

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO TRIÂNGULO MINEIRO**

Késsio Johones De Melo Oliveira

**AVALIAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO  
CIVIL DA CIDADE DE UBERABA: UMA PERSPECTIVA PARA A SUA  
UTILIZAÇÃO EM GUIAS DE MEIO FIO**

Uberaba - MG

2023

Késsio Johones De Melo Oliveira

**AVALIAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO  
CIVIL DA CIDADE DE UBERABA: UMA PERSPECTIVA PARA A SUA  
UTILIZAÇÃO EM GUIAS DE MEIO FIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação Stricto Sensu – Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica, da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, como requisito para obtenção do título de Mestre em Inovação Tecnológica.

Orientador: Professor Dr. Mário Sérgio da Luz

Uberaba- MG

2023

**Catálogo na fonte: Biblioteca da Universidade Federal do  
Triângulo Mineiro**

O47a Oliveira, Késsio Johones de Melo  
Avaliação de agregados reciclados de resíduos da construção civil da  
cidade de Uberaba: uma perspectiva para a sua utilização em guias de meio  
fio / Késsio Johones de Melo Oliveira. -- 2023.  
114 f. : il., graf., tab.

Dissertação (Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica) -- Uni-  
versidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, MG, 2023

Orientador: Prof. Dr. Mário Sérgio da Luz

1. Meio ambiente. 2. Produtos reciclados. 3. Gestão integrada de  
resíduos sólidos. 4. Brasil. 5. Triângulo Mineiro/Alto Paranaíba (MG :  
Mesorregião). I. Luz, Mário Sérgio da. II. Universidade Federal do Triân-  
gulo Mineiro. III. Título.

CDU 628.567.3:502.2(815)

KÉSSIO JOHONES DE MELO OLIVEIRA

**AVALIAÇÃO DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL DA CIDADE DE UBERABA:  
UMA PERSPECTIVA PARA A SUA UTILIZAÇÃO EM GUIAS DE MEIO FIO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação Profissional em Inovação Tecnológica da Universidade Federal do Triângulo Mineiro como requisito parcial para obtenção do título de mestre.

Uberaba, 11 de dezembro de 2023

**Banca Examinadora:**

Dr. Mário Sérgio da Luz – Orientador  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Paulo de Castro Guetti  
Universidade Federal do Triângulo Mineiro

Dr. Brunno Borges Canelhas  
Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Triângulo Mineiro



Documento assinado eletronicamente por **MARIO SERGIO DA LUZ, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2023, às 11:36, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULO DE CASTRO GUETTI, Professor do Magistério Superior**, em 11/12/2023, às 11:37, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



Documento assinado eletronicamente por **Brunno Borges Canelhas, Usuário Externo**, em 12/12/2023, às 09:48, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no § 3º do art. 4º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#) e no art. 34 da [Portaria Reitoria/UFTM nº 165, de 16 de junho de 2023](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [http://sei.ufm.edu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](http://sei.ufm.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **1150676** e o código CRC **DE8AAB45**.

Dedico à minha mãe, irmãos e sobrinho.  
Ao longo dos anos, vocês foram uma  
constante fonte de amor e apoio, sem o qual  
eu não teria conseguido chegar tão longe.

## AGRADECIMENTOS

Sinto imensa gratidão a Deus por me proporcionar a realização deste sonho e ao Programa de Mestrado Profissional em Inovação Tecnológica (PMPIT-UFTM), da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, por ter aberto as portas da ciência/pesquisa para o meu desenvolvimento pessoal e profissional. Agradeço também às excelentes amigadas com meus colegas mestrandos e aos brilhantes professores e técnicos em especial ao grande amigo Adller que me encorajaram a desenvolver pesquisas, mesmo com os desafios e contratemplos que surgiram em minha vida.

Agradeço de coração ao Felipe Datto Liberato e ao Vinicius Marques Lopez, amigos que surgiram em um momento extremamente importante e que através do convívio diário e diálogos me ensinaram um pouco mais sobre arte, mundo, bichos, e de forma geral como a biologia permeia no grande terreno misterioso da vida. Obrigado pelas boas energias e conselhos de encorajamento para enfrentar mais esse desafio.

Agradeço imensamente à minha família, especialmente à minha mãe, Maria Inêz de Melo. Mesmo não possuindo títulos acadêmicos, ela detém grandes conhecimentos sobre a vida, e me deu o maior incentivo para buscar o meu lugar no mundo através dos estudos. Isso, apesar de significar a distância de 30, 530, 680, 3600 e atualmente 680Km que nos separa. Obrigado por ter sido porto seguro e meu refúgio nos momentos de tripulação e por sempre acreditar.

Agradeço de coração ao Professor Dr. Mário Sérgio da Luz por sua dedicação e orientação incansável durante os anos em que realizei a minha dissertação. Sem o seu conhecimento, experiência e apoio, eu não teria conseguido finalizar meu trabalho.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão aos meus colegas da Universidade Federal do Triângulo Mineiro, que foram extremamente gentis e acolhedores durante a minha pesquisa. Agradeço também a UFTM por me ajudar a completar o meu projeto, sendo minha casa e meu local de trabalho.

Por fim, o mestrado foi uma experiência extremamente gratificante e cheia de desafios. Embora os desafios tenham sido muitos, me senti motivada ao longo do processo, pois tinha a consciência de que estava construindo algo que iria me ajudar a alcançar meus objetivos. Contudo, enfrentei algumas dificuldades, como dividir o tempo entre meu trabalho na UFTM e a jornada de estudos, além de ser meu primeiro contato com a ciência. Meu agradecimento a todos aqueles que acreditaram em mim, mesmo quando as chances de sucesso pareciam escassas. Obrigado pela confiança depositada.

## RESUMO

O avanço do crescimento da população humana trouxe consigo a necessidade constantes intervenções e modificações nas paisagens naturais (e.g., expansão de cidades). No entanto, os efeitos adversos desta expansão têm sido principalmente atribuídos aos resíduos gerados ao longo dos processos de construção e demolição, causando impactos ao longo de toda a cadeia produtiva. A utilização de Resíduos de Construção Civil - RCC como matéria-prima para produzir novos produtos é cada vez mais comum e apresenta inúmeros benefícios, não só para o meio ambiente, como também para os consumidores. O presente estudo explora a viabilidade e a utilização de agregado reciclado de resíduos de construção civil para a produção de novos produtos, especificamente guia de meio fio. Inicialmente, os agregados reciclados de RCC foram caracterizados usando amostras de areia e brita da região de Uberaba-MG como referência. Seguindo a NBR 15116, analisou-se visualmente o agregado graúdo reciclado, separando as partículas de acordo com sua composição. Foram determinados pulverulento, massa específica, massa unitária e volume de vazios para comparação com areia natural e brita convencional. Após isso, foi definido a dosagem do concreto com base nos requisitos de resistência e trabalhabilidade, considerando ensaios. Finalmente, foi realizado o ajuste a dosagem do concreto de acordo com as necessidades específicas para a fabricação das guias de meio-fio e corpos de prova. Os resultados obtidos indicam que os agregados reciclados de RCC apresentam densidade semelhante à dos naturais, com percentual de resíduos cerâmicos considerável. Além disso, a massa específica dos agregados reciclados de RCC (brita e areia) foi menor em 24,5% e 7,5%, respectivamente, quando comparadas às britas convencionais e às areias naturais. O índice de absorção de água dos agregados reciclados de RCC foi superior ao natural. Os resultados dos ensaios mostram que o concreto de referência supera os requisitos analisados, mas a influência dos agregados reciclados de RCC na dosagem reduz consideravelmente os parâmetros de resistência. No entanto, para a confecção da guia de meio-fio, é viável usar 50% e 100% de RCC, mesmo não atendendo ao BT-82/ABCP, pois satisfazem os requisitos de resistência do DNIT 020/2006 – ES. Este estudo sugere que o uso de agregados reciclados tem seus desafios mas, pode se notar um excelente custo-benefício. Principalmente empregado na substituição de concretos não estruturais, o concreto de agregados reciclados apresenta maior ganho ambiental em comparação com concreto convencional.

**Palavras-chave:** Meio Ambiente, Produtos Reciclados, Gestão de resíduos, Brasil, Triângulo Mineiro

## ABSTRACT

The advancement of human population growth has brought with it the need for constant interventions and modifications in natural landscapes (e.g., city expansion). However, the adverse effects of this expansion have been primarily attributed to the waste generated throughout construction and demolition processes, causing impacts along the entire production chain. The use of Construction and Demolition Waste (CDW) as raw material to produce new products is increasingly common and presents numerous benefits, not only for the environment but also for consumers. The present study explores the viability and use of recycled aggregate from construction and demolition waste for the production of new products, specifically for curbstones. Initially, the recycled aggregates from CDW were characterized using sand and gravel samples from the Uberaba-MG region as a reference. Following NBR 15116, the coarse recycled aggregate was visually analyzed, separating particles according to their composition. Pulverulent content, specific mass, unit mass, and void volume were determined for comparison with natural sand and conventional gravel. After this, the concrete dosage was defined based on strength and workability requirements, considering tests. Finally, the concrete dosage was adjusted according to the specific needs for the manufacturing of curbstones and test specimens. The results obtained indicate that the recycled aggregates from CDW have a density similar to that of natural aggregates, with a considerable percentage of ceramic waste. Moreover, the specific mass of recycled aggregates from CDW (gravel and sand) was lower by 24.5% and 7.5%, respectively, when compared to conventional gravel and natural sands. The water absorption rate of the recycled aggregates from CDW was higher than that of natural aggregates. The test results show that the reference concrete exceeds the analyzed requirements, but the influence of recycled CDW aggregates in the dosage considerably reduces the strength parameters. However, for the manufacture of curbstones, it is feasible to use 50% and 100% CDW, even though it does not meet BT-82/ABCP standards, as it satisfies the strength requirements of DNIT 020/2006 – ES. This study suggests that the use of recycled aggregates has its challenges, but it is noticeable that there is excellent cost-benefit. Mainly employed in the replacement of non-structural concretes, recycled aggregate concrete presents greater environmental benefits compared to conventional concrete.

**Keywords:** Environmental, Recycled Products, Waste management, Brazil, Triângulo Mineiro.

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1	- RESÍDUO DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) DESPEJADO NA ÁREA DE TRANSBORDO E TRIAGEM DE USINA DE RECICLAGEM ECO AMBIENTAL, 2023-----	05
FIGURA 2	- CENÁRIOS BRASILEIROS DOS PRINCIPAIS GERADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) NO BRASIL-----	06
FIGURA 3	- CLASSIFICAÇÃO DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) PELAS RESOLUÇÕES CONAMA-----	07
FIGURA 4	- CLASSIFICAÇÃO DOS TIPOS DE AREIA CONFORME SUA GRANULOMETRIA E APLICAÇÃO-----	11
FIGURA 5	- PÁTIO DE TRABALHO DA USINA FIXA DE RECICLAGEM ECOAMBIENTAL-----	15
FIGURA 6	- SEPARAÇÃO DE MATERIAIS ÁREAS DE TRANSBORDO E TRIAGEM USINA ECO AMBIENTAL-----	16
FIGURA 7	- LANÇAMENTO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) CLASSE A NO BRITADOR-----	17
FIGURA 8	- PILHA DE AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL: AREIA E PEDRISCO-----	17
FIGURA 9	- DISTRIBUIÇÃO DAS USINAS DE RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) NO BRASIL EM 2015-----	18
FIGURA 10	- PRINCIPAIS CONSUMIDORES DE AGREGADOS RECICLADOS NO BRASIL EM 2015-----	19
FIGURA 11	- EVOLUÇÃO DO ÍNDICE NACIONAL DO CUSTO DA CONSTRUÇÃO-INCC DE 2020 A 2022, CONFORME REGISTRADO PELA FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS-----	20
FIGURA 12	- PERCENTUAL POR TIPOS DE MATERIAL DE RCC QUE CHEGAM À USINA DE RECICLAGEM-----	22
FIGURA 13	- EXEMPLO DE COMO A LOCALIDADE DO RCC CONTRIBUI PARA SUA COMPOSIÇÃO-----	23

FIGURA 14	- ABSORÇÃO DE ÁGUA DE PARTÍCULAS CERÂMICAS E DE CIZAS NOS RCC-----	24
FIGURA 15	- EXEMPLOS DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO-----	27
FIGURA 16	- ESQUEMA DA ZONA DE TRANSIÇÃO INTERFACIAL (ZTI) DO CONCRETO-----	28
FIGURA 17	- EXEMPLO DA EXSUDAÇÃO INTERNA EM CONCRETOS-----	29
FIGURA 18	- APLICABILIDADE DE AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETO. A. COMPLEXO HABITACIONAL DE “WERDWIES,2017 EM ZURIQUE; B. EDIFÍCIO DA ESCOLA “IM BIRCH,2017, SUIÇA; C. WADSPIRALE, ALEMANHA, 2015; D. PRÉDIO ADMINISTRATIVO DA FUNDAÇÃO FEDERAL ALEMÃ PARA O MEIO AMBIENTE, 2015-----	31
FIGURA 19	- EVOLUÇÃO DO ABATIMENTO TRONCO DE CONE DOS CONCRETOS COM ARS-----	35
FIGURA 20	- RELAÇÃO ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA E VARIAÇÃO DE TRABALHABILIDADE EM FUNÇÃO DA PERCENTAGEM DE RCC SUBSTITUÍDO EM CONCRETOS-----	36
FIGURA 21	- DIFERENÇA ENTRE MATRIZES DE (A) CONCRETO AGREGADO NATURAL E (B) CONCRETO AGREGADO RECICLADO(CAR)-----	37
FIGURA 22	- VARIAÇÃO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DE CAR COM DIFERENTES FATOR A/C-----	38
FIGURA 23	- VARIAÇÃO NA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AOS 28 DIAS DE CONCRETOS COM SUBSTITUIÇÃO DE AGREGADO NATURAL POR AR PROGRESSIVAMENTE-----	39
FIGURA 24	- RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS MECÂNICAS A COMPRESSÃO AXIAL CONCRETOS CONVENCIONAIS E CAR-----	40
FIGURA 25	- RESULTADOS DE RESISTÊNCIAS TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAIS CONCRETOS DOSADOS COM AGREGADOS NATURAIS E CAR-----	41

FIGURA 26	- CLASSIFICAÇÃO TÁTIL-VISUAL DOS GRUPOS AGREGADO GRAÚDO BRITA 1. A: GRUPO 1; B: GRUPO 2; C: GRUPOS 3; E D: GRUPO 4-----	44
FIGURA 27	- EXEMPLO DOS PROCESSOS DE PENEIRAMENTOS MANUAL DOS RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL UTILIZADO NO PRESENTE TRABALHO. A: MASSA RETIDA EM PENEIRAS BRITA 1; B: MASSA RETIDA EM PENEIRAS AREIA E; C: PENEIRAMENTO MANUAL AREIA-----	46
FIGURA 28	- PROCESSO DE LAVAGEM AREIA (A) E PESAGEM DE AREIA APÓS SECAGEM (B)-----	47
FIGURA 29	- PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA AGREGADO GRAÚDO BRITA 1 RCC. A: QUARTEAMENTO DA AMOSTRA; B: MATERIAL SUBMERSO PARA SATURAÇÃO; C: CONDIÇÃO SUPERFÍCIE-SECA-SATURADA; D: MATERIAL SECO-----	49
FIGURA 30	- PREPARAÇÃO DO MATERIAL PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO DE MASSA ESPECÍFICA AGREGADO MIÚDO AREIA RCC. A: CONDIÇÃO SATURADA; B: CONDIÇÃO SUPERFÍCIE-SECA-SATURADA; C: PESAGEM HIDROSTÁTICA; MATERIAL SECO EM PESAGEM-----	50
FIGURA 31	- MASSA UNITÁRIA DE AGREGADO GRAÚDO BRITA 1 RCC. A: RECIPIENTE VAZIO, EM PREPARAÇÃO; B: RECIPIENTE CHEIO PARA PESAGEM-----	52
FIGURA 32	- CURVAS WALZ DETERMINAÇÃO FATOR (A/C) EM FUNÇÃO DAS RESISTÊNCIAS DO CONCRETO E CIMENTO AOS 28 DIAS DE IDADE-----	57
FIGURA 33	- ESPECIFICAÇÃO DO PERFIL TIPO1 DE GUIA MEIO FIO SUGERIDO ABCP, USADA NO PRESENTE ESTUDO-----	61
FIGURA 34	- PRÉ-MOLHAGEM DOS AGREGADOS RECICLADOS. A AREIA RECICLADA IN ATURA, B ESPALHAMENTO DA AREIA PARA FACILITAR ADIÇÃO DE ÁGUA E C AREIA COM ÁGUA DE PRÉ-MOLHAGEM 80% ÍNDICE DE ABSORÇÃO, D BRITA COM PRÉ-MOLHAGEM-----	63

FIGURA 35	-	EXEMPLO DO ENSAIO DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE REALIZADO NO PRESENTE ESTUDO. EXEMPLOS DO ENCHIMENTO (A) E ABATIMENTO DO TRONCO DO CONE DESMOLDADO (B)-----	65
FIGURA 36	-	ENCHIMENTO DAS FORMAS DAS GUIAS DE MEIO-FIO COM CONCRETO. A. FORMAS UNTADAS; B. ADENSAMENTO COM VIBRADOR DE IMERSÃO; C. PREENCHIMENTO DE SEGUNDA CAMADA E D. FORMAS CHEIAS DE CONCRETO-	66
FIGURA 37	-	ETAPAS DO PROCESSO DE CURA ÚNICA DOS CORPOS DE PROVA. A. CORPOS DE PROVA IDENTIFICADOS; B. DESMOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA E CURA ÚMIDA	68
FIGURA 38	-	RETIFICA EM CORPOS DE PROVAS CONCRETO REFERÊNCIA E RECICLADO RESPECTIVAMENTE. A TOPO DO CORPO DE PROVA REFERÊNCIA EVIDENCIA HOMOGENEIDADE DOS AGREGADOS NATURAIS QUE SÃO MARCADOS POR BRITAS DE COLORAÇÃO PARECIDAS E TAMANHOS PRÓXIMOS. B DEMOSTRA O TOPO DO CORPO DE PROVA DE CONCRETO RECICLADO, DEMOSTRANDO HETEROGENEIDADE DOS AGREGADOS QUE O COMPÕEM, DESTACANDO POR CERÂMICAS, BRITAS, ARGAMASSAS POROSAS, ASFALTOS E ATÉ PEDAÇOS DE MATERIAIS VIDREOS. -----	69
FIGURA 39	-	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO EM PRENSA HIDRÁULICA. A – POSICIONAMENTO CORPO DE PROVA EM PRENSA HIDRÁULICA. B – APLICAÇÃO DE CARGA/FORÇA AXIAL DE COMPRESSÃO E RUPTURA CORPO DE PROVA.-----	70
FIGURA 40	-	ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO TRAÇÃO DIAMETRAL EM PRENSA HIDRÁULICA E CORPO DE PROVA PARTIDO AO MEIO-----	71
FIGURA 41	-	PERCENTUAL DE CADA GRUPO QUE COMPÕEM A BRITA-1 DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC) OBTIDA POR	

	ANÁLISE TÁTIL-VISUAL DAS CURVAS GRANULOMÉTRICAS DAS AREIAS E BRITAS-----	75
FIGURA 42	- COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA BRITA-1 CONVENCIONA E DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)-----	76
FIGURA 43	- COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA AREIA NATURAL E RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)-----	76
FIGURA 44	- RESULTADOS DO <i>SLUMP TEST</i> OBTIDOS PELO TESTE DE ABATIMENTO DO TRONCO DE CONE-----	77
FIGURA 45	- EVOLUÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS-----	80
FIGURA 46	- COMPARAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS (CAR) COM REFERÊNCIA-----	82
FIGURA 47	- RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL APÓS OS 28 DIAS-----	84
FIGURA 48	- FIGURA 48 - SECÇÃO DE RUPTURA ENSAIO TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL CAR-100%-AS. CÍRCULOS VERDES REPRESENTAM AGREGADOS DE BOA RESISTÊNCIA E FRAGILIDADE NA ZTI. CÍRCULOS AMARELOS REPRESENTAS AGREGADOS DERIVADOS DE BAIXA RESISTÊNCIA (CERÂMICA E ARGAMASSA POROSA)	86
FIGURA 49	- SECÇÃO DE RUPTURA ENSAIO TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL. A SECÇÃO DE RUPTURA CAR-50% E B CAR-100%. CÍRCULOS VERDES REPRESENTAM AGREGADOS DE BOA RESISTÊNCIA E FRAGILIDADE NA ZTI. CÍRCULOS AMARELOS REPRESENTAS AGREGADOS DERIVADOS DE BAIXA RESISTÊNCIA (CERÂMICA E ARGAMASSA POROSA) -----	87
FIGURA 50	- ÍNDICE DE ABSORÇÃO DE ÁGUA NOS CONCRETOS EM ESTUDO-----	88
FIGURA 51	- GUIAS DE MEIO FIO FEITAS COM CONCRETO DE REFERENCIA A ESQUERDA, TOM MAIS CINZA. A DIREITA TEMOS GUIA DE MEIO FIO CAR-100%-----	89

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1	- COMPARATIVO ENTRE PARÂMETROS DOS AGREGADOS CONVENCIONAIS E RECICLADOS-----	25
TABELA 2	- REQUISITOS ESPECÍFICOS DOS ARS E COMPOSTOS PARA USO EM PRODUTOS E COMPÓSITOS CIMENTÍCIOS. SEGUNDO ABNT NBR 15116:2021-----	32
TABELA 3	- DIFERENÇAS NAS PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO E EDENDURECIDO DO CONCRETO COM AGREGADO 100% RECICAVEIS EM RELAÇÃO COM AGREGADO NATURAL----	33
TABELA 4	- CURVAS APRESENTADAS NO GRÁFICO COM AS RESPECTIVAS REFERÊNCIAS-----	39
TABELA 5	- PROPORÇÕES PASTA PARA DOSAGENS EM DIFERENTES RESISTÊNCIAS DO CONCRETO-----	53
TABELA 6	- DESVIO-PADRÃO A SER ADOTADO EM FUNÇÃO DE CONDIÇÃO DE PREPARO DO CONCRETO-----	54
TABELA 7	- RELAÇÃO DE ÁGUA USADA NA DOSAGEM DO CONCRETO SEM INCORPORAÇÃO DE AR EM FUNÇÃO DO DMC E ABATIMENTO-----	55
TABELA 8	- REQUISITOS PARA CONCRETO EXPOSTO A SOLUÇÕES CONTENDO SULFATOS OU SOLO ABNT NBR 12655:2022----	56
TABELA 9	- VOLUME COMPACTADO SECO (VCS) DE AGREGADO GRAÚDO POR M <sup>3</sup> DE CONCRETO-----	59
TABELA 10	- CONSUMO DE AREIA E BRITA, TRAÇOS DOS CONCRETOS PARA 1 METRO CÚBICO DE CONCRETO REFERÊNCIA E CAR CORRIGIDOS-----	60
TABELA 11	- CONSUMO DOS MATERIAIS PARA A DOSAGEM DE 75 L DE CONCRETO/CONFECÇÃO DA GUIA E CORPOS DE PROVA---	62
TABELA 12	- RESULTADOS DOS ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS NATURAIS E RECICLADO-----	73
TABELA 13	- MASSA ESPECÍFICA APARENTE CONCRETOS EM ESTUDO-	79

TABELA 14	- DESAFIOS ASSOCIADOS AO USO DE ARS E SUAS IMPLICAÇÕES NAS PROPRIEDADES DOS CAR-----	81
TABELA 15	- RELAÇÃO ENTRE CAR E CONCRETO DE REFERÊNCIA NO GANHO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL EM DIFERENTES IDADES-----	83
TABELA 16	- TABELA 16 - CONCRETOS RESISTÊNCIA MÍNIMA REQUERIDA PELAS NORMAS APÓS 28 DIAS-----	84
TABELA 17	- CUSTO POR METRO CÚBICO DE CONCRETO E GUIAS DE MEIO FIO-----	90

## LISTA DE SIGLAS

APPs	-	Áreas de Preservação Permanentes
AR	-	Agregado Reciclado
ARCI	-	Agregado Reciclado Cimentício
ARCO	-	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	-	Agregado Reciclado Misto
CA	-	Consumo de Água
CAR	-	Concretos de Agregado Reciclado
CC	-	Consumo De Cimento
DMC	-	dimensão máxima característica
DNIT	-	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ESG	-	Ambiente, Social e Governança
MF	-	Módulo De Finura
PNRS	-	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RCC	-	Resíduos da Construção Civil
RCD	-	Resíduos da Construção e Demolição
SSS	-	Saturada Superfície Seca
ZTI	-	Zona de Transição Interfacial

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	01
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	05
2.1	OBJETIVO GERAL	05
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	05
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	06
3.1	ORIGEM, CLASSIFICAÇÃO E LEGISLAÇÕES DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)	06
3.2	UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL	11
3.2.1	Agregados naturais e convencionais	11
3.2.2	Agregados Reciclados contextualização	13
3.3	Geração de resíduos da construção civil no brasil	15
3.3.1	Usinas de RCC no Brasil e em Uberaba	16
3.4	Perspectivas da utilização de resíduos da construção civil na fabricação de novos produtos	22
3.5	CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL	24
3.6	CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONCRETO	27
3.6.1	Concreto fase macroscópica e microscópica	29
3.7	APLICABILIDADE DE AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS	32
3.7.1	A Influência dos agregados reciclados no comportamento de concretos	35
3.7.2	Redução da trabalhabilidade	36
3.7.3	Resistências Mecânicas em Concretos com Agregados Reciclados	38
<b>4</b>	<b>PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b>	44
4.1	Ensaio de caracterização dos agregados	45
4.1.1	Considerações Iniciais	45
4.1.2	Análise tátil-visual do agregado graúdo reciclado	46
4.1.3	Composição granulométrica	47
4.1.4	Determinação de material pulverulento	48
4.1.5	Determinação da massa específica de agregado graúdo	50
4.1.6	Determinação da massa específica de agregado miúdo	51

4.1.7	Determinação da massa unitária e volume de vazios	53
4.2	Definição DOSAGEM DO CONCRETO, para ensaios nos estados frescos e endurecido	55
4.2.1	Definição do traço concreto método ABCP/ACI	55
4.2.2	Resistência a compressão obtida por dosagem em diferentes idades	56
4.2.3	Trabalhabilidade do concreto	57
4.2.4	Fator água/cimento (a/c)	57
4.2.5	Consumo de cimento por metro cúbico de concreto	59
4.2.6	Consumo de agregados graúdo e miúdo por metro cúbico de concreto	60
4.3	Dosagem do concreto para fabricação das guias de meio fio e corpos de prova	62
4.3.1	Preparo do concreto com agregado reciclado com pré-molhagem	64
4.3.2	Propriedades reológicas do concreto e enchimento das formas das guias de meio fio	67
4.3.3	Propriedades do concreto no estado endurecido, resistência à compressão axial e tração por compressão diametral	70
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b>	<b>76</b>
5.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS	76
5.2	RESULTADOS OBTIDOS NOS CONCRETOS EM ESTUDO	80
5.3	RESULTADOS DOS CONCRETOS EM ESTUDO, ESTADO ENDURECIDO	83
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>91</b>
<b>7</b>	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>92</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A indústria da construção civil é um setor chave da economia brasileira, com grande inspiração estratégica. Em 2016, ela respondeu por cerca de 5,2% do Produto Interno Bruto (PIB) do país e gerou 8,5% dos empregos em todo o país, consolidando-se como um dos principais segmentos da produção nacional e um componente essencial para o atual desenvolvimento do Brasil, conforme aponta o relatório de 2020 do governo brasileiro e o estudo de Naggali em 2014.

Ao longo das últimas décadas, a construção civil tem sido objeto de interesse de pesquisadores em todo o mundo devido ao seu impacto ambiental significativo, seja na da produção de resíduos, mas também, por consumir uma grande quantidade de matéria prima, extraída da natureza. Conforme mencionado por Jailon, Poon e Chiang (2009); Yuan, Shen e Li (2011) e Yuan et al. (2012), a construção civil é atualmente um dos principais responsáveis por causar danos ao meio ambiente. Adicionado a isso, a exploração de recursos minerais utilizados para produção de agregados na construção civil tem se tornado um problema significativo. Por exemplo a extração de areias naturais através de dragagens e desmontes hidráulicos tem causado uma série de impactos negativos no meio ambiente, tais como perda de biodiversidade, comprometimento do regime de vazão dos cursos d'água, assoreamento de rios devido à destruição das margens e matas ciliares, agravamento da crise hídrica, além de outros. Conforme destacado por Marques e Campos (2012), quando se observa a exploração das pedreiras para produção de brita é possível identificar modificação das paisagens e grande poluição do ar devido às partículas sólidas em suspensão, que ocorre no processo de desmonte das rochas por explosivos, causando danos à saúde humana e meio ambiente que podem ser irreversíveis e comprometer a sustentabilidade (VIEIRA E REZENDE, 2015). No Brasil, por exemplo, a mineração de agregados pode chegar a produzir anualmente cerca de 623 milhões de toneladas de minerais (MANCIN, 2012).

A construção civil tem um amplo impacto no meio ambiente, sendo responsável por grandes quantidades de poluição e destruição das formas de vida que existem nos ecossistemas. De acordo com o Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes - DNIT (Brasil, 2006), a poluição ambiental é definida como a adição ou liberação de substâncias ou fontes de energia no meio ambiente, que alteram sua concentração natural, tornando-as superiores. Esta poluição pode ocorrer em diferentes meios, como o solo, a água e o ar atmosférico (BRASIL, 2006).

Dentro desse contexto, a CNN, em 2019, relatou que:

A poluição foi responsável por cerca de nove milhões de mortes em 2019 – o equivalente a uma em cada seis mortes em todo o mundo.

[...] embora tenha diminuído o número de mortes por fontes de poluição associadas à pobreza extrema, como poluição do ar doméstico e da água, essas reduções são compensadas pelo aumento de mortes atribuíveis à poluição industrial, que inclui a poluição do ar ambiente e química. Óbitos causados por esses fatores de risco, considerados pelos autores consequência não intencional da industrialização e da urbanização, aumentaram 7% desde 2015 e mais de 66% desde 2000.

Dessa forma, compreende-se que o impacto dessa poluição ambiental é extenso, já que pode afetar, desfavoravelmente, as formas de vida dos ecossistemas, prejudicando, inclusive, aspectos básicos de seus habitats. Cita-se, como exemplo, a produção de concreto, a qual é um dos maiores fatores contribuintes para a emissão de gases de efeito estufa e impactos no meio ambiente (LIMBACHIYA et al., 2012). Seguindo essa premissa, é essencial que a indústria da construção adote medidas para minimizar seu impacto ambiental. Isso inclui a implementação de práticas de construção sustentáveis, tais como a gestão adequada de resíduos, a adoção de projetos de construção energeticamente eficientes e o uso de materiais reciclados visando a proteção dos ecossistemas naturais. Diante desses desafios, na área da construção civil, o emprego de Resíduos da Construção Civil (RCC) para fabricação de Agregados Reciclados (ARs), tem-se mostrado uma alternativa para a redução de problemas ambientais e, consequentemente, propiciando a sustentabilidade.

Pesquisadores em todo o mundo têm estudado a viabilidade técnica do uso de Resíduos da Construção Civil ou Resíduos da Construção e Demolição (RCD) para produção de agregados reciclados em substituição dos naturais e convencionas, conseguindo mitigar impactos ambientais, sociais e econômicos (BUTTLER, 2003; KATZ, 2003; LEITE, 2001; CABRAL et al., 2010) outro benefício da utilização do Agregado Reciclado de RCC (AR) possibilita reduzir os impactos ambientais, mas também como resposta à grande escalada nos preços dos insumos devido à pandemia de COVID-19, que afetou significativamente o custo de produção. Em função disso, o interesse científico nessa área tem se intensificado nos últimos tempos, com o desenvolvimento de estudos que buscam novas formas de aproveitar os resíduos gerados pela construção civil e soluções para a sua gestão, a fim de contribuir para a sustentabilidade econômica e ambiental do setor. Por exemplo, em construções Barros (2012) em seus estudos, percebeu que de todos os materiais usados em um canteiro de obras, parte relevante sai como resíduos, estimando-se que pode chegar a representar 30% de perdas do total utilizado. Desse modo, de acordo com Barros, esses dados sobre esses resíduos são importantes

para se diminuir o impacto da construção civil na geração de desperdício e na preservação dos ambientes naturais.

Acrescenta-se que o uso de Agregado Reciclados (AR) tem sido amplamente estudado e experimentado em todo o mundo, principalmente pela necessidade de se adotar práticas mais sustentáveis na indústria da construção civil. A reciclagem de resíduos da construção civil é uma alternativa que pode reduzir significativamente o impacto ambiental causado pela geração de resíduos sólidos (BENEDETTI et al., 2021). Nesse sentido, um dos materiais reciclados mais utilizados na construção civil é o RCC advindo de concretos, argamassas e alvenarias, que pode ser transformado em agregados para a produção de concreto e argamassa (SILVA et al., 2020). A utilização desses agregados reciclados apresenta diversos benefícios ambientais, tais como a redução do consumo de recursos naturais, como a areia e a brita, além da redução do volume de resíduos destinados aos aterros sanitários (FERREIRA et al., 2020).

Além dos benefícios ambientais da reutilização de agregados reciclados de construção e demolição, o uso desses materiais pode ser uma opção viável e econômica na produção de produtos da construção civil. De acordo com Gonçalves e Lopes (2021), o uso de agregados reciclados em substituição aos agregados naturais pode resultar em uma redução nos custos de produção, sem afetar a qualidade dos materiais produzidos. Essa alternativa de produção pode ser uma solução sustentável e econômica para a indústria da construção civil, que demanda grandes quantidades de materiais de construção e, conseqüentemente, gera grandes resíduos.

A utilização do ARs na produção de materiais de construção não se restringe apenas a elementos de infraestrutura e pavimentação como: pré-moldados, blocos, guias de meio-fio, manilhas, lastro de vala, sub-bases de pavimentos, mas também pode ser mencionado na produção de outros materiais, como concretos e argamassas. Alguns estudos apontam que a substituição de agregados naturais por agregados reciclados pode levar a um aumento no desempenho mecânico desses materiais (XIAO; LI; ZHANG, 2005). Todavia, é importante ressaltar que a utilização de materiais reciclados na construção civil exige cuidados específicos, tal como a seleção dos materiais adequados, a classificação correta dos resíduos e o acompanhamento da qualidade dos materiais produzidos. Para isso, é importante que as empresas do setor invistam em tecnologias e processos adequados para a reciclagem de resíduos (REIS; SANTOS; SANTOS, 2021).

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 OBJETIVO GERAL

O presente estudo teve como objetivo principal o de identificar possível uso de agregados reciclados oriundos de RCC da cidade de Uberaba para fabricação de guia de meio fio pré-moldada de acordo com a NBR 15116:2021.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Especificamente, busca-se:

- a) Desenvolver um novo produto, guia de meio fio, baseados em Agregados Reciclados (ARs) oriundos de Resíduos da Construção Civil(RCC);
- b) Avaliar os aspectos técnicos do produto feito com esses ARs (i.e., guia de meio fio), realizando ensaios laboratoriais, a fim de verificar suas características de resistência a compressão, tração, consistência, absorção de água;
- c) Avaliar os aspectos econômicos da guia de meio fio feita com ARs de RCC, verificando o custo de produção do novo produto em relação ao convencional;
- d) Contribuir para ampliação do conhecimento da utilização dos ARs oriundos de RCC.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 ORIGEM, CLASSIFICAÇÃO E LEGISLAÇÕES DOS RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)

Os RCC são resíduos gerados durante a construção, reforma, transformação ou demolição de edificações, estradas e outras obras de infraestrutura, são conhecidos pelo senso comum como entulho (Figura 1). Os principais geradores são as construtoras, empresas de demolição, serviços públicos de limpeza urbana e também pequenos geradores, como reformas em residências (OLIVEIRA et al., 2016). Segundo a pesquisa de Carneiro et al. (2019), as construções de edifícios e infraestrutura de transporte e saneamento são responsáveis pela maior parte da geração de RCC. Gonçalves e Pimenta (2017) em sua pesquisa constataram que as empresas de saneamento contribuíram significativamente para a geração de RCC, podendo chegar a mais de 50% do total em algumas cidades brasileiras.

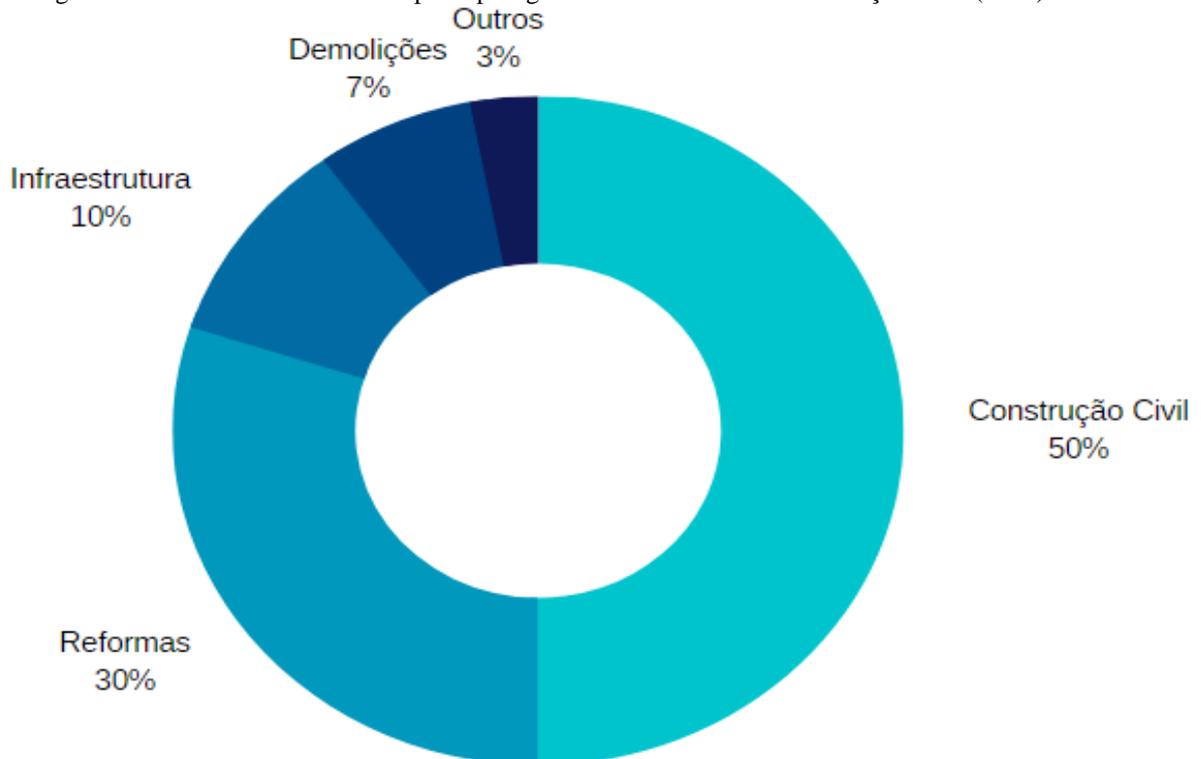
Figura 1 – Resíduo da construção civil (RCC) despejado na Área de Transbordo e Triagem (ATT) de usina de reciclagem ECO AMBIENTAL, 2023



Fonte: Do Autor (2023)

A geração de RCC é um problema ambiental significativo em todo o mundo, especialmente em países em desenvolvimento, onde as atividades de construção e demolição estão em constante expansão. No Brasil, a geração de RCC é estimada em cerca de 130 milhões de toneladas por ano). Quanto à contribuição de cada gerador, segundo a ABRECON, obras de construção civil responde por 50% do total de resíduos gerados, seguida por reformas (30%), atividades de infraestrutura (10%), demolições (7%) e outros setores (3 %) (Figura 2).

Figura 2 – Cenários brasileiros dos principais gerados de Resíduos da Construção Civil (RCC) no Brasil



Fonte. ABRECON (2021)

É importante ressaltar que a disposição inadequada desses resíduos no ambiente urbano acarreta uma série de problemas. Primeiramente, a preservação das galerias pluviais e redes de esgoto é comprometida, resultando em inundações e transbordamentos. Além disso, a poluição visual e atmosférica é intensificada, afetando negativamente a qualidade estética e ambiental das áreas urbanas (ABRECON, 2021). Outra consequência preocupante é o impacto na saúde pública, uma vez que a presença desses resíduos pode atrair vetores de doenças, representando um risco para a comunidade. Acrescenta-se que a ocupação de áreas urbanas de forma irregular resulta em um ambiente inseguro, prejudicando a qualidade de vida das pessoas que vivem

nessas regiões. Em razão disso, torna-se fundamental estabelecer formas adequadas de tratamento e destinação desses resíduos.

No Brasil, existem diferentes classificações reconhecidas pelo meio científico e pela legislação. Uma das mais aceitas é a estabelecida pelo Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) por meio da Resolução nº 307/2002. Essa resolução define os Resíduos da Construção Civil como provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, assim como os resultantes da preparação e escavação de terrenos. Os RCC englobam materiais 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 e fiação elétrica, sendo comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha. Esses resíduos são classificados em quatro classes, conforme apresentado na Figura 3.

Figura 3 – Classificação dos Resíduos da Construção Civil (RCC) pelas resoluções CONAMA

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

Fonte: ABRECON, 2017

A maioria dos RCC apresenta potencial para reutilização e reciclagem, especialmente os classificados como classe A (Figura 3). A utilização desses resíduos na produção de agregados reciclados pode desempenhar um papel significativo na redução da demanda por agregados naturais na construção civil. Isso contribui para evitar a exploração excessiva de recursos naturais e os danos ambientais mencionados anteriormente. Além disso, a reutilização/reciclagem dos RCC possui um alto potencial econômico e pode reduzir o impacto

social em até 50%, em comparação com o uso de agregados convencionais (KWAN et al., 2012; MALTA et al., 2013).

A Resolução CONAMA nº 448/2012, que atualizou a Resolução CONAMA nº 307/2002, busca promover a reutilização e a reciclagem RCC. Além disso, estabelece a obrigatoriedade da elaboração de um Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil por parte dos geradores de RCC, visando uma gestão mais eficiente e sustentável desses materiais. Essas medidas estão alinhadas com a Lei nº 12.305/2010, conhecida como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). A PNRS define princípios, objetivos, instrumentos e diretrizes para a gestão integrada e gestão de resíduos sólidos, incluindo os RCC. Seu propósito é reduzir a geração de resíduos, aumentar a reciclagem e reutilização, e garantir a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos.

Além das resoluções CONAMA mencionadas, outras normas e legislações brasileiras também estabelecem procedimentos a serem seguidos em relação aos RCC. A Resolução CONAMA nº 348/2004 estabelece diretrizes para o licenciamento ambiental de empreendimentos de reciclagem de resíduos da construção civil e demolição. Por sua vez, as normas técnicas NBR 15.112:2004, NBR 15.113:2004 e NBR 15.114:2004 fornecem diretrizes para o projeto, implantação e operação de áreas de transbordo e triagem, aterros e áreas de reciclagem de resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes. Em conjunto, essas normas e legislações têm o objetivo de estabelecer um arcabouço legal e técnico que promova a gestão adequada dos RCC, com ênfase na reutilização, reciclagem e redução do impacto ambiental. Dessa forma, busca-se mitigar os problemas associados à disposição inadequada desses resíduos, contribuindo para a preservação do meio ambiente, a economia de recursos naturais e a melhoria da qualidade de vida da população.

Com relação aos benefícios da PNRS para os RCC, pode-se destacar a possibilidade de reutilização e reciclagem desses materiais, o que contribui para a diminuição da demanda por agregados naturais e para a redução dos impactos ambientais causados pela geração e transporte desses materiais. Adicionalmente, a reciclagem dos RCC pode gerar empregos e renda, além de contribuir para a economia circular. No entanto, apesar da importância da PNRS para o gerenciamento dos RCC, sua efetiva implementação tem sido um desafio para muitos municípios brasileiros. De acordo com o estudo realizado por Melo et al. (2021), que avaliou a implementação da PNRS em municípios do Brasil, apenas 28,6% deles conseguiram implementar completamente a Lei 12.305/2010 até o ano de 2019. Os resultados apontaram que as principais barreiras para a implementação plena da lei foram a escassez de recursos

financeiros e a falta de capacitação técnica dos gestores municipais. Esses aspectos dificultam a adoção de medidas e a execução de projetos adequados para o gerenciamento dos RCC. Além disso, a ausência de infraestrutura adequada e de incentivos efetivos para a reciclagem dos RCC ainda são obstáculos a serem superados (BRASIL, 2010; MELO et al., 2021). Assim, é necessário um esforço conjunto para superar as barreiras existentes e buscar soluções viáveis e eficazes para o gerenciamento adequado dos RCC, visando alcançar os objetivos estabelecidos pela PNRS.

A cidade de Uberaba, localizada em Minas Gerais, tem-se destacado positivamente nesse contexto, já que foi um dos primeiros municípios brasileiros a implantar leis compatíveis com o PNRS (Política Nacional de Resíduos Sólidos). Por meio da Lei 10.876 (2009), que instituiu o Sistema para a Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e Resíduos Volumosos, foi estabelecida a responsabilidade de todos os agentes envolvidos na geração, destinação e redução dos resíduos da construção e demolição. O artigo 6º dessa lei, além de disciplinar os fluxos e os agentes, também detalha a destinação adequada dos resíduos da construção civil e resíduos volumosos gerados na cidade:

Artigo 6º:

I – Uma Rede de Ecopontos para pequenos volumes de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, implantada em bacias de captação de resíduos; (Redação dada pela Lei nº 11.348/2011)

II – Sistema Disque Coleta para Pequenos Volumes de acesso telefônico a pequenos coletores privados de resíduos da construção civil e resíduos volumosos;

III – uma Rede de Áreas para Recepção de grandes volumes (Áreas de Transbordo e Triagem, Áreas de Reciclagem e Aterros de Resíduos da Construção Civil);

IV – Ações para a informação e educação ambiental dos munícipes, dos transportadores de resíduos e das instituições sociais multiplicadoras, definidas em programa específico;

V – Ações para o controle e fiscalização do conjunto de agentes envolvidos, definidas em programa específico;

VI – Ação de gestão integrada a ser desenvolvida por Núcleo Permanente de Gestão que garanta a unicidade das ações e exerça o papel gestor que é competência do Poder Público Municipal.

Há mais de uma década desde a sanção da Lei 10.876 (2009), o município continua a enfrentar significativos desafios na gestão dos resíduos da construção civil. Conforme apontado por Silva e Fernandes (2012), é possível observar a disposição inadequada de RCC em diversas áreas urbanas e rurais, inclusive em Áreas de Preservação Permanente (APPs). Um exemplo negativo que merece destaque foi o uso da Pedreira de Léa como destino final para os RCC, o que gerou impactos ambientais significativos (SILVA; FERNANDES, 2012). Embora o setor público tenha adotado algumas medidas pontuais para enfrentar o problema, como a

inauguração de 11 ecopontos, e a iniciativa privada tenha estabelecido o primeiro aterro sanitário de RCC em 2010 através da empresa Soma Ambiental, é imperativo reconhecer que essas iniciativas se mostraram lentas para uma gestão eficaz dos resíduos. Somente em 2015, por iniciativa privada da empresa Eco Ambiental, foi implantada a primeira usina de reciclagem de RCC no município de Uberaba. Portanto, é evidente a necessidade de um maior engajamento de todos os envolvidos, tanto no setor público como no privado, para superar os desafios enfrentados na gestão dos resíduos de construção civil na região.

## 3.2 UTILIZAÇÃO DE AGREGADOS NA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

### 3.2.1 Agregados naturais e convencionais

Os agregados são materiais granulares utilizados na construção civil, como um dos principais componentes do concreto. De acordo com Bauer (1992), os agregados são definidos como "materiais inertes, geralmente pedregulhos, areias ou cascalhos, utilizados em misturas com materiais cimentícios, visando a produção de concretos e argamassas". Esses podem ser classificados em naturais ou artificiais. Os agregados naturais são provenientes da natureza, como as areias e pedregulhos extraídos de rios, lagos e jazidas, enquanto os artificiais derivados de processos industriais, como argila expandida, peletizada e os agregados reciclados que são produzidos a partir do beneficiamento de RCC (BAUER, 2008).

Os agregados naturais convencionais mais comuns usados na construção civil são a areia, o cascalho e a brita. A areia é empregada principalmente na composição das argamassas, enquanto o cascalho e a brita são utilizadas na produção de concreto, seja para elementos estruturais ou não. Esses materiais são classificados de acordo com o seu tamanho, de forma que a brita é o agregado com maior diâmetro (agregado graúdo), seguido pelo cascalho e pela areia agregado miúdo (NEVILLE, 2013), temos que segundo Falcão Bauer (2014), os agregados convencionais são classificados em três categorias: pedregulhos, seixos rolados e areia. Os pedregulhos são fragmentos de rochas com diâmetro entre 4,8 mm e 152 mm, apresentando superfície irregular e angulosa. Já os seixos rolados são fragmentos de rochas com geometria arredondada, cujo diâmetro também varia entre 4,8 mm e 152 mm, resultante do processo de atração natural em rios ou de processos artificiais, como a britagem e a lavagem. A areia, por sua vez, é um material granular fino com diâmetro entre 0,05 mm e 4,8 mm, e é tratado pela desagregação natural ou artificial de rochas. As areias se classificam em finas,

médias e grossas, dependendo do diâmetro equivalente(d) de suas partículas. Areias finas possuem d50 entre 0,075 mm e 0,425 mm, areias médias possuem d50 entre 0,425 mm e 2,00 mm, e areias grossas possuem d50 entre 2,00 mm e 4,76 mm” (DAS, 2009) (Figura 4).

Figura 4 - Classificação dos tipos de areia conforme sua granulometria e Aplicação

<b>Areias (diâmetro Equivalente)</b>	<b>Faixa Granulométrica</b>	<b>Aplicação</b>
Finas	0,075 mm a 0,425 mm	Utilizadas em argamassas e concretos com maior trabalhabilidade
Medias	0,425 mm a 2,00 mm	Mescla das duas faixas granulométrica concreto mais coeso
Grossas	2,00 mm a 4,76 mm	Utilizada em concretos mais resistentes

Fonte: Adaptada DAS, 2009 e MEHTA; MONTEIRO, 2008

A classificação granulométrica das areias é importante para a escolha do tipo de areia mais adequado para determinada aplicação na construção civil. Areias finas são mais utilizadas em argamassas e concretos com maior trabalhabilidade, enquanto as areias médias e grossas são mais utilizadas em concretos mais resistentes (MEHTA; MONTEIRO, 2008). A utilização de agregados naturais e convencionais na construção civil é ampla e variada. Além da produção de concreto e argamassas, esses materiais também podem ser utilizados na pavimentação asfáltica, na construção de fundações, drenagem e aterramento, entre outras aplicações (SILVA, 2018). No entanto, a geração de agregados naturais pode trazer impactos ambientais, como a degradação de áreas naturais e do ar e da água. Por isso, há uma preocupação crescente em reduzir a utilização desses materiais na construção civil, em favor de materiais alternativos, como os agregados reciclados resultantes de RCC (BAUER, 2008). Dessa forma, é fundamental que sejam estudadas alternativas para reduzir o uso de agregados naturais na construção civil, seja por meio da substituição por materiais alternativos ou da redução do consumo por meio de técnicas de dosagem mais eficientes.

Essa abordagem é importante não só para a preservação do meio ambiente, mas, também, para a redução dos custos de construção e o aumento da eficiência energética dos edifícios (RIBEIRO et al., 2019). Diversos países do mundo têm se destacado como produtores de agregados reciclados, especialmente nas regiões da Ásia/Pacífico, Rússia e América do Norte. A China, por si só, respondeu por metade da demanda global de agregados no período de 2010-2015 (YANG et al., 2017, TAN et al., 2018). No continente americano, os EUA se destacam tanto da produção quando reutilizando e valorização dos resíduos de construção e demolição. Anualmente, é produzida uma quantidade de 534 milhões de toneladas de destes resíduos, dos quais 256,30 milhões de toneladas são reutilizadas, representando um percentual de 48% na valorização desses materiais (USEA, 2016).

O Brasil produz 101 milhões de toneladas de resíduos anualmente, apesar disso, apenas 6,14% desses resíduos são devidamente reutilizados (LIRA, 2015), uma porcentagem menor que o Canadá (30% de reutilização) (GIROUX ENVIRONMENTAL CONSULTING, 2014; TAN et al., 2018). O cenário do Brasil é extremamente preocupante, pois muitos países desenvolvidos e empresas conscientes de sua responsabilidade em relação ao meio ambiente não estão se contentando com a simples reciclagem de resíduos, mas buscando a eliminação total do desperdício (TAN et al., 2018). Isso significa que todos os produtos devem ser pensados para que possam ser reutilizados, reparados ou reciclados, o que contribui para a preservação da natureza e para um menor impacto no planeta. O conceito ESG (Ambiente, Social e Governança) vem ganhando corpo nos últimos anos, integrando cada vez mais a agenda estratégica de empresas de diferentes setores, entre eles o da construção civil, como base para a tomada de decisões. Segundo o Sebrae (2023), as empresas estão cada vez mais empenhadas em adotar critérios ESG de sustentabilidade como um dos principais focos do negócio.

### 3.2.2 Agregados Reciclados contextualização

O avanço do crescimento da população humana trouxe consigo a necessidade de constantes intervenções e modificações nas paisagens naturais um exemplo é a expansões de cidades. No entanto, os efeitos adversos desta expansão têm sido principalmente atribuídos aos resíduos gerados ao longo dos processos de construção e demolição, causando impactos ao longo de toda cadeia produtivas (WANG et al., 2014; BAKSHAN et al., 2015; JALAEI et al., 2021). Apesar de serem considerados como materiais de baixo risco, os resíduos da construção civil podem ter um impacto significativo no meio ambiente, como emissões de gases de efeito

estufa, consumo de energia, esgotamento de recursos, deterioração da terra e poluição (MAH et al., 2016; NAYANA; KAVITHA, 2017; JALAEI et al., 2021). Por exemplo, A indústria da construção representa cerca de 40 a 50% da produção de gases de efeito estufa, que são os principais responsáveis pelas precipitações ácidas (CIWMB, 2000). Assim, o uso e reciclagem conscientes dos resíduos provenientes da construção civil são cruciais para diminuição de custos ambientais e financeiros.

Em outros países, principalmente no continente europeu, a reciclagem de quase a totalidade dos resíduos produzidos é uma feliz realidade. No Brasil, apesar dos avanços, ainda é preciso muito trabalho para que se alcance esse patamar. Por exemplo, os Resíduos Construção Civil em alguns municípios Brasileiros podem ter uma grande representação de 58% até 70% aproximadamente de todos os Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) (PINTO, 1999; ABRELPE, 2017) e pouco mais de 6% é reciclado (LIRA, 2015). Isso sugere que há um problema em escala nacional e que a falta do gerenciamento de resíduos da construção afeta as cidades em suas dimensões sociais, econômicas e ambientais.

Além do Plano de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, o Brasil aprovou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), pela Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Essa lei estabelece a maneira como o país deve lidar com seus resíduos, sendo um marco na responsabilidade compartilhada, pois seu art.3º (inciso XVII) evidencia que todos os envolvidos na produção, distribuição, venda e consumo possuem responsabilidade pelo descarte dos resíduos. Ela prevê o término dos depósitos irregulares de descartes (e.g., “lixões”) até o ano de 2014, deixando os aterros sanitários apenas com materiais que possuem grande quantidade de matéria orgânica. A maior parte dos resíduos urbanos, como plásticos, metal, papel e resíduos da construção e demolição, devem ser reciclados, pois há uma grande oportunidade de minimizar o fenômeno da poluição ambiental e, como consequência, de obter lucro (BRASILEIRO; MATOS, 2015).

### 3.3 GERAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL

A geração de resíduos da construção civil no Brasil é uma questão de grande relevância e desafio para o país. A indústria da construção é responsável por uma parcela significativa da economia, mas também é uma das principais fontes de resíduos sólidos, representando uma ameaça ao meio ambiente e à sustentabilidade. Em 2017, os municípios do Brasil coletaram

aproximadamente 45 milhões de toneladas de RCCs, representando 58% dos resíduos sólidos urbanos (ABRELPE, 2017). Esses valores representam apenas resíduos jogados em locais públicos ou deixados em vias públicas (ABRELPE, 2017). Para Santos (2007) a construção civil, cada vez mais responsável pelo consumo de cerca de 20 a 50% recursos naturais, destaca-se como uma das indústrias mais prejudiciais ao meio ambiente, consumindo e descartando resíduos sólidos tanto em ambientes urbanos quanto rurais. Por isso, o desenvolvimento de práticas que minimizem esses impactos torna-se indispensável.

De acordo com a Associação Brasileira de Reciclagem de Resíduos de Construção e Demolição (ABRECON), o volume de materiais que podem ser reciclados no Brasil é suficiente para construir cerca de 7.000 edifícios de dez andares, 168.000 quilômetros de estradas ou 3,7 milhões de casas populares (ABRECON, 2017). Estes números são expressivos, pois mostram o potencial de reutilização dos materiais que estão sendo descartados de forma inadequada. Adicionalmente, diferentes tipos de agregados podem ter menores ou maiores custos em diferentes regiões do país, por exemplo, os agregados no estado do Acre têm preços mais elevados, com uma média de US\$ 46,6/m<sup>3</sup>, o que representa um custo três vezes maior do que em Rondônia (US\$ 16,6/m<sup>3</sup>) e 3,4 vezes a mais do que em Minas Gerais (US\$ 13,5/m<sup>3</sup>). (SINAPI, 2020). Esses números são realmente expressivos, pois demonstram que os materiais descartados de forma inadequada podem ser reutilizados com grande potencial.

A composição dos resíduos provenientes da construção pode variar significativamente de país a país e é influenciada diretamente pelas tecnologias aplicadas na construção. Por exemplo, é comum encontrar um maior uso de madeira nos Estados Unidos e no Japão, enquanto na Europa e no Brasil, sua porcentagem é significativamente menor. Da mesma forma, o gesso é um elemento comum em construções americanas e europeias, e tem experimentado um aumento significativo em grandes centros urbanos brasileiros (PINTO, 1999). A composição do RCC é impactada por um conjunto de fatores, como o cronograma de execução dos serviços, os materiais utilizados e as perdas de materiais decorrentes do processo (MIRANDA et al., 2009). Nos últimos anos, o aumento dos empreendimentos imobiliários e as atividades de construção em larga escala no Brasil têm gerado uma quantidade significativa de resíduos da construção civil (OLIVEIRA et al., 2014). Este quadro é ainda mais preocupante devido à ausência de dados fiáveis e informações consistentes sobre a quantidade de resíduos produzidos durante esta atividade.

Redução de resíduos é amplamente reconhecida como uma forma eficiente e eficaz de minimizar a produção de RCC e suas consequências ambientais. Reutilização e Reciclagem são

consideradas práticas válidas para a redução do volume de descartes em aterros sanitários (BANIAS et al., 2011; YUAN SHEN, 2011). Além disso, uma boa gestão dos recursos durante todas as etapas do processo de construção, com planejamento adequado, pode evitar a superlotação dos canteiros e a diminuição dos custos financeiros e ambientais da obra (MENDIS *et al.*, 2013). A incompatibilidade entre projetos, a desatualização de projetos em campo, a modificação de projetos após a execução de serviços e a falta de padronização podem gerar a necessidade de quebra de paredes e lajes de concreto para a instalação de tubulações hidráulicas e elétricas (ROCHA *et al.*, 2014). Isso, por sua vez, tem o potencial de causar grandes prejuízos, resultando em resíduos de blocos e concreto (ROCHA et al., 2014).

### 3.3.1 Usinas de RCC no Brasil e em Uberaba

A reciclagem de RCC ocorre em instalações que podem ser certificadas ou não pela ABRECON. Essas instalações podem ser organizadas em diferentes formatos, incluindo usinas fixas, que são estabelecidas em áreas designadas geralmente perímetro urbano, usinas móveis, montadas sobre esteiras ou rodas, frequentemente utilizadas em projetos com grande geração de RCC, e usinas híbridas, que não possuem mecanismos de locomoção e são rebocadas por caminhões *munck*. A figura 5 representa uma usina fixa de RCC em Uberaba.

Figura 5 - Pátio de trabalho da usina fixa de reciclagem ECOAMBIENTAL



Fonte: Do autor (2023)

Para a produção de agregados reciclados a partir de RCC, o processo inicia com o descarregamento dos caminhões que fazem recolhimento dos geradores resíduos nas Áreas de Transbordo e Triagem nas usinas, onde ocorre a triagem manual por colaboradores que separaram materiais de Classe A, retirando todos que não são passíveis de serem reciclados na produção de agregado (Figura 6).

Figura 6 - Separação de materiais áreas de transbordo e triagem usina ECO AMBIENTAL



Fonte: Do autor (2023)

Após a triagem, esses materiais são armazenados separadamente e levados para britadores para serem triturados em diferentes granulometrias em um britador de mandíbula (Figura 7). Após a britagem, os materiais são classificados por tamanho por meio de peneiras padronizadas e elevadas por conjunto de correias que tem sistemas de eletro imas e catação manual de possíveis impurezas que passaram por processos anteriores, o conjunto de peneira transportas os ARs formando pilhas de areia, brita, bica corrida e pedrisco, entre outros, prontos para reutilização na indústria da construção civil (Figura 8)

Figura 7 - Lançamento de Resíduos da Construção Civil (RCC) Classe A no Britador.



Fonte: Do autor (2023)

Figura 8 - Pilha de Agregados Reciclados de Resíduos da Construção Civil: Areia e Pedrisco



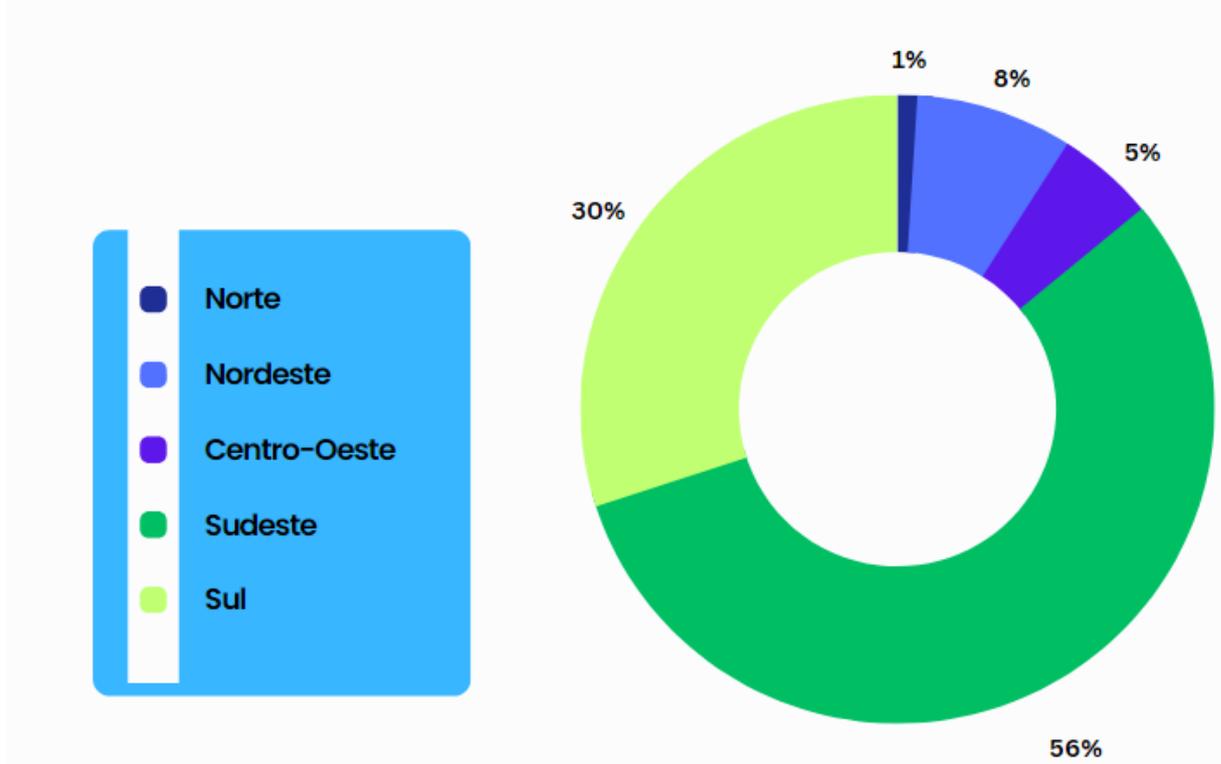
Fonte: Do autor (2023)

No contexto da reciclagem, de acordo com uma pesquisa conduzida por Miranda et al. (2016), o Brasil possui aproximadamente 310 usinas de reciclagem de RCC, abrangendo tanto empreendimentos de caráter público quanto privado. Porém, em torno da metade destas usinas em operação está operando abaixo da sua capacidade máxima, com uma produção real situada em torno de 45%. Esse cenário pode ser parcialmente atribuído à insuficiência de matéria-prima

destinada às usinas de reciclagem, assim como à demanda limitada por agregados reciclados na indústria da construção civil. Uma das principais causas dessa demanda limitada está associada à relutância da engenharia civil em relação à adoção de agregados reciclados no Brasil, um paradigma que ainda demanda superação (BUTTLER; CORREA; RAMALHO, 2005).

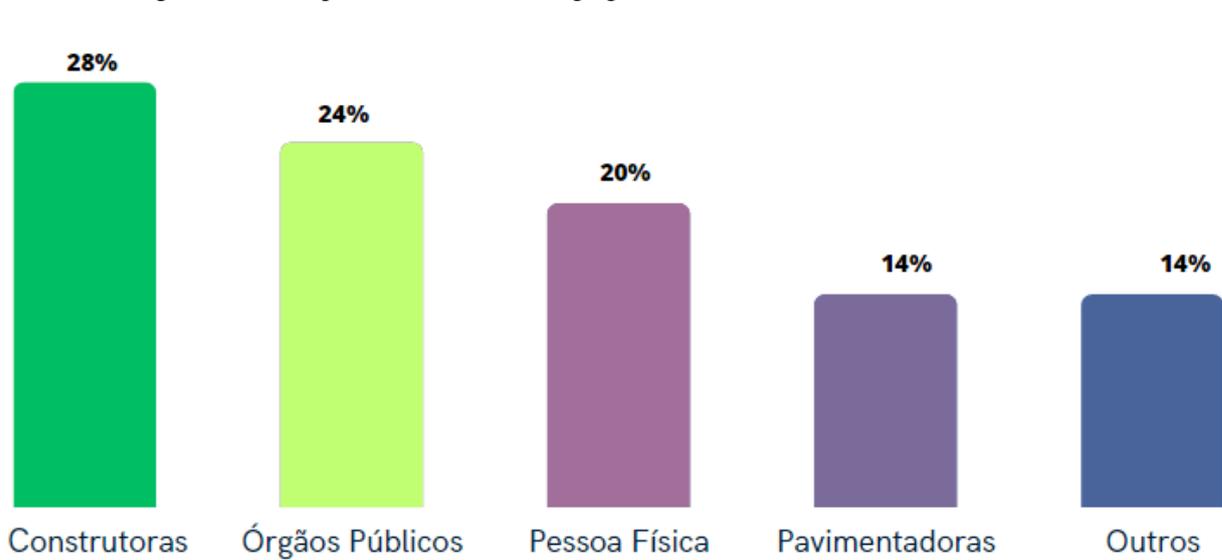
Dados mais recentes, conforme registrado no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), indicam que a região Sudeste do país foi a que apresentou o maior número de instalações para o gerenciamento de RCC no ano de 2015 (Figura 9), destacando-se os estados de São Paulo e Minas Gerais como as unidades federativas com o maior quantitativo de unidades de gerenciamento para RCC (BRASIL, 2020). No espectro dos principais consumidores de agregados reciclados, merecem destaque as construtoras e as entidades públicas, conforme ilustrado na Figura 10.

Figura 9 - Distribuição das Usinas de Reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC) no Brasil em 2015



Fonte: Planares, 2015.

Figura 10 - Principais consumidores de agregados reciclados no Brasil em 2015



Fonte: BRASIL, 2020.

A Usina de Reciclagem Eco ambiental, localizada em Uberaba, pertence ao Grupo LIMPA ENTULHO que atua desde 2015, buscando fazer o descarte adequado dos entulhos e alternativas para aproveitamento destes para produção de agregado reciclado. A usina é pioneira no município de Uberaba e na produção de agregados reciclados a partir dos RCC de Classe A. A usina segundo parâmetros da ABRECON é classificada como fixa. É composta por um britador de mandíbula que faz a quebra dos RCC de classe A em fragmentos menores que posterior é passado por um conjunto de peneiras que classifica os agregados em diferentes granulometrias, que é caminhada para um conjunto de esteiras que fazem as pilhas dos agregados (Figura 7 e 8). A Usina possui uma capacidade de produção de 80 m<sup>3</sup>/h de agregado reciclado que atende os consumidores da cidade de Uberaba e de toda a região. fornecendo agregados reciclados de diferentes granulometrias, atuando nas três esferas relevantes do conceito ESG, Ambiental, Social e Econômico.

Na esfera ambiental, ao propor um descarte e manejo adequados dos RCC, essa iniciativa tem um impacto social positivo, pois emprega diretamente uma equipe composta por diversos profissionais, incluindo motoristas, operadores de máquinas e catadores que trabalham nas Áreas de Transbordo e Triagem. Essa oportunidade de emprego beneficia pessoas com pouca qualificação que têm visto suas opções de trabalho nas áreas urbanas diminuir ao longo do tempo. Na esfera econômica, a usina oferece os agregados a preços significativamente mais acessíveis em comparação aos materiais naturais e convencionais disponíveis no mercado. Por exemplo, o metro cúbico do agregado graúdo e miúdo é vendido a apenas 30 reais, enquanto

a areia média convencional tem um preço de 170 reais e a brita 1 de basalto chega a 190 reais, conforme a cotação em 27/09/2023.

Essa diferença de preço torna os agregados reciclados uma opção economicamente vantajosa, incentivando práticas mais sustentáveis na indústria da construção. Esse cenário se torna ainda mais atrativo em um contexto pós-pandemia da COVID-19, uma vez que a crise gerou impactos significativos nos custos dos insumos da construção. Por exemplo, o Índice Nacional do Custo da Construção INCC, de janeiro de 2020 a dezembro de 2022, apresentou um aumento acumulado de 31,92%, conforme a Figura 11.

Figura 11 - Evolução do Índice Nacional do Custo da Construção-INCC de 2020 a 2022, conforme registrado pela Fundação Getúlio Vargas

	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	Acumulado anual
2022	0,71	0,38	0,86	0,95	2,28	2,14	0,86	0,09	0,09	0,12	0,36	0,09	9,27
2021	0,89	1,89	1,30	0,90	2,22	2,16	0,85	0,46	0,51	0,86	0,67	0,35	13,84
2020	0,38	0,33	0,26	0,22	0,20	0,34	1,17	0,72	1,16	1,73	1,28	0,70	8,81

Fonte: Fundação Getúlio Vargas.

Os Recursos de Compensação Ambiental (RCA) têm ganhado uma atenção crescente no setor da construção, não apenas como uma obrigação para cumprir a legislação e as resoluções do CONAMA, mas também como uma maneira de reduzir os custos de produção e promover o desenvolvimento sustentável.

### 3.4 PERSPECTIVAS DA UTILIZAÇÃO DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL NA FABRICAÇÃO DE NOVOS PRODUTOS

Os resíduos da construção civil têm sido usados pela humanidade desde a antiguidade (LEITE, 2007). No entanto, foi após a Segunda Guerra Mundial que a utilização do Resíduos da Construção Civil se tornou mais frequente, já que serviu tanto para dar uma destinação adequada aos entulhos gerados, quanto para contribuir para a reconstrução da infraestrutura viária da Europa (SCHULZ; HENDRICKS, 1992). A reciclagem desses resíduos iniciou, no Brasil, na década de 1980, a partir da instalação e utilização de pequenos moinhos durante a construção de edificações, em que os resíduos provenientes de alvenaria eram reciclados para a elaboração de argamassas (LIMA, 1999).

A utilização de RCC como matéria-prima para produzir novos produtos é cada vez mais comum e apresenta inúmeros benefícios, não só para o meio ambiente, como também para os consumidores. Por exemplo, a utilização de agregados reciclados pode resultar em menor energia incorporada, bem como reduzir as emissões de transporte, especialmente quando os materiais reciclados são reutilizados em proximidade ao local de reprocessamento (NAYANA; KAVITHA, 2017). Especificamente, o uso de agregados reciclados pode reduzir as emissões de carbono em números entre 23 e 28% quando comparados com agregados naturais (NAYANA; KAVITHA, 2017). Assim, o uso correto dos agregados reciclados gera benefícios para os mais diversos atores em todo ciclo produtivo.

Esses exemplos reais demonstram como a utilização de resíduos da construção civil na fabricação de novos produtos pode gerar benefícios ambientais significativos. Em muitos municípios brasileiros que possui usina de reciclagem de RCC, é possível encontrar uma gama de projeto de pesquisas tecnológicas que emprega o uso sustentável de agregados reciclado em diversos produtos. Por exemplo: (1) resíduos de concreto, tijolos e cerâmica podem ser triturados e transformados em agregados reciclados utilizados na produção de tijolos, blocos reciclados e telhas ecológicas (CAMPOS et al., 2017; GOMES et al., 2017) (2) resíduos asfálticos provenientes de demolições podem ser reaproveitados na fabricação de asfalto reciclado (ARAÚJO E ALVES, 2021); (3) resíduos de construção, como concreto, argamassa e pedras, podem ser transformados em substitutos aos agregados naturais na produção de concreto, argamassa e pavimentos (GUIMARÃES et al., 2019; KHAYAT, 2016); (4) alguns resíduos da construção civil, como lã de vidro, espumas e plásticos, podem ser reaproveitados na fabricação de materiais isolantes térmicos e acústicos (e.g., MEDEIROS et al., 2019) e (5) fabricação de meios-fios de concreto e blocos de piso com agregado reciclado (GAYARRE, et al., 2011) (veja também para utilizações adicionais ASSUNÇÃO et al., 2007; CABRAL, 2007; LEITE, 2007; LIMA, 2008; MALTA et al., 2013; MOREIRA; FIGUEIREDO, 2010; SADATI; MOTTA, 2005).

Apesar das inúmeras vantagens previamente mencionadas, o uso de Resíduos da Construção Civil na indústria da construção enfrenta desafios e obstáculos. Um dos principais desafios reside na variação da qualidade e durabilidade dos produtos em comparação com os agregados naturais (LUCHEZZI; TERENCE, 2013). Alguns resíduos de construção podem apresentar limitações técnicas, dificultando sua incorporação em novos produtos. Por exemplo, resíduos misturados ou contaminados podem complicar o processamento e a aplicação em determinadas indústrias (LUCHEZZI; TERENCE, 2013). A fabricação de novos produtos a

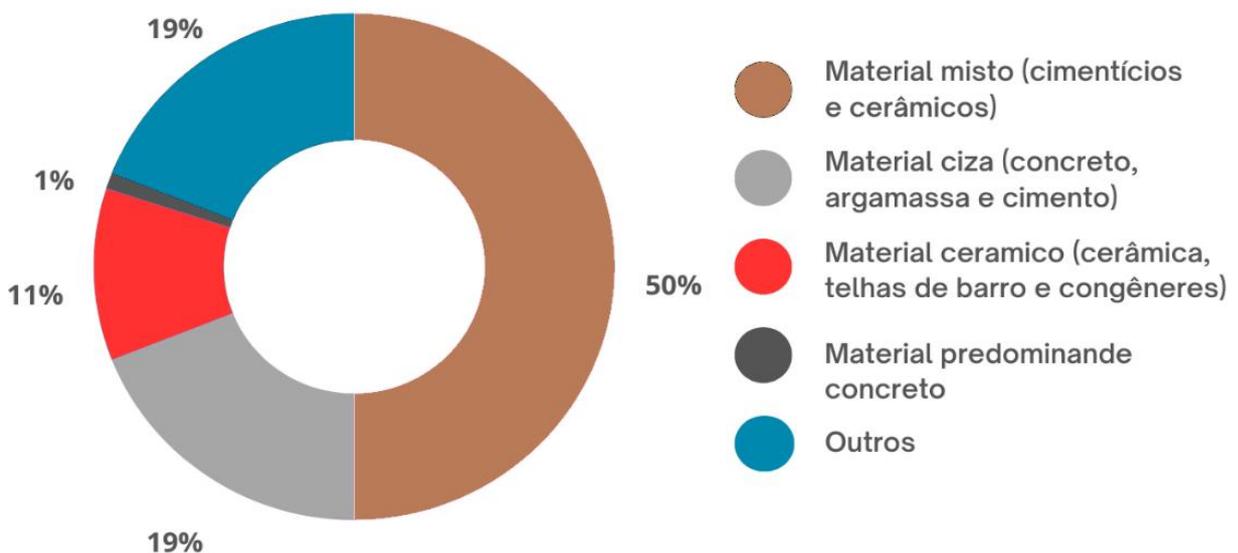
partir de RCC também pode demandar investimentos adicionais em infraestrutura e tecnologias de reciclagem, afetando sua viabilidade econômica (DE SOUZA TITO et al., 2023).

Uma gestão adequada dos RCC é fundamental para garantir a qualidade dos materiais reciclados. Isso envolve a correta separação dos resíduos, armazenamento apropriado e a implementação de processos eficazes de triagem e reciclagem (LUCHEZZI; TERENCE, 2013). Por fim, é necessário realizar testes e pesquisas para assegurar que esses materiais reutilizados atendam aos requisitos técnicos e normas de segurança. Portanto, uma avaliação e planejamento detalhados são necessários, levando em consideração a finalidade do projeto, suas limitações, vantagens e desvantagens, bem como o custo-benefício de sua utilização (DE SOUZA TITO et al., 2023). Assim, é de suma importância entender os RCC em cada situação e localidade.

### 3.5 CARACTERÍSTICAS DO RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO CIVIL NO BRASIL

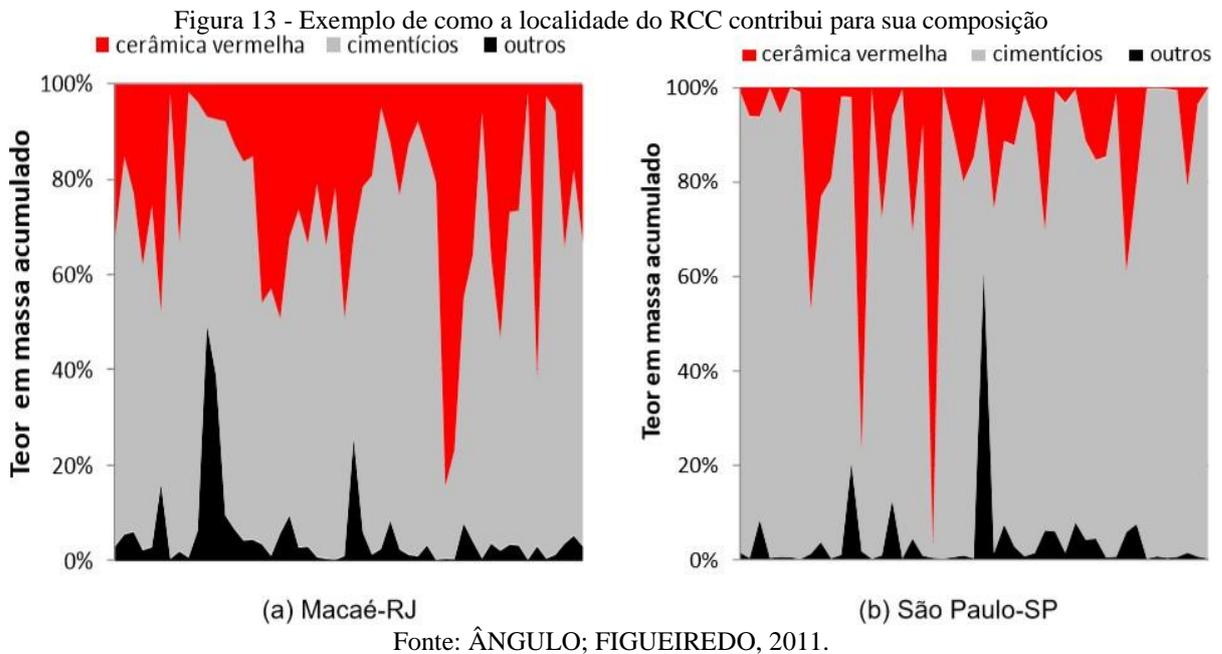
A pesquisa realizada por Miranda et al. (2016) revelou que nos processos de reciclagem de RCC no Brasil, aproximadamente metade (50%) dos RCCs recebidos para reciclagem são de natureza mista, contendo materiais cimentícios e cerâmicos. Cerca de 19% desses resíduos consistem principalmente em materiais cinzas, como concreto, argamassa e cimento, enquanto 11% são compostos por componentes cerâmicos, como cerâmica, telhas de barro e similares. Apenas 1% é predominantemente composto por concreto. A Figura 12 ilustra essas percentagens dos tipos de RCC com base nos materiais que chegam à usina de reciclagem.

Figura 12 - Percentual por Tipos de Material de RCC que Chegam à Usina de Reciclagem



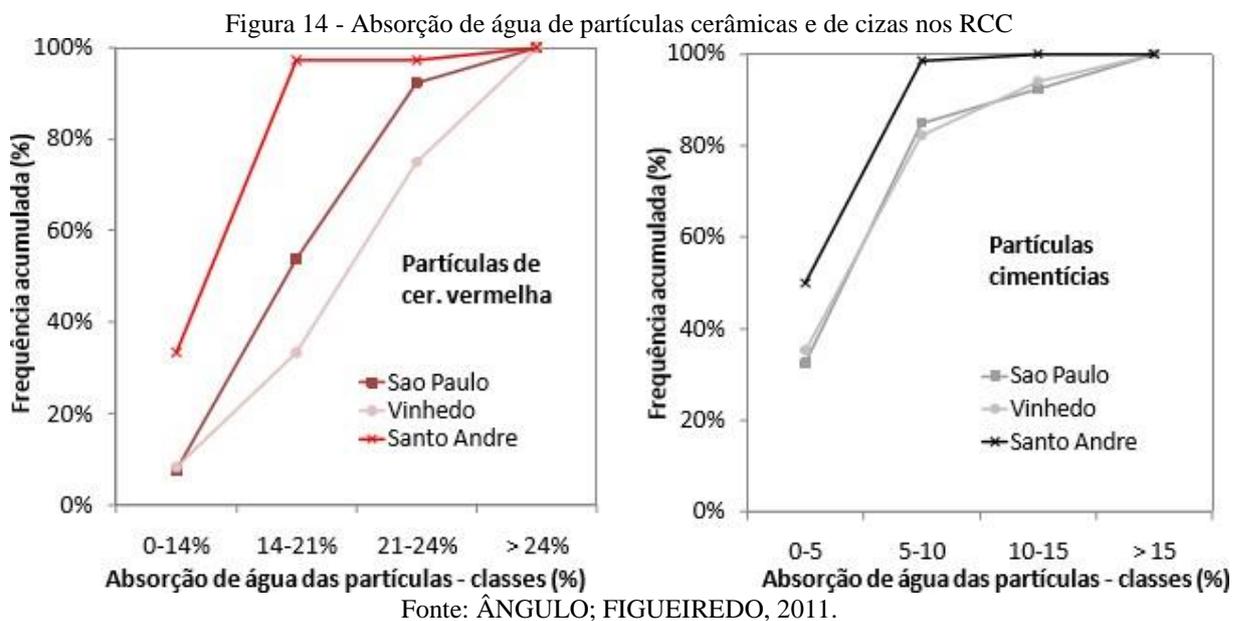
Fonte: adaptada Miranda, 2016

Uma vez que os materiais coletados para a produção de agregados reciclados têm sua origem, em grande parte, em caçambas localizadas nas ruas ou canteiros de obras da construção civil, a variedade de materiais disponíveis para serem refinados em agregados está diretamente ligada aos tipos de resíduos descartados. Essa diversidade na tipologia dos materiais pode também variar conforme a região geográfica em que se encontram (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011) (Figura 13). Entretanto, devido à prevalência da construção em concreto armado no Brasil, a maioria dos materiais descartados possui uma base cimentícia. Contudo, essa diversidade mencionada tem um impacto direto nas propriedades dos materiais que incorporam resíduos de construção e demolição como matéria-prima, e isso é considerado um dos principais desafios para sua utilização em aplicações de concreto.



No que diz respeito à granulometria dos agregados reciclados produzidos em usinas de reciclagem no Brasil, os dados referentes a 2015, conforme publicados no Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2020), demonstram uma variação considerável nessas características. Essas variações são influenciadas por diversos fatores, incluindo a composição dos RCC de Classe A, os métodos de triagem adotados nas usinas, as tecnologias de moagem e a classificação por peneiras, entre outros. A porosidade dos agregados é uma propriedade intimamente relacionada à composição dos agregados reciclados, sendo que a absorção de água por agregados de cerâmica vermelha tende a ser mais alta em comparação aos agregados de origem cimentícia (Figura 14) (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011). É fundamental ressaltar que

quanto menor for a porosidade do agregado, maior será sua resistência aos esforços mecânicos e à abrasão. Portanto, é de se esperar que os agregados reciclados sejam mais suscetíveis a danos do que os agregados convencionais. Além disso, agregados mais porosos têm uma tendência maior a se desintegrar facilmente e a apresentar uma maior proporção de partículas finas, resultando em uma maior absorção de água quando incorporados em matrizes cimentícias (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).



É relevante notar que os ARs derivados de RCC tendem a apresentar uma massa específica menor em comparação com os agregados convencionais. Essa característica se deve à composição diversificada dos RCC, à presença de partículas pulverulentas e à porosidade inerente a esses materiais. Como resultado, os agregados reciclados geralmente exibem valores de absorção de água mais elevados e contêm uma proporção maior de partículas finas em comparação com os agregados convencionais (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Por exemplo, em um estudo realizado por Rodrigues e Fucale (2014), foi observada uma taxa de absorção de água de 10% para o agregado miúdo reciclado, em contraste com apenas 1% para o agregado miúdo natural. Além disso, o teor de material pulverulento nos agregados reciclados atingiu 8,7%, enquanto nos agregados naturais esse valor foi de apenas 1%. No que diz respeito à massa específica, o agregado miúdo reciclado apresentou uma densidade de 2,54 kg/dm<sup>3</sup>, enquanto o agregado miúdo natural registrou uma densidade de 2,62 kg/dm<sup>3</sup>, representando uma diminuição de 3,1% em relação aos parâmetros dos agregados convencionais (RODRIGUES; FUCALÉ, 2014).

De forma semelhante, Vieira, Dal Molin e Lima (2004) identificaram uma absorção de água de 6,04% para o agregado graúdo reciclado, comparado a 2,5% para o agregado graúdo convencional. A massa específica desses agregados também apresentou diferenças, com o agregado graúdo reciclado tendo uma densidade de 2,52 kg/dm<sup>3</sup>, em contraste com a densidade de 2,70 kg/dm<sup>3</sup> do agregado graúdo convencional. Essas constatações estão em linha com os resultados de outros estudos que destacam as variações nas propriedades físicas dos agregados reciclados em comparação com os convencionais (Tabela 1).

Tabela 1 - Comparativo entre parâmetros dos agregados convencionais e reciclados

Agregados	Parâmetros					
	Absorção (%)		Massa específica (g/cm <sup>3</sup> )		Massa unitária (g/cm <sup>3</sup> )	
	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo	Miúdo	Graúdo
Natural	0,46	1,21	2,61	2,88	1,44	1,53
Reciclado de concreto	7,52	5,64	2,55	2,26	1,53	1,47
Reciclado de argamassa	4,12	9,53	2,61	2,01	1,43	1,38
R. de cerâmica vermelha	10,60	15,61	2,34	1,86	1,45	1,25

Fonte: CABRAL *et al.*, 2007, adaptada.

Diante dessas informações, diante das características singulares dos agregados reciclados, como a sua menor massa específica, maior absorção de água e teor elevado de partículas pulverulentas em comparação com os agregados convencionais, é fundamental considerar essas diferenças ao empregá-los em aplicações de construção e concretagem.

### 3.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE O CONCRETO

Os concretos são materiais complexos, sendo uma composição de agregados graúdos e miúdos incorporados em uma matriz de cimento Portland. Essa matriz consiste em uma solução aquosa que contém grãos de cimento Portland e espaços que podem conter ar. A presença de ar na matriz pode se manifestar na forma de bolhas ou espaços interconectados, e essa configuração é determinada pelas propriedades de plasticidade da mistura (BAUER, 2008). Além disso, é possível introduzir na composição, em proporções menores, uma variedade de componentes, como aditivos químicos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições

minerais, que têm se tornado cada vez mais comuns na indústria da construção civil (ISAIA, 2007).

Diversos fatores exercem influência sobre as propriedades do concreto. A quantidade de cimento na mistura, expressa pela relação entre os vazios e o cimento Portland, desempenha um papel fundamental (BAUER, 2008). Essa relação água/cimento é um parâmetro essencial para ajustar a proporção dos materiais e desenvolver as propriedades mecânicas do concreto durante o processo de hidratação do cimento Portland. Essas características desempenham são importantes nos processos de transporte, lançamento e adensamento do concreto, assegurando que ele seja colocado de forma uniforme, sem segregação, e que, após a cura, apresente uma estrutura com a mínima porosidade possível (BAUER, 2008).

O concreto é indiscutivelmente um ator de destaque na indústria da construção. Sua versatilidade permite sua aplicação em uma ampla gama de condições ambientais, desde ambientes com temperaturas extremamente altas até projetos submersos (Figura 15). O que torna o concreto ainda mais notável é sua durabilidade em contextos desafiadores, superando outros materiais frequentemente empregados na construção, como madeira e aço. Essa característica tem feito do concreto a escolha preferida em diversos empreendimentos (MEHTA E MONTEIRO, 2008). No entanto, para maximizar suas capacidades, frequentemente é necessário combinar o concreto com o aço, a fim de reforçar sua resistência à tração. Essa parceria entre concreto e aço resulta na tipologia conhecida como concreto armado, seguindo as diretrizes de dimensionamento estabelecidas na ABNT NBR 6118:2014.

Figura 15 - Exemplos de estruturas de concreto armado



Usina Hidrelétrica de Itaipu, Brasil.



Viaduto de Millau, França.



Burj Khalifa, Emirados Arabes Unidos



Ponte Danyang-Kunshan, China.

Fonte: Retirada do Portal TecnoMor (2023).

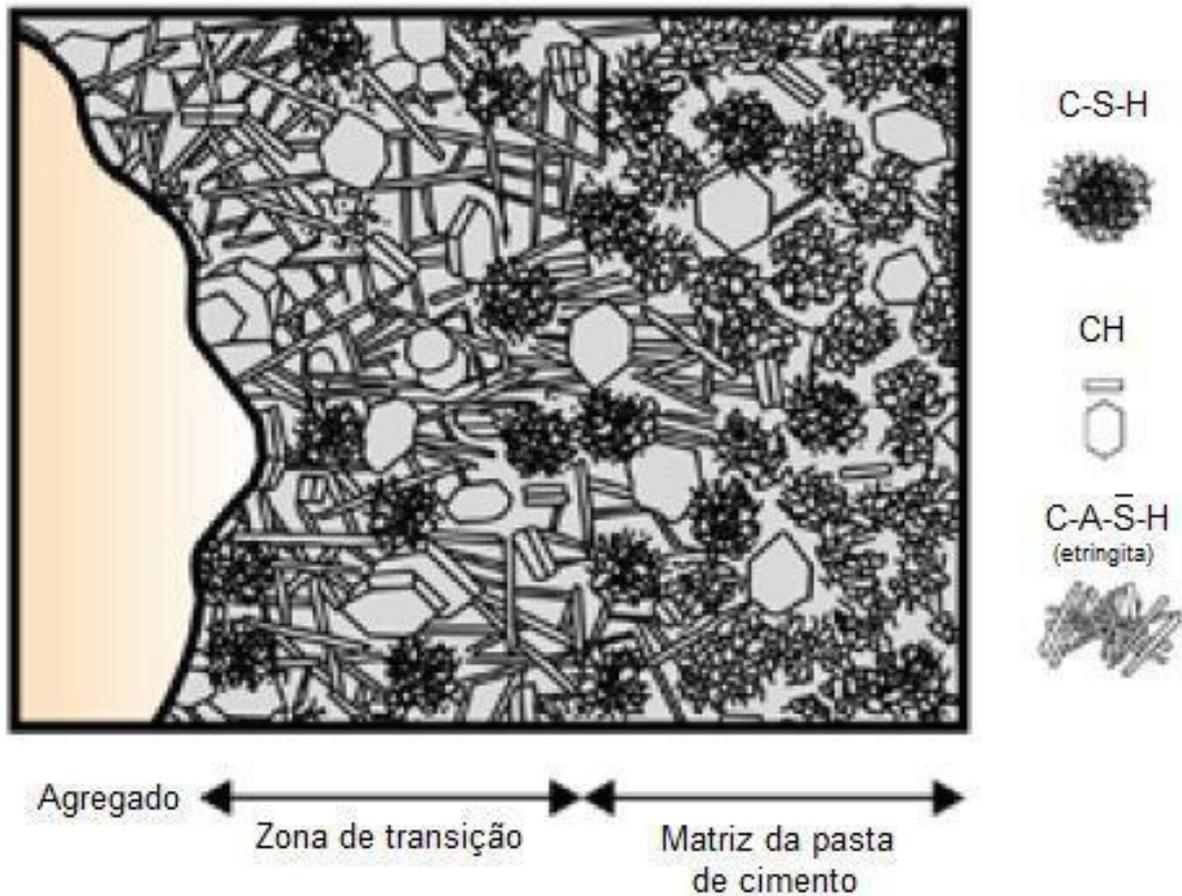
### 3.6.1 Concreto fase macroscópica e microscópica

O concreto é um material compósito que pode ser dividido em fases distintas. Macroscopicamente, ele se divide em duas partes principais: a fase da argamassa e a fase dos agregados graúdos. No nível microestrutural, observamos a presença da chamada Zona de Transição Interfacial (ZTI) que se situa na interface entre a argamassa e os agregados graúdos (NEVILLE; BROOKS, 2013). Conforme Mehta e Monteiro (2014), a ZTI é uma camada extremamente fina, geralmente com uma espessura que varia de 10 a 50  $\mu\text{m}$ , e ela envolve os agregados graúdos no interior do concreto. Essa zona desempenha papel fundamental e acaba sendo frequentemente a parte mais frágil do concreto e exercendo uma influência significativa em seu comportamento mecânico.

Essa fragilidade pode ser atribuída a diversos fatores (MEHTA; MONTEIRO, 2014), tais como a maior concentração de etringita, que são os primeiros compostos de hidratação do cimento conhecidos por seus cristais grandes e porosos de baixa resistência mecânica, a posição dos cristais de hidróxido de cálcio hidratado (CH e C-S-H) que tendem a se alinhar paralelamente à superfície dos agregados, favorecendo a formação de planos de clivagem ou fissuras internas no concreto, e a porosidade devido à camada de água que se forma ao redor

dos agregados graúdos. A Figura 16 ilustra esquematicamente a ZTI e demonstra a formação dos compostos cristalinos resultantes da hidratação do cimento Portland ao longo do tempo.

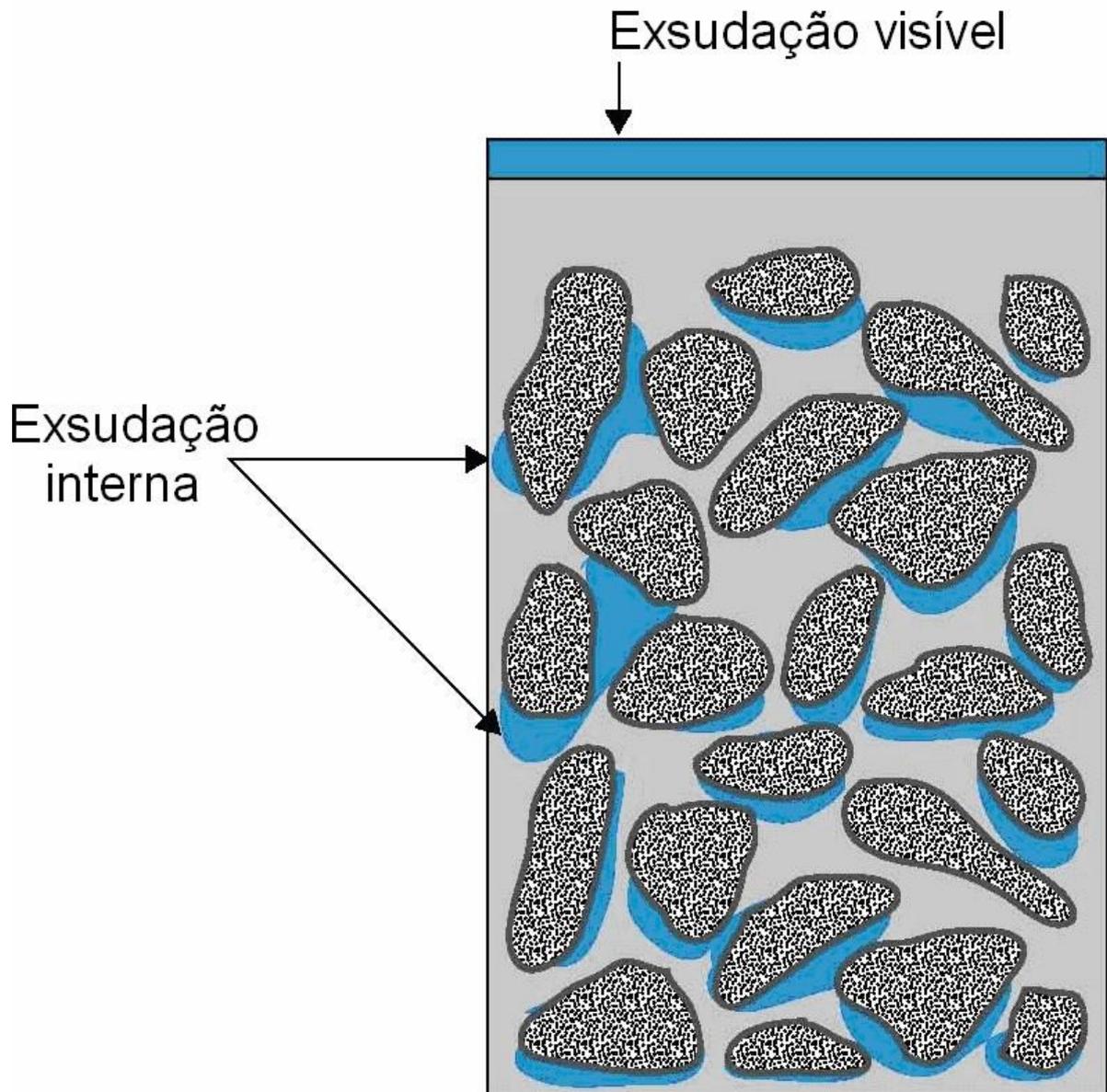
Figura 16 - Esquema da Zona de Transição Interfacial (ZTI) do concreto



Fonte: Adaptada de (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A ZTI desempenha um papel fundamental na resistência do concreto, pois, no estado fresco, ocorre a formação de filmes de água em torno das partículas dos agregados graúdos, um fenômeno conhecido como exsudação interna no concreto. Isso contribui para um aumento na relação água/cimento na região da ZTI. Com o tempo, os produtos de hidratação do cimento fazem com que a argamassa se adira à superfície dos agregados graúdos. A dimensão dos agregados graúdos é um fator crítico na formação da ZTI e, conseqüentemente, no comportamento mecânico do concreto. Agregados com um alto índice de forma, que é a relação entre a espessura e o comprimento do agregado, apresentam uma maior probabilidade de formação de películas ou camadas de água em torno deles, enfraquecendo ainda mais a ZTI. Portanto, a escolha de agregados graúdos mais cúbicos, em contraposição aos agregados lamelares e alongados, desempenha um papel essencial no processo de dosagem do concreto (ISAÍÁ, 2007; BAUER, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014) (Figura 17).

Figura 17 - Exemplo da exsudação interna em concretos



Fonte: Retirada de (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Outro fator que influencia a resistência da ZTI no concreto é a presença de microfissuras dispersas no material. A formação dessas microfissuras depende de vários parâmetros, como o tamanho e a distribuição granulométrica dos agregados, a quantidade de cimento, a relação água/cimento, o grau de compactação do concreto no estado fresco, as condições de cura, a umidade ambiente e condições térmica do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Quando essas microfissuras estão presentes na fase da argamassa do concreto, a aplicação de cargas representando até 70% da resistência máxima à compressão pode ser suficiente para iniciar a fissuração. À medida que essas fissuras se propagam gradualmente, podem se conectar com as

microfissuras presentes na ZTI, formando uma continuidade que leva à ruptura do concreto (ISAÍÁ, 2007; BAUER, 2008; MEHTA; MONTEIRO, 2014). É relevante ressaltar que, em situações de esforços de compressão, uma quantidade substancial de energia é necessária para formar e estender essas fissuras, conferindo ao material uma maior resistência a esse tipo de esforço, ao contrário do que ocorre com esforços de tração ou flexão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

### 3.7 APLICABILIDADE DE AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS

Atualmente, uma das principais abordagens para promover o crescimento sustentável da indústria da construção civil, ao mesmo tempo em que se preserva o meio ambiente, consiste na utilização de resíduos provenientes da construção e demolição para a produção de concretos, conhecidos como "recycled concrete aggregates" ou Concretos de Agregado Reciclado (CAR). A norma ABNT NBR 15116:2021, que estabelece diretrizes para o uso de agregados reciclados de Classe A, conforme a Resolução CONAMA nº307 (BRASIL, 2002), em sua primeira edição de 2004, limitava o uso desses agregados apenas em aplicações não estruturais, ou seja, em concretos de classes de resistência C10 e C15 (ABNT NBR 15116:2021). No entanto, em sua revisão de 2021, essa norma passou por atualizações significativas (ABNT NBR 15116:2021), que incluem:

- A introdução de três subclasses de agregados: o agregado reciclado de concreto (ARCO), o agregado reciclado cimentício (ARCI) e o agregado reciclado misto (ARM);
- A definição do cálculo da quantidade de água necessária para a pré-molhagem dos ARs de RCC;
- A permissão para o uso de ARs em concretos com finalidades estruturais, desde que observadas as recomendações específicas. Isso envolve o uso restrito de **ARCO**, um limite de substituição de 20% dos agregados convencionais por agregados reciclados e aplicação em concretos das classes de agressividade I e II da ABNT NBR 6118:2014.

Várias nações têm implementado diretrizes análogas referentes ao uso de agregados derivados de RCC em composições de concreto com propósitos estruturais. Exemplos notáveis incluem a norma CUR-VB: 1984, adotada pela Holanda, o padrão DIN 4226-100:2002, da Alemanha, e a OT 70085:2006, em vigor na Suíça. Tais iniciativas regulatórias têm servido como catalisadores para o avanço tecnológico na produção e aplicação de concretos que

integram agregados reciclados em projetos construtivos contemporâneos (GERIN; DE NARDIN, 2019) (Figura 18).

Figura 18 - Aplicabilidade de agregados reciclados em concreto. A. Complexo habitacional de “Werdwies, 2017 em Zurique; B. Edifício da escola “Im Birch, 2017, Suíça; C. Wadspirale, Alemanha, 2015; D. Prédio Administrativo da Fundação Federal Alemã para o Meio Ambiente, 2015.



Fonte: (GERIN; DE NARDIN, 2019).

A norma ABNT NBR 15116:2021, defini limites e referencias para a utilização de agregados RCC em composições de concreto. Dentro do escopo da norma, a Tabela 2 é de especial importância. Ela delinea, de forma clara, os requisitos essenciais e os limites aceitáveis para diversas características dos Ars de RCC, incluindo teor de sulfatos, absorção de água, presença de materiais finos (ou pulverulentos) e composição granulométrica.

Tabela 2 - Requisitos específicos dos ARs e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios. Segundo ABNT NBR 15116:2021

Ensaio		Limite %	Requisito	Método de ensaio
Materiais indesejáveis <sup>b</sup> (G <sub>4</sub> )	Teor	< 1	Anexos A e B	Anexos A e B
Argila em torrões	Teor	< 3	ABNT NBR 7211	ABNT NBR 7218
Sulfatos	Teor	< 0,1	ABNT NBR 7211	ABNT NBR 9917
Cloretos	Teor para concreto simples	< 0,2	ABNT NBR 7211	ABNT NBR 9917
	Teor para concreto armado	< 0,1		
	Teor para concreto protendido	< 0,01		
Absorção de água	Classe ARCO	< 7	5.3	ABNT NBR 16917 (graúdo)
	Classe ARCI ou ARM	< 12	5.3	ABNT NBR 16916 (miúdo)

Ensaio		Limite %	Requisito	Método de ensaio
Finos (< 0,075 mm)	Teor para concretos protegidos de desgaste superficial	< 12	ABNT NBR 7211	ABNT NBR NM 46
	Teor para concretos submetidos a desgaste superficial	< 10		

<sup>a</sup> Por exigência do consumidor, pode ser necessária a verificação da reação álcali-agregado, de acordo com a ABNT NBR 15577-1. A mesma exigência pode ser aplicada a outras propriedades do agregado reciclado, como massa unitária, massa específica, ciclagem etc.

<sup>b</sup> São considerados materiais indesejáveis os fragmentos de natureza orgânica, como madeiras, plástico, betume e materiais carbonizados, e de natureza inorgânica, como vidros, vidrados cerâmicos e gesso. Os Anexos A e B estabelecem os métodos para determinação desses materiais.

Ensaio		Limite sugerido	Requisito	Método de ensaio
Teor de cerâmica vermelha ou branca não polida (G <sub>3</sub> )	Classe ARCO	0%	Anexos A e B	Anexos A e B
	Classe ARCI	< 10%		
	Classe ARM	< 40%		
Granulometria	Agregado graúdo	4,75/12,5 mm	ABNT NBR 7211	ABNT NBR NM 248
		9,5/25 mm		
		19/31,5 mm		
		37,5/75 mm		
		25/50 mm		
	Agregado miúdo	Zona utilizável	ABNT NBR 7211	ABNT NBR NM 248
Zona ótima				

Fonte: ABNT NBR 15116:2021

### 3.7.1 A Influência dos agregados reciclados no comportamento de concretos

A utilização de agregados provenientes de Resíduos de Construção Civil em composições de concreto tem sido um tema de estudo intensivo, sobretudo devido à heterogeneidade intrínseca a esses materiais reciclados. Essa diversidade composicional, decorrente da origem dos RCC de Classe A para produzir agregados miúdos e graúdos, se traduz em propriedades variáveis nos concretos resultantes, incluindo diferentes relações água/cimento (a/c) (VIEIRA et al., 2004; RODRIGUES; FUCALE, 2014; GERIN et al., 2019).

Os agregados provenientes de RCC exercem uma influência significativa na performance dos concretos, tanto em estados frescos quanto endurecidos, e, portanto, não podem ser desconsiderados. Os desafios nessa área são principalmente originados pela caracterização imprecisa e notável heterogeneidade dos RCC (CABRAL et al., 2007). Mehta e Monteiro (2014) ressaltam que a adição de agregados reciclados em concretos pode levar a reduções nas resistências que chegam a atingir 25,1% daquelas observadas em concretos com agregados convencionais (Tabela 3).

Tabela 3 - Diferenças nas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto com agregado 100% recicláveis em relação com agregado natural

<b>Propriedade</b>	<b>Relação</b>
Resistência à compressão	Redução em até 25,1%
Resistência à tração direta e na flexão	Redução em até 10,5%
Módulo de elasticidade	Redução em até 45,6%
Retração por secagem	Aumento em até 71%
Fluência	Aumento em até 50,5%
Absorção de água	Aumento em até 50,04%
Profundidade de carbonatação	Similar
Resistencia ao congelamento e degelo	Reduzida
Penetração de cloretos	A mesma ou ligeiramente aumentada
Abatimento	O mesmo ou ligeiramente reduzido

Fonte: Adaptada de (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Esse fenômeno pode ser atribuído a uma série de fatores, incluindo a porosidade intrínseca dos agregados e as particularidades da ZTI (LEITE, 2001). Nesse sentido, a discussão

se amplia ao considerar o impacto nos demais atributos do concreto devido ao uso de ARs, proporcionando uma avaliação abrangente e criteriosa sobre sua viabilidade e eficácia em aplicações práticas. A avaliação de concretos produzidos com a inclusão de ARs frequentemente destaca questões relacionadas à durabilidade, integridade estrutural e desempenho a longo prazo. Nesse contexto, a permeabilidade do concreto, juntamente com o potencial de ocorrência de fissuras e a aderência entre os agregados reciclados e a matriz de cimento, ganham destaque na discussão (LEITE, 2001). É importante ressaltar que a absorção de água pelos agregados reciclados não apenas afeta imediatamente a mistura do concreto fresco, mas também pode influenciar o desempenho do concreto endurecido em ambientes sujeitos a ciclos de umidade e secagem.

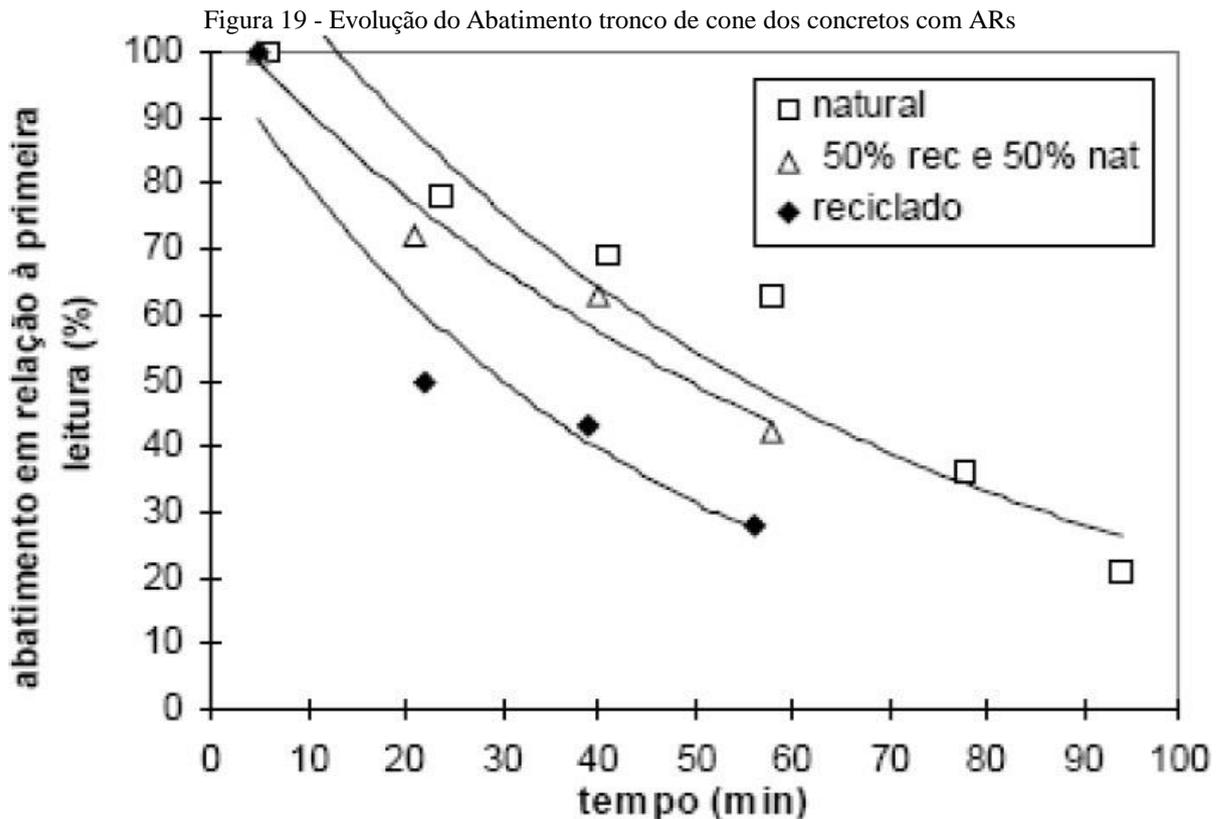
A fim de melhor descrever a influência que o agregado RCC atua nas propriedades no estado fresco e endurecido do concreto foram elaborados tópicos a seguir.

### 3.7.2 Redução da trabalhabilidade

As propriedades reológicas do concreto relacionam-se ao estudo de sua capacidade de fluir e deformar-se no estado fresco, sendo cruciais para a correta colocação, compactação e, conseqüentemente, o desempenho futuro da matriz cimentícia (e.g., NARDIN, 2019). Estas propriedades são influenciadas por múltiplos fatores, como a relação água/cimento, composição dos materiais, natureza dos agregados e até mesmo a temperatura ambiente. Em termos de definição, a trabalhabilidade se refere à facilidade com que o concreto pode ser misturado, transportado, colocado e compactado sem segregação. No estado fresco, quando se introduz agregados reciclados na composição, nota-se uma redução nessa trabalhabilidade se comparado aos concretos formulados com agregados convencionais (FROTTE et al., 2017; NARDIN, 2019). Uma causa primordial para essa diminuição reside no maior conteúdo de partículas finas presentes nos agregados reciclados, que intensifica a absorção da água da mistura (FROTTE et al., 2017; NARDIN, 2019).

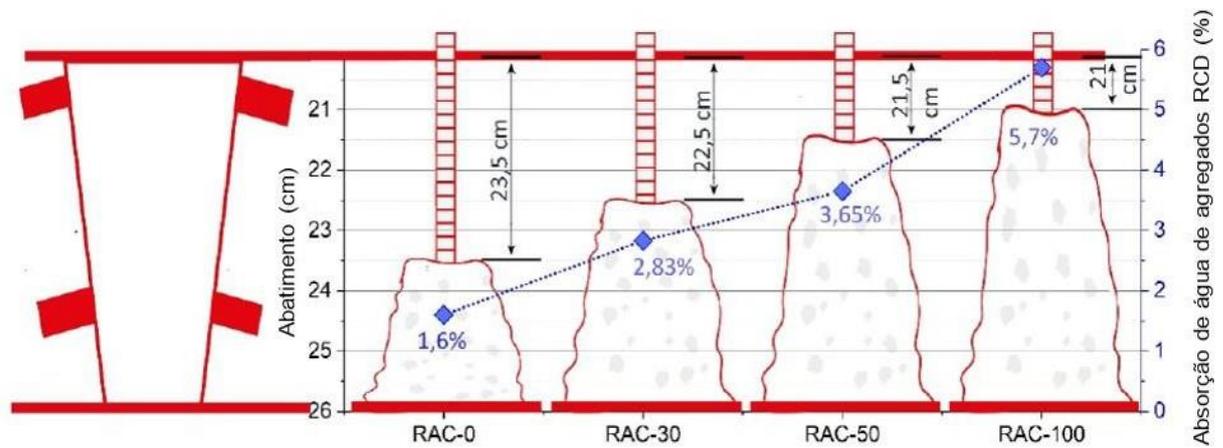
A figura 19 ilustra a perda de abatimento de concretos em função do tempo, considerando diferentes composições de agregados. Observa-se uma tendência clara de redução no abatimento ao longo do tempo para todas as composições (LATTERZA, 1998). No entanto, o concreto com agregados reciclados exibe uma diminuição de abatimento mais acentuada em comparação ao concreto com agregados naturais. Mesmo a composição que combina 50% de agregados reciclados com 50% naturais demonstra uma taxa de redução intermediária,

indicando que a presença de ARs tem um impacto direto e proporcional na retenção de trabalhabilidade do concreto ao longo do tempo. Esta análise reforça a importância de considerar o tipo e a proporção de agregados na formulação do concreto, especialmente quando se busca otimizar a trabalhabilidade e o desempenho do material no estado fresco (FROTTE et al., 2017).



A trabalhabilidade do concreto é um parâmetro crucial que muitos estudos já apontaram como afetado pela utilização de agregados reciclados igual aponta figura 19 e 20. De acordo com GERIN; SALES; NARDIN (2019) e LEITE (2001), a perda de plasticidade em concretos frescos pode ser minimizada através da compensação da água, que é prontamente absorvida devido ao alto índice de absorção e porosidade do agregado reciclado. Esta compensação pode ser feita adicionando-se água diretamente na mistura ou pré-saturando os agregados reciclados.

Figura 20 - Relação índice de absorção de água e variação de trabalhabilidade em função da percentagem de RCC substituído em concretos



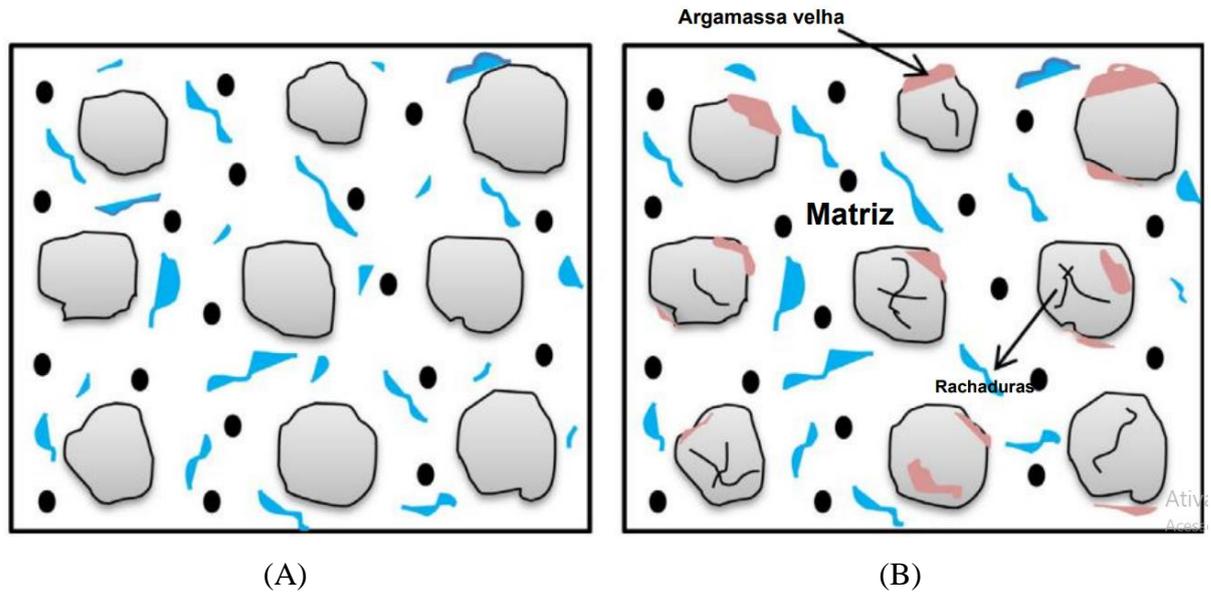
Fonte: Adaptada de (GERIN; SALES; NARDIN, 2019).

### 3.7.3 Resistências Mecânicas em Concretos com Agregados Reciclados

A análise das propriedades do concreto em seu estado endurecido quando consolidado e composto por agregados reciclados destaca-se diversas características mecânicas. Entre elas, ressalta-se a resistência à compressão, à tração, à flexão, bem como o módulo de elasticidade, a fluência e a resistência de união. Estas características são intrinsecamente moldadas por fatores como: a relação água/cimento ( $a/c$ ) da composição, as especificidades técnicas de engenharia, as propriedades físicas intrínsecas ao agregado reciclado (AR) utilizado e a microestrutura do concreto (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002).

Diversos estudos corroboram a visão de que os ARs podem apresentar resistências mecânicas potencialmente inferiores. Razões para isso se centram na aderência deficitária entre a antiga argamassa e o AR, na presença de trincas e fissuras no AR, efeitos colaterais do processo de britagem, e na circunstância de haver uma argamassa porosa, de resistência questionável, circundando o AR (AJDUKIEWICZ; KLISZCZEWICZ, 2002; MCNEIL; KANG, 2013). Como pode ser evidenciado na ilustração (Figura 21) proposta por Monalisa Behera et al. (2014).

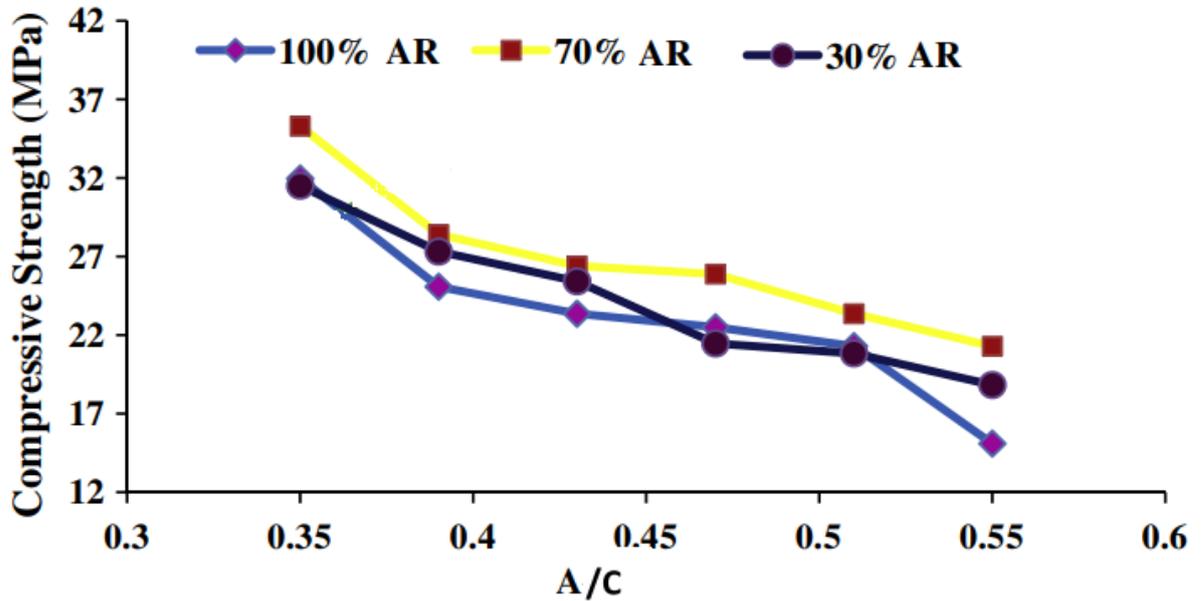
Figura 21 - Diferença entre matrizes de (A) concreto agregado natural e (B) Concreto Agregado Reciclado(CAR)



Fonte: Retirada de Behera et al. (2014)

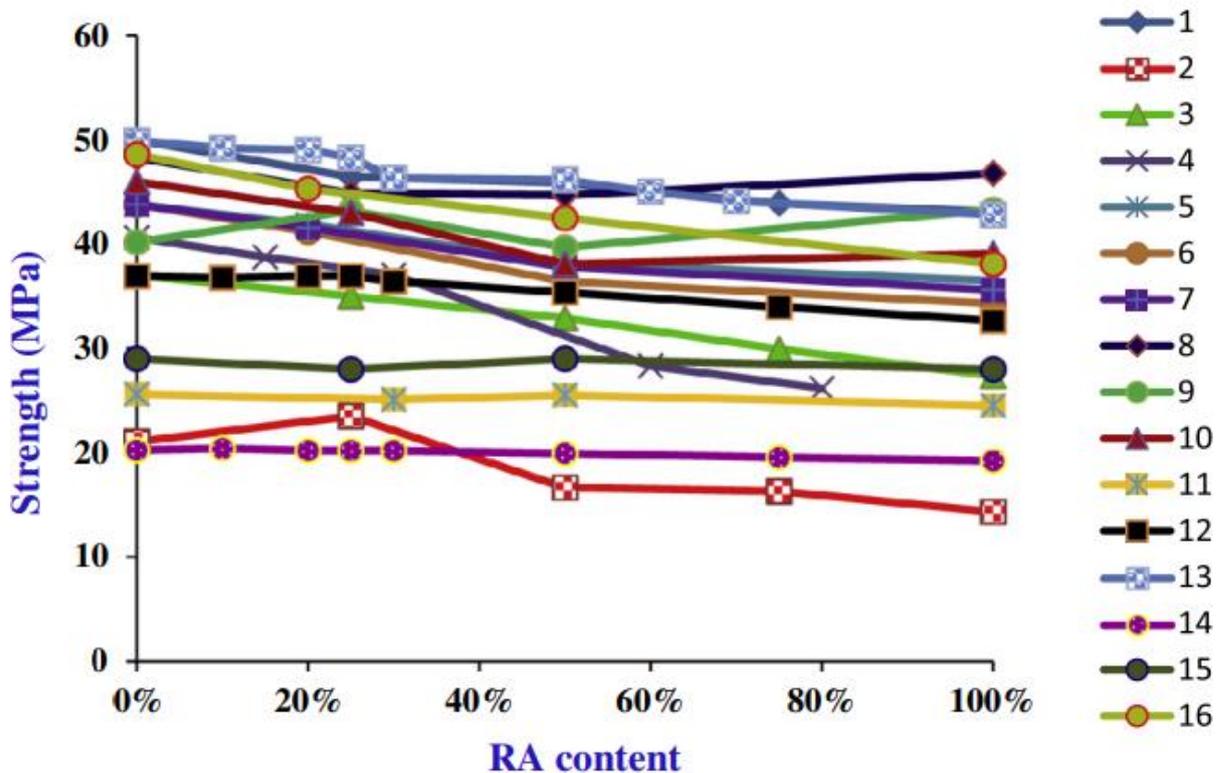
Com todas as dificuldades descritas, torna-se necessário uma criteriosa avaliação das características do AR antes de sua adoção em dosagens concretos e argamassas. É relevante também ponderar que o comportamento mecânico do CAR é influenciado pelo percentual AR, condição de umidade e pela heterogeneidade que é caracterizada pelo RCC (Figura 22). Esta heterogeneidade é resultado da composição variada do RCC, que integra elementos cimentícios, cerâmicos, rochas e impurezas (FROTTE et al., 2017; GERIN, SALES; DE NARDIN, 2019). Adicionado a isso ao avaliar concretos com substituições progressivas de agregados naturais por reciclados, observa-se uma tendência de diminuição das resistências (Figura 23). A Tabela 4 a seguir mostra um resumo em relação às curvas apresentadas no gráfico com as respectivas referências.

Figura 22 - Variação na resistência à compressão aos 28 dias de CAR com diferentes fator a/c



Fonte: Retirada de Behera et al. (2014)

Figura 23 - Variação na resistência à compressão aos 28 dias de concretos com substituição de agregado natural por AR progressivamente



Fonte: Retirada de Behera et al. (2014)

Tabela 4 - Curvas apresentadas no gráfico com as respectivas referências

<b>N° da Curva</b>	<b>Autor(es) e Ano</b>	<b>Título do Trabalho</b>
<b>1</b>	Rao et al. 2011	Influência do agregado graúdo reciclado de campo nas propriedades do concreto
<b>2, 3</b>	Elhakam et al. 2012	Influência da autocura, método de mistura e adição de sílica ativa nas propriedades mecânicas do concreto com agregados reciclados
<b>4</b>	Kwan et al. 2012	Influência da quantidade de agregado graúdo reciclado nas propriedades de projeto e durabilidade do concreto
<b>5, 6, 7</b>	Kou & Poon 2008	Propriedades mecânicas de concreto de 5 anos preparado com agregados reciclados obtidos de três fontes diferentes
<b>8, 9, 10</b>	Poon et al.	Influência dos estados de umidade de agregados naturais e reciclados no abatimento e resistência à compressão do concreto
<b>11</b>	Limbachiya et al. 2012	Desempenho de concreto de cimento Portland/sílica ativa produzido com agregado de concreto reciclado
<b>12, 13, 14</b>	Limbachiya et al. 2004	Desempenho do concreto agregado reciclado
<b>15</b>	Etxeberria et al. 2007	Influência da quantidade de agregados graúdos reciclados e do processo de produção nas propriedades do concreto agregado reciclado
<b>16</b>	Kou & Poon 2012	Melhorar as propriedades de durabilidade do concreto preparado com agregado graúdo reciclado

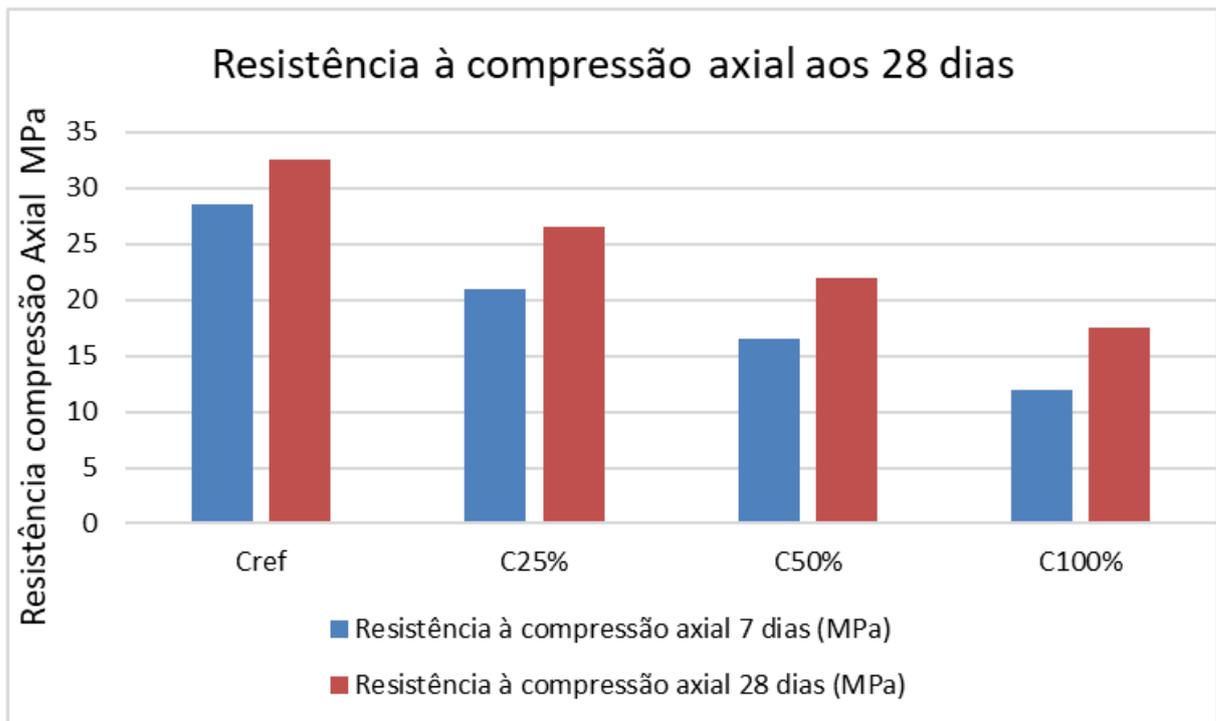
Fonte: Retirada de Behera et al. (2014)

**Nota:** A tabela apresentada organiza e correlaciona as curvas apresentadas no gráfico com as respectivas referências, autores e títulos dos trabalhos apresentado por Behera et al. (2014)

Além da resistência a compressão, existem outros parâmetros mecânicos já mencionados, tais como: absorção e resistência à tração e à deformabilidade, podem ser impactados pela presença de Ars de RCC. Esses aspectos são particularmente relevantes quando consideramos a aplicação em guias de meio fio, que são ementos pre moldados que estão expostos a intempres.

Em seus estudos Frotte et al. (2017) realizou ensaios de resistências à compressão e à tração diametral em concretos com substituições parciais de 25% (C25%) e 50% (C50%) 100% (C100%) de agregados miúdos naturais pelos reciclados que são arestado na figura 24 e 25. Nos Ensaio de resistência à compressão e à tração por compressão diametral correspondem a moldagem e cura de corpos de prova cilíndricos segundo a ABNT NBR 5738:2015 e para a determinação da resistência à compressão tem-se as recomendações da ABNT NBR 5739:2018.

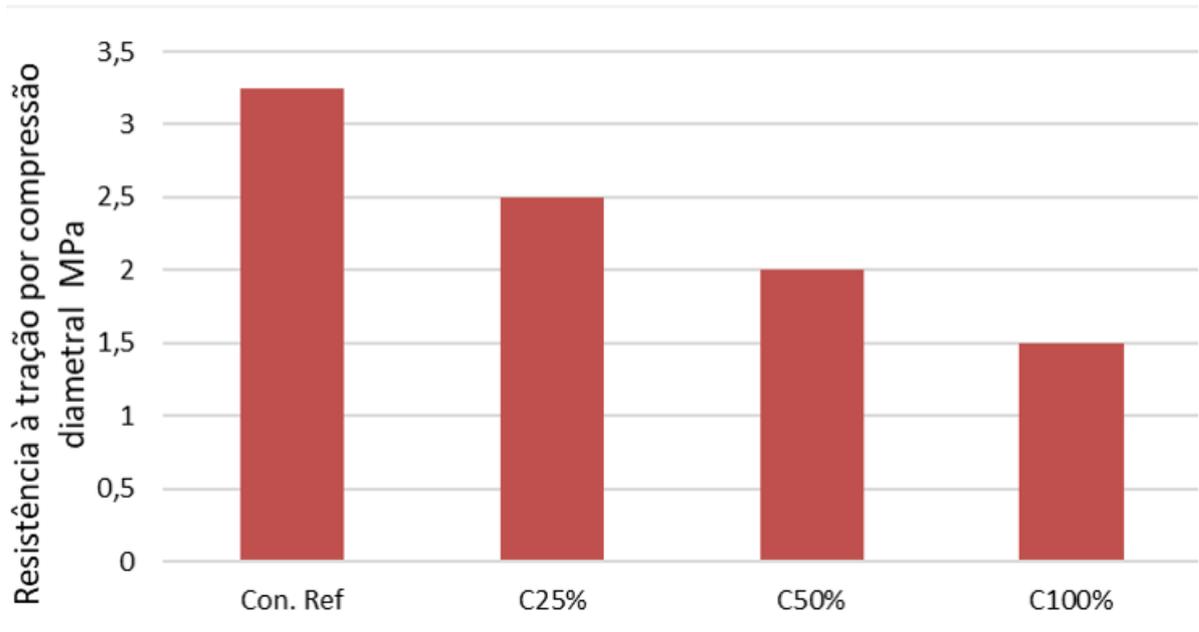
Figura 24 - Resultados de resistências mecânicas a compressão axial concretos convencionais e CAR



Fonte: Fretirada de Rotte et al. (2017)

Para as resistências à compressão axial (Figura 24), observa-se que as substituições parciais resultaram em valores inferiores em comparação ao concreto de referência, tanto aos 7 dias quanto aos 28 dias. Essa queda de desempenho pode ser atribuída à composição heterogênea do agregado reciclado, que inclui fissuras provenientes do processamento dos agregados reciclados e a presença de argamassas antigas aderidas ao AR, o que prejudica a Zona de Transição Interfacial. Notavelmente, o concreto com uma substituição de 25% de AR demonstrou uma resistência à compressão superior em relação aos concretos com 50% e 100% de AR. Esse resultado evidencia a tendência de que a resistência diminui à medida que aumenta a proporção de AR (BEHERA et al. 2014). A mesma tendência se manifesta no comportamento da resistência à tração por compressão diametral (Figura 25).

Figura 25 - Resultados de resistências tração por compressão diametrais concretos dosados com agregados naturais e CAR



Fonte: Fretirada de Rotte et al. (2017)

#### 4 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Este estudo é uma pesquisa experimental e quantitativa, a qual buscou avaliar o Agregado Reciclado de RCC da cidade de Uberaba, localizada em Minas Gerais. Foi usada a fabricação de concretos não estruturais, com o intuito de identificar possíveis usos em novos produtos pré-moldado (guia de meio fio), de acordo com a NBR 15116:2021 agregados reciclados, para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaio.

Para a pesquisa, foi escolhida a pré-molhagem, adicionando água equivalente a 80% do valor total da absorção do agregado reciclado, conforme preconizado pela NBR 15116:2021. Essa abordagem está alinhada com as recomendações da literatura, que sugerem uma variação de 50% (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; EVANGELISTA; BRITO, 2010) a 80% (ETXEBERRIA et al., 2007) para a pré-molhagem. No entanto, é importante ter em mente que um excesso de água pode comprometer as propriedades mecânicas dos concretos reciclados, como alertado por Ângulo e Figueiredo (2011). Nesse contexto, com o objetivo de explorar alternativas e verificar a melhor forma de lidar com a alta absorção dos agregados reciclados, foi conduzido um estudo adicional. Para o estudo adicional, foi utilizado o concreto com 100% de RCC, sem pré-molhagem, e foi adicionada água proporcional à massa que representaria o índice de absorção dos agregados graúdo e miúdo. A intenção era avaliar se poderia obter ganhos significativos em resistência.

Antes dos ensaios laboratoriais, amostras de areia natural e brita convencional foram usadas como parâmetros comparativos, respectivamente, areia de leito de rio e brita de rocha basálticas encontradas no mercado local. Os agregados empregados nos ensaios não foram lavados para preservar suas características originais, principalmente para areia e brita recicladas que possuem maiores quantidades de impurezas.

Formulações e tabelas auxiliares foram usadas para dosar concretos convencionais e concretos com substituição parcial/total por agregados reciclados, de acordo com o método da Associação Brasileira de Cimento Portland ABCP, levando em consideração os resultados obtidos nas caracterizações físicas dos agregados.

Como resumo geral, primeiro foi realizado ensaios de caracterização dos agregados para obter informações essenciais sobre suas propriedades. Após isso, foi definido a dosagem do concreto com base nos requisitos de resistência e trabalhabilidade, considerando ensaios.

Finalmente, foi realizado o ajuste a dosagem do concreto de acordo com as necessidades específicas para a fabricação das guias de meio-fio e corpos de prova, assegurando que atendam aos critérios de qualidade estabelecidos. Adiante, os processos e protocolo seguido em cada parte do método será descrito.

Para a realização desse projeto, foram estabelecidas parcerias com a usina Eco ambiental, localizada na cidade de Uberaba-MG, no endereço: Rua João Urbano de Carvalho, 227 Distrito Industrial II – CEP: 38064-740 e com o laboratório de Materiais da Universidade Federal do Triângulo Mineiro (UFTM), localizado na Unidade II, Campus ICTE.

## 4.1 ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

### 4.1.1 Considerações iniciais

Conforme estabelecido pela NBR 15116:2021, os agregados reciclados são classificados em três subcategorias: Agregado Reciclado Cimentício (ARCI), Agregado Reciclado de Concreto (ARCO) e Agregado Reciclado Misto (ARM). O ARCI é composto, principalmente, por diversos materiais cimentícios, como concretos, argamassas e blocos pré-moldados, podendo conter pequenas quantidades de cerâmica vermelha. O ARCO é constituído principalmente por resíduos de concreto, enquanto o ARM tem como base a mistura de materiais cimentícios e cerâmica vermelha.

No presente estudo, foram utilizados agregados da subcategoria ARM, nas granulometrias miúda (areia RCC) e graúda (brita 1 RCC). A coleta desses agregados seguiu as orientações da NBR 15116:2021, mais especificamente no item 4.3, que define os parâmetros para extrair material da pilha de modo a obter amostras representativas do agregado reciclado de RCC em quantidades adequadas para os ensaios de caracterização, dosagem do concreto e fabricação do pré-moldado protótipo de guia de meio-fio. Já os agregados naturais e convencionais foram utilizados nos ensaios de caracterização, dosagem do concreto e fabricação do pré-moldado protótipo de guia de meio-fio foram fornecidos pelo Laboratório de Materiais da instituição. Dessa forma, seguindo as diretrizes da NBR 15116:2021 e utilizando os diferentes tipos de agregados reciclados, foi possível realizar as análises necessárias para a caracterização e dosagem do concreto, assim como a produção do pré-moldado protótipo de guia de meio-fio.

#### 4.1.2 Análise tátil-visual do agregado graúdo reciclado

De acordo com a NBR 15116:2021, a composição dos agregados reciclados graúdos foi determinada por meio de uma análise visual. Inicialmente, foi separada uma amostra de 5 kg de brita, que passou por um processo de lavagem e secagem em estufa até alcançar uma massa constante. Em seguida, os fragmentos presentes na amostra foram separados manualmente (Figura 26).

Figura 26 - Classificação tátil-visual dos grupos Agregado Graúdo brita 1. A: grupo 1; B: grupo 2; C: grupo 3; e D: grupo 4



Fonte: Do autor (2023)

O Grupo 1 (G1) inclui fragmentos que apresentam pasta de cimento endurecida em mais de 50% do seu volume. Já o Grupo 2 (G2) é composto por fragmentos constituídos principalmente por rocha em mais de 50% do seu volume. O Grupo 3 (G3) é formado por fragmentos de cerâmica vermelha, com superfície não esmaltada, ocupando mais de 50% do seu volume.

Por fim, o Grupo 4 (G4) é composto por fragmentos indesejáveis, tanto de natureza orgânica (como madeiras, plásticos, betumes e materiais carbonizados) quanto de natureza inorgânica (como metais, vidros, cerâmica branca esmaltada e gesso). Essa análise visual dos fragmentos presentes na amostra de brita permite identificar e classificar cada fragmento de acordo com os critérios estabelecidos.

#### 4.1.3 Composição granulométrica

Para realizar o ensaio foi utilizada a ABNT NBR 17054:2022 Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio, visando obter a distribuição granulométrica dos agregados reciclados e naturais foi iniciado o processo de peneiramento manual e posterior pesagem das massas retidas em cada peneira de serie normal (Figura 27), utilizando os critérios das normas foi definido a dimensão máxima característica (DMC), módulo de finura (MF) para ambos os agregados reciclados e naturais.

Figura 27 - Exemplo dos processos de peneiramentos manual dos resíduos da construção civil utilizado no presente trabalho. A: massa retida em peneiras brita 1; B: Massa retida em peneiras areia e; C: Peneiramento manual areia



Fonte: Do autor (2023)

#### 4.1.4 Determinação de material pulverulento

Para a determinação de percentual de finos nos agregados foram usados procedimentos da norma ABNT NBR 16973- Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de  $75 \mu\text{m}$  por lavagem. Para realização do ensaio foi considerado 300g para areia RCC e natural e 2500g de brita 01 RCC e convencional, conforme orientação do item 4.3 da referida norma. Após a secagem em estufa foi iniciado o processo de lavagem dos agregados até que verificasse que água de lavagem saísse limpa (Figura 28).

Após lavagem, os agregados foram secos em estufa até a constância de massa e faz a diferença entre a massa inicial e a massa final, usando-se a Equação 1.

$$M = \frac{M_i - M_f}{M_i} \times 100 \quad (1)$$

onde, M: Percentual de material pulverulento (%)

$M_i$ : Massa inicial da amostra seca (g).

$M_f$ : Massa da amostra seca após as lavagens (g).

Figura 28 - Processo de lavagem areia (A) e pesagem de areia após secagem (B)



Fonte: Do autor (2023)

#### 4.1.5 Determinação da massa específica de agregado graúdo

Para determinar a massa específica/densidade e o índice de absorção de água das britas convencional e recicladas, foi seguida a norma ABNT NBR 16917:2021- Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água. O procedimento se iniciou a partir da retirada de duas amostras de 3kg, de acordo com o item 6.2 da referida norma.

Posteriormente, a saturação da amostra em 24h nas próximas etapas foi feita a determinação da massa Saturada Superfície Seca (SSS) e determinação da massa imersa por pesagem em balança hidrostática. Depois, as amostras foram secas em estufa na temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$  até constância de massa (Figura 29).

Por fim, utilizando a Equação 2, foi determinada a massa específica das britas:

$$r_s = \frac{m_A}{m_B - m_C} \quad (2)$$

onde,  $r_s$  é a densidade do agregado na condição seca, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$m_A$  é a massa da amostra seca em estufa a  $(105 \pm 5)^{\circ}\text{C}$ , expressa em gramas (g);

$m_B$  é a massa da amostra na condição SSS, expressa em gramas (g);

$m_C$  é a massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca, expressa em gramas (g)

Figura 29 - Preparação do material para realização do ensaio de massa específica Agregado graúdo brita 1 RCC.  
 A: quartejamento da amostra; B: material submerso para saturação; C: condição superfície-seca-saturada; D: material seco



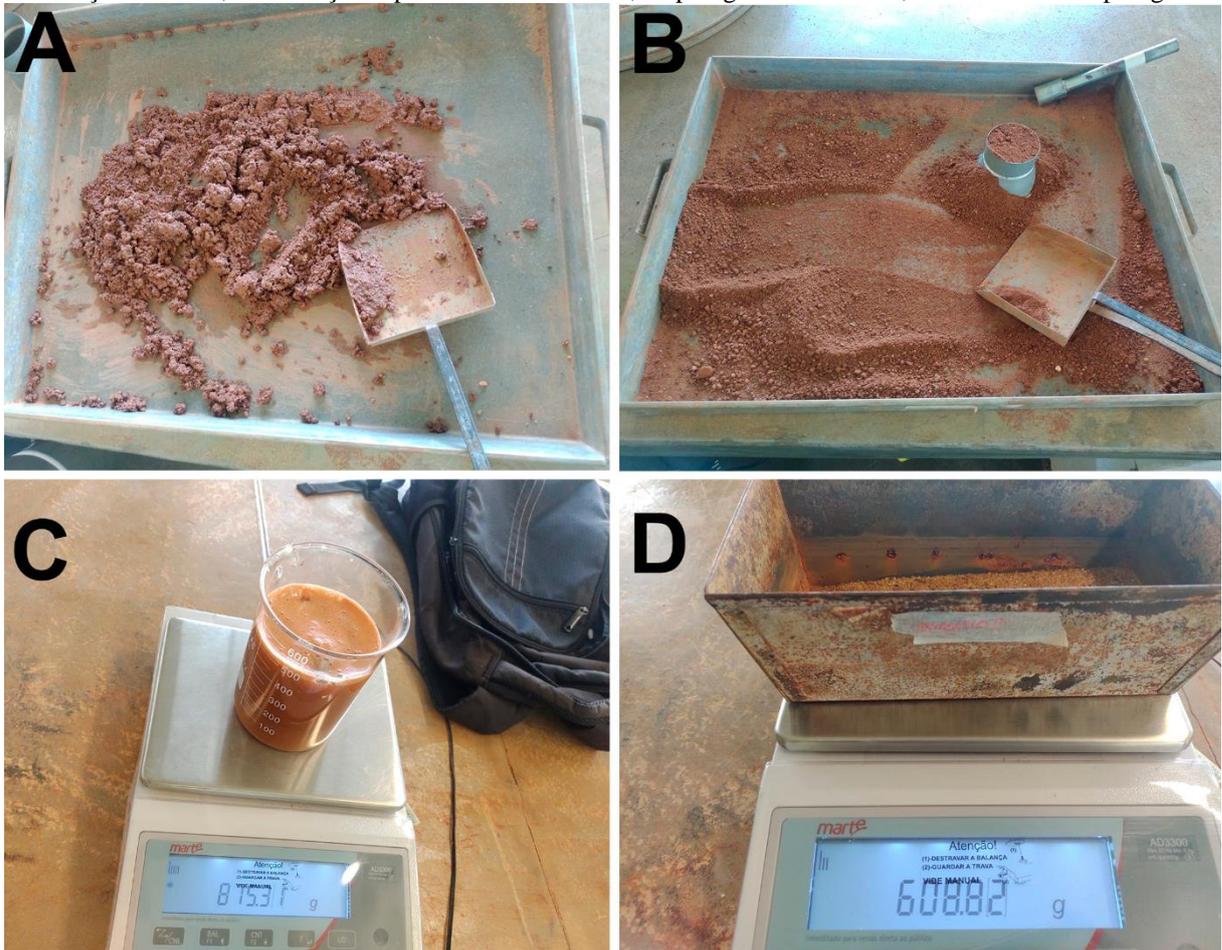
Fonte: Do autor (2023)

#### 4.1.6 Determinação da massa específica de agregado miúdo

A determinação da massa específica dos agregados miúdos naturais e reciclados foi realizada seguindo os procedimentos descritos na ABNT NBR 16916:2021 - Agregado Miúdo - Determinação da Densidade e da Absorção de Água (Figura 30).

Primeiramente, foram retiradas amostras de 2,5 kg para a realização dos ensaios em duplicata. Em seguida, foi aferida a condição SSS, para isso a amostra foi colocada no molde tronco-cônico sem comprimi-la e 25 golpes de compactação foram aplicados suavemente em sua superfície (Figura 30). Em seguida, a amostra foi colocada em um recipiente de massa e volume conhecido e completado com água até a marca de 500ml, e feita a pesagem do conjunto (Figura 30). Por fim, as amostras foram secas em estufa, na temperatura de  $105^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ , até a constância de massa, para a obtenção da massa seca.

Figura 30 - Preparação do material para realização do ensaio de massa específica Agregado miúdo areia RCC. A: condição saturada; B: condição superfície-seca-saturada; C: pesagem hidrostática; material seco em pesagem



Fonte: Do autor (2023)

Com base nos parâmetros adquiridos, foram aplicadas as Equações 3 e 4 para determinar a massa específica das areias.

$$r_s = \frac{m_A}{V - V_a} \quad (3)$$

onde:

$r_s$  é a densidade do agregado na condição seca, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$V$  é o volume do frasco calibrado, em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ );

$V_a$  é o volume de água adicionada ao frasco, de acordo com seguinte equação, expresso em centímetros cúbicos ( $\text{cm}^3$ ):

$$V_a = \frac{m_D - m_C}{\rho_a} \quad (4)$$

onde,

$m_C$  = é a massa do conjunto formado pela massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, expressa em gramas (g);

$m_D$  = é a massa da amostra na condição saturada superfície seca, mais a massa do frasco, mais a massa da água, expressa em gramas (g); é a massa da amostra submersa em água na condição saturada superfície seca, expressa em gramas (g)

$\rho_a$  = é a densidade da água na temperatura do banho, expressa em gramas por centímetro cúbico ( $\text{g/cm}^3$ ).

#### 4.1.7 Determinação da massa unitária e volume de vazios

Os ensaios de massa unitária dos agregados graúdos foram realizados de acordo com a norma ABNT NBR 16972:2021- Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios. Para realizar o ensaio, foi usado um recipiente cilíndrico padronizado de 10 dm<sup>3</sup>, preenchido com o material agregado em três camadas, cada uma adensada com 25 golpes da haste de adensamento, distribuídos uniformemente (veja a Figura 31).

Ao utilizar a equação 5, foi possível obter os valores de massa unitária.

$$\rho_{ap} = \frac{m_{ar} - m_r}{V} \quad (5)$$

Onde

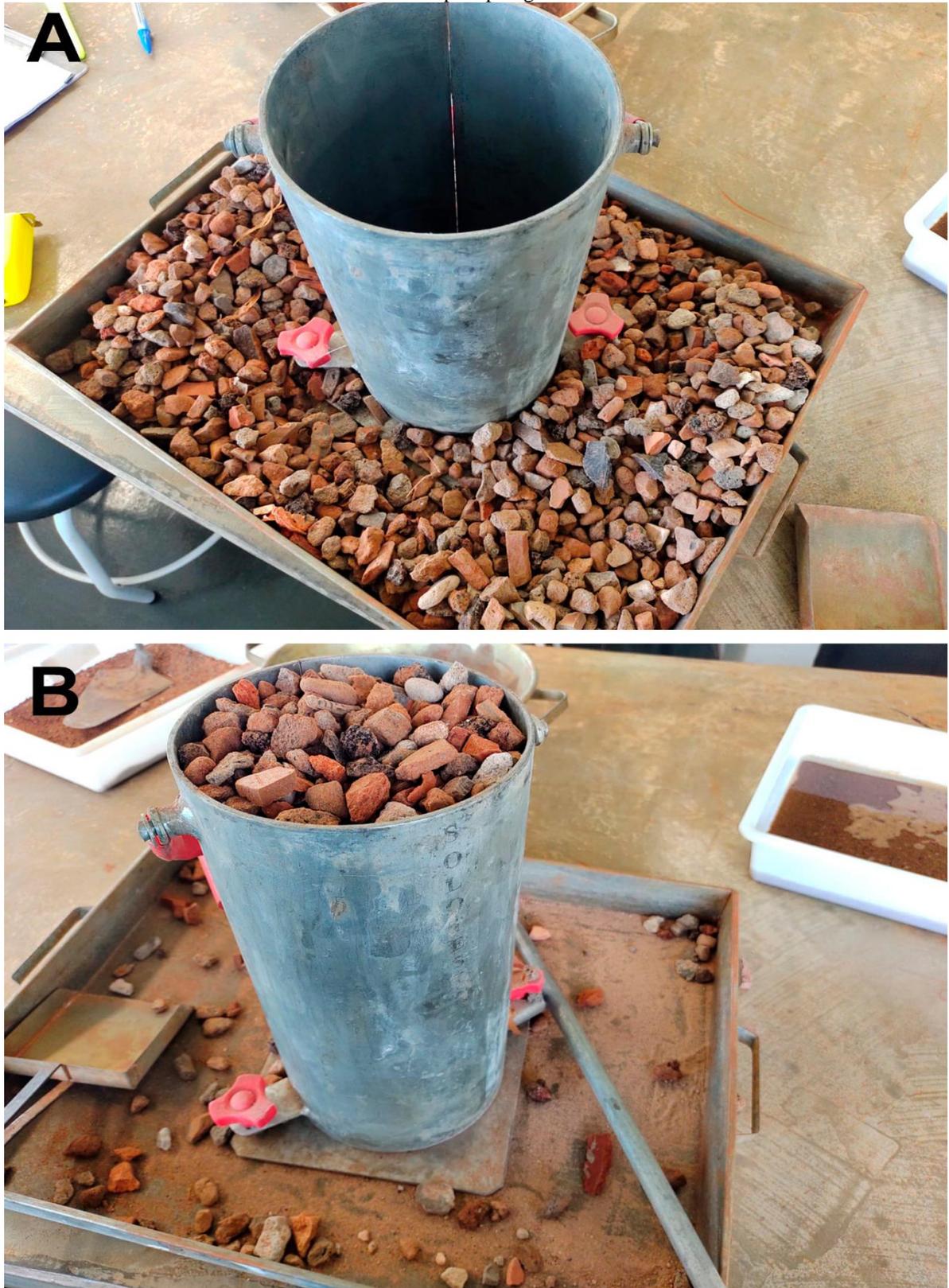
$\rho_{ap}$  é a massa unitária do agregado, expressa em quilogramas por metro cúbico ( $\text{kg/m}^3$ );

$m_{ar}$  é a massa do recipiente com o agregado, expressa em quilogramas (kg);

$m_r$  é a massa do recipiente vazio, expressa em quilogramas (kg);

$V$  é o volume do recipiente, expresso em metros cúbicos ( $\text{m}^3$ );

Figura 31 - Massa unitária de Agregado graúdo brita 1 RCC. A: recipiente vazio, em preparação; B: recipiente cheio para pesagem



Fonte: Do autor (2023)

## 4.2 DEFINIÇÃO DOSAGEM DO CONCRETO, PARA ENSAIOS NOS ESTADOS FRESCOS E ENDURECIDO

Para garantir um desempenho adequado do concreto em suas diversas aplicações, é fundamental uma dosagem correta. Essa dosagem envolve a combinação precisa de água, cimento, agregados e aditivos, resultando em concretos que atendam aos requisitos de trabalhabilidade e consistência no estado fresco, assim como durabilidade, resistência à compressão e tração no estado endurecido, e tudo isso com um custo reduzido (MEHTA; MONTEIRO, 2014). No caso específico da determinação da proporção adequada para a construção de guias de meio-fio, foi adotado o método de dosagem ACI/ABCP, seguindo as orientações descritas no Boletim Técnico 82 da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP) e NORMA DNIT 020/2006 – ES (Drenagem - Meios-Fios E Guias - Especificação De Serviço).

### 4.2.1 Definição do traço concreto método ABCP/ACI

Para a utilização do método ACI/ABCP, a caracterização dos agregados é fundamental para estabelecer a trabalhabilidade, resistência e quantidade de elementos necessários à fabricação do concreto, conforme detalhado na Tabela 5.

Tabela 5 – Proporções pasta para dosagens em diferentes resistências do concreto

<b>Materiais</b>	<b>Baixa resistência (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia moderada (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Alta resistência (kN/m<sup>3</sup>)</b>
Cimento	255	356	510
Água	178	178	178
Ag. Miúdo	801	848	890
Ag. Graúdo	1169	1032	872
<b><u>Proporção da pasta de cimento</u></b>			
% em massa	18	22,10	28,1
% em volume	26	29,3	34,30
Água/cimento	0,70	0,50	0,35
Resistencia (MPa)	18	30	60

Fonte: Adaptada de Mehta e Monteiro (2014)

Conforme o Boletim Técnico 82 da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), os parâmetros de dosagem para os concretos utilizados na confecção de meio-fio devem seguir um consumo mínimo de 300 kg/m<sup>3</sup> de cimento por metro cúbico de concreto. Essa medida é essencial para assegurar a durabilidade adequada das peças, mesmo quando expostas à ação do tempo e ao impacto provocado pelos veículos (i.e., exposição severa). Ademais, para atender a

essa aplicação específica, é requerida uma resistência mínima de 25 MPa (250 kgf/cm<sup>2</sup>) após 28 dias da confecção do produto, quando se comparado a norma DNIT 020/2006 – ES estabelece uma resistência mínima aceitável de 15 Mpa (150 kgf/cm<sup>2</sup>).

#### 4.2.2 Resistência a compressão obtida por dosagem em diferentes idades

A  $f_{cmj}$  : Resistência média do concreto à compressão, prevista para à idade de j dias (MPa) definida pela Equação A:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 * sd \quad (6)$$

Sendo,

$f_{ckj}$ ; Resistência característica do concreto à compressão, aos j dias (MPa); 25 Mpa aos 28 dias.

sd: Desvio padrão da dosagem (MPa);

De acordo com a ABNT NBR 12655:2022, sd é definido para concretos que tem desvio padrão desconhecido, em seu item 5.6.3.3 (Tabela 6). Considerando que a preparação/ dosagem da amostra será realizada em laboratório, com base nos traços em massa, foi adotada a condição da classe A com sd de 4,0 Mpa. Aplicando-se, então, a equação A, temos que  $f_{cm28}$ : 31,56 Mpa.

Tabela 6 - Desvio-padrão a ser adotado em função de condição de preparo do concreto

Condição de preparo do concreto	Desvio-padrão (Mpa)
A	4,0
B	5,5
C	7,0

Fonte: Adaptada de ABNT NBR 12655:2022

#### 4.2.3 Trabalhabilidade do concreto

Para determinar a quantidade adequada de água a ser adicionada ao concreto, utilizou-se a Tabela 7 proposta por Mehta e Monteiro (2014), que estabelece a relação entre a dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo e a consistência/abatimento do concreto.

Considerando que o concreto será adensado com vibrador mecânico tipo agulha, sem a incorporação de ar, e levando em conta que se trata de um elemento pré-moldado, onde uma desmoldagem mais rápida é desejada para melhorar a eficiência do processo, optou-se por um abatimento de 25 a 50 mm para um agregado graúdo com DMC de 19 mm. Com base nessa consideração foi utilizado as informações da referida tabela, estima-se que a quantidade de água necessária será de 187 kg/m<sup>3</sup> por metro cúbico de concreto.

Tabela 7 - Relação de água usada na dosagem do concreto sem incorporação de ar em função do DMC e abatimento

<b>DMC do agregado graúdo (mm)</b>					
<b>Abatimento (mm)</b>	<b>9,5</b>	<b>12,5</b>	<b>19</b>	<b>25</b>	<b>38</b>
<i>Concreto sem ar incorporado</i>					
25 a 50	208 kg/m <sup>3</sup>	199 kg/m <sup>3</sup>	187 kg/m <sup>3</sup>	178 kg/m <sup>3</sup>	163 kg/m <sup>3</sup>
75 a 100	228 kg/m <sup>3</sup>	216 kg/m <sup>3</sup>	201 kg/m <sup>3</sup>	193 kg/m <sup>3</sup>	178 kg/m <sup>3</sup>
150 a 175	243 kg/m <sup>3</sup>	228 kg/m <sup>3</sup>	213 kg/m <sup>3</sup>	201 kg/m <sup>3</sup>	187 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: Adaptada de ABCP (*apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014)

#### 4.2.4 Fator água/cimento (a/c)

O cimento utilizado para o concreto das guias de meio-fio, considerando sua exposição ao solo, especialmente em ambientes urbanos, deve atender aos requisitos da ABNT NBR 12655:2022, que classifica a agressividade como classe II. Essa classificação implica em um fator a/c (água/cimento) menor que 0,6 e uma classe mínima do cimento igual ou superior a C25. A exposição a ambientes agressivos, como os solos urbanos, pode resultar em diversos mecanismos de deterioração, incluindo a ação de sulfatos. Dessa forma, o item 5.2.2.3 dessa norma recomenda o uso de cimento resistente a sulfatos em concretos expostos a solos ou soluções contendo sulfatos Tabela 8. Dito isso, para garantir a conformidade com essas especificações, foi selecionado o cimento CPIV-32RS para o traço do concreto das guias de meio-fio.

Tabela 8 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos ou solo\_ABNT NBR 12655:2022

<b>Condições de exposição em função da agressividade</b>	<b>Sulfato solúvel em água (SO<sub>4</sub>) presente no solo</b> % em massa	<b>Sulfato solúvel (SO<sub>4</sub>) presente na água</b> ppm	<b>Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal<sup>a</sup></b>	<b>Mínimo <i>f<sub>ck</sub></i> (para concreto com agregado normal ou leve)</b> MPa
Fraca	0,00 a 0,10	Ver Tabela 6	Conforme Tabela 2	Conforme Tabela 2
Moderada <sup>b</sup>	0,10 a 0,20	150 a 1 500	0,50	35
Severa <sup>c</sup>	Acima de 0,20	Acima de 1 500	0,45	40

<sup>a</sup> Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

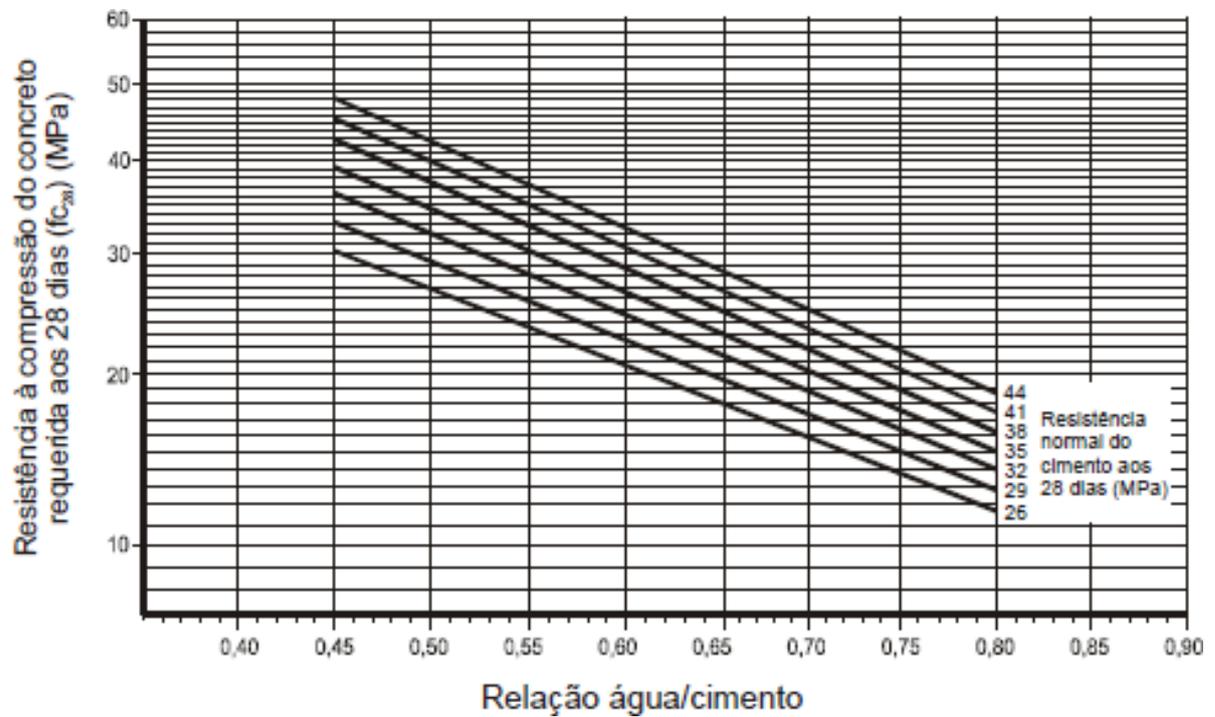
<sup>b</sup> A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO<sub>4</sub> seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.

<sup>c</sup> Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: ABNT NBR 12655:2022

Esse cimento possui a resistência *f<sub>ckj</sub>* 28 dias adequada para a aplicação e oferece proteção contra os efeitos prejudiciais dos sulfatos presentes em alguns ambientes urbanos. Além disso, o cálculo do fator *a/c*, que é um parâmetro crucial para a trabalhabilidade do concreto, foi realizado utilizando as curvas de Walz (Figura 31). A determinação precisa desse fator permite ajustar a quantidade de água a ser utilizada, considerando a relação com a resistência e a durabilidade do concreto. Por meio de interpolação, obteve-se o valor de  $(a/c)=0,47$

Figura 32 - Curvas Walz determinação fator (a/c) em função das resistências do concreto e cimento aos 28 dias de idade



Fonte: Adaptada de Rodrigues (1998, apud MEHTA; MONTEIRO, 2014).

#### 4.2.5 Consumo de cimento por metro cúbico de concreto

Considerando o consumo de água (Ca) de 187 kg/m<sup>3</sup> (conforme a referência, veja Tabela 7), e o fator a/c (água/cimento) de 0,47 (conforme a referência, veja Tabela 8), pode-se utilizar a equação 7 para determinar o consumo de cimento (Cc):

$$C_c = C_a / (a/c) \quad (7)$$

Onde,

Cc: Consumo de cimento (Kg/m<sup>3</sup>);

Ca: Consumo de água (Kg/m<sup>3</sup>);

(a/c): Fator água/cimento.

Aplicando a equação 7, obtemos um consumo de 398 kg/m<sup>3</sup> de cimento para o concreto, o que está em conformidade com a especificação do Boletim Técnico 82 da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).

#### 4.2.6 Consumo de agregados graúdo e miúdo por metro cúbico de concreto

Para definir a proporção de brita na dosagem padrão do concreto, foi utilizada a tabela 09 proposta por Rodrigues (1990) a equação 8. Foi considerado inicialmente os agregados naturais/convencionais e, posteriormente, para definir a dosagem com os agregados reciclados, foram propostas correções em relação às proporções de agregados naturais/convencionais, considerando-se a substituição parcial (50%) ou total (100%) dos agregados convencionais no concreto. Isso se justifica devido às diferenças em massa unitária, principalmente no agregado graúdo, para não ocasionar volumes muito grandes de agregado reciclado. A metodologia usada será a de LEITE (2001), expressa pela equação 9. Para calcular a quantidade de agregado graúdo no concreto convencional, temos a equação 8.

$$C_b = V_{cs} * M_g \quad (8)$$

Onde:

$C_b$ : Consumo de agregado graúdo em kg.

$V_{cs}$ : Volume compactado seco do agregado graúdo seco ( $m^3$ ), apresentado por Rodrigues (1990) (Tabela 9).

$M_g$ : Massa unitária compactada do agregado graúdo (kg)

Tabela 9 - Volume compactado seco (Vcs) de agregado graúdo por m<sup>3</sup> de concreto

Módulo de Finura da Areia (MF)	Dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo (mm)				
	9,5	19	25	32	38
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2,0	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3,0	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665

Fonte: Adaptada de Rodrigues (1990)

Correção das proporções de agregado reciclados pelos convencionais, segundo Leite (2001).

$$M_{RCC} = M_{ac} \frac{\gamma_{RCC}}{\gamma} \quad (9)$$

Onde:

$M_{RCC}$ : Consumo em massa dos agregados reciclados (kg);

$M_{ac}$ : Consumo em massa dos agregados convencionais (kg);

$\gamma_{RCC}$ : Massa específica dos agregados reciclados (g/cm<sup>3</sup>);

$\gamma$ : Massa específica dos agregados convencionais (g/cm<sup>3</sup>).

A quantidade de agregado miúdo para a dosagem é obtida na equação 10

$$C_m = [1 - (\frac{M_c}{\gamma_c} + \frac{M_b}{\gamma_b} + \frac{M_a}{\gamma_a})] * \gamma_m \quad (10)$$

Sendo:

$C_m$ : Quantidade de agregado miúdo  $\text{Kg/m}^3$  de concreto;

$M_c$ : Massa cimento (Kg);

$M_b$ : Massa cimento (Kg);

$M_a$ : Massa de água (Kg);

$\gamma_c$ : Massa específica do cimento;

$\gamma_b$ : Massa específica da brita;

$\gamma_a$ : Massa específica da água;

$\gamma_m$ : Massa específica da areia.

Após aplicação das equações 10, obtivemos os seguintes consumos de areias e britas e traços dos concretos (Tabela 10):

Tabela 10 - Consumo de areia e brita, traços dos concretos para 1 metro cúbico de concreto referência e CAR corrigidos

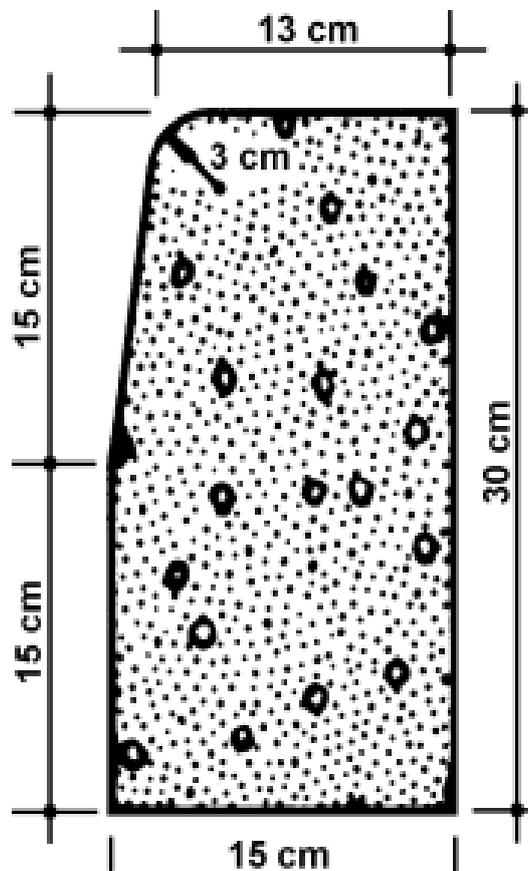
Concretos	Consumo areia ( $\text{kg/m}^3$ )	Consumo brita ( $\text{kg/m}^3$ )	Traço em massa
	Nat./RCC	Conv./RCC	c:a:b//a/c
Referência (agregado naturais)	787,9	1100,5	1:2,0:2,8// 0,47
(Substituição 50% agregado naturais/convencion as por reciclados (corrigidos)	394+364,7	550,25+415,5	1:1,90:2,4 5// 0,47
Substituição 100% agregado nat./conv. por reciclados (corrigido)	729,4	831	1:1,83:2,1 // 0,47

Fonte: Do Autor (2023)

#### 4.3 DOSAGEM DO CONCRETO PARA FABRICAÇÃO DAS GUIAS DE MEIO FIO E CORPOS DE PROVA

De acordo com os traços em massa definidos em epígrafe, foi realizado a dosagem para 75 litros de concreto, volume suficiente para avaliar a consistência e trabalhabilidade do concreto fresco com ensaio de abatimento de tronco de cone (*Slump Test*) e enchimento moldes dos corpos de prova e formas das guias de meio fio de 30 cm de altura, 100 cm de comprimento e 15/13 cm de espessura, de acordo com o Boletim Técnico 82 da ABCP - Tipo I (Figura 33) dos diferentes tipos de concreto. Já no estado endurecido, foram realizados ensaios de resistência a compressão com 3 corpos de provas, rompidos em idades de 3, 14 e após os 28. Dos concretos nas proporções 0%, 50% e 100% de substituição dos agregados naturais/convencionais pelos reciclados. Na Tabela 11 pode-se observar o consumo dos materiais para a dosagem de 75 L de concreto.

Figura 33 - Especificação do perfil tipo1 de guia meio fio sugerido ABCP, usada no presente estudo



Fonte: Retirada de Boletim técnico 82 da ABCP (1997)

Tabela 11 - Consumo dos materiais para a dosagem de 75 L de concreto/confecção da guia e corpos de prova

<b>Traço em massa</b>			
Materiais	Concreto referência 1:2,0:2,8/ 0,47	Concreto 50% RCC 1:1,90:2,45/ 0,47	Concreto 100% RCC1:1,83:2,1/0,47
Cimento	30,00 kg	30,00 kg	30,00 kg
Areia	60,00 kg	30,00 kg	-
Areia RCC	-	27,77 kg	54,54
Brita 01	84,00 kg	42,00 kg	-
Brita 01 RCC	-	31,71	63,43
Água	14,10 kg	14,10 kg	14,10 kg

Fonte: Do autor (2023).

Quanto ao uso de agregados reciclados, conforme evidenciado na Tabela 11, é notável que há uma diferença considerável nas massas dos agregados naturais/convencionais, devido às suas massas específicas distintas. De fato, os agregados reciclados, em geral, possuem massas específicas menores em comparação com os agregados convencionais. Esse fator implica em um consumo maior de agregados quando seguimos o método ABCP, que considera a dosagem para 1 metro cúbico de concreto. Para corrigir esse consumo, aplicamos a abordagem metodológica proposta por Leite (2001) por meio da Equação (9), que faz a compensação do maior volume que agregado reciclado tem considerando mesma massa agregado natural.

#### 4.3.1 Preparo do concreto com agregado reciclado com pré-molhagem

A incorporação de agregados reciclados em concretos representa uma prática crucial para promover a sustentabilidade na construção civil. No entanto, essa inclusão apresenta desafios, especialmente em relação à absorção de água pelos agregados reciclados. A norma ABNT NBR 5116:2022 é de suma importância na regulamentação dessa prática e destaca a necessidade de pré-molhar esses agregados no seu item "5.3 Pré-molhagem e compensação de água", que traz a equação (11), a qual possibilita calcular a quantidade de água necessária à pré-molhagem do agregado reciclado. A pré-molhagem é um procedimento destinado a ajustar propriedades reológicas essenciais, como trabalhabilidade e consistência, e a minimizar a perda de abatimento nos concretos frescos. Essa norma recomenda uma abordagem na qual se adiciona uma quantidade suplementar de água, correspondente a 80% do índice de absorção de

água do agregado reciclado. Embora a norma não estabeleça um tempo específico de pré-molhagem, algumas diretrizes indicam um intervalo de 10 a 15 minutos antes da mistura do concreto (LEITE, 2001).

$$C_{ar} = C_r \times A \times K_1 \quad (11)$$

Onde:

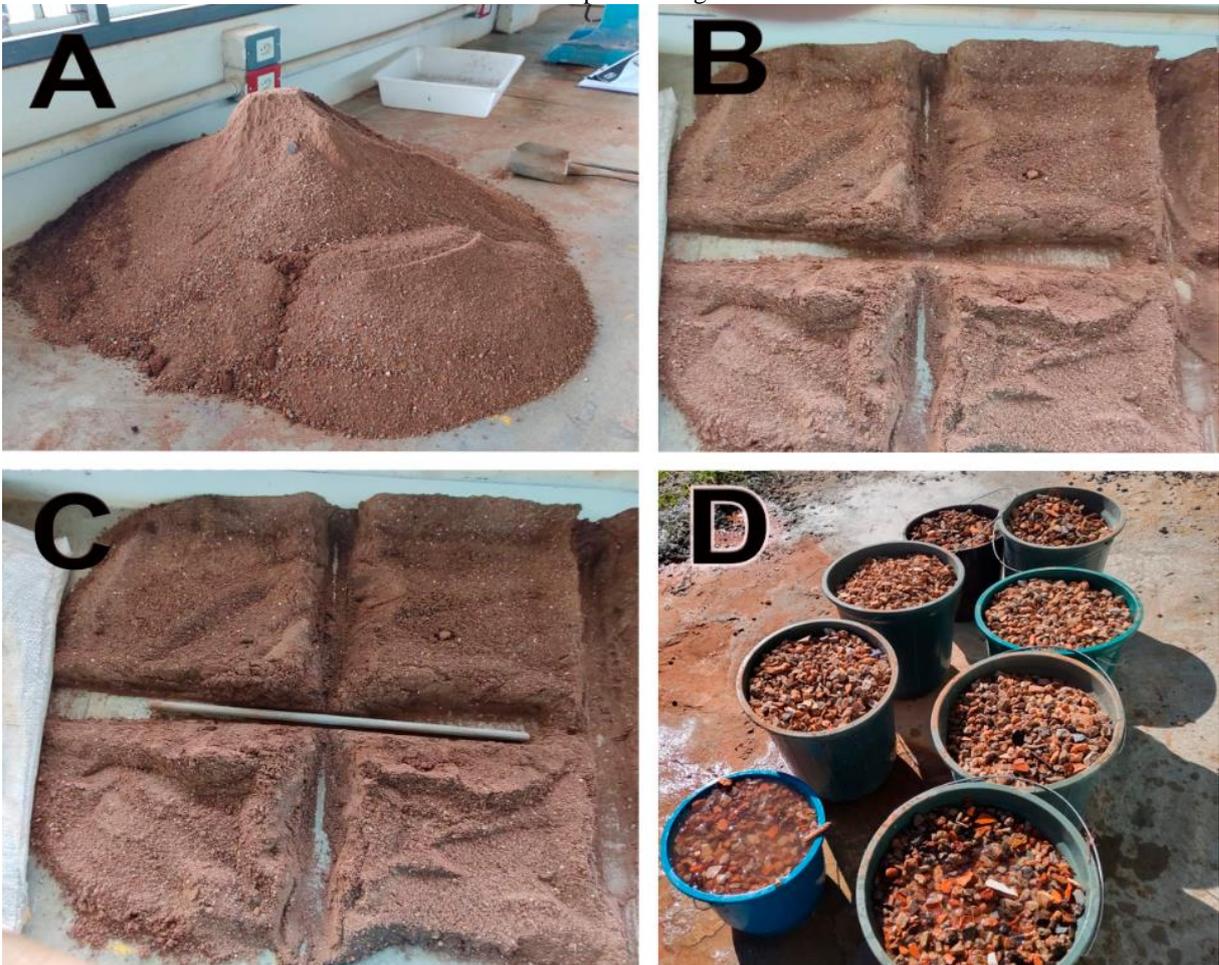
A: Absorção de água do agregado reciclado, expressa em porcentagem de massa (%).

$C_r$ : Quantidade de agregado reciclado, expressa em quilogramas por metro cúbico de argamassa ou de concreto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$C_{ar}$ : Quantidade de água necessária à pré-molhagem do agregado reciclado, expressa em quilogramas por metro cúbico de argamassa ou de concreto ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ).

$K_1$ : Fração percentual de água absorvida nas primeiras horas pelo agregado reciclado, expressa em relação à sua absorção de água em 24 h.

Figura 34 - Pré-molhagem dos agregados reciclados. A areia reciclada in natura, B espalhamento da areia para facilitar adição de água e C areia com água de pré-molhagem 80% índice de absorção em repouso 15 min, D brita com pré-molhagem.



Fonte: Do autor (2023).

A partir de valores de absorção de água de 9,03% da areia e de 5,91% da brita recicladas, a pré-molhagem (Figura 34) foi feita com adição suplementar de água de 4,11 kg na areia e de 4,78kg na brita no concreto 100% RCC e com substituição de 50% a metade dos valores.

Após os 15 minutos os agregados foram usados para mistura de concreto em betoneira que seguiram o seguinte procedimento para todos os concretos:

- 1º Imprimação de betoneira
- 2º: 50% da água de amassamento;
- 3º: 100% do agregado graúdo;
- 4º: 100% do cimento;
- 5º: Misturar por 3 minutos;
- 6º: Pausar betoneira por 30 segundos;
- 7º: 100% do agregado miúdo;
- 8º: 50% da água de amassamento;
- Misturar por 3 minutos e observar a homogeneidade final do concreto.

#### 4.3.2 Propriedades reológicas do concreto e enchimento das formas das guias de meio fio

Após a mistura do concreto, realizou-se a avaliação de sua consistência por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme estipulado pela ABNT NBR 16889:2020. Esse procedimento é necessário para determinar a consistência e a trabalhabilidade do concreto fresco, influenciando diretamente seu desempenho em aplicações posteriores. O ensaio do abatimento do tronco de cone envolveu o preenchimento do molde tronco-cônico em três etapas distintas, com 25 golpes de compactação aplicados em cada camada. Em seguida, a altura do abatimento foi medida após inverter o molde tronco-cônico e posicionar a haste de adensamento na horizontal, conforme ilustrado na Figura 35. Essa avaliação foi realizada duas vezes para cada um dos traços de concreto testados.

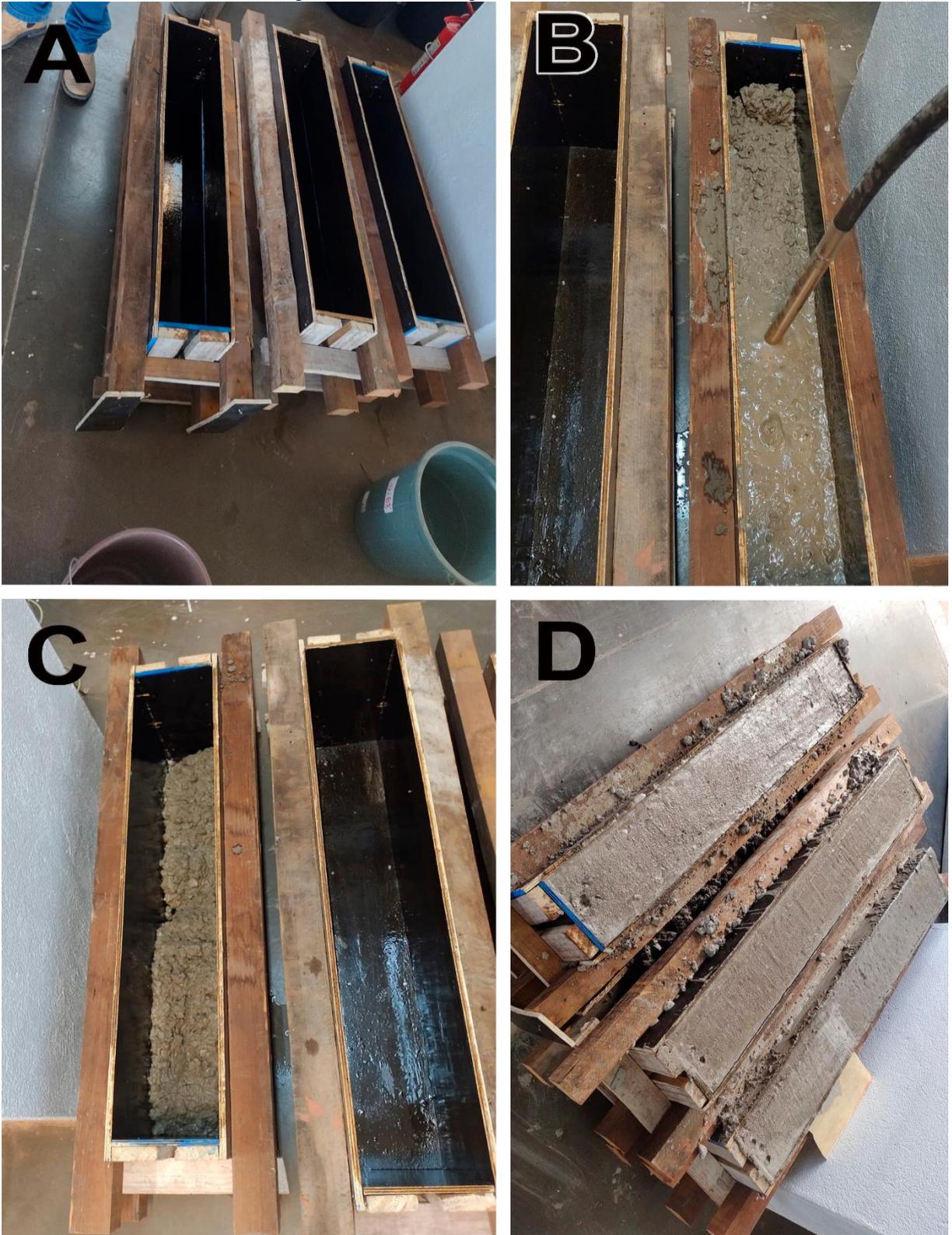
Figura 35 - Exemplo do ensaio de abatimento do tronco de cone realizado no presente estudo. Exemplos do enchimento (A) e abatimento do tronco do cone desmoldado (B)



Fonte: Do autor (2023).

Além disso, para o enchimento das formas das guias de meio-fio com concreto (Figura 36 A), foram adotadas práticas específicas para garantir um resultado de alta qualidade. Utilizou-se um vibrador de imersão, inserindo a agulha verticalmente no concreto (Figura 36 B). Cuidados especiais foram tomados para evitar o contato da agulha com as paredes da forma, prevenindo a segregação do concreto. Esse procedimento é fundamental para eliminar bolhas de ar, preencher completamente a forma e assegurar um acabamento superficial de excelência e a durabilidade dos elementos pré-moldados (Figura 36 C, D).

Figura 36 - Enchimento das formas das guias de meio-fio com concreto. A. formas untadas; B. adensamento com vibrador de imersão; C. preenchimento de segunda camada e D. formas cheias de concreto.



Fonte: Do autor (2023).

#### 4.3.3 Propriedades do concreto no estado endurecido, resistência à compressão axial e tração por compressão diametral

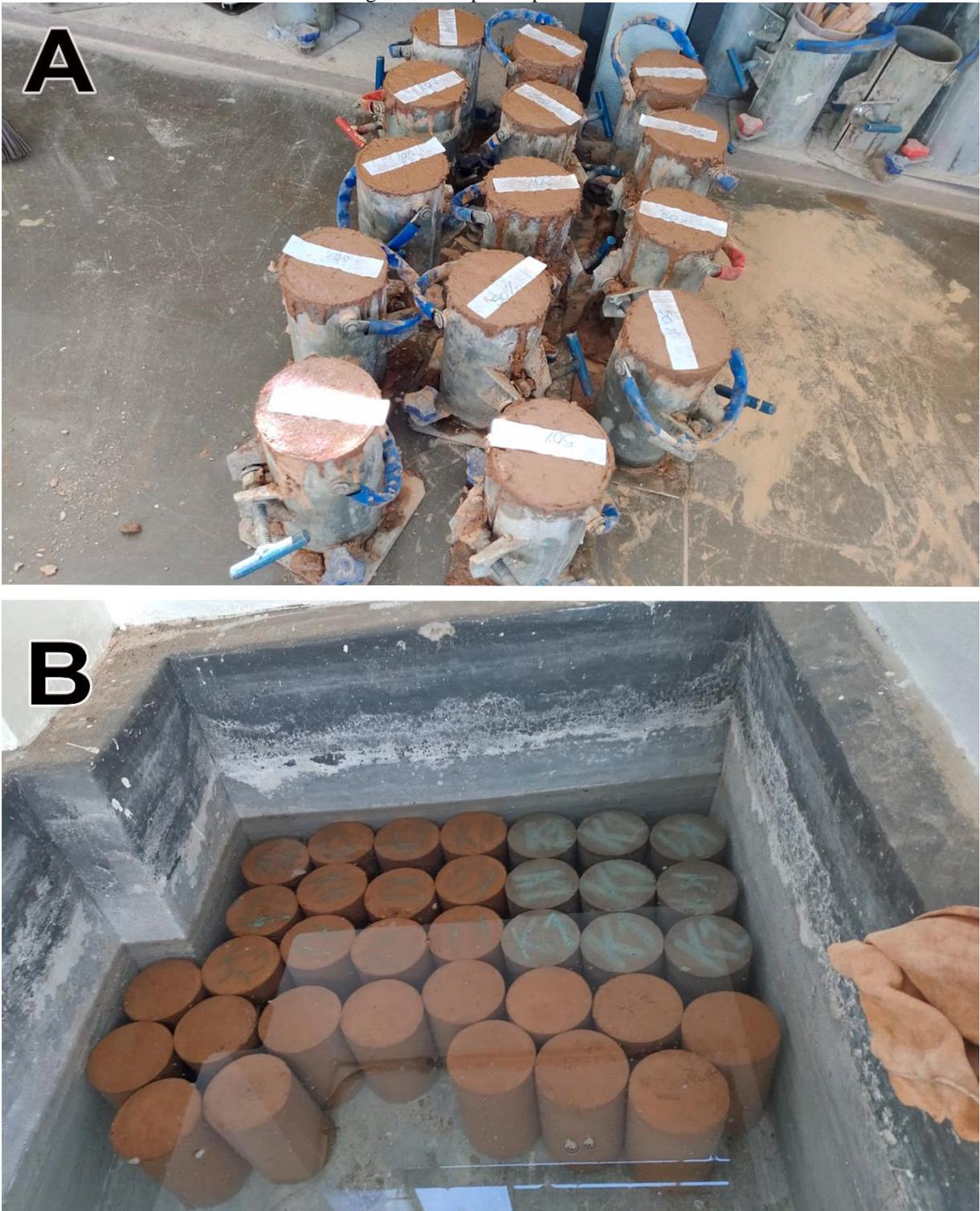
As resistências à compressão do concreto foram obtidas por meio da moldagem de corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm. Esse processo envolveu o preenchimento dos corpos de prova em duas camadas, com a aplicação de 12 golpes de compactação em cada camada, juntamente com golpes laterais para garantir um adensamento adequado, conforme orientação ABNT NBR 5738:2015. Para cada idade de ruptura, ou seja, 3, 14 e 28 dias, e para cada tipo de concreto avaliado, foram confeccionados 3 corpos de prova para cada idade de ruptura.

Após a confecção, os corpos de prova de concreto foram devidamente identificados, protegidos contra a exsudação e, após um período de 24 horas, foram desmoldados e submetidos a um processo de cura úmida. Esse processo de cura envolveu a imersão dos corpos de prova em um tanque contendo água, com a adição de cal hidratada, até que atingissem as idades necessárias para a realização dos ensaios de resistência. A Figura 37 exemplifica essas etapas de maneira ilustrativa.

Ao atingirem as idades de 3, 14 e 28 dias, os corpos de prova foram retirados do processo de cura úmida, preparando-se para a realização dos ensaios de resistência à compressão axial, conforme as diretrizes da ABNT NBR 5739:2018. Inicialmente, foram medidas as dimensões de diâmetro ( $d$ ) e altura ( $h$ ) dos corpos de prova, com o intuito de avaliar a necessidade de aplicar correções aos resultados de resistência à compressão por meio de um fator de correção.

Os corpos de prova foram submetidos a um processo de retificação nas suas superfícies superior e quando necessário inferior, seguindo os padrões estabelecidos. Em seguida, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão utilizando uma prensa hidráulica automática EMC, com uma taxa de aplicação de carga constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s, conforme estipulado pela ABNT NBR 5739:2018. A representação desse processo pode ser visualizada na Figura 39.

Figura 37 - Etapas do processo de cura única dos corpos de prova. A. corpos de prova identificados; B. Desmoldagem dos corpos de prova e Cura úmida



Fonte: Do autor (2023)

Figura 38 - Retifica em corpos de provas concreto referência e reciclado respectivamente. A Topo do corpo de prova referência evidencia homogeneidade dos agregados naturais que são marcados por britas de coloração parecidas e tamanhos próximos. B demonstra o topo do corpo de prova de concreto reciclado, demonstrando heterogeneidade dos agregados que o compõem, destacando por cerâmicas, britas, argamassas porosas, asfaltos e até pedaços de materiais vidreos.



Fonte: Do autor (2023)

Para calcular a resistência à compressão axial dos concretos convencional e agregados recicláveis (Figura 39), utilizou-se a Equação 12:

$$F_c = 4F / (\pi * D^2) \quad (12)$$

Sendo:

$F_c$ : Resistência à compressão ( $MP_a$ );

$F$ : Força máxima alcançada (N);

$D$ : Diâmetro do corpo de prova (mm).

Figura 39 - Ensaio de resistência à compressão em prensa hidráulica. A – Posicionamento corpo de prova em prensa hidráulica. B – aplicação de carga/força axial de compressão e ruptura corpo de prova



Fonte: Do autor (2023)

Para calcular a resistência à tração por compressão diametral ( $f_{cd}$ ) dos concretos convencional e reciclados, utilizou-se as orientações da norma ABNT NBR 7222:2011 (DIAS et al., 2021) e a Equação 13 (Figura 40):

$$f_{cd} = 2P / (\pi * D * H) \quad (13)$$

Onde:

$P$  = carga máxima aplicada ao corpo de prova, em Newtons (N)

$D$  = diâmetro médio do corpo de prova, em milímetros (mm)

$H$  = altura média do corpo de prova, em milímetros (mm)

Figura 40 - Ensaio de resistência à compressão tração diametral em prensa hidráulica e corpo de prova partido ao meio



Fonte: Do autor (2023)

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

Examinando os resultados expostos na Tabela 12, é possível inferir que a massa específica da brita convencional e da areia natural é maior em 24,5% e 7,5%, respectivamente, quando comparadas às britas e às areias recicladas de RCC. Além disso, o índice de absorção de água dos ARs de RCC é superior aos agregados naturais/convencionais (Tabela 12), sendo que parâmetro estabelecidos 15116:2021 (Tabela 2), traz limite para agregado RCC classe ARM uma absorção menor que 12%, logo ambos agregados atendem item normativo. Os agregados miúdos apresentam uma pequena diferença na sua massa unitária, de apenas 0,02 g/cm<sup>3</sup>, enquanto, para as britas, esse valor é um pouco maior, com 0,26 g/cm<sup>3</sup> (Tabela 12). Por outro lado, a diferença de densidade aparente é mais significativa nas britas por conta do seu diâmetro máximo característico, que é maior. Além disso, a forma dos agregados reciclados após sair do britador não contribui para uma melhor acomodação (compacta) do agregado. Considerando que a brita e a areia de RCC são feitas a partir do mesmo resíduo de construção misto ARM, a diferença está apenas na granulometria, sendo que quanto menor for a granulometria, maior será a massa unitária(aparente) menor quantidade de espaços vazios (Tabela 12).

Tabela 12 - Resultados dos ensaios de caracterização dos agregados naturais e reciclado

<b>Parâmetros</b>	<b>Norma</b>	<b>Areia natural</b>	<b>Areia RCC</b>	<b>Brita convencional</b>	<b>Brita RCC</b>
Massa específica absorção	ABNT NBR 16916:21 16917:21	2,69 g/cm <sup>3</sup> 1,15%	2,49 g/cm <sup>3</sup> 9,03%	2,90 g/cm <sup>3</sup> 2,11%	2,19 g/cm <sup>3</sup> 5,91%
Massa unitária	ABNT NBR 16972:21	1,48 g/cm <sup>3</sup>	1,46 g/cm <sup>3</sup>	1,55 g/cm <sup>3</sup>	1,22 g/cm <sup>3</sup>
Dimensão máxima característica	ABNT NBR 17054:22	2,36 mm	4,76 mm	19 mm	19 mm
Módulo de finura	ABNT NBR 17054:22	2,13	2,09	5,28	5,42
Teor de material pulverulento	ABNT NBR 16973:21	0,8 %	10,19 %	0,3 %	1,17%

Fonte: Do autor (2023).

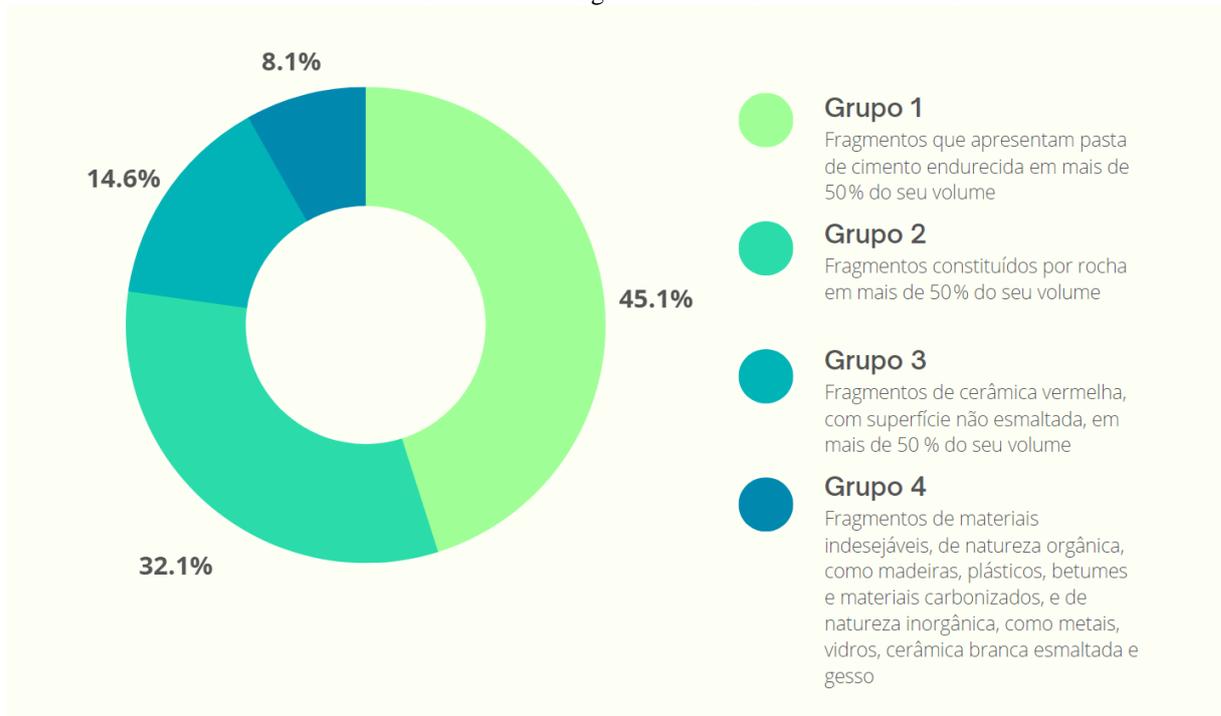
A Dimensão Máxima Característica (DMC) para ambas as britas foi igual a 19mm, enquanto para os agregados miúdos, a areia reciclada possuía um valor de 4,76 mm, sendo maior que a areia natural (2,36 mm). O que pode ter gerado essa diferença, durante uma visita à empresa de reciclagem, foi constatado que não havia uma subdivisão das areias em finas, médias e grossas, sendo o agregado que passa por uma peneira de série normal de 4,76mm comercializado como areia. Relativamente ao Módulo de Finura (MF), as areias natural e reciclada apresentaram valores próximos, enquanto para as britas para efeito de comparação, as convencionais obtiveram um resultado menor (5,28) do que a brita reciclada RCC (5,42).

O teor de material fino (pulverulento) foi notavelmente elevado na areia reciclada, chegando a 10,19%. Em comparação, a areia natural e a brita convencional apresentaram valores inferiores a 1%, com respectivamente 0,8% e 0,3%. Além disso, a britânica RCC alcançou 1,17%. A presença elevada de finos nos materiais influencia diretamente as propriedades do concreto. Materiais com maior concentração de finos tendem a ter uma maior absorção de água. Isso significa que o uso de areia reciclada pode levar o concreto a reter mais água, potencialmente diminuindo sua trabalhabilidade. Tal fator é de grande importância, principalmente quando se almeja um acabamento de superfície liso e uma boa consistência do concreto.

A norma ABNT NBR 7211:2022 estipula que, para concretos que sofrerão desgaste superficial, o teor de impurezas não deve exceder 3%. Para concretos protegidos contra desgaste, o limite é de 5%. Esses critérios sugerem que areias com valores acima dos mencionados podem não ser adequadas para estruturas com requisitos específicos de durabilidade e resistência. No entanto, é importante destacar a existência de outras regulamentações, como a NBR 15116:2021, que estabelecem diretrizes distintas. Essa especificação permite um teor de até 10% de resíduos para concretos sujeitos a desgaste e 12% para aqueles que são protegidos. A variação entre essas normas ressalta a importância de conduzir pesquisas detalhadas e compreender as demandas específicas de cada projeto.

Após uma análise visual e tátil, foi observado que a brita-1 de RCC possui uma composição de massa com uma predominância significativa de resíduos cimentícios e rochosos, correspondendo a um percentual de 45,1% e 32,1%, respectivamente (Figura 41). Esses elementos contribuem para que a densidade do agregado não seja substancialmente diferente daquela dos agregados convencionais. Além disso, é notável que o percentual de resíduos cerâmicos é considerável, o que influencia diretamente na taxa de absorção de água. No entanto, é importante mencionar que os resíduos do grupo 4, classificados como indesejáveis para a produção de agregados reciclados, como vidros, asfalto (betume), madeira e plásticos, representam 8,1% da massa total. Esse valor supera significativamente o limite estabelecido pela NBR ABNT 15116, que estipula um máximo de 1% para britas e areias provenientes de RCC. A maior parte desses resíduos indesejáveis consiste em material de origem betuminosa (asfalto, mastique e mantas), que compreende 60% da massa da amostra analisada, além de 22% de cerâmica esmaltada, 10% de materiais ferrosos (pregos, arames, discos diamantados, entre outros) e 8% de outros materiais (madeira, vidro e papel).

Figura 41 - Percentual de cada grupo que compõem a brita-1 de Resíduos da Construção Civil (RCC) obtida por análise tátil-visual das curvas granulométricas das areias e britas

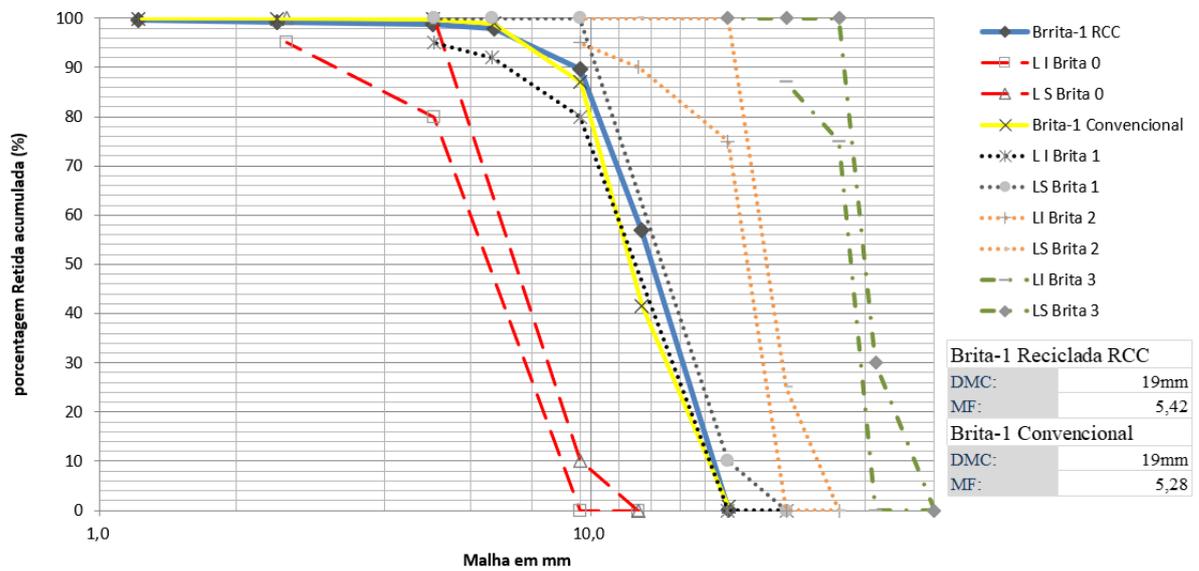


Fonte: Adaptada pelo autor (2023)

Analisando a granulometria dos agregados na Figura 42, tem-se que os graúdos brita 1 de RCC, tem uma distribuição granulométrica em todas as faixas de peneira situada dentro do limites superior (LS) e limite inferior(LI) da brita 1 apresentada no parâmetro da ABNT NBR 7211:2022, já convencional utilizada em estudo, por surpresa apresentando uma continua distribuição granulométrica mais acaba por ultrapassar um pouco o LI da faixa brita 1 da norma, ambos agregando apresentaram DMC idênticos de 19mm e os Modulo de finura muito próximo 5,28 nas britas-1 convencional e 5,42 reciclada.

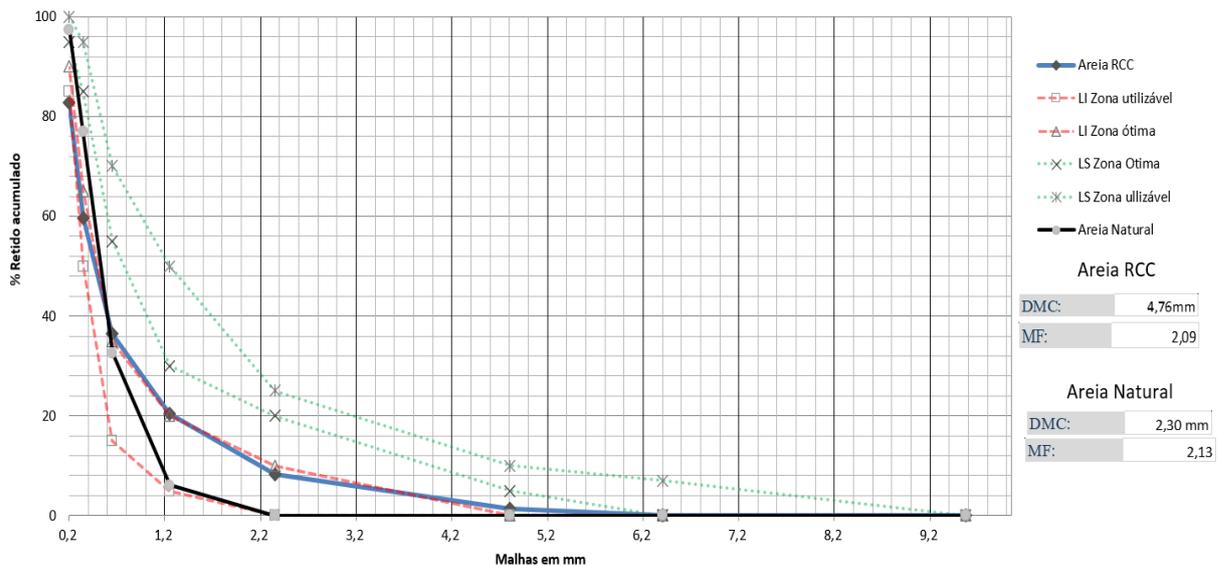
Observando a distribuição granulométrica figura 43, a areia RCC encontra-se em sua maior parte próxima do limite inferior da zona ótima estabelecida pela ABNT NBR 7211:2022, já a natural utilizada em estudo, por surpresa apresenta uma mudança acentuada do limite superior da zona ótima e atravessa o limite inferior da zona utilizável próximo a peneira de malha 0,30mm e terminando sua distribuição granulométrica no limite inferior da zona ótima estabelecida pela ABNT NBR 7211:2022.

Figura 42 - Composição granulométrica Brita-1 Convenciona e de Resíduos da Construção Civil (RCC)



Fonte: Do autor (2023).

Figura 43 - Composição granulométrica Areia Natural e Resíduos da Construção Civil (RCC)



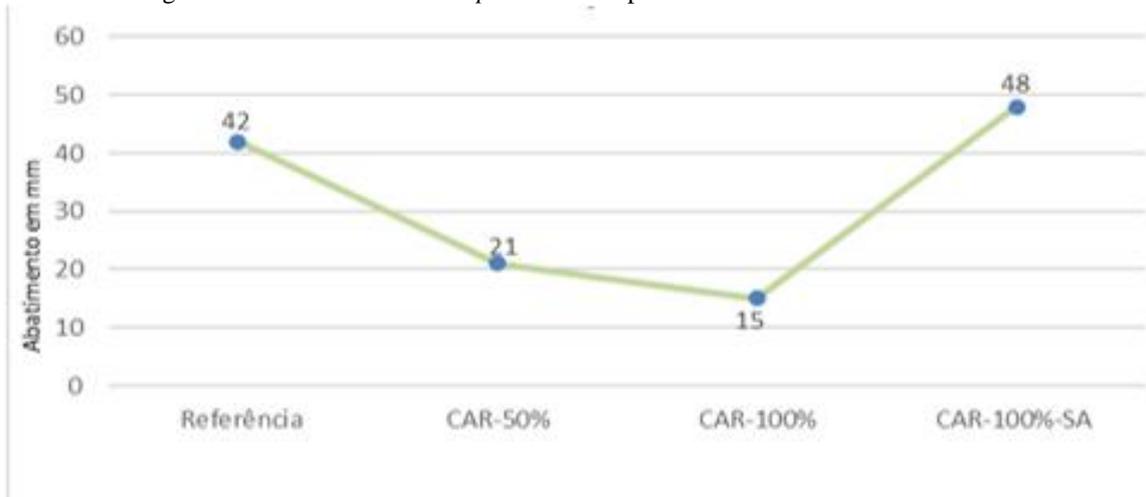
Fonte: Do autor (2023).

## 5.2 RESULTADOS OBTIDOS NOS CONCRETOS EM ESTUDO

Os resultados dos ensaios de consistência do concreto, obtidos pelo teste de abatimento do tronco de cone, estão detalhados na Figura 44. Durante a fase experimental, para garantir equivalências nos resultados e permitir uma comparação efetiva, padronizou-se a relação água/cimento em 0,47 para todos os concretos em estudo, considerando que o concreto foi

usado para elemento pré-moldado( guia de meio fio) que se deseja uma desforma rápida optou por um concreto com abatimento menor.

Figura 44 - Resultados do *Slump test* obtidos pelo teste de abatimento do tronco de cone



Fonte: Do autor (2023).

Durante a execução, observou-se uma notável perda de trabalhabilidade nos CAR. Para contornar esse problema, decidimos incorporar um superplastificante, que, surpreendentemente, melhorou o desempenho do concreto, superando até mesmo o concreto de referência, como mostrado na figura 44. De acordo com Frotte et al. (2017), a incorporação acentuada de RCC em concretos pode levar a um aumento significativo da porosidade. Este aumento está diretamente ligado a uma maior absorção de água, decorrente da presença predominante de materiais pulverulentos. Esta característica leva a uma maior retenção de ar no concreto ainda em estado fresco, o que pode comprometer suas propriedades mecânicas e durabilidade, como apontado por Taylor (1997).

A fim de combater essa perda de trabalhabilidade um aspecto adicional foi analisado que é o desempenho do Agregados Reciclados 100% (CAR-100%-SA), considerando sem pré-molhagem, uma abordagem que seguiu a diretriz da NBR 15116:2021. Para melhorar a consistência nesta condição obteve-se por um superplastificante (MasterGlenium 51, BASF

S.A) adicionado 1% da massa do cimento utilizado, durante a dosagem CAR-100%-SA foi adicionado ao concreto a quantidade de água em pequenas parcelas até atingir a massa que representa o índice de absorção dos agregados, além do amassamento, diretamente na betoneira. Com esta dosagem foi possível um abatimento notavelmente superior em relação ao concreto referência. Tal intervenção ressalta a importância de aditivos químicos para enfrentar a redução da trabalhabilidade, esta melhoria ressalta o potencial dos aditivos em aprimorar a trabalhabilidade do concreto, conforme apontado por Lima et al. (2017).

O concreto de referência atingiu um abatimento dentro dos limites estipulados na Tabela 7 que define uma faixa entre 25-50mm. Contudo, a adição de agregados reciclados levou à obtenção de um concreto de menor plasticidade. Esse comportamento pode ser atribuído à heterogeneidade dos agregados reciclados e ao elevado teor de material pulverulento na areia reciclada, que foi de 10,19%.

Este valor ultrapassou levemente o limite estabelecido pela Tabela 2, que estipula um teor de finos no agregado inferior a 10% para concretos expostos ao desgaste superficial, como guias de meio-fio. Mesmo com a adoção da pré-hidratação, a trabalhabilidade do concreto foi afetada pela inclusão desses agregados. Esses resultados são consistentes com estudos anteriores, como os realizados por Gerin, Sales e Nardin (2019) e Frotte et al. (2017). Em contrapartida, amostras que não passaram pelo processo de pré-molhagem e tiveram a adição de água durante a mistura correspondente ao índice de absorção e incremento de aditivo superplastificante apresentaram uma consistência notável, evidenciando efeito dos aditivos químicos. A Tabela 13 apresenta os resultados obtidos para a massa específica aparente por meio do método gravimétrico. Observa-se uma tendência de redução na massa específica aparente do concreto quando se utilizam agregados reciclados, e essa redução se acentua à medida que a proporção de agregados reciclados aumenta na dosagem. Essa tendência é consistente com estudos anteriores realizados por Frotte et al. (2017) e Rodrigues (2014).

Ambos os estudos identificaram uma diminuição na massa específica do concreto à medida que a proporção de ARs de RCC aumentava. Isso ocorre devido à menor massa específica dos agregados reciclados, à presença de material pulverulento e à heterogeneidade inerente aos RCC. Esses achados reforçam a importância de considerar a redução na massa específica quando se utiliza agregados reciclados na dosagem do concreto, uma vez que isso pode afetar as propriedades e o desempenho do material final.

Tabela 13 - Massa específica aparente concretos em estudo

<b>Tipo de concreto</b>	<b>Norma</b>	<b>M. específica aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Concreto convencional	ABNT NBR 9833:2008	2.498,5
Concreto 50% reciclado com pré- molhagem	ABNT NBR 9833:2008	2,341,7
Concreto 100% reciclado com pré- molhagem	ABNT NBR 9833:2008	2,140,7
Concreto 100% reciclado sem pré- molhagem (aditivo)	ABNT NBR 9833:2008	2,168,3

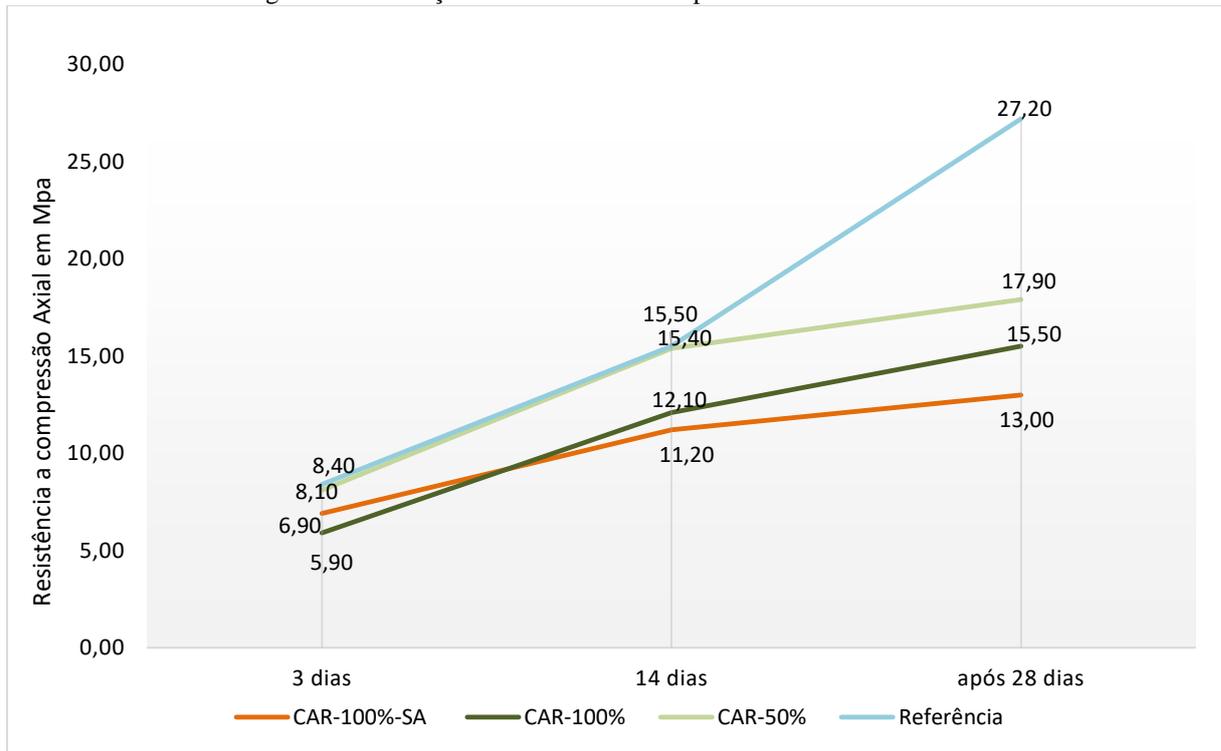
Fonte: Do autor (2023)

### 5.3 RESULTADOS DOS CONCRETOS EM ESTUDO, ESTADO ENDURECIDO

A incorporação de agregados reciclados de Resíduos de Construção Civil em concretos tem sido objeto de intensa pesquisa devido à variabilidade e heterogeneidade inerentes a esses materiais (VIEIRA et al., 2004; RODRIGUES; FUCALE, 2014). Os gráficos apresentados oferecem resultados de ensaios valiosos sobre o comportamento de concretos com agregados reciclados da cidade de Uberaba-MG, tanto em resistências mecânicas Figura 45 quanto em propriedades físicas, como a absorção de água Figura 50.

A resistência à compressão desempenha um papel fundamental na avaliação da qualidade dos concretos, especialmente quando se trata da sua aplicação em guias de meio-fio. Esses elementos pré-fabricados devem atender a requisitos rigorosos para suportar as exposições adversas ao ambiente e as tensões provenientes do tráfego veicular. Neste estudo, foram adotadas duas normas como referência: o Boletim Técnico 82 da ABCP e a Norma DNIT 020/2006 - ES. A primeira estabelece um requisito mínimo de resistência de 25 MPa, enquanto a segunda define um valor mínimo de 15 Mpa. Vale destacar que a resistência média do concreto à compressão, após 28 dias, foi medida em 31,56 MPa, com uma variação de aproximadamente 4 MPa.

Figura 45 - Evolução da resistência à compressão axial dos concretos



Fonte: Do autor (2023)

Além disso, percebe-se também uma evolução na resistência à compressão com o passar do tempo para todos os traços de concreto em estudo (Figura 45). A literatura sugere que concretos produzidos com agregados reciclados apresentam uma redução nas resistências mecânicas que podem chegar a 25,1% daquelas observadas em concretos com agregados convencionais (Mehta e Monteiro, 2014), já outros autores como Frotte et al., 2017, apontam uma diminuição observada CAR de mais de 40% quando se observa substituição total de agregados naturais por ARs, demonstrando que há diversos fatores e desafios existentes no emprego ARs, apontados na literatura e referência bibliográfica do presente estudo condensadas tabela a seguir (veja Tabela 14) e como consequência pode causar grande variabilidade da resistência no compósito (concreto) VIEIRA et al., 2004.

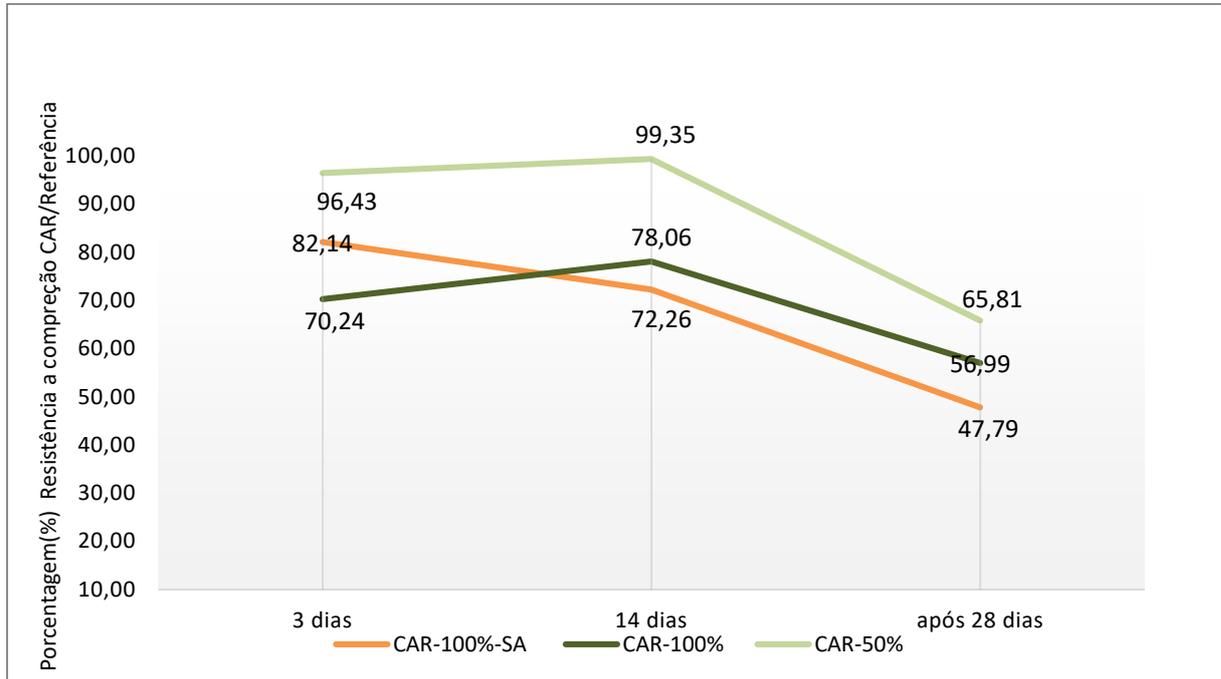
Tabela 14 - Desafios associados ao uso de ARs e suas implicações nas propriedades dos CAR

<b>Desafio com ARs</b>	<b>Consequência no CAR</b>	<b>Referência</b>
Heterogeneidade dos ARs	Variabilidade nas propriedades do CAR.	VIEIRA et al., 2004
Adesão Inadequada na ZTI	Redução da resistência devido à aderência pobre entre o AR e a matriz cimentícia.	AJDUKIEWICZ & KLISZCZEWICZ, 2002
Presença de Fissuras e Trincas no AR	Comprometimento da resistência mecânica do CAR.	MCNEIL & KANG, 2013
Maior Porosidade e Absorção de Água	Influência negativa na resistência e maior retenção de água no CAR.	FROTTE et al., 2017
Maior Conteúdo de Partículas Finas nos ARs	Absorção da água da mistura aumentada, afetando a trabalhabilidade.	FROTTE et al., 2017; NARDIN, 2019
Desafios na Dosagem	Necessidade de ajuste na dosagem para garantir trabalhabilidade e resistência desejadas.	MEHTA & MONTEIRO, 2014
Influência na Trabalhabilidade	Redução na trabalhabilidade, impactando o desempenho do material no estado fresco.	GERIN; VENDAS; NARDIN (2019)

Fonte: Adaptada pelo autor (2023)

Os resultados obtidos figuram 46 indicam uma tendência de redução na compressão axial em relação aos valores do concreto de referência. Concretos contendo 50% de Agregados Reciclados (CAR-50%) e concretos com 100% de Agregados Reciclados (CAR-100%), ambos com pré-molhagem conforme a NBR 15166:2021, apresentaram resistências que convergem para expectativas da literatura. Notavelmente, o CAR-50% mostrou uma resistência inferior ao concreto de referência após 28 dias, mas superou todas as demais misturas CAR, evidenciando uma relação inversamente proporcional entre a proporção de Agregados Reciclados e o ganho de resistência dos concretos em estudados (Figura 46). Essa tendência está alinhada com os achados reportados por Behera et al. (2014), corroborando os resultados observados por Mehta e Monteiro, 2014; Frotte et al., 2017.

Figura 46 - Comparação da Resistência à Compressão Axial dos Concretos com Agregados Recicladados (CAR) com referência



Fonte: Do Autor (2023)

Nossos resultados também sugerem que todos os concretos, independentemente da proporção de ARs, apresentam um aumento na resistência com o passar do tempo (Figura 45). No entanto, o que varia é a taxa desse aumento. Por exemplo, ao analisar o coeficiente angular das curvas, há uma decrescente tendência de redução da resistência à medida que a proporção de ARs aumenta. Em outras palavras, o CAR-100% ganhar resistência mais lentamente em comparação ao CAR-50% e ao concreto de referência (Figura 45). Esta observação é ainda mais notável quando analisamos os resultados após 28 dias. Ao direcionar nossa atenção a dicotomia entre os CAR e o concreto referência se torna ainda mais evidente (Figura 46). No 3 dia, o CAR-50% demonstra uma resistência substancial, equivalente a 96,43% da resistência do concreto de referência. Por outro lado, o CAR com 100% de ARs tem uma resistência de 70,24%, e o CAR-100%-SA exibe 82,14% (Tabela 15) e ao passar do tempo há uma tendência do distanciamento de ganho de resistência em relação a referência, destacando apenas o CAR-50% que aos 14 dias tem um leve aumento atingindo quase valor de referência chegando a 99,35% do concreto referência.

Tabela 15 - Relação entre Concretos com Agregados Reciclados (CAR) e Concreto de Referência no ganho de resistência à compressão axial em diferentes idades

Intervalo de dias	CAR-50%	CAR-100%	CAR-100%-SA
3 dias	96,43%	70,24%	82,14%
14 dias	99,35%	78,06%	72,26%
28 dias	65,81%	56,99%	47,79%

Fonte: Do Autor (2023)

Essa significativa alta de resistência dos CAR-50% as os 14 dias pode ser atribuída à presença de partículas finas provenientes dos ARs, que podem agir como um material de enchimento, melhorando a microestrutura do concreto (Smith, 1998). No entanto, conforme o tempo avança, há uma acentuada queda na resistência dos CARs em comparação com o concreto de referência.

A diminuição da resistência à compressão axial observada nos CAR, conforme ilustrado na Figura 46, pode ser majoritariamente atribuída às características intrínsecas dos agregados reciclados. Em sua composição, predominam materiais como cerâmicas de alvenaria e argamassas de reboco, os quais, segundo Silva (2005), apresentam resistências inferiores às da matriz cimentícia, justificando a redução de performance do CAR quando comparado ao concreto de referência, especialmente após 14 dias de cura. Adicionalmente, os efeitos colaterais do processo de britagem, como a presença de fissuras nos agregados reciclados, bem como a aderência comprometida entre a argamassa antiga e os agregados, contribuem para uma Zona de Transição Interfacial (ZTI) fragilizada (Ajdukiewicz & Kliszczewicz, 2002), exacerbando a discrepância entre as resistências dos materiais. Essas características conferem aos RCCs uma resistência mecânica menor em relação aos agregados naturais, que se caracterizam por uma maior homogeneidade e resistência intrínseca.

A resistência à compressão é um parâmetro fundamental para a avaliação de concretos destinados a aplicações como guias de meio fio. Tais aplicações requerem durabilidade em face das exposições ambientais e capacidade de suportar cargas. Os valores de resistência a compressão axial aos 28 dias foram relacionados com exigência requerida pelas normas ABCP e DNIT (Tabela 16). Desta análise, observamos o Concreto de Referência atendem às especificações de resistência de ambas as normas após 28 dias. O CAR-50% e CAR-100% atende apenas à norma DNIT, enquanto o e CAR-100%-SA não atende a nenhuma das duas normas após 28 dias.

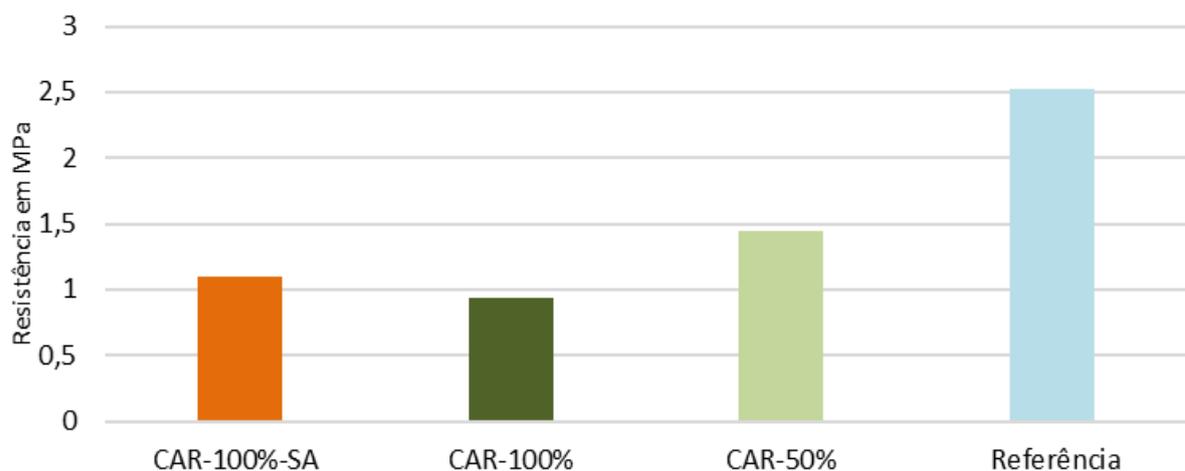
Tabela 16 - Concretos resistência mínima requerida pelas normas após 28 dias

Tipo	Mpa	BT-82/ABCP	DNIT 020/2006 - ES
		25 Mpa	15 Mpa
CAR-100%-SA	13,00	Não	Não
CAR-100%	15,50	Não	Sim
CAR-50%	17,90	Não	Sim
Concreto de referência	27,20	Sim	Sim

Fonte: Do Autor (2023)

A análise da evolução da resistência à compressão dos concretos revela nuances interessantes quando posta lado a lado com os dados da resistência à tração por compressão diametral. O fenômeno observado no comportamento da resistência à compressão axial, em particular a queda na resistência com aumento da proporção de ARs nos CAR, se estende também à resistência à tração por compressão diametral estudos de Frotte et al. (2017) e Gerin, Sales e Nardin (2019). Os concretos com 100% de CAR, tanto com ou sem o aditivo superplastificante, apresentam resistências significativamente menores à compressão e à tração em comparação com o concreto de referência após 28 dias (Figura 47). Esta redução, que é mais proeminente no CAR-100% sem aditivo, pode ser atribuída à heterogeneidade dos agregados reciclados e desafios discutidas na tabela 14.

Figura 47 - Resistência à Tração por Compressão Diametral após os 28 dias



Fonte: Do autor (2023)

No caso do CAR-50%, percebe-se uma resistência à compressão e tração intermediária entre o concreto de referência e o CAR-100%. Esta situação sinaliza a influência da porcentagem de agregados reciclados na resistência do concreto, confirmada pelos estudos de Frotte et al. (2017) e Gerin, Sales e Nardin (2019).

A resistência à tração é importante propriedades do concreto em especialmente para aplicações em guias de meio fio. Nestas aplicações, resistências menores à tração podem se traduzir em fissuras e falhas prematuras devido às cargas dinâmicas de veículos e variações climáticas. Por exemplo, em uma análise profunda das fotografias pós-ensaio de tração por compressão diametral revela padrões de ruptura interessantes. É possível discernir, com base nas marcações coloridas, os diferentes componentes presentes na matriz do concreto. As marcações circulares verdes, indicativas de agregados de alta resistência como brita basáltica e cascalho, estão evidentes no plano de ruptura, são contornadas pela ZTI não ocorrendo sua ruptura, evidenciando sua alta resistência. Por outro lado, as marcações circulares amarelas representam os ARs constituintes como cerâmica e argamassas porosas de baixa resistência - parecem manifestar um padrão de ruptura precoce. Esta observação é consistente com a literatura que destaca a heterogeneidade e as propriedades muitas vezes comprometidas dos ARs evidenciada pela tabela resumo do referencial deste estudo Tabela 14.

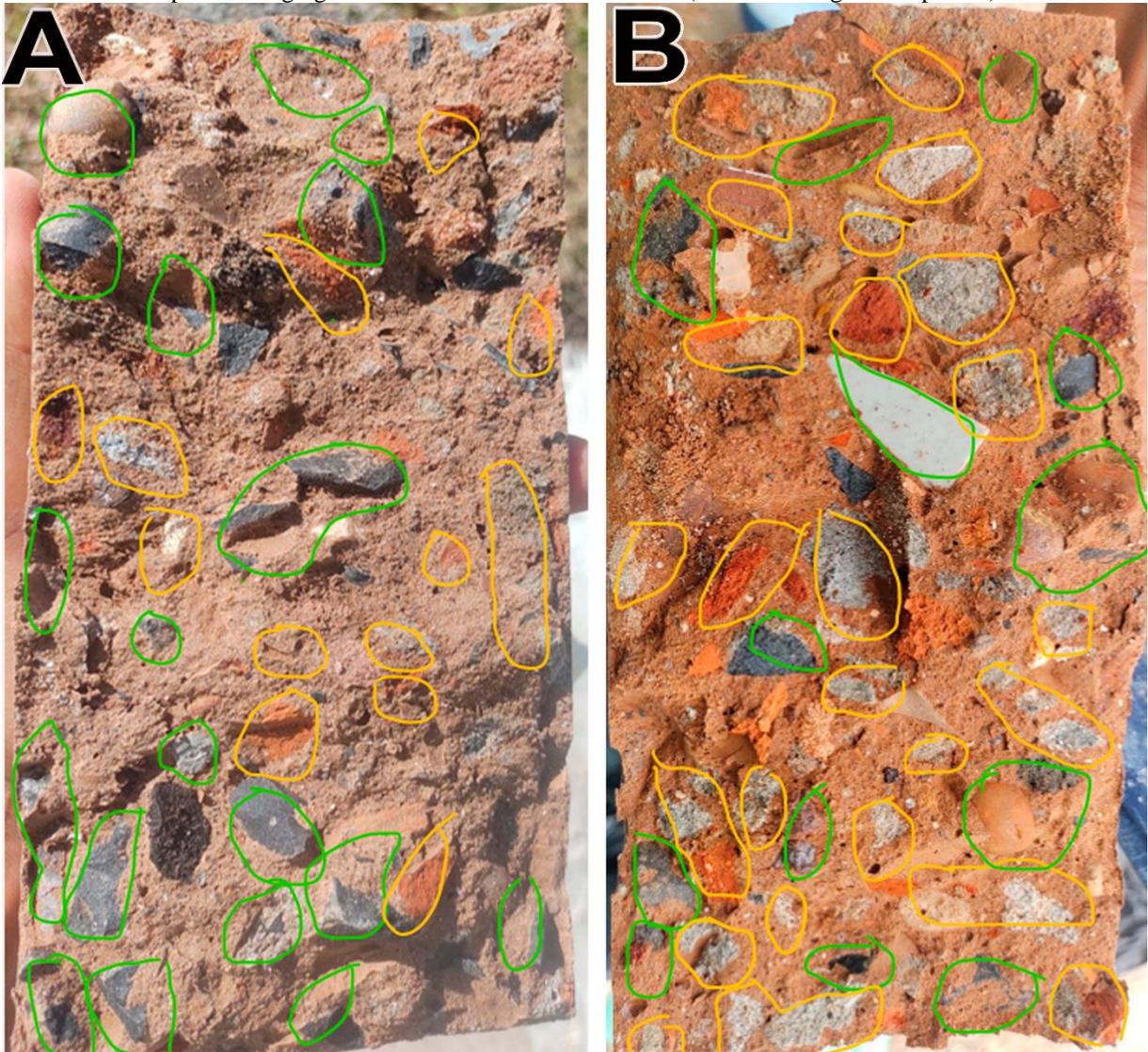
O interessante é notar que mesmo agregados de boa resistência, quando envoltos por argamassas de baixa aderência, são contornados no plano de ruptura. Este fenômeno sugere uma deficiência na aderência entre a Zona de Transição Interfacial (ZTI) e a superfície do agregado, resultando em desprendimento da matriz. Esta hipótese é validada pelo padrão de ruptura observado nas fotografias, onde a ZTI parece não aderir bem ao agregado, destacando-se da superfície e deixando uma marca evidente na contraparte do corpo de prova. essas observações reiteram a complexidade das interações entre os componentes do concreto (Figura 48 e 49).

Figura 48 - Secção de ruptura ensaio tração por compressão diametral CAR-100%-AS. Círculos verdes representam agregados de boa resistência e fragilidade na ZTI. Círculos amarelos representam agregados derivados de baixa resistência (cerâmica e argamassa porosa)



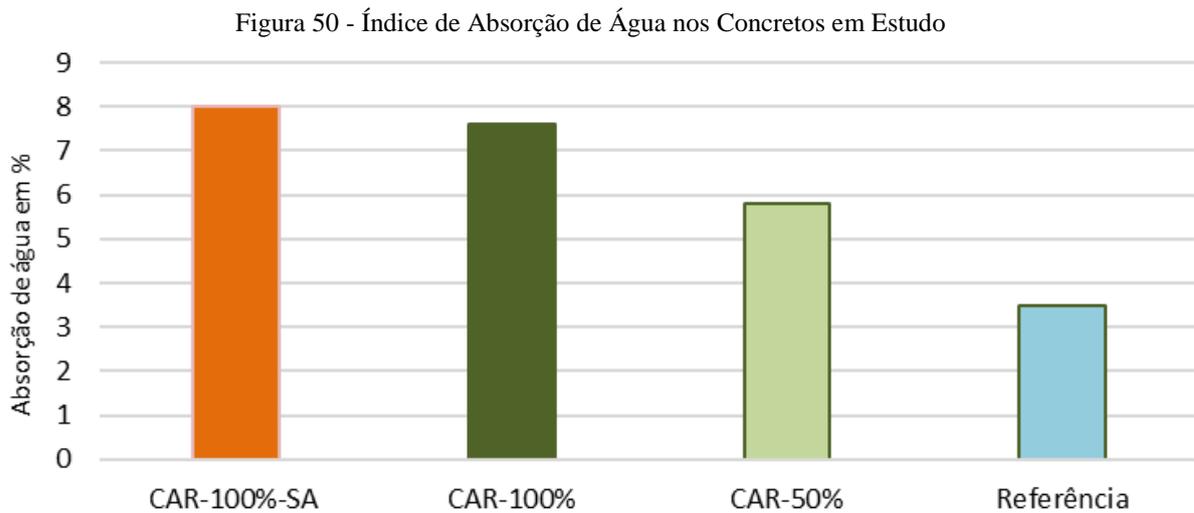
Fonte: Do autor (2023)

Figura 49 - Secção de ruptura ensaio tração por compressão diametral. A secção de ruptura CAR-50% e B CAR-100%. Círculos verdes representam agregados de boa resistência e fragilidade na ZTI. Círculos amarelos representam agregados derivados de baixa resistência (cerâmica e argamassa porosa)



Fonte: Do autor (2023)

Adicionalmente, foram realizados ensaios de absorção nos corpos de prova (Figura 50), especificamente o CAR-100% e CAR-100%-SA, apresentam índices de absorção significativamente mais altos em comparação com o concreto de referência e o CAR-50%. Esta tendência elevada para os concretos CAR-100% e CAR-100%-SA está correlacionada com os resultados da Tabela 14. Esta alta absorção no agregado reciclado é indicativa de sua maior porosidade, que, conforme apresentado por Frotte et al. (2017), pode levar a uma maior retenção de ar no concreto fresco elevando o índice.



Fonte: Do autor (2023)

#### 5.4 RESULTADOS DO CUSTO PRODUÇÃO DAS GUIAS DO MEIO-FIO

Concluindo a análise dos resultados, é possível afirmar que, apesar dos desafios associados à utilização ARs, os quais são detalhadamente discutidos na Tabela 14, os pré-moldados produzidos neste estudo atenderam aos requisitos estabelecidos pela legislação vigente, conforme demonstrado na Tabela 16. Notavelmente, a massa específica aparente dos Concretos com Agregados Reciclados (CARs) mostrou-se próxima à do concreto convencional, como evidenciado na Tabela 13.

Além disso, as guias de meio fio fabricadas com CAR exibiram um acabamento superficial comparável ao do concreto de referência. As superfícies acabadas revelaram-se não só esteticamente agradáveis, mas também tecnicamente satisfatórias para aplicação em ambientes sujeitos a intempéries. Essa observação é reforçada pela Figura 51, que não indica a presença de fissuras de retração significativas, as quais poderiam comprometer a durabilidade e a funcionalidade das peças. Este achado é particularmente relevante, pois destaca o potencial dos ARs em concretos que podem ter uma resistência moderada que não tem fins estruturais como no caso da aplicação das guias de meio fio.

Figura 51 - Guias de meio fio feitas com concreto de referência a esquerda, tom mais cinza. A direita temos guia de meio fio CAR-100%



Guia-meio fio Concreto Referência



Guia-meio fio CAR-100%



Alinhamento das guias-meio fio Referência



Alinhamento das guias-meio fio CAR-50%, CAR-100% e CAR-100%-SA

Fonte: Do autor (2023)

Considerando os impactos ambientais significativos decorrentes da extração de recursos minerais produção de agregados naturais e do descarte inadequado de RCC, a reutilização desses materiais no ciclo construtivo torna-se não apenas uma questão de responsabilidade ambiental, mas também uma estratégia alinhada aos princípios ESG de Sustentabilidade Corporativa. Esta abordagem, além de mitigar impactos ambientais, favorece uma redução de custos, como salientado por Bauer (2008). A tabela 17 evidencia que o uso de CAR-100% e CAR-100%-SA pode representar uma redução de custos por metro cúbico de concreto de até 46,6% em comparação ao concreto de referência. Até mesmo o CAR-50% apresenta uma economia notável de 23,3% ela também os custos vinculados à produção das guias de meio-fio, comparando o concreto de referência com variantes contendo ARs. Os custos apresentados

excluem a mão de obra e levam em consideração os preços dos agregados adquiridos sem fator de escala, com base em cotações de lojas de construção na cidade de Uberaba.

Estas economias não só corroboram o argumento financeiro a favor da reciclagem de agregados, mas também reforçam o conceito de sustentabilidade na construção civil, oferecendo um meio tangível para a redução da pegada de carbono do setor. A análise econômica realizada em nosso estudo revelou um custo-benefício significativo na adoção de ARs na fabricação de guias de meio fio.

Tabela 17 - Custo por Metro Cúbico de Concreto e guias de meio fio

<b>Tipo de Concreto</b>	<b>Custo por Metro Cúbico (R\$)</b>	<b>Custo R\$ da guia-meio fio 45l</b>
Concreto de Referência	494,98	22,27
CAR-50%	379,60	17,09
CAR-100%	264,31	11,90
CAR-100%-SA	264,31	11,90

Fonte: autor

## 6 CONCLUSÃO

Após a realização dos ensaios de caracterização dos agregados, principalmente os reciclados, notou-se que algumas características se aproximaram das sugeridas por outros trabalhos, como a massa específica mais baixa, elevado índice de absorção de água e alto teor de material pulverulento em relação aos agregados naturais. Por outro lado, a granulometria, o DMC e o MF demonstraram características similares aos agregados naturais e, em alguns casos, apresentaram uma distribuição granulométrica mais próxima da granulometria de referência sugerida pela ABNT NBR 7211:2022.

Infelizmente, a análise tátil visual do agregado reciclado graúdo apresentou grande heterogeneidade na sua constituição de partículas, extrapolando a quantidade de materiais indesejáveis pelo grupo 4 da NBR 15116:2022, tornando-o inadequado para a utilização. No entanto, existem aplicações de concretos que não exigem um rigor estrutural grande, como a confecção de guias de meio-fio. De acordo com o Boletim Técnico 82 da ABCP, o meio-fio tem como principais características servir como um obstáculo entre o tráfego de veículos e o trânsito de pedestres, delimitando a faixa de rolamento e os passeios laterais ou os refúgios centrais, proporcionando maior segurança para os pedestres.

A análise detalhada dos dados demonstra que o uso de agregados reciclados pode resultar em economias significativas. Comparativamente ao concreto de referência, a utilização de CAR-100% e CAR-100%-SA pode reduzir o custo do metro cúbico e da guia de meio-fio em até 46,7%. Em termos de resistência, o CAR-50% atinge 65,81% da resistência do concreto de referência após 28 dias, enquanto o CAR-100%-SA atinge 47,79%, ambos são inviabilizados BT-82/ABCP, que exige uma resistência mínima de 25 MPa após 28 dias, entretanto a DNIT 020/2006 – ES tem uma exigência de uma resistência menor de 15 Mpa, logo apenas CAR-100%- AS não atende, demonstrando a viabilidade dos CAR em aplicações não estruturais.

Embora a heterogeneidade e características desfavoráveis do agregado reciclado graúdo limitem seu uso em concretos estruturais, o estudo abre caminho para a utilização desses materiais em aplicações menos rigorosas, como na produção de guias de meio-fio. Esta aplicação específica não só se alinha com as propriedades dos materiais reciclados, mas também contribui para a segurança urbana e a sustentabilidade ambiental. O uso desses agregados em guias de meio-fio representa um exemplo prático de como materiais reciclados podem ser incorporados com sucesso na construção civil, oferecendo benefícios tanto ecológicos quanto econômicos.

## 7 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICAS

ABRECON. Brazilian Association for Recycling of Construction and Demolition Waste. Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil. **Sector Research of the Recycling of Construction Waste**. 2017.

ABRELPE, “Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017”. Disponível em: <<http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2017.pdf>>. Acesso em 4 de julho de 2022.

ABREU, L.P. et al. Análise da implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos nos municípios brasileiros. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, v. 50, p. 43-61, 2018.

AJDUKIEWICZ, A.; KLISZCZEWICZ, A. Influence of recycled aggregates on mechanical properties of HS/HPC. **Cem Concr Compos**, 2002;2:269–279.

ARAÚJO, D. A. M.; ALVES, D. S. V. Análise do Emprego de Resíduo de Construção e Demolição Em Revestimento Asfáltico a Frio. **Revista de Engenharia e Pesquisa Aplicada**, 6(1), 1-8. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT (2004) **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro. 2004.

ASSUNÇÃO, L. T.; CARVALHO, G. F.; BARATA, M. S. Avaliação das propriedades das argamassas de revestimento produzidas com resíduos da construção e de demolição como agregado. **Exacta**, 5(2), 223-230. 2007.

BAKSHAN, A.; SROUR, I.; CHEHAB, G.; EL-FADEL, M. A fieldbased methodology for estimating waste generation rates at various stages of construction projects. **Resources, Conservation and Recycling**, 100, 70-80. 2015.

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. 2497-2502, 2011.

BARROS, R.T.V. et al. Elementos de gestão de resíduos sólidos. **Belo Horizonte: Tessitura**, v. 1, 2012.

BAUER, LA Materiais de construção. São Paulo: **LTC**, 2008.

BEHERA, Monalisa et al. Recycled aggregate from C&D waste & its use in concrete – A breakthrough towards sustainability in construction sector: A review. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 501-516, 2014.

BESSA, L.A.; MELLO, J.C.C.B.; LOURENÇO, P.C.A. Resíduos da construção civil no Brasil e sua gestão sustentável. **Ambiente Construído**, v. 19, n. 1, pág. 105-123, 2019.

BENEDETTI, V. et al. Reciclagem de resíduos de construção e demolição na indústria cimenteira: uma revisão. **Journal of Cleaner Production**, v. 279, p. 123662, 2021.

BOGGIO, A.J. **Estudo comparativo de métodos de dosagem de concretos de cimento Portland**. 2000. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000. 182p.

BRASILEIRO, L. L.; MATOS, J. M. E. Revisão bibliográfica: reutilização de resíduos da construção e demolição na indústria da construção civil. **Cerâmica**, v. 61, p. 178-189, 2015.  
BUTTLER, A. Reciclagem de resíduos de construção e demolição na construção civil. Porto Alegre: **Ed. da UFRGS**, 2003.

CÂMARA, R. A. S.; CASTRO, J. B. V.; SOUZA, I. T. B. Análise de composição gravimétrica dos resíduos da construção civil: um estudo de caso em Teresina - PI. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 11, n. 1, p. 91-103, 2019.

CAMPOS, R. F. F.; WEBER, E.; BORGA, T. Análise da eficiência do tijolo ecológico solo-cimento na construção civil. **IGNIS Periódico Científico de Arquitetura e Urbanismo Engenharias e Tecnologia de Informação**. 2017.

CARNEIRO, A. S. et al. Gerenciamento de resíduos da construção civil em Belo Horizonte. **Revista Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 19, n. 1, p. 25-42, 2019.

CIWMB, CIWMB. *Designing With Vision: A Technical Manual for Material Choices in Sustainable Construction*. **California: California Environmental Protection Agency**, 2000.

CNN. Com 9 milhões de mortes em 2019, mundo avança pouco contra poluição, diz estudo. 2019. Disponível em: < <https://www.cnnbrasil.com.br/saude/com-9-milhoes-de-mortes-em-2019-mundo-avanca-pouco-contrapoluicao-diz-estudo/>>. Acesso em 23 de janeiro de 2023.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002**. Disponível em: < [https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002\\_Res\\_CONAMA\\_307.pdf](https://cetesb.sp.gov.br/licenciamento/documentos/2002_Res_CONAMA_307.pdf)>. Acesso em 4 de junho de 2022.

CÓRDOBA, Rodrigo Eduardo. Estudo do potencial de contaminação de lixiviados gerados em aterros de resíduos da construção civil por meio de simulações em colunas de lixiviação. 2014. 340 f. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Doutor em Ciências: Engenharia Hidráulica e Saneamento. Universidade de São Paulo.

DAS, B.M. *Princípios de mecânica dos solos*. São Paulo: **Cengage Learning**, 2009.

FARIA, C. A. et al. Recycling construction and demolition waste to produce building materials: a Brazilian case study. **Waste Management**, v. 28, n. 12, p. 2721-2727, 2008.

FERREIRA, AB e cols. Agregado reciclado de resíduos da construção civil: uma alternativa sustentável para a construção civil. **Cadernos de Engenharia de Estruturas**, v. 22, n. 1, pág. 59-72, 2020.

GAYARRE, F.L. et al. Fabricação de meios-fios de concretos e blocos de piso com agregado reciclado. **ScienceDirect**. 2011.

GERIN, Mayara Turi; NARDIN, Silvana. Exemplos de edificações com utilização de agregados de resíduos de construção e demolição. **In: TECSIC 2019: 2º Workshop de Tecnologia de Processos e Sistemas Construtivo**. 2019, Universidade Federal de São Carlos.

GERIN, Mayara Turi; SALES, Almir; NARDIN, Silvana De. Propriedades mecânicas e físicas do concreto com agregados de resíduos de concreto. **Revista Tecnológica** - Universidade Estadual de Maringá, v. 259-272, p., 2019.

Giroux Environmental Consulting, State of Waste Management in Canada, Can. Counc. **Minist. Environ**, 2014, 155.

GOMES, P.C.C. et al. Obtenção de blocos de concreto com utilização de resíduos reciclados da própria fabricação dos blocos. **Ambiente Construído**, 17, 267-280. 2017.

GONÇALVES, FT; LOPES, LS Agregados reciclados de resíduos da construção civil na produção de concreto. **Revista de Engenharia Civil IMED**, v. 6, n. 1, pág. 77-84, 2021.

GONÇALVES, LS; PIMENTA, MSR Análise da gestão de resíduos da construção civil em cidades brasileiras. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 17, n. 2, pág. 189-205, abr./jun. 2017.

GUIMARÃES, Mag Geisielly Alves et al. Incorporação de resíduos de construção e demolição e pó-de-pedra em dosagens experimentais de argamassa para mitigação de impactos ambientais. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 5, p. 25337-25349, 2020.

JALAEI, Farzad; ZOGHI, Milad; KHOSHAND, Afshin. Life cycle environmental impact assessment to manage and optimize construction waste using Building Information Modeling (BIM). **International Journal of Construction Management**, v. 21, n. 8, p. 784-801, 2021.

KWAN, A.K.H. et al. Uma revisão sobre a tecnologia viável para a reciclagem de resíduos de construção. **Recursos, Conservação e Reciclagem**, v. 66, p. 201-214, 2012.

LEITE, Fabiana da Conceição. Comportamento mecânico de agregado reciclado de resíduo sólido da construção civil em camadas de base e sub-base de pavimentos. 2007. 216 f. Mestre em Engenharia de Transportes. Universidade de São Paulo.

LEITE, M. B. Avaliação da utilização de resíduos da construção civil como agregado reciclado em concretos de cimento Portland. 2001. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LIMA, Adriana Sampaio; CABRAL, Antonio Eduardo Bezerra. Caracterização e classificação dos resíduos de construção civil da cidade de Fortaleza (CE). **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18, p. 169-176, 2013.

LIMA, José Antonio Ribeiro de. Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos. **São Carlos**, v. 240, 1999.

- LIMBACHIYA, Mukesh; MEDDAH, Mohammed Seddik; OUCHAGOUR, Youssef. Use of recycled concrete aggregate in fly-ash concrete. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 439-449, 2012.
- LIRA, D. S. A reciclagem de resíduos da Construção Civil de classe A seu reuso na cadeia de suprimentos do setor. **Revista Interface Tecnológica**, 12(1), 80-92. 2015.
- LUCHEZZI, C.; TERENCE, M. C. Logística reversa aplicada na construção civil. **Revista Mackenzie de Engenharia e Computação**, 13(1). 2013.
- MALTA, MR; SILVA, RV; GONÇALVES, MC Reciclagem de resíduos da construção civil: estudo de caso em Belo Horizonte. **Revista Ambiente Construído**, v. 13, n. 3, pág. 55-66, 2013.
- MCNEIL, K.; KANG, TH-K. Recycled concrete aggregates: a review. **Int J Concr Struct Mater**, 2013;7(1):61-9.
- MEDEIROS, M. F. et al. Viabilidade econômica de mantas térmicas, produzidas a partir de resíduos de asfalto, para revestimento de telhados. **Revista Matéria**, 24(4). 2019.
- MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais. 2ª ed. São Paulo: **IBRACON**, 2014.
- MELO, JPF e cols. Implementação da Política Nacional de Resíduos Sólidos nos municípios brasileiros: um estudo de caso. **Revista de Administração Pública**, v. 55, n. 3, pág. 510-532, 2021.
- MENDIS, Daylath; HEWAGE, Kasun N.; WRZESNIEWSKI, Joanna. Reduction of construction wastes by improving construction contract management: a multinational evaluation. **Waste management & research**, v. 31, n. 10, p. 1062-1069, 2013.
- MIRANDA, Leonardo Fagundes Roseback; ANGULO, Sérgio Cirelli; CARELI, Élcio Duduchi. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986-2008. **Ambiente Construído**, v. 9, n. 1, p. 57-71, 2009.
- MOREIRA, Lucia Hiromi Higa; FIGUEIREDO, Antonio Domingues de. Influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural. 2010.
- NAYANA, A. Y.; KAVITHA, S. Evaluation of CO2 emissions for green concrete with high volume slag, recycled aggregate, recycled water to build eco environment. **Int. J. Civ. Eng. Technol**, v. 8, p. 703-708, 2017.
- NEVILLE, AM Propriedades do concreto. São Paulo: **Pini**, 2013.
- OLIVEIRA, E. R. et al. Análise da gestão de resíduos da construção civil na cidade de Belo Horizonte. **Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 69, n. 4, p. 485-490, 2016.

OLIVEIRA, F. G. et al. Caracterização e gerenciamento de resíduos de construção e demolição na cidade de Natal/RN. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 13, n. 4, p. 498-507, 2018.

OLIVEIRA, F. M. D. R.; BUFFON, Nathasha Magalhães; FREITAS, S. S. The effectiveness of C&D Waste management considering the stationary buckets contents. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, v. 19, p. 3047-3060, 2014.

OSSA, FO et al. Resíduos de Construção e Demolição: Geração e Tratamento. **Revista Brasileira de Engenharia Civil**, v. 18, n. 1, pág. 99-108, 2016.

PINTO, T. D. P. Gerenciamento de resíduos da construção no Brasil. **In: RCD08, Universidade de São Paulo**, São Paulo. 2008.

PINTO, T. D. P. Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. Tese (Doutor em Engenharia) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo *São Paulo*, 189p. 1999.

Portal TecnoMor. 7 das maiores construções de concreto do mundo. 2023. Disponível em: < <https://tecnomor.com.br/blog/maiores-construcoes-de-concreto-do-mundo/>>. Acesso em 07 de outubro de 2023.

REIS, R.A.B.; SANTOS, A.L.; SANTOS, J.B.A. Reciclagem de resíduos da construção civil: uma revisão bibliográfica. In: Congresso Brasileiro. 2021.

RIBEIRO, J.L.D. Uso de resíduos da construção civil como agregados em concreto. **In: Anais do 58º Congresso Brasileiro do Concreto. Florianópolis: IBRACON**, 2019.

ROCHA, Viviane Gomes et al. Gestão e reuso de resíduo classe A. **Seminário Estudantil de Produção Acadêmica**, v. 13, 2014.

RODRIGUES, P. P. F. Parâmetros de dosagem do concreto. ET – 67. São Paulo: **ABCP**, 1990.

SADATI, Seyedhamed; KHAYAT, Kamal H. Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 126, p. 691-700, 2016.

SANTOS, A. M. et al. Aplicabilidade de agregados reciclados de resíduos de construção civil em argamassas de revestimento. **Ambiente Construído**, v. 15, n. 2, p. 121-138, 2015.

SANTOS, E. C. G. D. Aplicação de resíduos de construção e demolição reciclados (RCD-R) em estruturas de solo reforçado. 2007. (Doctoral dissertation, Universidade de São Paulo).

SEBRAE. ESG no Segmento de Obras Industriais e Corporativas. Brasília, DF: **Câmara Brasileira da Indústria da Construção (CBIC)**, 2023.

SCHULZ, R.; HENDRICKS, F. Recycling of masonry rubble. Recycling of demolished concrete and masonry. **Report of technical committee—demolition and reuse of concrete**, v. 37, 1992.

SILVA, R. The effects of recycled aggregate on the properties of new concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 17(1), 1-4. 2005.

SILVA, D.S.S. Utilização de resíduos de construção e demolição na produção de concreto. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

SILVA, Vinícius Arcanjo da; FERNANDES, André Luís Teixeira. Cenário do gerenciamento dos resíduos da construção e demolição (RCD) em Uberaba-MG. **Sociedade & Natureza**, v. 24, p. 333-344, 2012.

SINAPI (2022). Relatório De Insumos e Composições - Dez/22 – Não Desonerado Caixa Econômica Federal, Rio Branco. 2022.

SMITH, J. (1998). Properties of recycled aggregate and their influence in new concrete production. *Resources, Conservation and Recycling*, 21(1), 77-86.

SOUZA TITO, D. et al. Estrutura de Concreto Pré-Moldado Utilizado na Construção Civil. **Epitaya E-books**, 1(32), 113-131. 2023.

TAM, Vivian WY; SOOMRO, Mahfooz; EVANGELISTA, Ana Catarina Jorge. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). **Construction and Building materials**, v. 172, p. 272-292, 2018.

USEPA, U. (2016). Advancing sustainable materials management: 2014 Fact Sheet. United States Environ. Prot. Agency, Off. L. **Emerg. Manag. Washington, DC**, 20460, 22.

VIEIRA, L. M.; REZENDE, A. S. de. Agregados reciclados de resíduos da construção civil: revisão de literatura. **Revista Tecnologia e Sociedade**, v. 11, n. 22, p. 49-64, 2015.

WANG, Jiayuan; LI, Zhengdao; TAM, Vivian WY. Critical factors in effective construction waste minimization at the design stage: a Shenzhen case study, China. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 82, p. 1-7, 2014.

YANG, Hong et al. Urban construction and demolition waste and landfill failure in Shenzhen, China. **Waste management**, v. 63, p. 393-396, 2017.

YUAN, Hongping; SHEN, Liyin. Trend of the research on construction and demolition waste management. **Waste management**, v. 31, n. 4, p. 670-679, 2011.