disponível em: <https://www.academia.edu/2330495/Study_of_Site_s_Construction_Waste_in_Batu_Pahat_Johor>. Acesso em: 2 jul. 2022.

NEVILLE, A. M. Propriedades do Concreto 2a ed São Paulo: Pini 1997 p. 125-187.

NUNES, K.; MAHLER, C. Comparison of Construction and Demolition Waste Management between Brazil, European Union and USA. *Waste Management & Research*, v. 38, n. 4, p. 415–422, 11 fev. 2020. Disponível em: <<https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0734242X20902814>>. Acesso em: 2 jul. 2022.

OK, B. *et al.* Geotechnical properties of recycled construction and demolition materials for filling applications. **Transportation Geotechnics**, [S. l.], v. 24, p. 100380, set. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.trgeo.2020.100380>.

OLIVEIRA, Frederico Carneiro de. **Usina de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição: Análise de Viabilidade de Implantação no Município de Ouro Preto – MG**. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Ouro Preto. Programa de Pós-Graduação em Sustentabilidade Socioeconômica Ambiental. 2020. 132 f. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/13189/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_UsinaReciclagemRes%c3%adduo.pdf. Acesso em: 1 mar. 2022.

OSSA, A.; GARCÍA, J.L.; BOTERO, E. Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], v. 135, p. 379-386, 1 nov. 2016. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.088>.

PAIVA, P. S. **Caracterização e Avaliação das Propriedades Geomecânicas para Uso em Pavimentação de Agregados de Rochas Vulcânicas da Porção Central do Rio Grande de Sul**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria: [s.n.], 2017. Disponível em: https://repositorio.ufsm.br/bitstream/handle/1/14728/DIS_PPGE2017_PAIVA_PRI_SCYLLA.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Acesso em: 4 ago. 2022.

PAZ, D.H.F, LAFAYETTE, K.P.V., SOBRAL, C. GIS-based planning for managing the flow of construction and demolition waste in Brazil. **Waste Management & Research**, v. 36 (6), p. 541-549, 2018. DOI <https://doi.org/10.1177/0734242X18772096>.

PEREIRA, S.M. *et al.* Aplicação de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados (RCD-R) em Obras Geotécnicas. **7o. Congresso Brasileiro de Geossintéticos**, [s. l.], 1 nov. 2015. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/356175296_Aplicacao_de_Residuos_de_Construcao_e_Demolicao_Reciclados_RCD-R_em_Obras_Geotecnicas. Acesso em: 6 abr. 2022.

PINTO, T. P. Metodologia para a Gestão Diferenciada de Resíduos Sólidos da Construção Urbana. Tese de Doutorado da Escola politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999.

PINTO, T.P.; GONZÁLES, J.L.R. Manejo e gestão dos resíduos da construção civil. Volume 1 – Manual de orientação: como implementar um sistema de manejo e gestão nos municípios. Brasília: CAIXA, 2005.

POON, C.S.; CHAN, D.X. Feasible use of recycled concrete aggregates and crushed clay brick as unbound road subbase. **Construction and Building Materials**, v.20, n.8, p.578–585. 2006

REIS, Glaydson Simoes dos; CAZACLIU, Bogdan Grigore; CORREA, Catalina Rodriguez; OVSYANNIKOVA, Ekaterina; KRUSE, Andrea; SAMPAIO, Carlos Hoffmann; LIMA, Eder Claudio; DOTTO, Guilherme Luiz. Adsorption and recovery of phosphate from aqueous solution by the construction and demolition wastes sludge and its potential use as phosphate based fertiliser. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, dez. 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2213343719307286>. Acesso em: 10 de Março de 2022.

REMÉDIO, M. J **Caracterização Tecnológica de Rochas Visando a Empregabilidade com Lastro de Ferrovia de Trem de Alta Velocidade**. Orientador: Rogério Pinto Ribeiro. 2017. 154 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo, [S. l.], 2017. DOI 10.11606/T.18.2014.tde-26052015-162328.

RESENDE, Luiz Henrique Siqueira. **Análise da gestão de resíduos sólidos de construção civil de Belo Horizonte (MG) a partir da percepção dos atores envolvidos**. 2016. 124 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016.

SALAZAR, Rafael A. Robayo; SAAVEDRA, William Valencia; GUTIÉRREZ, Ruby Mejía de. Construction and Demolition Waste (CDW) Recycling—As Both Binder and Aggregates—In Alkali-Activated Materials: A Novel Re-Use Concept. **Sustainability**, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/14/5775> Acesso em 22 março de 2022.

SANTOS JUNIOR, P. J. Gabiões e estruturas de arrimo: Análise teórico numérico-experimental do comportamento mecânico. 2018. 213 f. Dissertação (Mestrado) -

Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Unicamp, Campinas/sp, 2018.

SANTOS, Eder Carlos Guedes dos. **Avaliação experimental de muros reforçados executados com resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) e solo fino**. 2011. 248 f. Tese (Doutorado) - Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, 2011.

SANTOS, Rony Souza. Lastros Ferroviários de Granitos e Rocha Básica em Regiões Tropicais: Relações entre Petrografia, Propriedades Físico-Mecânicas e de Alterabilidade. Orientador: Prof. Dr. Rogério Pinto Ribeiro. 2021. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18132/tde-19042022-163000/publico/DissertSantosRonySouzadosCorrig.pdf>. Acesso em: 4 ago. 2022.

São Paulo (Município). Comitê Intersecretarial para a Política Municipal de Resíduos Sólidos. Plano de Gestão integrada de Resíduos Sólidos da Cidade de São Paulo. São Paulo, 2014. Disponível em: <http://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/servicos/arquivos/PGIRS-2014.pdf>. Acesso em: 25 mai. 2022.

SCHNEIDER, D.M. Deposições irregulares de resíduos da construção civil na cidade de São Paulo. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) - Universidade de São Paulo, 2003.

SILVA, Alex Fabiane Fares da. **Gerenciamento de resíduos de construção civil de acordo com a resolução CONAMA 307/02: estudo de caso para um conjunto de obras de pequeno porte**. 2007.117 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

SILVA, C. H. C. **Comportamento geotécnico dos filitos do talude oeste da Mina Pau Branco**. Orientador: Milene Sabino Lana. 2010. 127 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, 2010. Disponível em: https://www.repositorio.ufop.br/bitstream/123456789/2989/1/DISSERTA%c3%87%c3%83O_ComportamentoGeot%c3%a9nicoFilitos.PDF. Acesso em: 2 maio 2022..

SILVA, D. A.; GEYER, A. L. B.; PANTOJA, J. C. Estudo da forma do agregado graúdo e sua influência no módulo de elasticidade do concreto. **Brazilian Journal of Development**, [S. l.], p. 60426-60440, 21 ago. 2020. DOI 10.34117/bjdv6n8-453.

SILVA, Danilo de Almeida. GEYER, André Luiz Bortolacci. Análise e classificação da forma do agregado graúdo britado para concreto. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**. Ano 03, Ed. 12, Vol. 05, pp. 18-28 Dezembro de 2019. ISSN:2448-0959.

SILVA, R.V; DE BRITO, J.; DHIR, R.K. Use of recycled aggregates arising from construction and demolition waste in new construction applications. **Journal of Cleaner Production**, [S. l.], p. 1 - 9, 12 jul. 2019. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117629>.

Townsend, T., Wilson, C., Beck, B., 2014. The Benefits of Construction and Demolition Materials Recycling in the United States. **Construction & Demolition Recycling Association**. Disponível em: <https://www.usagypsum.com/wp-content/uploads/2016/05/CDRA-White-paper-executive-summary.pdf>. Acesso em: 2 maio 2022.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (US EPA). Advancing sustainable materials management: 2018 fact sheet. 2020. Washington, D.C.: US EPA. Disponível em: https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-09/documents/2013_advncng_smm_fs.pdf. Acesso em: 03 mar. 2022.

WEB OF SCIENCE. Analyze Results: 1,045 publications selected from Web of Science Core Collection. Disponível em: <https://www.webofscience.ez27.periodicos.capes.gov.br/wos/woscc/analyze-results/8d8ac728-0cc8-4f1f-906d-f3e4d2935f32-03653ea8>. Acesso em: 14 março. 2022.

WHITTAKER, Mark James; GRIGORIADIS, Konstantinos; SOUTSOS, Marios; SHA, Wei; KLINGE, Andrea; PAGANONI, Sara; CASADO, Maria; BRANDER, Linus; MOUSAVI, Marjan; SCULLIN, Michael; CORREIA, Ruben; ZERBI, Tommaso; STAIANO, Giovanni; MERLI, Irene; INGROSSO, Ilaria; ATTANASIO, Agnese; LARGO, Alessandro. Novel construction and demolition waste (CDW) treatment and uses to maximize reuse and recycling. **Advances in Building Energy Research**, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/17512549.2019.1702586>. Acesso em 20 de março de 2022.

WRAP, 2004. Recycled and Secondary Aggregates e Supply Chain Case Study: A316 Resurfacing Pilot Project. **Waste & Resources Action Programme**, Oxon, UK, p. 4.

WRAP, 2005. Use of Recycled Asphalt and Recycled Aggregate in the A34 Chieveley/M4 Junction 13 Improvement. **Waste & Resources Action Programme**, Oxon, UK, p. 8

ZUAZO, Evelio Teijón López ; ZAMANILLO, Ángel Veja; PÉREZ, Miguel Ángel Calzada; MIGUEL, Ángel Robles. Use of Recycled Aggregates Made from Construction and Demolition Waste in Sustainable Road Base Layers. **Sustainability**, agosto, 2020. Disponível em: <https://sci-hub.mkssa.top/10.3390/su12166663>. Acesso em: 17 de março de 2022.

APÊNDICE A – Amostras com 25% de vermelho no início e fim do ensaio

APÊNDICE B – Amostras com 25% de misto no início e fim do ensaio

APÊNDICE C - Amostras com fração cinza no início e fim do ensaio