



CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL  
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS PARA A MITIGAÇÃO DE  
IMPACTOS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

HENRIQUE COMBA GOMES

VARGINHA  
2021

HENRIQUE COMBA GOMES

AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS PARA A MITIGAÇÃO DE  
IMPACTOS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Centro Federal de Educação Tecnológica  
de Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Orientadora: Profa. Me. Mag Geisielly Alves Guimarães

VARGINHA  
2021

HENRIQUE COMBA GOMES

AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS PARA A MITIGAÇÃO DE  
IMPACTOS DA INDÚSTRIA DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Trabalho de conclusão de curso apresentado  
ao Centro Federal de Educação Tecnológica  
de Minas Gerais como requisito parcial para  
obtenção do título de Engenheiro Civil.

Data de aprovação: 23/08/2021

Banca examinadora:



---

Mag Geiseli Alves Guimarães, Me.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade  
Varginha



---

Denise de Carvalho Urashima, Dra.

Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais (CEFET-MG) - Unidade  
Varginha



---

Lucas Henrique Pedrozo Abreu, Dr.  
Universidade Federal de Lavras (UFLA)

## DEDICATÓRIA

A todos aqueles que me apoiaram durante essa jornada, principalmente meus pais Fábio e Alessandra e meus irmãos Filipe e Daniel, por todos os momentos que estiveram comigo durante esses anos, e a Jesus, senhor e salvador da minha vida.

## AGRADECIMENTOS

A professora Mag Geisielly Alves Guimarães pela amizade, oportunidade, pelo convite a iniciação científica e pela orientação pelas quais esse trabalho pode ser escrito.

A professora Denise de Carvalho Urashima pela amizade, companheirismo e contribuições durante as pesquisas e congressos.

Aos professores Armando Belato Pereira, Carlos Alberto de Carvalho Castro e outros pela amizade, conselhos e contribuições.

Aos engenheiros Diogo Bastos Gouvêa, Débora Vitar Pala, Sebastião Rogério Teixeira, Reinaldo Maia Silva, Mateus Henrique Medeiros e Magno Augusto de Oliveira, pelos ensinamentos, convívio e por ensinar como ser um profissional da engenharia.

Ao CEFET MG pela disponibilização das instalações para os ensaios e pela oportunidade da graduação, a CAPES pelo apoio econômico para as pesquisas.

Ao grupo ECOVIA/LIMPAVIA pelos materiais reciclados doados para os ensaios laboratoriais.

Aos amigos, pelas parcerias, alegrias, orações e apoio. Aos meus companheiros desta jornada acadêmica, pela parceria, apoio e compreensão durante a graduação.

Aos meus irmãos na fé, pelo carinho, apoio e alegrias.

Aos meus queridos tios André, Alexandre e Érica, pelo apoio e amizade.

Ao meu bisavô Antonio pela alegria e apoio.

As minhas queridas avó, Terezinha, e minha tia, Monica, pelo apoio, carinho, amizade e pela leitura e revisão do manuscrito.

Aos meus queridos irmãos, Filipe e Daniel, pela amizade, parceria, alegrias e apoio durante toda a vida e graduação.

A meus amados pais, Fábio e Alessandra, pela amizade, apoio, ensinamentos e conselhos dados durante toda a vida e graduação. Sou grato durante toda a vida.

A Jesus Cristo, meu Deus, amigo e mestre, por tudo o que fez em minha vida.

## EPÍGRAFE

“Para que os seus corações sejam confortados, vinculados juntamente em amor, e tenham toda a riqueza da forte convicção do entendimento, para compreenderem plenamente o mistério de Deus, Cristo, em quem todos os tesouros da sabedoria e do conhecimento estão ocultos”

Colossenses 2:2-3.

## RESUMO

A preservação dos recursos naturais e a busca pelo avanço sustentável tem despertado o interesse de pesquisadores visando obter recursos reutilizáveis. O mesmo ocorre na construção civil pois, além de ser um setor estratégico da economia nacional, é o maior gerador de resíduos sólidos e consumidor de recursos minerais. Os resíduos de construção e demolição (RCD) são passíveis de reciclagem pela obtenção de agregados reciclados advindos de moagens de resíduos em diferentes granulometrias. A incorporação destes agregados reciclados em dosagens de concretos estruturais é uma realidade em países europeus, sendo que no Brasil o seu uso é restrito a concreto não-estruturais. Este Trabalho de Conclusão de Curso tem como objetivo abordar a aplicabilidade de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em dosagens experimentais de concreto visando a mitigação de impactos advindos da indústria da construção civil. Foram realizados ensaios laboratoriais de dosagem de concreto com a substituição total de agregados convencionais por reciclados que foram obtidos em uma usina de reciclagem em Varginha. Os resultados foram de grande importância para compreender as propriedades dos materiais reciclados e suas influências em dosagens de concretos. Os principais resultados obtidos foram: menor massa específica do agregado graúdo reciclado em relação aos demais agregados; alto percentual de material pulverulento na areia reciclada e o concreto dosado com substituição total de agregados convencionais por reciclados atingiram resultados de resistência à compressão na ordem de 10 MPa nos primeiros 07 dias e 15 MPa aos 28 dias. A continuidade destas pesquisas deve ser incentivada buscando-se meios de adequar as propriedades dos agregados reciclados e estabelecer critérios de uso para fins estruturais. Assim sendo, ser possível alcançar a meta estabelecida pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos de aumentar a reciclagem dos resíduos da construção civil a níveis de 25% até o ano de 2040.

**PALAVRAS-CHAVE:** concreto; resíduos de construção e demolição; redução de impactos; reciclagem.

## ABSTRACT

The preservation of natural resources and the search for sustainable advancement have aroused the interest of researchers seeking to obtain reusable resources. The same occurs in civil construction because, besides being a strategic sector of the national economy, it is the largest generator of solid waste and consumer of mineral resources. Construction and demolition waste (CDW) can be recycled by obtaining recycled aggregates from grinding waste into different granulometry. Incorporating these recycled aggregates in structural concrete mixes is a reality in European countries, whereas, in Brazil, their use is restricted to non-structural concrete. This work aims to address the applicability of recycled aggregates from construction and demolition waste in experimental concrete mixtures to mitigate the impacts from the construction industry. Laboratory tests of concrete dosage were performed with the total replacement of conventional aggregates by recycled ones obtained in a recycling plant in Varginha. The results were important to understand the properties of the recycled materials and their influences on concrete dosages. The main results obtained were: smaller specific mass of the recycled coarse aggregate about the other aggregates; a high percentage of powdered material in the recycled sand and the concretes, dosed with 100% of substitution of conventional aggregates by recycled ones, reached values of compressive strength in the order of 10 MPa in the first seven days and 15 MPa at twenty-eight days. The continuity of this research must be encouraged to adequate the properties of recycled aggregates and establish criteria of use for structural purposes. Thus, it will be possible to reach the goal established by the National Solid Waste Plan of increasing the recycling of civil construction waste to levels of 25% by the year 2040.

**KEYWORDS** concrete; construction and demolition waste; impact reduction; recycling.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fontes geradoras dos resíduos da construção e demolição. ....	5
Figura 2: Classificação dos resíduos de construção e demolição por Resoluções CONAMA.....	6
Figura 3: Ordem de prioridade definida na PNRS para gestão dos resíduos sólidos..	7
Figura 4: Classificação dos RSU quanto à origem Segundo a PNRS.....	8
Figura 5: Usina para reciclagem de entulhos. ....	10
Figura 6: Área de transbordo e triagem de entulhos. ....	11
Figura 7: Obtenção de agregados reciclados.....	11
Figura 8: Distribuição das unidades de manejo de RCC no Brasil em 2015. ....	12
Figura 9: Principais consumidores de materiais reciclados produzidos com resíduos no Brasil. ....	12
Figura 10: Usina de reciclagem de entulhos da cidade de Varginha.....	14
Figura 11: Exemplos de agregados da construção civil. ....	16
Figura 12: Exemplo de composição dos agregados de RCD obtidos em duas cidades brasileiras.....	17
Figura 13: Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de resíduos no Brasil, em 2015. ....	18
Figura 14: Absorção de água de partículas cerâmicas e de cimento nos agregados de RCD. ....	19
Figura 15: Exemplos de estruturas de concreto armado no Brasil. ....	21
Figura 16: Ilustração da zona de transição interfacial (ZTI) do concreto.....	22
Figura 17: Exsudação interna em concretos. ....	23
Figura 18: Aplicabilidade de agregados reciclados em concretos estruturais: .....	25
Figura 19: Perda de abatimento de concretos com uso de agregados reciclados. ...	30
Figura 20: Absorção média de água e variação de trabalhabilidade em função da porcentagem de RCD substituído. ....	31
Figura 21: Comportamentos de massa específica em concretos reciclados com substituições parciais de agregado miúdo natural por reciclado de composição mista. ....	32
Figura 22: Absorção de água em concretos (% de massa) com incorporação de agregados reciclados. ....	33

Figura 23: Resultados de resistências mecânicas em concretos dosados com agregados reciclados aos 7 e 28 dias (intervalo de confiança de 68%).	34
Figura 24: Resistência à compressão pela relação a/c por incorporação de agregados miúdo (AMR) e graúdo (AGR) reciclados aos 28 dias.	35
Figura 25: Resistências mecânicas de concretos com incorporação de agregados graúdos reciclados (AGR) por moagens de concretos.	36
Figura 26: Módulos de elasticidade de concretos com incorporação de agregados graúdos reciclados (AGR) por moagens de concretos.	38
Figura 27: Análise tátil-visual da composição mista do agregado graúdo reciclado.	40
Figura 28: Ensaio de composição granulométrica.	41
Figura 29: Determinação de material pulverulento por lavagem.	41
Figura 30: Ensaio de massa específica de areias.	42
Figura 31: Ensaio de massa específica de britas.;	44
Figura 32: Ensaio de massa unitária dos agregados.;	45
Figura 33: Cimento Portland utilizado na pesquisa.	46
Figura 34: Pré-molhagem dos agregados reciclados	49
Figura 35: Dosagem dos concretos em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 400L.	50
Figura 36: Procedimento de calibração do recipiente cilíndrico.	51
Figura 37: Determinação da massa específica do concreto fresco.	51
Figura 38: Determinação do abatimento do tronco de cone.	52
Figura 39: Moldagem de corpos de prova de concreto.	53
Figura 40: Corpos de prova para ensaios de resistência à compressão	54
Figura 41: Ensaio de resistência à compressão em prensa hidráulica.	54
Figura 42: Composição granulométrica das areias natural e reciclada.	58
Figura 43: Composição granulométrica das britas convencional e reciclada.	58
Figura 44: Materiais componentes da brita reciclada por agregados mistos.	59
Figura 45: Taxa de ganho de resistência à compressão.	61
Figura 46: Resultados de resistência à compressão média.	62
Figura 47: Corpos de prova de concreto após ensaios de resistência à compressão.	63

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Quantidade de RCC coletado regiões do Brasil de 2010 a 2018. ....	9
Tabela 2: Comparativo entre parâmetros dos agregados convencionais e reciclados. .....	20
Tabela 3: Requisitos para agregado reciclado e concreto estrutural reciclado. ....	26
Tabela 4: Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios.....	27
Tabela 5: Recomendações dos agregados totais reciclados e compostos para uso em materiais cimentícios.....	27
Tabela 6: Diferenças nas propriedades do concreto reciclado comparadas ao concreto com agregado natural utilizando a mesma relação água/cimento e 100% de substituição de agregado. ....	29
Tabela 7: Massa específica de concretos dosados com substituições parciais de agregados convencionais por agregados reciclados.....	31
Tabela 8: Consumo dos materiais para dosagem de 40 L de concretos convencional e reciclado. ....	48
Tabela 9: Caracterização física dos agregados. ....	56
Tabela 10: Índice de consistência pelo abatimento do tronco de cone. ....	59
Tabela 11: Massa específica pelo método gravimétrico.....	60
Tabela 12: Resultados de resistência à compressão. ....	61
Tabela 13: Resultados estimados de resistência à tração e módulo de elasticidade. .....	63
Tabela 14: Custo unitário dos materiais para dosagem de 1m <sup>3</sup> de concreto. ....	64

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- ABRECON – Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição
- ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
- ACI – Instituto Americano de Concreto
- ATT – Área de Transbordo e Triagem
- ARC – Agregado reciclado de concreto
- ARM – Agregado de resíduo misto ou agregado reciclado misto
- CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente
- DMC – Dimensão Máxima Característica
- DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral
- ICC – Indústria da Construção Civil
- MF – Módulo de Finura
- MMA – Ministério do Meio Ambiente
- NBR – Norma Brasileira
- NM – Norma do Mercosul
- PPA – Plano Plurianual da União
- PNMA – Política Nacional do Meio Ambiente
- PNRS – Política Nacional dos Resíduos Sólidos
- PLANARES – Plano Nacional dos Resíduos Sólidos
- RCA – Agregado Reciclado de Concreto
- RCC – Resíduos da Construção Civil
- RCD – Resíduos de Construção e Demolição
- RSU – Resíduos Sólidos Urbanos
- SINDUSCON-MG – Sindicato da Indústria da Construção Civil no Estado de Minas Gerais
- SISNAMA – Sistema Nacional do Meio Ambiente
- SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento
- SUASA – Sistema Unificado de Atenção a Sanidade Agropecuária

SNVS – Sistema Nacional de Vigilância Sanitária

ZTI – Zona de Transição na Interface

## LISTA DE SÍMBOLOS

% – Porcentagem

a/c – Relação água cimento

dm<sup>3</sup> – Decímetro cúbico

g – Gramas

g/cm<sup>3</sup> – Grama por centímetro cúbico

h – Horas

Kg – Quilograma

L – Litros

L/kg – Litro por quilograma

Kg/dm<sup>3</sup> – Quilograma por decímetro cúbico

Kg/m<sup>3</sup> – Quilograma por metro cúbico

KN/m<sup>3</sup> – Quilo newtons por metro cúbico

min – Minutos

mm – Milímetros

N – Newtons

MPa – Megapascal (medida de resistência)

MPa/s – Megapascal por segundo (acrécimo de tensão)

GPa – Gigapascal (medida de resistência)

R\$/kg – Custo por quilograma

ton/hab – Toneladas por habitante

ton/hab/dia – Toneladas por habitantes por dia

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	1
1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO .....	3
1.2.1. Objetivo Geral .....	3
1.2.2. Objetivos Específicos.....	3
1.3. JUSTIFICATIVA .....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	5
2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD) .....	5
2.1.1. Origem e classificação .....	5
2.1.2. Plano Nacional de Resíduos Sólidos .....	8
2.1.3. Usinas de reciclagem de resíduos da construção civil.....	10
2.1.4. Usina de reciclagem de entulhos de Varginha.....	13
2.2. AGREGADOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL.....	15
2.2.1. Agregados convencionais .....	15
2.2.2. Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição .....	17
2.3. CONCRETOS .....	20
2.3.1. Considerações iniciais .....	20
2.3.2. Microestrutura do concreto .....	21
2.4. APLICABILIDADE DE AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS.....	24
2.4.1. Contextualização .....	24
2.4.2. Influência dos agregados reciclados no comportamento de concretos...29	
<b>3. MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	39
3.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL .....	39
3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	39
3.2.1. Considerações iniciais .....	39
3.2.2. Análise tátil-visual do agregado graúdo reciclado.....	40
3.2.3. Composição granulométrica .....	40
3.2.4. Determinação de material pulverulento .....	41
3.2.5. Determinação da massa específica de agregado miúdo .....	42
3.2.6. Determinação da massa específica de agregado graúdo.....	43

3.2.7. Determinação da massa unitária e volume de vazios .....	44
3.3. DEFINIÇÃO DA DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO ABCP/ACI..	45
3.4. DEFINIÇÃO DE PRÉ-MOLHAGEM DOS AGREGADOS RECICLADOS .....	48
3.5. PROCEDIMENTO DE MISTURA DO CONCRETO EM BETONEIRA .....	49
3.6. DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO .....	50
3.6.1. Massa específica no concreto fresco .....	50
3.6.2. Consistência pelo abatimento do tronco de cone .....	52
3.7. DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO .....	52
3.7.1. Resistência à compressão axial.....	52
3.7.2. Estimativas de demais parâmetros mecânicos .....	55
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>56</b>
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS .....	56
4.2. PARÂMETROS DOS CONCRETOS DOSADOS.....	59
4.2.1. Propriedades no estado fresco .....	59
4.2.2. Propriedades no estado endurecido .....	60
4.3. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA.....	64
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS</b>	<b>66</b>
5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	66
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	68
<b>REFERÊNCIAS BIBLIGRÁFICAS.....</b>	<b>69</b>
<b>APÊNDICE A: DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO .....</b>	<b>72</b>



# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1. CONTEXTUALIZAÇÃO

Atualmente, a indústria da construção civil (ICC) é um setor estratégico da economia nacional, sendo responsável, no ano de 2016, por cerca de 5,2% do Produto Interno Bruto (PIB) brasileiro, pela geração de 8,5% de empregos dentre o total de pessoas empregadas no país (BRASIL, 2020) e, assim, tornando-o um dos importantes ramos da produção nacional e indispensável para o atual desenvolvimento do país (NAGGALI, 2014).

Nas últimas décadas, a ICC vem recebendo a atenção de pesquisadores de todo o mundo por terem se tornado um dos principais agentes causadores de impactos ambientais (YUAN *et al.*, 2012; YUAN; SHEN; LI, 2011; JAILON; POON; CHIANG, 2009).

No Brasil, este setor é responsável por uma grande quantidade de resíduos sólido urbano (RSU), tendo alcançado no ano de 2018, segundo a ABRELPE (2019), a geração de 122.012 toneladas do resíduo. Também, a ICC é o principal agente da exploração e consumo de 20% a 75% de recursos minerais (AGOPYAN; JOHN, 2011; ÂNGULO *et al.*, 2003).

Os resíduos sólidos gerados pela ICC são denominados como Resíduos de Construção e Demolição (RCD) pela Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002) ou Resíduos da Construção Civil (RCC), segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010), os quais tratam de resíduos produzidos ao longo de toda a cadeia construtiva e que requerem classificação para uma adequada gestão integrada, ou seja, acondicionamento, transporte, destinação final e, também, sua reutilização ou reciclagem.

A exploração de recursos minerais como agregados da construção civil se tornou um problema nos últimos anos. A obtenção de areias naturais por dragagens e desmontes hidráulicos provoca a perda da biodiversidade, comprometimento do regime de vazão dos cursos d'água, assoreamento de rios pela destruição das margens e matas ciliares, agravamento da crise hídrica, escassez deste mineral, dentre outros (MARQUES; CAMPOS, 2012).

A mineração de rochas britadas aumenta a poluição do ar por partículas sólidas em suspensão, assim como os impactos supracitados, cujos danos podem ser

irreversíveis, afetando a sustentabilidade ambiental (VIEIRA; REZENDE, 2015). Segundo Mancin (2012), no Brasil, a mineração de agregados pode corresponder à produção anual de 623 milhões de toneladas/ano.

Uma das alternativas para a mitigação de impactos ambientais, sociais e econômicos é a produção de agregados reciclados a partir de RCD do tipo materiais cimentícios e cerâmicos, cuja viabilidade técnica desses materiais em dosagens de concretos vem sendo estudadas por pesquisadores em todo o mundo nas últimas décadas (BUTTLER, 2003; CABRAL *et al.*, 2010; KATZ, 2003; LEITE, 2001). Dentre as contribuições, aponta-se a obtenção de concretos para fins estruturais e que, no caso de substituições parciais, bem como um incremento no desempenho mecânico destes concretos em relação ao convencional (XIAO; LI; ZHANG, 2005).

É importante ressaltar que os países europeus já empregam agregados reciclados nas construções desde a Segunda Guerra Mundial, os quais foram fundamentais na reconstrução das cidades devastadas no pós-guerra com o uso de escombros das construções para produzir concreto e asfalto (LEITE, 2001; NAGGALI, 2014).

Na engenharia civil brasileira, é cada vez mais eminente a necessidade de se buscar alternativas que visam a redução de RCD gerados, grande parte ainda gerados por falhas na gestão de estoques e produção, o uso consciente de recursos minerais como agregados e, em conjunto, a reinserção de RCD a própria cadeia produtiva. Portanto, a manutenção da ICC como setor estratégico social e econômico, conjuntamente à preservação do meio ambiente.

Dentro dessa perspectiva, este trabalho de conclusão de curso tem como objetivo abordar os conceitos presentes na literatura acerca do tema, contribuindo para a manutenção do desenvolvimento econômico sustentável com a reinserção dos resíduos de construção e demolição na forma de agregados e o emprego destes na indústria da construção civil. Para tanto, foram realizados ensaios laboratoriais com a incorporação de agregados reciclados miúdo e graúdo em dosagem de concreto, os quais foram obtidos em usina de reciclagem de entulhos na cidade de Varginha, Minas Gerais, com o intuito de compreender a influência dos agregados reciclados nas propriedades de concretos nos estados fresco e endurecido.

## **1.2. OBJETIVOS DO TRABALHO**

### **1.2.1. Objetivo Geral**

Discorrer sobre a aplicabilidade de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição em dosagens experimentais de concreto.

### **1.2.2. Objetivos Específicos**

Como pontos específicos desta pesquisa, destacam-se:

- Realizar estudo bibliográfico acerca das propriedades dos agregados reciclados e a sua influência em dosagens para concretos com fins estruturais;
- Obter agregados reciclados em usina de beneficiamento localizado na cidade de Varginha, bem como a sua caracterização em laboratório;
- Efetuar a dosagem experimental de concretos com uso de agregados reciclados para compreensão das propriedades dos materiais constituintes e do concreto;
- Avaliar a influência por substituição total de agregados convencionais pelos reciclados nas propriedades físicas e mecânicas dos concretos;
- Avaliar o custo-benefício da incorporação de agregados reciclados em concretos em comparação a concretos dosados com agregados convencionais.

## **1.3. JUSTIFICATIVA**

O concreto é a mistura cimentícia presente em grande parte das tipologias construtivas da engenharia civil brasileira, sendo responsável pela exploração do ambiente natural para retirada de agregados que constitui em torno de 60% a 70% do volume de concreto (BAUER, 2008; ISAÍÁ, 2007).

Uma das alternativas que vem sendo estudadas em instituições de ensino é a utilização de RCD como agregados reciclados na própria ICC em dosagens de concretos, buscando-se a mitigadora de impactos sociais, ambientais e econômicos gerados por este segmento da economia. Contudo, a inserção de agregados reciclados para fins de dosagens estruturais de concreto é um tema que ainda carece de estudos, no sentido de buscar alternativas que visam compreender e absorver a heterogeneidade ainda presente nos agregados reciclados, considerado como o principal entrave de seu uso para fins estruturais.

A norma ABNT NBR 15116:2021 permite o uso de agregados reciclados em concretos para fins estruturais. Entretanto, ainda existe o atual paradigma dos profissionais da construção civil que não aceitam este material como agregado da construção civil mesmo que para fins não estruturais, dentre os atuais e futuros profissionais. Segundo Miranda *et al.* (2016), o comércio de agregados reciclados apresenta certa rejeição das indústrias, as quais alegam a inexistência de legislação que incentive o consumo (31%), a elevada carga tributária (26%), a falta de conhecimento do mercado (26%), a baixa qualidade do resíduo (11%) e a dificuldade de acesso comercial da empresa (6%).

Outro fator importante é o estímulo a implantação de mais usinas de reciclagens de RCD em conjunto com políticas públicas para a adequada gestão e reciclagem, viabilizando economicamente a inserção de agregados reciclados em diferentes localizações e o transbordo de demais resíduos para demais fins de reuso.

As publicações nacionais pela Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) e, mais recentemente, a consulta pública do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2020), apresentam princípios e diretrizes para a gestão integrada de resíduos que contemplam os RCD, além de atribuírem responsabilidades aos agentes geradores dos resíduos sólidos.

Mesmo com a existência de tais instrumentos legais e de diretrizes que visam a não geração, a redução, reutilização, reciclagem e tratamentos destes resíduos sólidos (BRASIL, 2002; 2010; 2021), ainda é necessária a adoção de práticas para a gestão integrada entre as esferas federal, municipal e estadual conjuntamente aos geradores de RCD e a incorporação rotineira de agregados reciclados nas práticas construtivas. Importante ressaltar que a meta atribuída a gestão dos RCC pelo Plano Nacional de Resíduos Sólidos é aumentar a sua reciclagem de modo a alcançar níveis de 25% de reciclagem de RCC até o ano de 2040 no Brasil (BRASIL, 2020).

Portanto, a questão abordada neste trabalho visa contribuir nos estudos de concretos dosados com agregados reciclados e de como tais incorporações podem influenciar em propriedades nos estados fresco e endurecido e, assim, agregar na viabilidade quanto ao uso destes agregados reciclados dentro da construção civil.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO (RCD)

#### 2.1.1. Origem e classificação

Os Resíduos de Construção e Demolição (RCD), também denominados de Resíduos da Construção Civil (RCC) e que são popularmente conhecidos como entulhos, são Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados durante processos de construção, reforma, escavação ou demolição (ABRECON, 2021). Segundo a Sinduscon-MG (2014), as pequenas reformas configuram-se como as principais geradoras de resíduos da construção, conforme apresentado na Figura 1.

**Figura 1:** Fontes geradoras dos resíduos da construção e demolição.



Fonte: SINDUSCON-MG, 2014.











No atual cenário global, estes materiais se configuram como um dos principais problemas no ambiente urbano por conta de sua geração, sendo produzidos em grandes volumes por conta de gestões inadequadas e desperdícios de materiais em obras e execuções ineficientes de projetos, entre outros; e pelo seu descarte inadequado, ocasionando aterramento de nascentes e corpos d'água, assoreamento de rios e consequentes enchentes e riscos de desabamento de residências próximas, vetor de doenças como a dengue e febre amarela quando acumulado, entre outros (ABRECON, 2021; CHEN *et al.*, 2017; SADATI; KHAYAT, 2016; MIRANDA *et al.*, 2016).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) corresponde ao órgão governamental cuja função é estabelecer normas, limites e/ou padrões federais de

poluição ambiental, delimitando a ação dos Estados e Prefeituras para com o meio ambiente visando à salubridade ambiental (NAGGALI, 2014).

Neste contexto, os RCD são definidos pela Resolução CONAMA nº 307 (BRASIL, 2002), alterada pela Resolução CONAMA nº 469 (BRASIL, 2015), como provenientes de construções, reformas, demolições de obras de construção civil e os resultantes de preparação e escavação de solos, classificando-os em quatro classes (Figura 2). A referida Resolução CONAMA estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil, além de atribuir responsabilidades a cada gerador e a importância social e ambiental de bem gerir os resíduos, dentre outros aspectos.

**Figura 2:** Classificação dos resíduos de construção e demolição por Resoluções CONAMA.

	CARACTERÍSTICA DO MATERIAL	EMPREENHIMENTO (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 permitam 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 objetivos 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.

Como apresentado na Figura 2, os RCD são passíveis de reutilização ou reciclagem, classificados de Classe A como materiais agregados (BRASIL, 2002). A reciclagem destes resíduos contribui diretamente na diminuição pela demanda por agregados convencionais para a construção civil, mitigando impactos econômicos, modificação de paisagens e impactos ambientais pela sua extração e mineração, (OSSA *et al.*, 2016; BESSA; MELLO; LOURENÇO, 2019), que alcançam níveis em torno de 50% (KWAN *et al.*, 2012; MALTA; SILVA; GONÇALVES, 2013).

Segundo o Anuário Mineral Brasileiro, produzido pelo Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM) de 2010, a construção civil consumiu, da produção bruta, 68,96% de areia e 40,71% de brita, e da produção beneficiada, 96,54% de areia e

63,73% de brita, sendo o estado de São Paulo o maior consumidor de areia de produção bruta (23,01%) e beneficiada (70,83%) e de brita de produção beneficiada (42,01%).

Outra classificação importante aos RCD é a sua inclusão como um Resíduo Sólido Urbano (RSU) pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Sancionada pela Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010 (BRASIL, 2010) é um documento da Legislação Federal que integra a Política Nacional do Meio Ambiente (PNAM), coordenada pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), órgão responsável pelo planejamento estratégico de ações referentes a esse setor.

A PNRS apresenta no Artigo 4º o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, isoladamente ou em regime de cooperação com Estados, Distrito Federal, Municípios ou particulares, com vistas à gestão integrada dos resíduos sólidos, assim como os objetivos a serem alcançados abordados nos Artigos 6º e 7º (BRASIL, 2010). Destaca-se que, dentre os objetivos da PNRS, o Artigo 6º, inciso VIII, trata-se de “[...] VIII - o reconhecimento do resíduo sólido reutilizável e reciclável como um bem econômico e de valor social, gerador de trabalho e renda e promotor de cidadania [...]” (Art. 6º: da LEI Nº 12.305, de 02 DE AGOSTO DE 2010).

Segundo o Artigo 9º, a PNRS define que, na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos, deve ser seguida a seguinte ordem de prioridade para o correto tratamento dos resíduos (BRASIL, 2010), indicados na Figura 3.

**Figura 3:** Ordem de prioridade definida na PNRS para gestão dos resíduos sólidos.



Fonte: SINDUSCON-MG, 2014.

Além disso, a PNRS faz a classificação dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) quanto a sua origem (Figura 4) e, em seu Artigo 13º, a inclusão dos resíduos gerados na engenharia civil, a saber: “[...] (h) resíduos da construção civil: os gerados nas construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, incluídos os resultantes da preparação e escavação de terrenos para obras civis [...]” (Art. 13. da LEI Nº 12.305, de 02 DE AGOSTO DE 2010).

**Figura 4:** Classificação dos RSU quanto à origem Segundo a PNRS.



Fonte: MOVIECO (2013).

Por último, a norma ABNT NBR 10.004:2004 classifica os RCC como resíduos sólidos não perigosos e inertes (Classe IIB) e, portanto, se enquadra nesta classificação para a PNRS.

### 2.1.2. Plano Nacional de Resíduos Sólidos

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), publicado para consulta pública de 31 de julho de 2020 até 16 de novembro de 2020, é a estratégia em âmbito nacional visando o cumprimento das metas e objetivos da Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) com um horizonte de 20 anos (BRASIL, 2020). Baseia-se no



diagnóstico da atual situação dos resíduos sólidos no Brasil, seguido da proposição de cenários que contemplam as tendências nacionais, internacionais e macroeconômicas.

O Planares define, assim como a PNRS, que a ordem de prioridade na gestão e gerenciamento dos resíduos sólidos é a não geração, seguida da redução. Contudo, como mencionado no próprio documento, no cenário atual a geração dos resíduos sólidos urbanos tem aumentado nos últimos anos (BRASIL, 2020), incluindo-se os RCC.

O Brasil gera em torno de 84 milhões de metros cúbicos de resíduos de construção civil e, segundo o Panorama da ABRELPE, cerca de 45 milhões de toneladas de RCC foram coletados pelos municípios no ano de 2018, no qual a região Sudeste destaca-se pela sua maior geração em termos de tonelada/dia, conforme a Tabela 1 (BRASIL, 2020).

**Tabela 1:** Quantidade de RCC coletado regiões do Brasil de 2010 a 2018.

<b>Região</b>	<b>Coletado (ton/dia)</b>	<b>Índice de coleta (ton/hab/dia)</b>
Norte	4.709	0,259
Nordeste	24.123	0,425
Centro-Oeste	13.255	0,824
Sudeste	63.679	0,726
Sul	16.246	0,546

Fonte: BRASIL, 2020, adaptada.

O Planares aponta que, para os resíduos produzidos pela Indústria da Construção Civil, por serem classificados como não degradáveis (materiais cimentícios, metais, telhas cerâmicas, entre outros), não têm seu volume diminuído com o decorrer do tempo, esgotando-se os espaços destinados a sua disposição e gerando um problema para o seu gerenciamento (BRASIL, 2020).

Em termos de diretrizes estabelecidos no Planares para o RCC, foram estabelecidos a eliminação das áreas de disposição final inadequada de RCC, bem como o aumento da reciclagem de RCC. Para tanto, foram estabelecidas estratégias, dentre as quais têm-se:

- Criação de linhas de financiamento para a recuperação de áreas degradadas pela disposição inadequada de RCC;
- Desenvolvimento de capacitação técnica aos agentes diretamente envolvidos na gestão e beneficiamento de RCC;

- Orientação aos setores público e privado sobre a construção de áreas para destinação final adequada de RCC;
- Incentivo ao uso de RCC ou de materiais agregados advindos do seu beneficiamento em obras públicas e privadas financiadas com recursos públicos;
- Criação de instrumentos econômicos para disponibilização de financiamentos destinados a aquisição de equipamentos e sistemas para reduzir a geração de RCC e ao seu aproveitamento.

### 2.1.3. Usinas de reciclagem de resíduos da construção civil

A reciclagem de RCC é realizada em usinas de reciclagem certificadas pela Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção e Demolição (ABRECON), podendo se organizar na forma de usina fixa (assentada em terreno), usina móvel (assentada sobre esteiras ou rodas, geralmente usadas em obras com grande volume de RCD) ou usina híbrida (usina sem esteiras ou rodas, que é puxada por caminhões munck). A Figura 5 exemplifica uma usina fixa de reciclagem de entulhos.

**Figura 5:** Usina para reciclagem de entulhos.



Fonte: SINDUSCON-MG, 2014.

Para a obtenção dos agregados RCD, primeiramente os entulhos que chegam às usinas são descarregados em pátios para o processo de triagem nas Áreas de Transbordo e Triagem (ATT) a fim de separar os materiais de Classe A, ou seja, passíveis de reciclagem (Figura 6). Posteriormente, são estocados separadamente e levados aos britadores para moagens em diversos tamanhos. Finalmente, são

classificados conforme granulometrias (Figura 7a) pela passagem em peneiras padronizadas e, assim, prontos para serem reutilizados na indústria da construção civil como areia, brita, bica corrida, pedrisco, dentre outros (Figura 7b).

**Figura 6:** Área de transbordo e triagem de entulhos.



Fonte: BESSA; MELLO; LOURENÇO, 2019.

**Figura 7:** Obtenção de agregados reciclados.



(a) Processo de moagem.



(b) Pilha de RCD de granulometria compatível com areia.

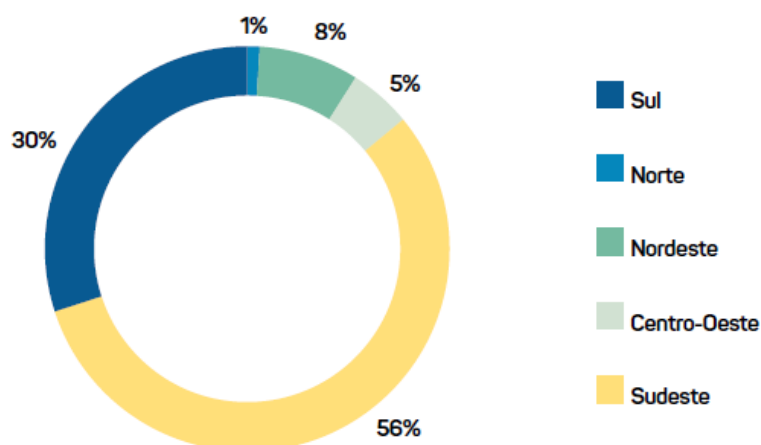
Fonte: BESSA; MELLO; LOURENÇO, 2019.

Em termos de reciclagem, na pesquisa realizada por Miranda *et al.* (2016), estima-se que no Brasil tem-se instaladas 310 usinas de reciclagem de RCC entre públicas e privadas, que em torno da metade destas em operação estão sendo subutilizadas, com produção real na faixa de 45% de sua capacidade máxima, por exemplo, devido à falta de matéria-prima destinada às usinas para reciclagem e pela baixa demanda por agregados reciclados na construção civil. Este último, uma das causas gira em torno da resistência da própria engenharia civil na sua reutilização no Brasil, cujo paradigma ainda precisa de ser vencido (BUTTLER; CORREA; RAMALHO, 2005).

Segundo o Planares, a região Sudeste abrigou o maior quantitativo de instalações para o manejo de RCC no Brasil no ano de 2015 (Figura 8), destacando-se os estados

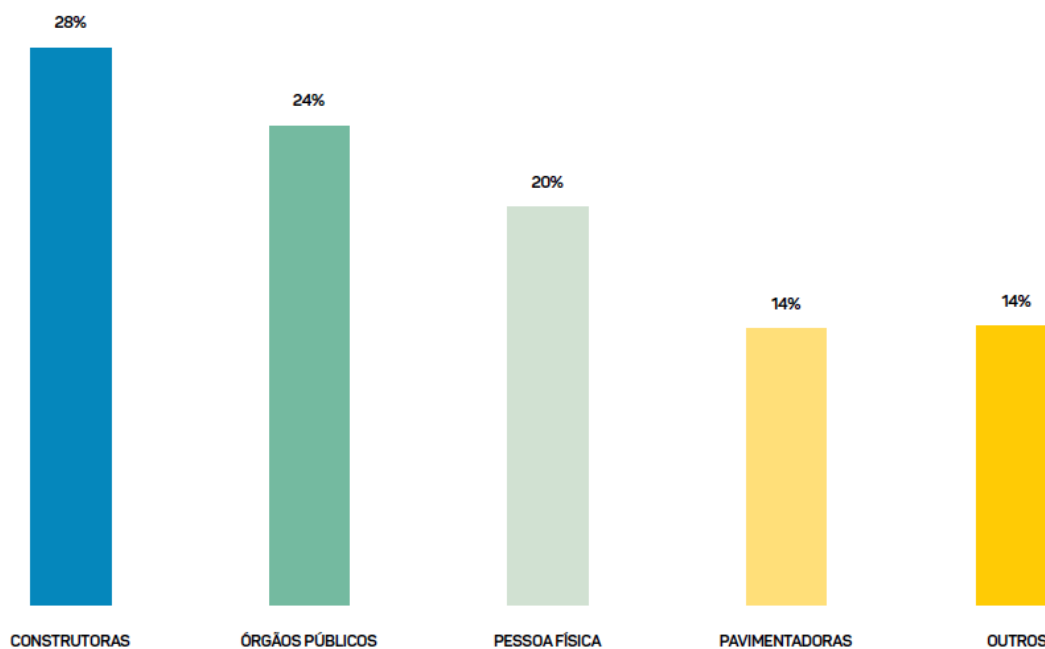
de São Paulo e Minas Gerais com maiores números de unidades de manejo para estes resíduos (BRASIL, 2020). Dentre os principais consumidores de agregados reciclados, destacam-se as construtoras e os órgãos públicos, conforme mostra a Figura 9.

**Figura 8:** Distribuição das unidades de manejo de RCC no Brasil em 2015.



Fonte: BRASIL, 2020.

**Figura 9:** Principais consumidores de materiais reciclados produzidos com resíduos no Brasil.



Fonte: BRASIL, 2020.

#### **2.1.4. Usina de reciclagem de entulhos de Varginha**

No município de Varginha está localizada a primeira usina de reciclagem de RCD do Sul de Minas, a ECOVIA - Reciclagem de Resíduos da Construção Civil. A usina pertence ao grupo LIMPAVIA, que atua desde o ano de 2008 na região visando o descarte adequado de entulhos para a preservação do meio ambiente.

A usina é filiada a ABRECON e se enquadra na definição como usina fixa e sem encontra em operação desde 2016 e sendo a única usina de reciclagem de entulhos localizada no Sul de Minas Gerais com operação em fluxo contínuo e, também, que recebe resíduos de construção e demolição de terceiros para a reciclagem.

A produção de agregados reciclados de diferentes granulometrias é realizada a partir da separação de resíduos recebidos no pátio de triagem, atualmente em torno de 65 caçambas diárias, correspondendo ao volume de entulhos de 200m<sup>3</sup>. A parcela passível de reciclagem como agregados corresponde ao percentual de 65% de resíduos recebidos diariamente na usina. Além da produção de agregados reciclados, a empresa também produz e comercializa blocos de concreto de vedação com empregado de agregados reciclados.

A usina apresenta estrutura de um britador que realiza a moagem dos agregados e, após este processo, os resíduos são classificados por um conjunto de peneiras por diferentes granulometrias, como apresentado na Figura 10. Ou seja, a partir da moagem de um mesmo montante de resíduos, é possível obter diferentes faixas granulométricas, que são armazenadas separadamente entre baias de agregados pela sua condução por esteiras separadoras.

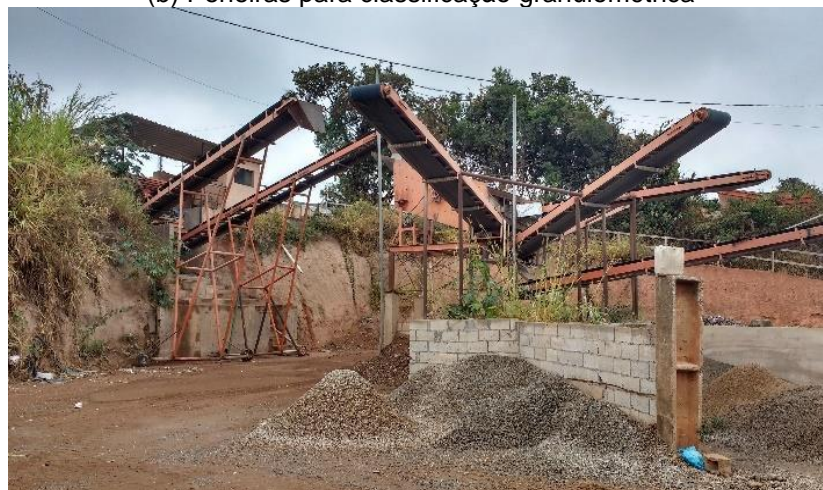
**Figura 10:** Usina de reciclagem de entulhos da cidade de Varginha.



(a) Britador



(b) Peneiras para classificação granulométrica



(c) Esteiras e peneiras para classificações granulométricas



(d) Agregado miúdo



(e) Agregado graúdo



(f) Pedrisco.

Fonte: Do autor.

## 2.2. AGREGADOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

### 2.2.1. Agregados convencionais

Conceitualmente, agregados são materiais particulados, não coesivos, de atividade química praticamente nula, classificados segundo a origem (natural ou artificial), dimensão (miúdo e graúdo) e por densidade (leve, normal ou pesado) e que, ao serem misturados ao cimento Portland com água, adquirem um aspecto compacto (BAUER, 2008; ABNT NBR 9935, 2011).

A classificação dos agregados quanto a dimensões baseia-se na composição granulométrica, que consiste em separar os grãos em diferentes peneiras, cujas aberturas estão definidas (ABNT NBR 9935:2011; ABNT NBR NM 248:2003):

- **Pulverulento:** material passante # nº200 (0,075 mm);
- **Agregado miúdo:** material passante na peneira nº4 (# 4,8 mm) e retido na peneira nº 100 (# 0,150 mm).
- **Agregado graúdo:** material retido na peneira nº4 (# 4,8 mm).

Outra classificação comumente atribuída aos agregados é quanto a sua origem, podendo ser (ABNT NBR 9935:2011):

- **Naturais:** Material pétreo granular que pode ser utilizado tal e qual encontrado na natureza, submetido à lavagem, classificação ou britagem. Exemplos: depósitos de areia, cascalho e seixos.
- **Artificiais:** Material granular resultante de processo industrial envolvendo alteração mineralógica, química ou físico-química da matéria-prima original. Exemplos: britas de diferentes granulometrias, areia de brita, argila expandida, escórias de alto-forno e agregados de resíduos de construção e demolição.

A areia obtida por dragagem dos rios ou desmontes hidráulicos é classificado como agregado miúdo de origem natural (Figura 11a) e as oriundas da britagem de rochas são consideradas agregado miúdo artificial (Figura 11b). As britas, obtidas da combinação de rochas para diferentes dimensões são classificadas como agregado graúdo artificial, sendo atribuído aos cascalhos, seixos rolados e pedregulhos a classificação de agregados graúdos naturais, conforme a Figura 11c.

**Figura 11:** Exemplos de agregados da construção civil.



(a) Agregado miúdo natural.



(b) Agregado miúdo artificial.



(c) Agregado graúdo artificial.

Fonte: Do autor.

Uma das maiores aplicabilidades dos agregados é em dosagens de concretos, podendo representar em torno de 60 a 75% do volume da mistura, de modo que sua tipologia, características e qualidade influenciam diretamente no desempenho dos concretos (BAUER, 2008; ISAÍA, 2007). Segundo Mehta e Monteiro (2014), as propriedades podem ser definidas em três categorias, baseados nos fatores microestruturais e fatores relacionados ao seu processamento:

- Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, modulo de elasticidade e sanidade;
- Características dependentes das condições prévias de exposição e fatores relacionados ao processo de fabricação: tamanho, forma e textura das partículas;
- Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, dureza, modulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.



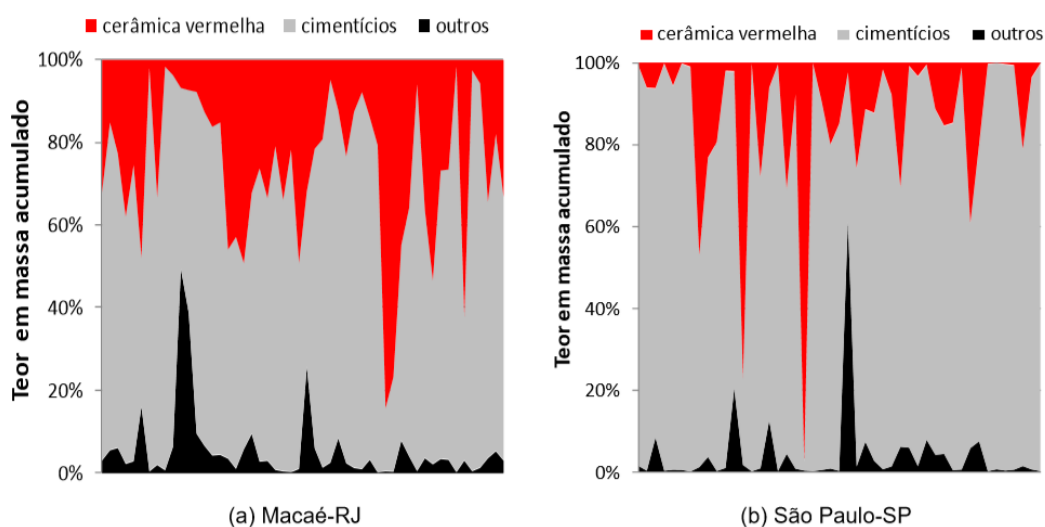
Propriedades como porosidade, massa específica, composição granulométrica, forma e textura superficial determinam as características do concreto no estado fresco. A composição mineralógica do agregado afeta resistência final e à abrasão de concretos, assim como o módulo de elasticidade, influenciando em demais propriedades do concreto no estado endurecido, como a durabilidade e o comportamento estrutural (MEHTA; MONTEIRO, 2014; NEVILLE; BROOKS, 2013).

### 2.2.2. Agregados reciclados de resíduos de construção e demolição

Pesquisa realizada por Miranda *et al.* (2016) a partir do levantamento entre usinas de reciclagem no Brasil reportou que os RCD que chegam para reprocessamento correspondem em torno de 50% do tipo misto (cimentícios e cerâmicos), 19% são predominantemente cinzas (concreto, argamassa e cimento), 11% são de composição cerâmica (cerâmica, telhas de barro e congêneres) e 1% de origem predominantemente concreto.

Como o material coletado para a produção de agregados reciclados provém quase que integralmente de caçambas postas nas ruas ou internamente às obras de construção civil, os materiais-base para o refinamento em agregados são diretamente dependentes do material descartado, cuja tipologia ainda pode se diferenciar por região em que se encontra (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011), conforme a Figura 12.

**Figura 12:** Exemplo de composição dos agregados de RCD obtidos em duas cidades brasileiras.



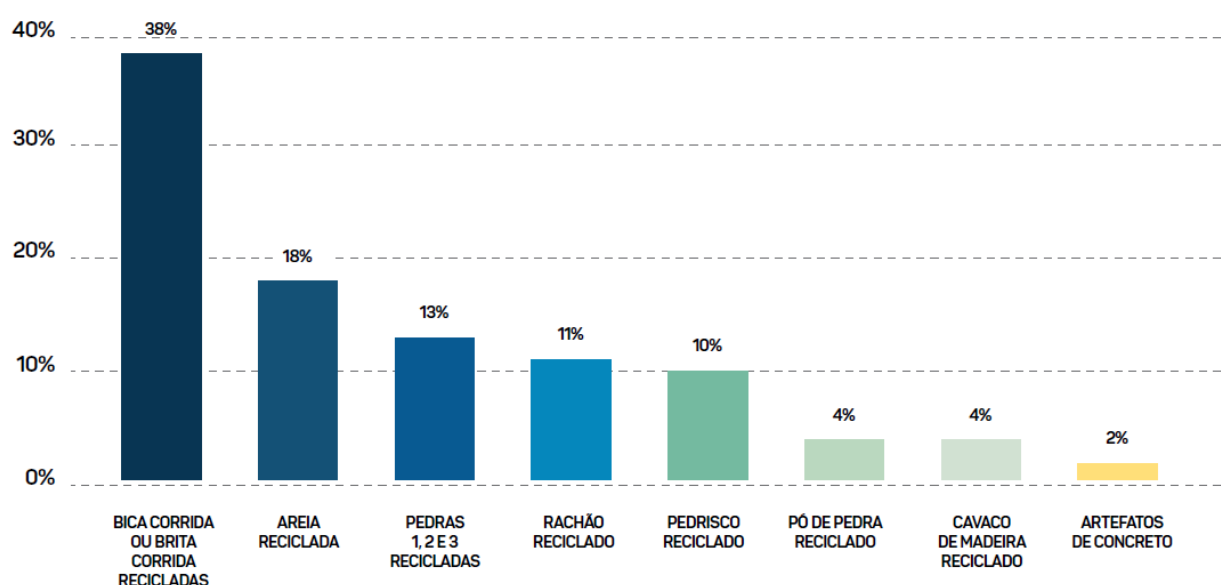
Fonte: ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011.

Por conta da tipologia construtiva predominante do Brasil ser o concreto armado, o maior percentual de materiais descartados provém de matriz cimentícia. Contudo, a

heterogeneidade exemplificada atinge diretamente as características dos materiais que utilizam os resíduos de construção e demolição como matéria prima, que é considerado um dos principais dificultadores de uso em concretos (ver item 2.4.2).

Em termos de granulometrias de agregados reciclados produzidos em usinas de reciclagem no Brasil, a Figura 13 apresenta um quantitativo para o ano de 2015 publicado no Planares (BRASIL, 2020), que depende também da composição dos RCD de Classe A, procedimentos adotados para a sua triagem nas usinas, tecnologias de moagens e classificações por peneiras, dentre outros.

**Figura 13:** Materiais produzidos pelas unidades de reciclagem de resíduos no Brasil, em 2015.

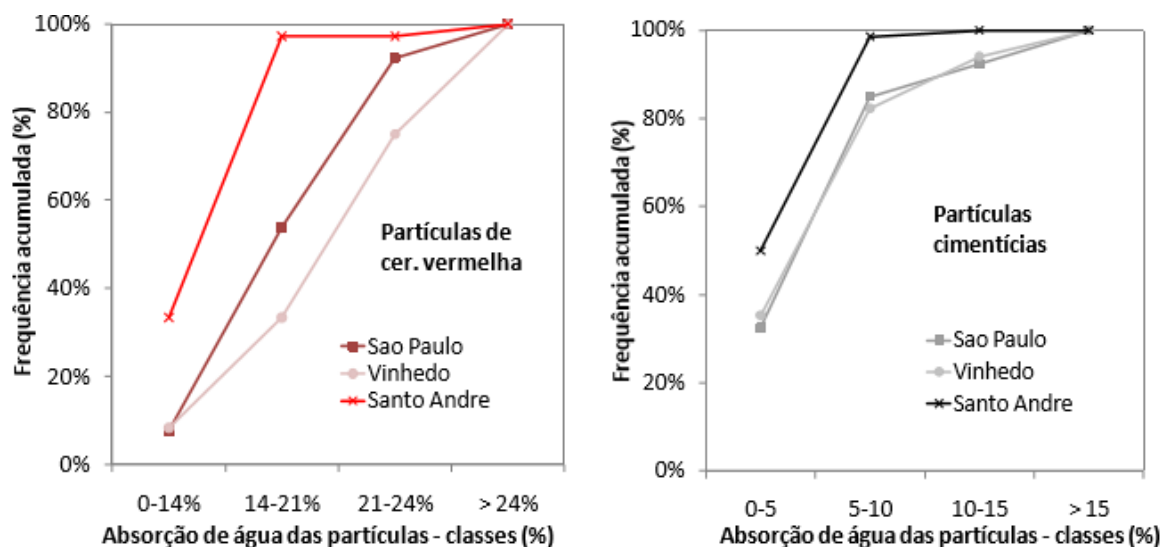


Fonte: BRASIL, 2020.

A porosidade dos agregados é uma das propriedades diretamente dependentes da composição dos agregados reciclados, sendo a absorção de água por agregados de cerâmica vermelha mais acentuadas em relação a agregados de origem cimentícia, como exemplificado na Figura 14 (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011).

Quanto menor a porosidade do agregado, maior será a sua resistência aos esforços mecânicos ou de abrasão, ou seja, espera-se que os agregados reciclados sejam mais frágeis do que os convencionais. Além disso, agregados mais porosos são mais friáveis e possuem maior teor de finos do que os convencionais, aumentando a absorção de água quando aplicados às matrizes cimentícias (ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

**Figura 14:** Absorção de água de partículas cerâmicas e de cimento nos agregados de RCD.



Fonte: ÂNGULO; FIGUEIREDO, 2011

Outro ponto importante é que os agregados RCD detêm menor massa específica do que os agregados convencionais por serem compostos por materiais variáveis e com presença de partículas pulverulentos e porosidade, impactando em maiores valores de absorção de água e de teor de pulverulentos em comparação aos agregados convencionais (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Rodrigues e Fucale (2014), por exemplo, obtiveram resultados de absorção de água para agregado miúdo natural igual a 1% e para o agregado reciclado igual a 10%, além de teor de material pulverulento de 1% para agregado natural e de 8,7% para o agregado reciclado. Em termos de massa específica, o agregado miúdo reciclado apresentou resultado de 2,54 kg/dm<sup>3</sup> e o agregado natural igual a 2,62 kg/dm<sup>3</sup>, ou seja, uma diminuição de 3,1% em relação ao parâmetro do agregado convencional (RODRIGUES; FUCALE, 2014).

Viera, Dal Molin e Lima (2004) observaram absorção de água para agregado graúdo convencional igual a 2,5% e para o reciclado igual a 6,04% e massas específicas de 2,70 kg/dm<sup>3</sup> (convencional) e 2,52 kg/dm<sup>3</sup> (reciclado), correspondendo a diminuição de 6,7% em comparação ao agregado graúdo convencional. Demais autores publicaram resultados com tendências similares de parâmetros, como exemplificado na Tabela 2.

**Tabela 2:** 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	0,42	1,22	2,64	2,87	1,44	1,56
Reciclado de concreto	7,55	5,65	2,56	2,27	1,54	1,43
Reciclado de argamassa	4,13	9,52	2,60	2,01	1,44	1,39
Reciclado de cerâmica vermelha	10,69	15,62	2,35	1,86	1,46	1,26

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

A composição dos agregados reciclados de RCD influenciará diretamente nas propriedades dos concretos nos estados frescos e endurecido, da mesma forma que para dosagens de concretos com agregados convencionais, conforme será apresentado no item 2.4.2.

## 2.3. CONCRETOS

### 2.3.1. Considerações iniciais

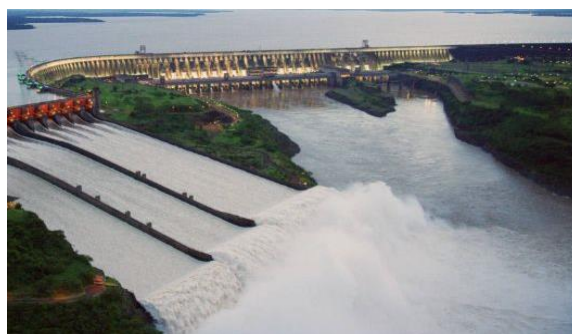
Concretos são compósitos constituídos pelos agregados graúdos e miúdos envoltos em uma pasta de cimento Portland composta de uma solução aquosa com grãos de cimento Portland e espaços preenchidos por ar. O ar pode ser encontrado envolto na pasta sob forma de bolhas ou em espaços interligados, determinada pelo nível de plasticidade da mistura (BAUER, 2008). Também podem ser adicionados ao material, em menores quantidade, aditivos químicos, pigmentos, fibras, agregados especiais e adições minerais, cada vez mais frequentes na indústria da construção civil (ISAIA, 2007).

Os valores das propriedades do concreto são dependentes, entre outros fatores, pelo teor de cimento presente na mistura, expressa pela relação entre os teores de vazios e cimento Portland, considerando os vazios como volume de ar. De forma mais comum, a relação água/cimento, importante para o ajuste do traço e ganhos de propriedades mecânicas pela hidratação do cimento Portland ao longo do tempo. Tais propriedades ainda influenciam em procedimentos de transporte, lançamento e adensamento do concreto sem segregação e que, depois de endurecido, se apresente de forma homogênea e com o mínimo de porosidade (BAUER, 2008).

A importância do concreto na construção civil está atrelada ao fato do material ser extremamente versátil, capaz de se adequar aos mais variados ambientes, desde altas temperaturas até obras submarinas, conforme exemplos na Figura 15.

A durabilidade do concreto em ambientes agressivos, diferente dos outros materiais comumente utilizados na indústria da construção civil, como madeira e aço, incentivou o seu uso em grandes escalas (MEHTA E MONTEIRO, 2008). Contudo, para o pleno emprego do concreto é necessário associá-lo ao aço para combater a baixa resistência à tração, dando origem a tipologia concreto armado, conforme requisitos de dimensionamento presentes na ABNT NBR 6118:2014.

**Figura 15:** Exemplos de estruturas de concreto armado no Brasil.



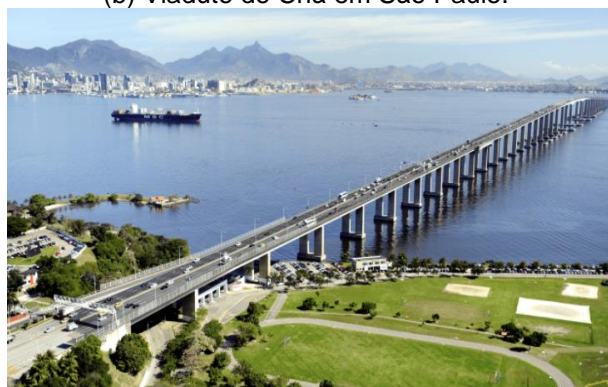
(a) Usina Hidrelétrica de Itaipu.



(b) Viaduto do Chá em São Paulo.



(c) Ponte estaiada em São Paulo.



(d) Ponte Rio-Niterói.

Fonte: (a) FOLHA DE SÃO PAULO, 2019; (b) JORNAL ESTADO DE SÃO PAULO, 2019; (c) REVISTA VEJA, 2019; (d) REVISTA ÁREA, 2018.

### 2.3.2. Microestrutura do concreto

O concreto é constituído em fases, sendo que na visão macro tem-se a fase argamassa e a fase gráuda e, do ponto de vista microestrutural, a presença da zona de transição interfacial (ZTI) na interface argamassa-brita (NEVILLE; BROOKS, 2013).

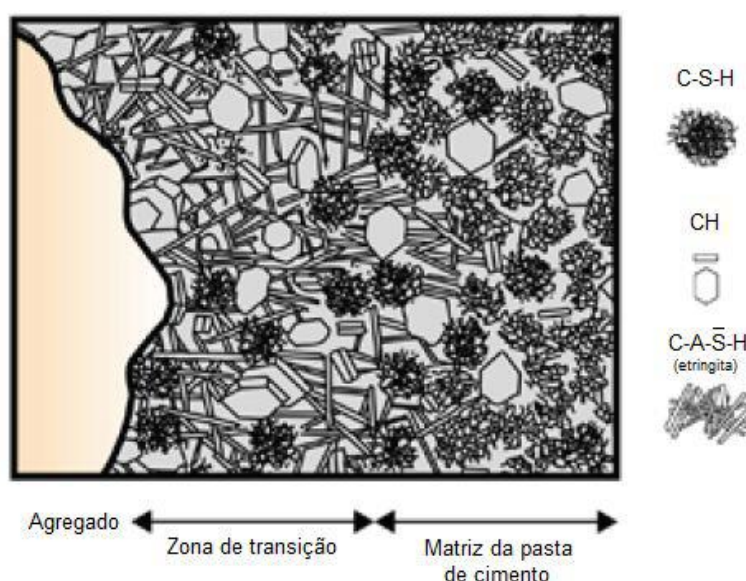
Segundo Mehta e Monteiro (2014), a zona de transição interfacial (ZTI) dos concretos é uma camada delgada, normalmente com espessura de 10 a 50  $\mu\text{m}$  em

torno do agregado graúdo, sendo comumente a região mais fraca do concreto e, portanto, exerce grande influência no comportamento mecânico dos concretos. Tal fragilidade se deve aos seguintes fatores (MEHTA; MONTEIRO, 2014):

- Maior concentração de etringita, que são os primeiros compostos de hidratação de cimento gerados e caracterizados como cristais grandes, porosos com baixa resistência mecânica;
- Os cristais de hidróxido de cálcio hidratados, sumarizados como CH e C-S-H, posicionam-se paralelamente à superfície do agregado, favorecendo a existência de planos de clivagem ou fissuras internas no concreto;
- Presença de porosidade devido ao filme de água que se forma em torno do agregado graúdo.

A Figura 16 ilustra a zona de transição interfacial (ZTI), bem como a presença dos compostos cristalinos do concreto oriundos da hidratação do Cimento Portland ao longo do tempo.

**Figura 16:** Ilustração da zona de transição interfacial (ZTI) do concreto.

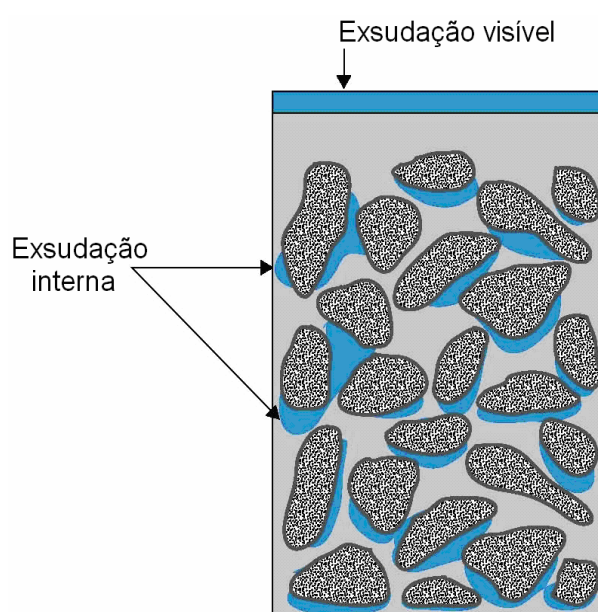


Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014.

A ZTI exerce influência na resistência do concreto, pois no concreto fresco recém-compactado, filmes de água se formam em torno das partículas de agregado graúdo, conhecido como exsudação interna no concreto, contribuindo para uma maior relação água/cimento na região de ZTI. Com o tempo, os produtos de hidratação são gerados e a argamassa ficará aderida à superfície do agregado graúdo.

Neste caso, o tamanho dos agregados graúdos influencia diretamente na ZTI e, portanto, no comportamento mecânico do concreto, pois quanto maior o índice de forma, relação entre espessura e comprimento, maior a possibilidade de formação de películas ou lâmina d'água em seu entorno, enfraquecendo ainda mais a ZTI. Assim, a aplicabilidade de agregados graúdos mais cúbicos, ao invés dos lamelares e alongados, também é uma escolha importante em dosagens de concreto (BAUER, 2008; ISAÍÁ, 2007; MEHTA; MONTEIRO, 2014). A Figura 17 ilustra o efeito de exsudação interna no concreto.

**Figura 17:** Exsudação interna em concretos.



Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014.

Além disso, outro fator que diminui a resistência da ZTI no concreto é a presença de microfissuras distribuídas no concreto, que são dependentes da relação entre os seguintes parâmetros: tamanho e distribuição granulométrica dos agregados, consumo de cimento, relação água/cimento, grau de adensamento do concreto no estado fresco, condições de cura, umidade ambiente e histórico térmico do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Com a existência das microfissuras na fase argamassa do concreto, acréscimos de cargas aplicadas em torno de até 70% da resistência à compressão máxima se tornam grandes o suficiente para o início da fissuração. Ao se espalharem gradualmente, ocorrem junções com as microfissuras presentes nas ZTI que, ao se tornarem contínuas, induzirão o rompimento do concreto (BAUER, 2008; ISAÍÁ, 2007;

MEHTA; MONTEIRO, 2014). Ressalta-se que, no caso de esforços por compressão, é necessária uma quantidade considerável de energia para a formação e a extensão das fissuras, tornando o material mais resistente a esse esforço, ao contrário de esforços à tração ou à flexão (NEVILLE; BROOKS, 2013).

## **2.4. APLICABILIDADE DE AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS**

### **2.4.1. Contextualização**

Atualmente, uma das principais tipologias para o desenvolvimento da indústria da construção civil, aliada à preservação do meio ambiente, é a utilização dos resíduos da construção e demolição para produção de concretos, os “*recycled concrete aggregates*” ou concretos de agregado reciclado (RCA).

A norma ABNT NBR 15116, que trata do uso de agregados reciclados de Classe A pela Resolução CONAMA nº307 (BRASIL, 2002), em sua primeira edição de 2004 permitia o seu uso apenas para fins não estruturais, ou seja, para classes de resistências C10 e C15 (ABNT NBR 15116:2021).

A referida norma foi atualizada no ano de 2021 e apresentou mudanças significativas, tais como (ABNT NBR 15116:2021):

- Apresentação de três subclasses de agregados, sendo agregado reciclado de concreto (ARCO), agregado reciclado cimentício (ARCI) e agregado reciclado misto (ARM);
- Cálculo da quantidade de água necessária para a realização da pré-molhagem dos agregados RCD;
- Possibilidade do uso de agregados reciclados para dosagens de concretos com fins estruturais, desde que sejam respeitadas as devidas recomendações, como o uso restrito de ARCO, teor de substituição de 20% dos agregados convencionais pelo reciclado e uso em concretos das classes de agressividade I e II da ABNT NBR 6118:2014.

Vale ressaltar que o trabalho foi realizado anteriormente a nova edição da norma, seguindo as especificações da versão antiga do documento.

Vários países já apresentam normas para o uso de agregados RCD em concretos para fins estruturais, como CUR-VB: 1984 (Holanda), DIN 4226-100:2002 (Alemanha) e a OT 70085:2006 (Suíça). Essas normatizações permitiram o desenvolvimento de



tecnologias para à aplicação de concretos com agregados reciclados em novas construções dentro do cenário atual, como exemplificado na Figura 18 (GERIN; SALES; DE NARDIN, 2019).

**Figura 18:** Aplicabilidade de agregados reciclados em concretos estruturais:



(a) Prédio Administrativo da Fundação Federal Alemã para o Meio Ambiente (DBU)



(b) Wadspirale, Alemanha



(c) Edifício da escola "Im Birch"



(d) Complexo habitacional de "Werdwies"

Fonte: GERIN; SALES; DE NARDIN, 2019.

Demais países europeus têm estabelecido novas normas técnicas para produção de concreto estrutural reciclado (Tabela 3), dimensionando e executando estruturas de concreto produzidas com as composições estabelecidas de agregados reciclados (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

**Tabela 3:** Requisitos para agregado reciclado e concreto estrutural reciclado.

Norma	Classificação	Composição	Taxa de absorção máxima de água (%)	Densidade seca em estufa (kg/m <sup>3</sup> )	Classe de resistência máxima (MPa)	Porcentagem substituição do agregado grão reciclado	Uso de agregado miúdo reciclado
RILEM TC 121-DRG (1994)	Tipo I	Agregados reciclados de alvenaria	20	≥1500	C16/20	Tamanho > 4 mm até 100%	
	Tipo II	Agregados de concreto	10	≥2000	C50/60	Tamanho > 4 mm até 100%	Tamanho < 4 mm – não recomendado
	Tipo III	Mistura = 80% Natural + 20% Agregado (máx. Reciclado)	-	≥2400	Sem limite superior	Tamanho > 4 mm até 20%	
Portugal E 471 (2006)	ARB 1	≥ 90% agregados do concreto	7	≥ 2200	C40/50	25%	Não recomendado
	ARB2	≥ 70% agregados do concreto	7	≥ 2200	C35/45	20%	
Espanha EHE (2008) – Annex 15	RCA	Agregados do concreto	7	≥ 2100	≤ 40	Tamanho > 4mm até 20%	Não recomendado
Alemanha DIN 4226-100: Agregados Reciclados	Tipo I Fragmentos de concreto/ Areia de concreto britado	≥ 90% do concreto e agregados naturais de acordo com DIN 4226-1	10	≥ 2000	De acordo com DIN EM 206 - 1 e DIN 1045 - 2 – C30/37	WO ≤ 45	Tamanho < 2mm – não recomendado
	Tipo II Fragmentos de concreto/ Areia artificial de construção	≥ 90% do concreto e agregados naturais de acordo com DIN 4226-1	15	≥ 2000		WF ≤ 35	
						WO ≤ 35	
						WF ≤ 25	

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014, adaptada.

A norma ABNT NBR 15116:2021 supracitada define os parâmetros mínimos, expostos na Tabela 4 e na Tabela 5, para a aplicação dos agregados RCD para dosagens de concretos.

**Tabela 4:** Requisitos específicos dos agregados totais reciclados e compostos para uso em produtos e compósitos cimentícios.

Ensaio		Limite (%)	Requisito	Método de ensaio
Materiais indesejáveis	Teor	< 1	Anexos A e B da norma	Anexos A e B da norma
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)
Finos (<0,075 mm)	Teor para concretos protegido por desgaste superficial	< 12	ABNT NBR 7211	ABNT NBR NM 46
	Teor para concretos submetidos a desgaste superficial	< 10		

OBSERVAÇÕES: <sup>1</sup>ARCO: agregado reciclado de concreto; <sup>2</sup>ARCI: Agregado reciclado cimentício.

<sup>3</sup>ARM: agregado reciclado misto.

Fonte: ABNT NBR 15116:2021, adaptada.

**Tabela 5:** Recomendações dos agregados totais reciclados e compostos para uso em materiais cimentícios.

Ensaio		Limite sugerido	Requisito	Método de ensaio
Teor de cerâmica vermelha ou branca não polida	Classe ARCO	0%	Anexos A e B da norma	Anexos A e B da norma
	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		

OBSERVAÇÕES: <sup>1</sup>ARCO: agregado reciclado de concreto; <sup>2</sup>ARCI: Agregado reciclado cimentício.

<sup>3</sup>ARM: agregado reciclado misto.

Fonte: ABNT NBR 15116:2021, adaptada.

Estudos recentes discorrem que as propriedades dos concretos produzidos com agregados RCD apresentam variabilidade principalmente devido à heterogeneidade de composição dos resíduos de Classe A moídos como agregados graúdos e/ou miúdos, na proporção parcial ou total, associados a uma determinada relação

água/cimento (a/c) (VIEIRA; DAL MOLIN; LIMA, 2004; RODRIGUES; FUCALE, 2014; GERIN; SALES; NARDIN, 2019).

As principais variabilidades, normalmente obtidas, são: diminuição das resistências de compressão e tração, menor módulo de elasticidade e menor massa específica, maior retenção de água e índice de vazios, menor trabalhabilidade, entre outros (CABRAL *et al.*, 2007; CABRAL *et al.* 2009).

Angulo e Figueiredo (2018) afirmam que agregados reciclados cimentícios com absorção de água de até 7,0% podem substituir o agregado convencional em 20%, conjuntamente ao aumento do consumo de cimento de mesma ordem de grandeza, tornando-se possível produzir concretos com propriedades mecânicas semelhantes ao concreto convencional. Algumas normas europeias limitam à incorporação de agregados graúdos reciclados de 20% até 25% para fins estruturais, como na Holanda e na Espanha, mesmo quando originados de resíduos de concretos (SOARES; BRITO; FERREIRA, 2014).

As compreensões acerca das heterogeneidades são consideradas primordiais para se estabelecer requisitos para o uso de concretos reciclados para fins estruturais. Angulo e Figueiredo (2011) enumeraram os seguintes fatores pertinentes ao uso de agregados de RCD, a saber:

- Segregar os resíduos logo na origem e na triagem nas usinas a fim de evitar a contaminação dos agregados por materiais indesejados e contaminantes;
- Uso em substituição ao agregado convencional sem elevar a porosidade média a níveis muito altos e evitar incremento no consumo de cimento;
- Produzir agregados de RCD com menor porosidade possível para a produção de concretos estruturais, conforme as exigências da ABNT NBR 7211:2019, referenciada pela ABNT NBR 12655:2015 para os requisitos relativos aos agregados para concreto.

Algumas das normas internacionais são mais restritivas do que a ABNT NBR 15116:2021 (Tabela 4 e 5) em termos de contaminantes (< 1%) e teores de sulfatos (DIN, 2002). Merece destaque a norma japonesa que define parâmetros de controle para agregados de RCD de alta qualidade, cuja absorção de água do agregado reciclado de concreto deve ser menor do que 3% (TOMOSAWA *et al.*, 2005).

## 2.4.2. Influência dos agregados reciclados no comportamento de concretos

### 2.4.2.1. Contextualização

É inegável a importância dos agregados no comportamento de concretos nos estados fresco e endurecido. Entretanto, devido à natureza heterogênea dos RCD, tem-se dificuldades de caracterização e obtenção de propriedades padronizadas entre as usinas geradoras de agregados reciclados (CABRAL *et al.*, 2007).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), concretos dosados com agregados reciclados apresentam, pelo menos, 67% da resistência de concretos dosados com agregados convencionais, devido a influência, dentre outros fatores, da porosidade dos agregados e da zona de transição interfacial (LEITE, 2001). Demais propriedades de concretos com agregados reciclados, em relação aos concretos dosados com agregados convencionais, estão sumarizados na Tabela .

**Tabela 6:** Diferenças nas propriedades do concreto reciclado comparadas ao concreto com agregado natural utilizando a mesma relação água/cimento e 100% de substituição de agregado.

Propriedade	Relação
Resistencia à compressão	Redução em até 25%
Resistencia à tração direta e na flexão	Redução em até 10%
Módulo de elasticidade	Redução em até 45%
Retração por secagem	Aumento em até 70%
Fluência	Aumento em até 50%
Absorção de água	Aumento em até 50%
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: MEHTA; MONTEIRO, 2014, adaptada.

Os tópicos a seguir discorrem sobre algumas das principais influências da incorporação dos agregados reciclados em propriedades dos concretos.

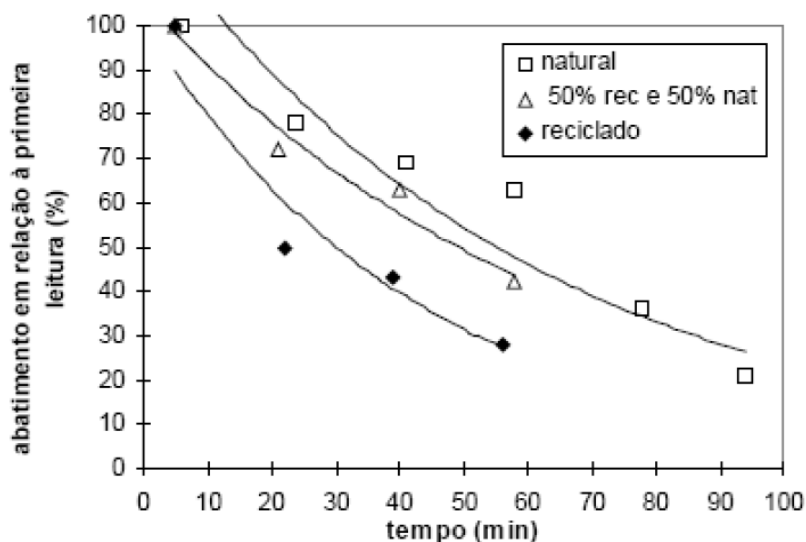
### 2.4.2.2. Redução da trabalhabilidade

Em termos de propriedade no estado fresco, a incorporação de agregados reciclados ocasiona a redução de trabalhabilidade em comparação aos concretos de agregados convencionais. A diminuição da trabalhabilidade ocorre devido ao maior teor de material pulverulento presente nos agregados reciclados, que eleva a absorção da água de dosagem (FROTTE *et al.*, 2017; GERIN; SALES; NARDIN, 2019).

Entende-se como trabalhabilidade o parâmetro obtido por ensaios de abatimento do tronco de cone segundo a ABNT NBR 16889:2020, que será discorrido em Materiais e Métodos (item 3.6.2).

Frotte *et al.* (2017), realizando-se dosagens com substituições parciais de agregados miúdos por agregados reciclados, observaram a diminuição de trabalhabilidade ao se aumentar o percentual de substituição. Para o concreto de referência, o abatimento obtido foi de 60mm e com substituições de 25% (C25%) e 50% (C50%), os valores de abatimento foram de 50mm e 35mm, respectivamente. Figura e Figura exemplificam demais resultados da literatura.

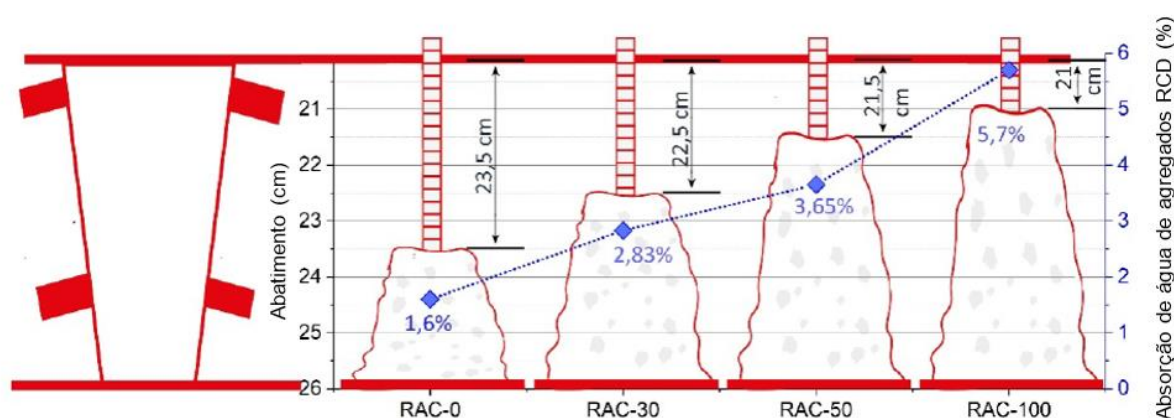
**Figura 19:** Perda de abatimento de concretos com uso de agregados reciclados.



Fonte: LATTERZA, 1998.

A compensação de água que será absorvida pelo agregado reciclado pode ser adicionada na água de amassamento ou na pré-saturação dos agregados reciclados para diminuir a perda de plasticidade em concretos frescos (GERIN; SALES; NARDIN, 2019; LEITE, 2001). No caso desta pesquisa, foi adotado o acréscimo de água para pré-molhagem igual a 80% do valor de absorção total do agregado reciclado, o que está de acordo com os valores sugeridos na literatura para essa pré-molhagem, pois variam entre 50% (LEITE, 2001; VIEIRA, 2003; EVANGELISTA; BRITO, 2010) até 80% (ETXEBERRIA *et al*, 2007). Contudo, deve-se atentar que este acréscimo de água pode impactar em diminuição das propriedades mecânicas de concretos reciclados, se adicionado em excesso (ANGULO; FIGUEIREDO, 2011).

**Figura 20:** Absorção média de água e variação de trabalhabilidade em função da porcentagem de RCD substituído.



Fonte: GERIN; SALES; NARDIN, 2019, adaptada.

#### 2.4.2.3. Redução da massa específica

Concretos reciclados tendem a apresentar diminuição nos valores de massa específica à medida que ocorre o aumento do teor de substituição dos agregados RCD. Isto é devido aos valores de massa específica dos agregados reciclados, compostos por materiais bastante variáveis e grande presença de pulverulentos, serem menores em relação aos agregados convencionais (RODRIGUES; FUCALE, 2014; CABRAL *et al.*, 2007; VIEIRA; DAL MOLIN; LIMA, 2004). A Tabela 7 exemplifica a influência de substituições parciais (25% e 50%) de agregados convencionais por reciclados na massa específica de concretos.

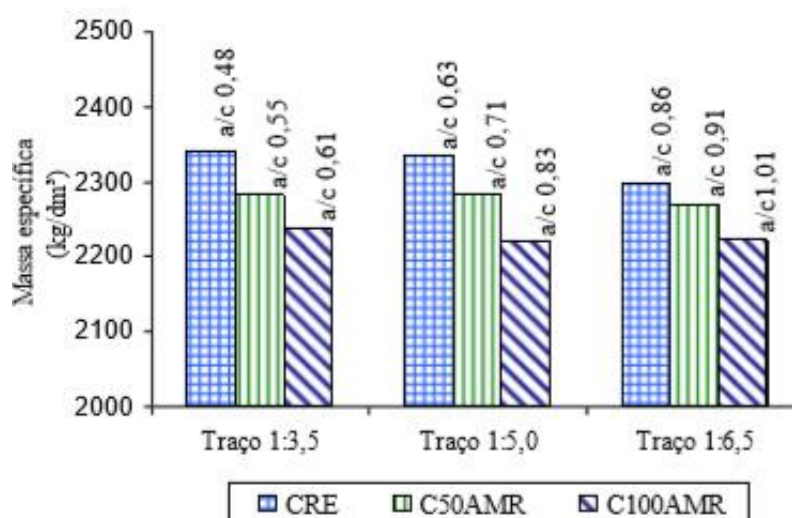
**Tabela 7:** Massa específica de concretos dosados com substituições parciais de agregados convencionais por agregados reciclados.

Massa específica	Concreto de referência (0% substituição)	25% de substituição (C25%)	50% de substituição (C50%)
Real	2,54 g/cm <sup>3</sup>	2,54 g/cm <sup>3</sup>	2,55 g/cm <sup>3</sup>
Seca	2,23 g/cm <sup>3</sup>	2,12 g/cm <sup>3</sup>	2,08 g/cm <sup>3</sup>
Saturada	2,35 g/cm <sup>3</sup>	2,28 g/cm <sup>3</sup>	2,26 g/cm <sup>3</sup>

Fonte: FROTTE *et al.*, 2017, adaptada.

De forma análoga a Tabela 7, o estudo proposto por Rodrigues e Fucale (2014) na Figura 21 mostra que a massa específica dos concretos diminui com o aumento da proporção de agregados reciclados. Na pesquisa foram utilizadas dosagens com substituição de 50% (C50AMR) e 100% (C50AMR) dos agregados miúdos convencionais pelos miúdos reciclados de composição mista, AMR (composição cimentícia + cerâmica).

**Figura 21:** Comportamentos de massa específica em concretos reciclados com substituições parciais de agregado miúdo natural por reciclado de composição mista.



Fonte: RODRIGUES; FUCALE, 2014.

#### 2.4.2.4. Aumento de porosidade

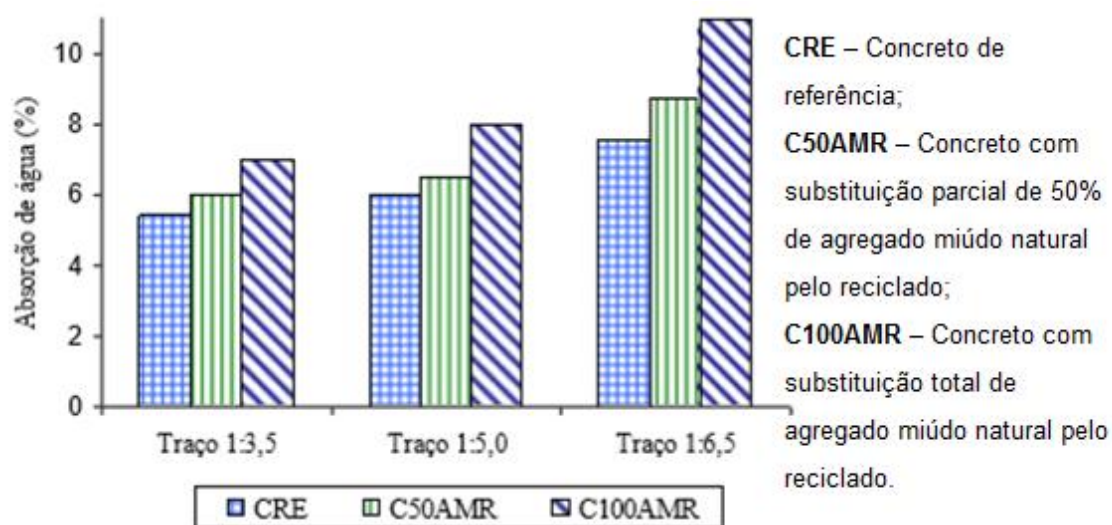
O aumento do percentual de RCD adicionados à mistura também eleva os teores de porosidade, que são acompanhados com aumento da absorção de água devido à maior presença de material pulverulento, resultando no aprisionamento de mais ar na mistura fresca (FROTTE *et al.*, 2017).

Gerin, Sales e Nardin (2019) apresentaram em dosagens de concretos com substituições parciais de agregados convencionais por reciclados resultados que, conforme se acrescentam estas substituições (30%, 50% e 100%), aumenta-se a proporção do índice de vazios (14,37% para concreto sem substituição; 14,63% para C30%; 15,00% para C50%; 15,76% para C100%). Em consequência, aumentos em absorções de água pelo concreto endurecido (6,28% para concreto sem substituição; 6,49% para C30%; 6,81% para C50%; 7,27% para C100%).

A Figura 22 apresenta resultados para o aumento de absorção de água conforme acrescentam-se percentuais de substituição de agregados miúdos naturais por reciclados (50% e 100% de substituição), além de traços com maiores proporções em massa de agregados (1:5 e 1:6,5) apresentarem elevações na absorção de água.



**Figura 22:** Absorção de água em concretos (% de massa) com incorporação de agregados reciclados.



Fonte: RODRIGUES; FUCALE, 2014, adaptada.

#### 2.4.2.5. Variabilidade nas propriedades de resistência

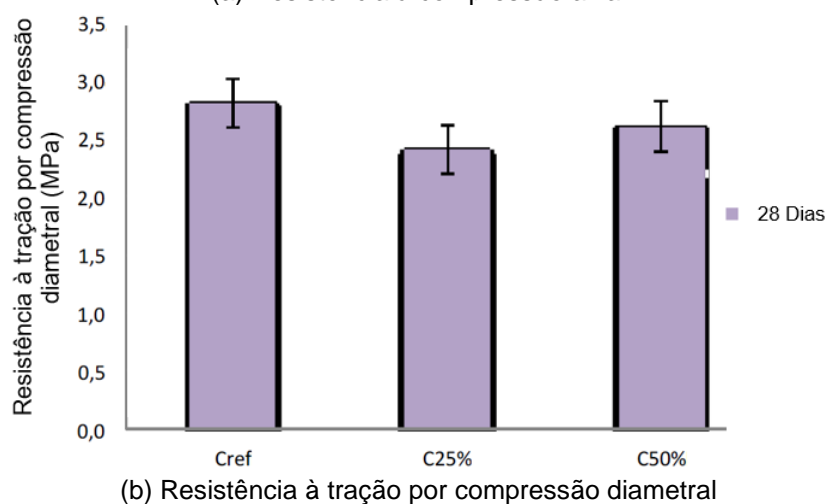
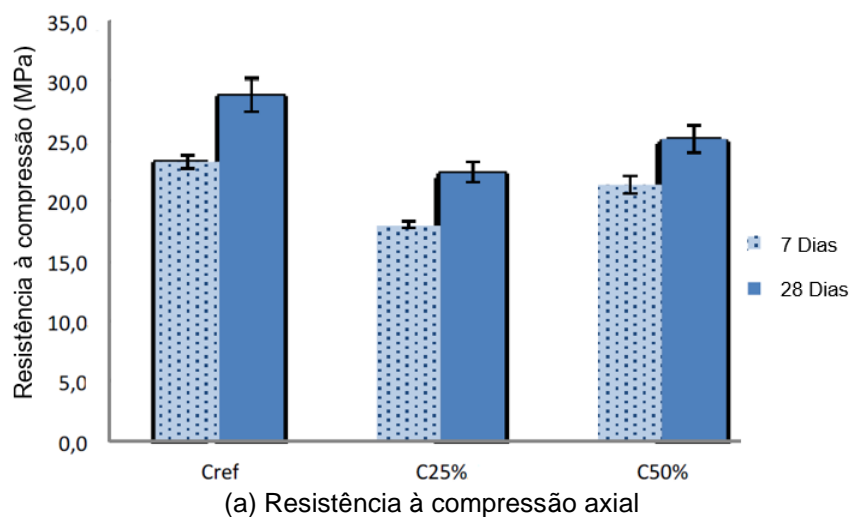
Quanto ao desempenho mecânico, os concretos reciclados obtêm valores distintos de resistências em relação aos concretos convencionais. Seu comportamento pode ser explicado pelos fatores abordados anteriormente: agregados reciclados serem provenientes de diferentes origens, cujas principais fontes são materiais cimentícios e cerâmicos; percentual dos agregados convencionais substituídos pelos reciclados, na proporção parcial ou total, associados a uma determinada relação água/cimento.

As resistências mecânicas dos concretos reciclados aumentam conforme há o acréscimo de agregados miúdos de matriz cimentícia e diminui à medida que se aumenta a relação a/c (FROTTE *et al.*, 2017; GERIN; SALES; DE NARDIN, 2019; RODRIGUES; FUCALE, 2014). Além disso, o teor crescente de substituição dos agregados graúdos reciclados, associado ao aumento da relação água/cimento, diminui as resistências mecânicas do concreto (VIANA NETO; SALES; SALES, 2018; VIEIRA; DAL MOLIN; LIMA, 2004).

A Figura 23 apresenta resultados obtidos por Frotte *et al.* (2017) para ensaios de resistências à compressão e à tração diametral em concretos com substituições parciais de 25% (C25%) e 50% (C50%) de agregados miúdos naturais pelos reciclados. Ensaio de resistência à compressão e à tração 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, sendo este incluído como método de estudo deste trabalho (ver item 3.7.1).

**Figura 23:** Resultados de resistências mecânicas em concretos dosados com agregados reciclados aos 7 e 28 dias (intervalo de confiança de 68%).



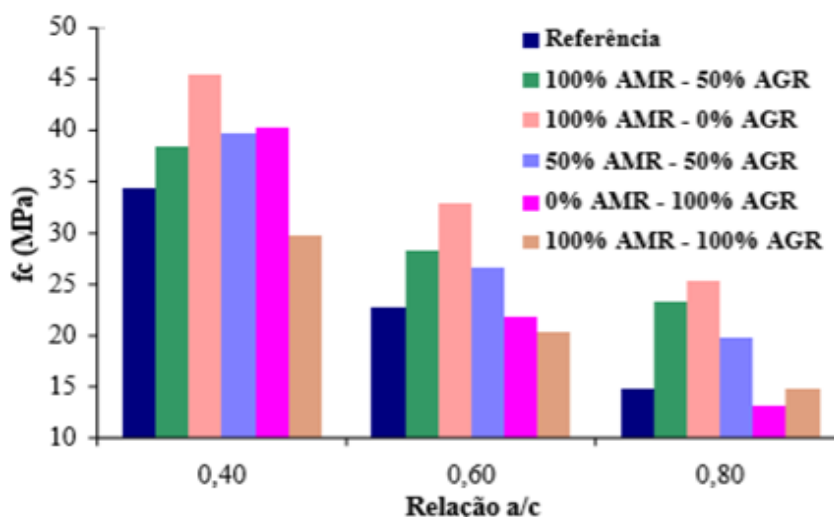
Fonte: FROTTE *et al.*, 2017, adaptada.

Para resistências à compressão (Figura 23a), as substituições parciais obtiveram valores inferiores ao concreto de referência em ambas as idades (7 dias e 28 dias) o que pode ser explicado pela composição heterogênea do agregado reciclado. O concreto com substituição de C50% apresentou maior resultado de resistência à compressão em relação ao concreto C25% que, segundo os autores, água absorvida pelos agregados reciclados pode ter se tornado disponível para hidratação de partículas remanescentes que não haviam sido hidratadas, aumentando o processo

de cura e, conseqüentemente, a resistência à compressão. Os mesmos comportamentos foram obtidos em termos de resistência à tração por compressão diametral (Figura 23b).

Na pesquisa realizada por Vieira, Dal Molin e Lima (2004), apresentada na Figura 24, foram realizados ensaios de resistência à compressão em concretos, variando a relação água/cimento ( $a/c$ ) e com a substituição parcial e total dos agregados convencionais pelos agregados reciclados. Os agregados reciclados são majoritariamente de material cerâmico (48%), resíduos de argamassa (28%) e concreto (19%).

**Figura 24:** Resistência à compressão pela relação  $a/c$  por incorporação de agregados miúdo (AMR) e graúdo (AGR) reciclados aos 28 dias.



Fonte: VIEIRA; DAL MOLIN; LIMA, 2004.

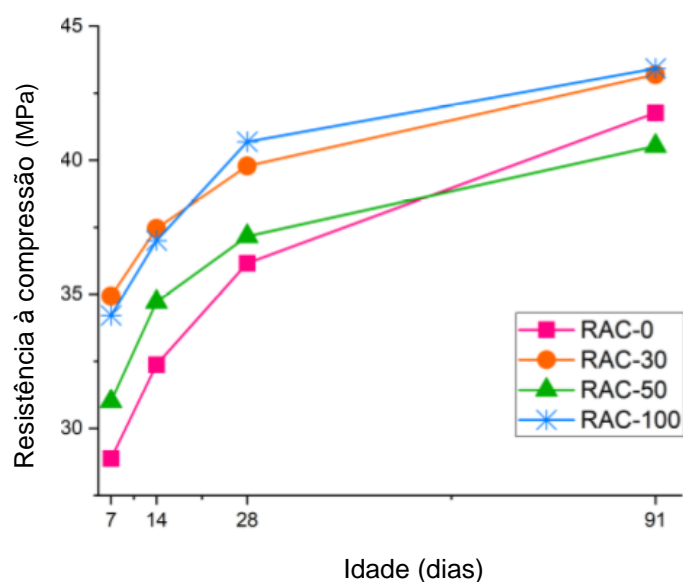
Os concretos que apresentaram maiores resultados foram aqueles em que houve substituição total e parcial dos agregados miúdos naturais pelos reciclados (AMR), o que pode ser explicado pela hidratação tardia nas massas por conta da liberação das partículas de água retidas no material pulverulento do AMR. Os concretos que apresentaram resistência inferior foram aqueles em que houve substituição total dos agregados graúdos convencionais pelos reciclados (AGR) devido à fragilidade destes agregados em relação às britas convencionais, diminuindo a resistência do concreto (Figura 24).

Dentre aqueles em que foram substituídos os dois agregados, os concretos em que foi substituído um maior percentual de AMR em relação ao AGR apresentaram maior resistência à compressão do que os que foram substituídos maior percentual

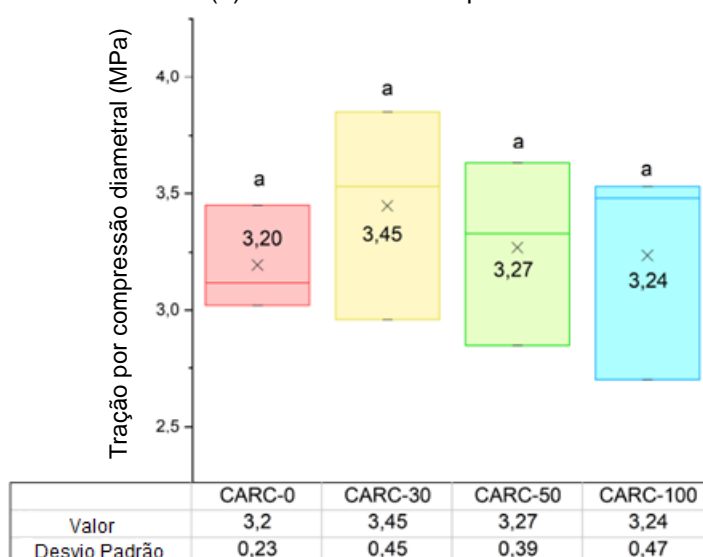
de AGR. Também, o aumento do percentual da relação a/c impactou em menores resultados de resistência à compressão, mostrando que o acréscimo de água influencia diretamente os parâmetros mecânicos de concretos convencionais e reciclados (VIEIRA; DAL MOLIN; LIMA, 2004).

Neste mesmo contexto, Gerin, Sales e Nardin (2019) apresentaram resultados promissores a partir de substituições parciais e total de agregado graúdo convencional (NCA) por agregado graúdo reciclado (RAC), a partir da moagem de resíduos de concretos obtidos pelos próprios pesquisadores (Figura 25).

**Figura 25:** Resistências mecânicas de concretos com incorporação de agregados graúdos reciclados (AGR) por moagens de concretos.



(a) Resistência à compressão axial



(b) Resistência à tração por compressão diametral

Fonte: GERIN; SALES; NARDIN, 2019, adaptada.

Nas primeiras idades, o concreto que apresentou menor resistência à compressão foi o RAC-0 (0% de agregado graúdo reciclado), enquanto as massas compostas por agregados graúdos reciclados (30%, 50% e 100%), por conta da pré-hidratação das britas recicladas antes das dosagens experimentais (Figura 25a). Aos 91 dias, maiores resistências foram obtidas com substituições de 30% e 100%, atingindo-se valores próximos de 45 MPa. Portanto, ao longo do tempo, os concretos dosados com agregados graúdos reciclados conseguiram atingir valores de resistência a compressão iguais e superiores ao concreto convencional.

Em termos de resistência à tração por compressão diametral (Figura 25b), concreto com substituição parcial de 30% apresentou o maior valor de resistência (3,45 MPa). Os demais concretos obtiveram resultados praticamente semelhantes, mostrando que tais concretos dosados a partir de agregados graúdos cimentícios atingiram valores de resistências mecânicas satisfatórias.

#### *2.4.2.6. Diminuição do módulo de elasticidade*

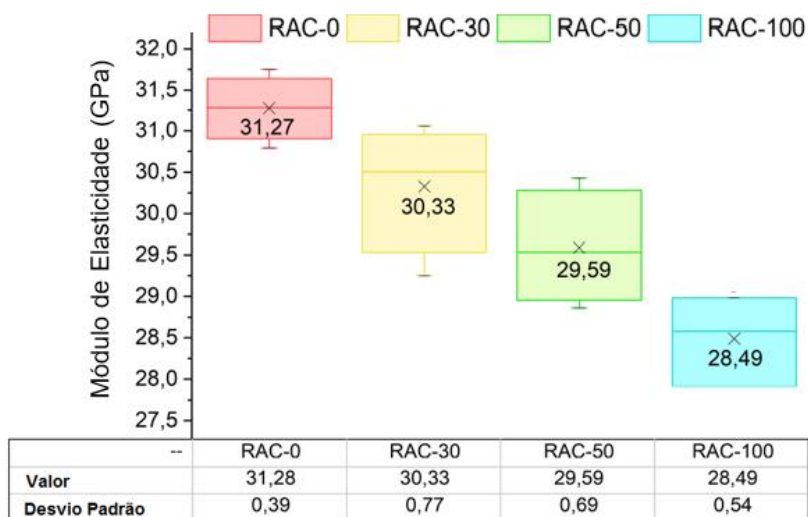
O valor do módulo de elasticidade de concretos reciclados tende a diminuir à medida que se eleva o teor de substituição, pois a porosidade dos agregados RCD, maiores que dos convencionais, tornam os concretos de RCD menos rígidos (CABRAL *et al.*, 2007).

Viana Neto, Sales e Sales (2018) publicaram, a partir de pesquisas laboratoriais, que apenas a adição de agregados miúdos reciclados em concretos aumenta o valor do módulo de elasticidade em relação a concretos com ambas as substituições de areias e britas. Isto se deve a melhorias de algumas propriedades pela areia RCD, como o aumento da massa específica real e diminuição da absorção de água. Em substituições de agregados graúdos, ocorrem decréscimos do módulo de elasticidade por conta da composição das britas, por exemplo, com teor de materiais deformáveis, como argamassa e restos de cerâmica, e diminuição de partículas de rochas britadas.

Para incorporação de agregados graúdos reciclados com composição cimentícia, Gerin, Sales e Nardin (2019) obtiveram perdas menos graduais de módulos de elasticidade com substituições parciais (30% e 50%) em comparação ao concreto convencional (Figura 26), por conta deste agregado graúdo reciclado ser mais rígido e, conseqüentemente, menos friável do que os demais (mistos ou por composição cerâmica). Por outro lado, os agregados reciclados, pela sua heterogeneidade

resultam em britas mais porosas, o que diminui o módulo de elasticidade em comparação ao concreto convencional.

**Figura 26:** Módulos de elasticidade de concretos com incorporação de agregados graúdos reciclados (AGR) por moagens de concretos.



Fonte: GERIN; SALES; NARDIN, 2019, adaptada.

### **3. MATERIAIS E MÉTODOS**

#### **3.1. DELINEAMENTO EXPERIMENTAL**

Visando compreender o comportamento de concretos dosados com agregados reciclados, foram realizados ensaios laboratoriais com os materiais obtidos na usina de reciclagem de entulhos localizado na cidade de Varginha, apresentada no item 2.1.4.

Antes dos procedimentos laboratoriais, a amostra de areia natural de dimensão média foi seca para eliminação de teores de umidades. Também, os agregados empregados não foram lavados, a fim de manterem suas características de origem, mesmo para areias e britas recicladas que apresentam maiores teores de impurezas.

Dosagens experimentais de concretos com agregados convencionais e a substituição total por agregados reciclados foram realizados segundo o método da ABCP/ACI, a partir de parâmetros obtidos de caracterizações físicas dos agregados. A metodologia de dosagem (formulações e tabelas auxiliares) é apresentada em Apêndice A - Dosagem Experimental de Concreto pelo Método ABCP/ACI. Os concretos dosados foram avaliados por parâmetros físicos e mecânicos, comparando-se as propriedades obtidas entre o concreto convencional e o concreto reciclado.

#### **3.2. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS**

##### **3.2.1. Considerações iniciais**

Na pesquisa, foram utilizados agregados reciclados mistos (ARM) de composição cimentícia e cerâmica nas granulometrias miúda (areia RCD) e graúda do tipo brita 1 RCD.

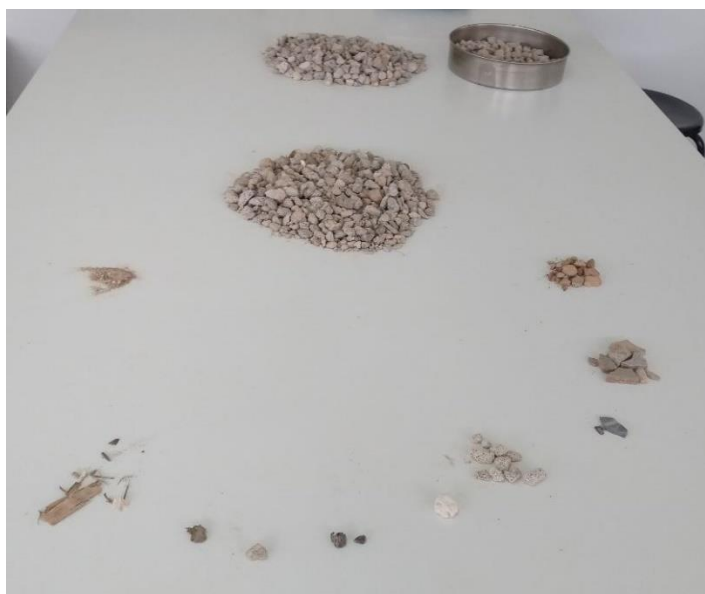
Os agregados reciclados foram coletados diretamente nas pilhas de estocagem na usina de reciclagem, atentando-se para retirada de amostras em três pontos distintos das pilhas e em quantidades suficientes para os ensaios de caracterização e dosagem de concreto. Ou seja, os agregados são de amostragem única e com a homogeneidade entre os três pontos de coleta para a mesma granulometria.

Em termos de agregados convencionais, foram utilizados areia natural de granulometria média e brita 1 de gnaisse, ambos obtidos no comércio na cidade de Varginha.

### 3.2.2. Análise tátil-visual do agregado graúdo reciclado

Como ensaio inicial, foi obtida 1.000 g da brita 1 reciclada por agregados mistos (ARM) para análise tátil-visual, de modo a obter uma composição percentual de sua mistura mista, devido a influência exercida pelos agregados graúdos no comportamento de concretos nos estados fresco e endurecido. A Figura 27 apresenta o procedimento realizado.

**Figura 27:** Análise tátil-visual da composição mista do agregado graúdo reciclado.



Fonte: Do autor.

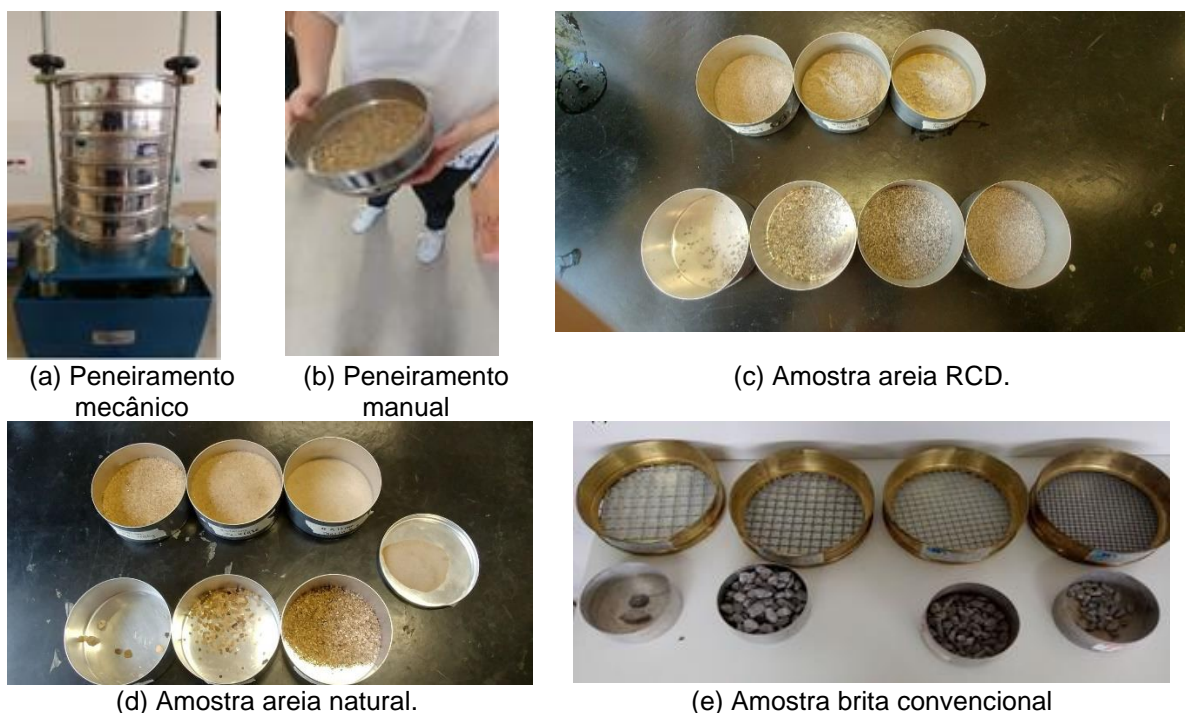
### 3.2.3. Composição granulométrica

O ensaio de composição granulométrica dos agregados foi realizado com o objetivo de se obter a classificação por dimensão máxima característica (DMC), módulo de finura (MF) e a distribuição dos tamanhos das partículas nas faixas de granulometria, segundo a ABNT NBR NM 248:2003. Foram utilizados processos de peneiramentos mecânico e manual, como apresentado na Figura 28.

Os parâmetros granulométricos foram obtidos a partir de massas retidas acumuladas nos conjuntos de peneiras padronizadas pela norma ABNT NBR NM 248:2003.



**Figura 28:** Ensaio de composição granulométrica.

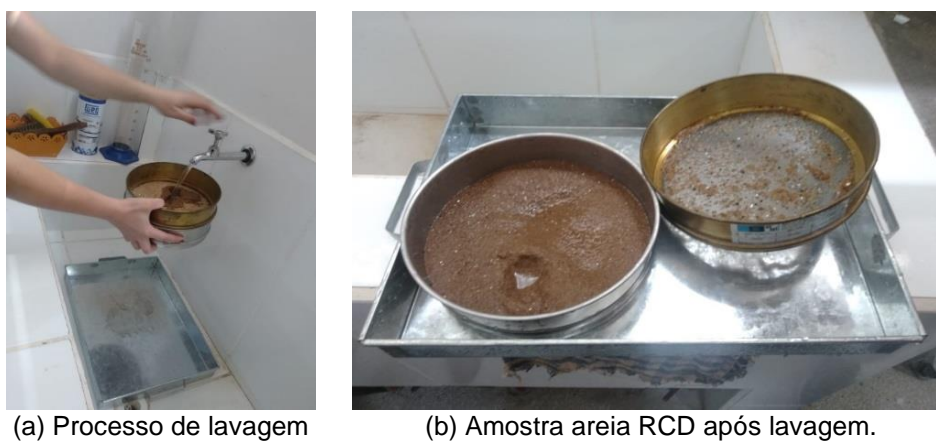


Fonte: Do autor.

### 3.2.4. Determinação de material pulverulento

Os ensaios para a determinação de percentual de finos presentes nos agregados foram realizados segundo a norma ABNT NBR NM 46:2003, que corresponde ao processo de lavagem dos agregados na peneira 0,075mm até a observação da limpidez da água de lavagem (Figura 29). Após o procedimento de lavagem, os agregados são secos em estufa para a verificação da diferença entre a massa inicial e a massa final, conforme a Equação 1.

**Figura 29:** Determinação de material pulverulento por lavagem.



Fonte: Do autor.

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

Sendo,

M: Percentual de material pulverulento (%)

M<sub>i</sub>: Massa inicial da amostra seca (g).

M<sub>f</sub>: Massa da amostra seca após as lavagens (g).

### 3.2.5. Determinação da massa específica de agregado miúdo

A determinação da massa específica das areias natural e recicladas foram realizadas pelo método do picnômetro (ABNT NBR NM 52:2009), apresentado na Figura 30. Contudo, devido a presença de material pulverulento na areia reciclada e a sua influência na presença de vazios, foi adotado o procedimento de retirada do ar dos picnômetros por meio de bomba a vácuo (Figura 30d).

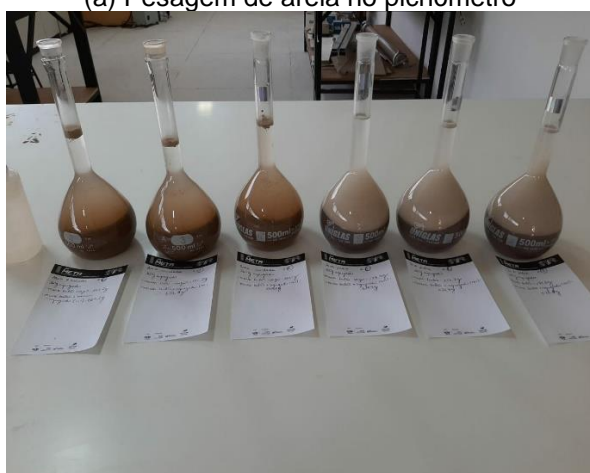
**Figura 30:** Ensaio de massa específica de areias.



(a) Pesagem de areia no picnômetro



(b) Pesagem do conjunto areia + água



(c) Agregados nos picnômetros preenchidos com água



(d) Retirada de ar por bomba à vácuo

Fonte: Do autor.

A partir dos parâmetros obtidos, determinou-se a massa específica dos agregados miúdos foi realizado pela Equação 2.

$$D = \frac{M}{(V - Va) - \frac{Ms - M}{\rho a}} \quad (2)$$

Sendo,

D: Massa específica do agregado miúdo (g/cm<sup>3</sup>);

M: Massa da amostra seca em estufa (g);

V: Volume do frasco (cm<sup>3</sup>);

Va: Volume da água adicionada ao frasco (cm<sup>3</sup>) conforme Equação 3;

Ms: Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g);

pa: Massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

$$Va = \frac{M_2 - M_1}{\rho a} \quad (3)$$

Sendo,

M<sub>2</sub>: Massa total (frasco + agregado + água), em gramas (g).

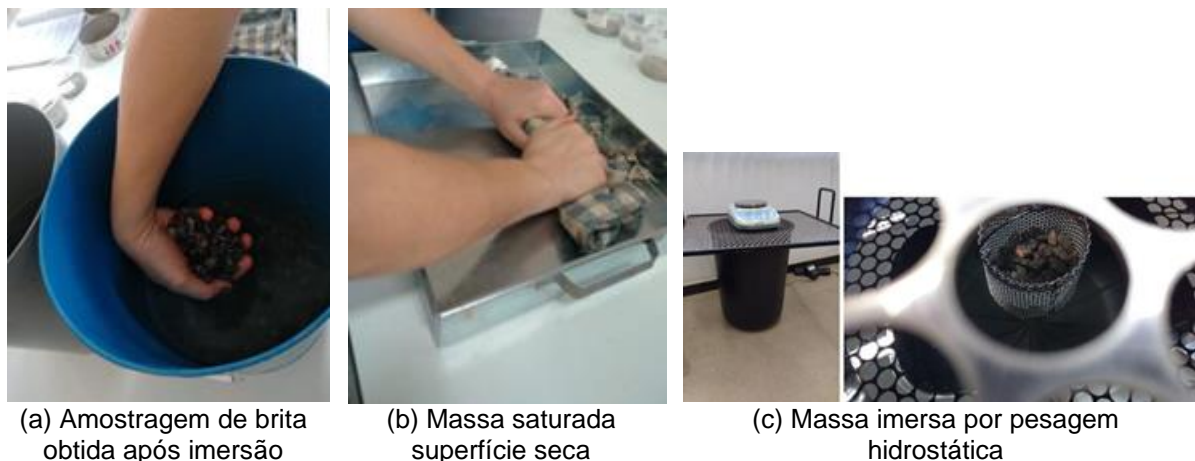
M<sub>1</sub>: Massa do conjunto (frasco + água), em gramas (g).

pa: Massa específica da água (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.2.6. Determinação da massa específica de agregado graúdo

A determinação da massa específica das britas convencional e recicladas foram realizadas pela norma ABNT NBR NM 53:2009, apresentado na Figura 31.

O procedimento consiste em imergir previamente as amostras de britas em água por, no mínimo 24 horas. Posteriormente, é retirada uma amostragem da água para as etapas do ensaio: determinação da massa saturada superfície seca (Figura 31a e Figura 31b) e determinação da massa imersa por pesagem hidrostática (Figura 32c). Ao final, as amostras são secas em estufa na temperatura de 105°C ± 5°C até constância de massa para a obtenção da massa seca. Os parâmetros obtidos foram aplicados na Equação 4 para a obtenção da massa específica das britas.

**Figura 31:** Ensaio de massa específica de britas.,;

Fonte: Do autor.

$$D = \frac{M}{M_s - M_a} \quad (4)$$

Sendo,

D: Massa específica do agregado graúdo ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

M: Massa seca em estufa (g);

$M_s$ : Massa saturada superfície seca (g);

$M_a$ : Massa imersa em água por pesagem hidrostática (g).

### 3.2.7. Determinação da massa unitária e volume de vazios

Ensaio de massa unitária dos agregados foram realizados segundo a norma ABNT NBR 45/2006, que especifica o uso de um recipiente cilíndrico de  $10 \text{ dm}^3$  padronizado e o seu enchimento com o material agregado. Resultados de massa unitária foram obtidos pela Equação 5.

$$\gamma = \frac{M_{ra} - M_r}{V_r} \quad (5)$$

Sendo,

$\gamma$ : Massa unitária dos agregados ( $\text{g}/\text{cm}^3$ );

$M_{ra}$ : Massa do recipiente + agregado (g);

Mr: Massa do recipiente vazio (g);

Vr: Volume do recipiente (cm<sup>3</sup>).

Adotou-se a condição de massa unitária no estado solto apresentado na Figura 32.

**Figura 32:** Ensaio de massa unitária dos agregados.;



(a) Preenchimento do recipiente cilíndrico com agregado.



(b) Determinação da massa do conjunto.

Fonte: Do autor.

### 3.3. DEFINIÇÃO DA DOSAGEM DO CONCRETO PELO MÉTODO ABCP/ACI

O traço para o concreto de referência foi obtido a partir do método ABCP/ACI apresentado no Apêndice A. Os itens a seguir sumarizam os parâmetros estabelecidos para a obtenção de traços em massa para concreto convencional e concreto reciclado. A obtenção do concreto reciclado foi a partir da substituição total dos agregados miúdo e graúdo pelos respectivos agregados reciclados.

- *Resistência de dosagem aos 28 dias:*

Na pesquisa, foi adotado o valor de resistência característica de projeto ( $f_{ck}$ ) aos 28 dias igual a 25MPa e, portanto, de característica estrutural. Como os concretos são dosados em laboratório, adotou-se a condição de dosagem A ( $s_d$ : 4,0 MPa) segundo a norma ABNT NBR 12655:2015. Neste caso, o valor de resistência média do concreto à compressão aos 28 dias ( $f_{cm28}$ ) é igual a 31,6 MPa.

Ressalta-se que o valor de classe C25 foi escolhido considerando uma aplicação estrutural em centros urbanos para classe de agressividade II-Moderada, de acordo com a norma ABNT NBR 12655:2015.

- *Escolha do tipo de Cimento Portland:*

O cimento Portland adotado para a pesquisa foi o CP II F 32 (Figura 33), pois apresenta um ganho significativo de resistência mecânica nas primeiras idades, parâmetro importante em estudos de dosagens com aplicabilidade de agregados reciclados.

**Figura 33:** Cimento Portland utilizado na pesquisa.



Fonte: Do autor.

- *Fixação da consistência adequada de trabalho:*

O valor de abatimento adotado considerou o lançamento convencional do concreto. Neste caso, enquadra-se na classe S100, ou seja, de  $100 \text{ mm} \leq A \leq 160 \text{ mm}$  (ABNT NBR 8953:2015). Com o valor de tolerância estabelecido, estabeleceu-se o abatimento dos concretos convencionais e reciclados igual a  $100 \pm 20 \text{ mm}$ .

- *Escolha da dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo:*

Ambas as britas utilizadas na pesquisa foram de granulometria brita 1, ou seja, de dimensão máxima característica (DMC) igual a 19mm, rotineiramente usados em concretos estruturais com lançamento convencional.

- *Quantidade de água de amassamento, por m<sup>3</sup> de concreto:*

O valor de consumo de água estimado na dosagem obtido foi de 209 kg/m<sup>3</sup>.

- *Definição da relação água/cimento (a/c):*

A relação a/c obtida foi igual a 0,50 L/kg, que atende ao limite máximo estabelecido pela norma ABNT NBR 12.655:2015 para a classe de agressividade II ( $\leq$  0,60 L/kg).

- *Consumo de cimento Portland, por m<sup>3</sup> de concreto:*

Para os valores utilizados, consumo de cimento calculado foi de 418 Kg/m<sup>3</sup>. Este valor atende ao consumo mínimo para a classe de agressividade II, que estabelece consumo de cimento  $\geq$  280 kg/m<sup>3</sup> (ABNT NBR 12655:2015).

- *Consumos de agregados graúdo e miúdo, por m<sup>3</sup> de concreto:*

Para os valores obtidos de módulo de finura (MF) e dimensão máxima característica (DMC) dos agregados, obteve-se consumo de brita 1 igual a 1161,8 kg/m<sup>3</sup>. Para as areias, o consumo é de 646,6 kg/m<sup>3</sup>.

- *Obtenção do traço em massa:*

O traço em massa adotado na pesquisa, para ambas as dosagens de concretos convencional e reciclado, foi igual a 1: 1,55: 2,78, a/c: 0,50 L/kg, ou seja:

- 1: Proporção em massa de cimento Portland (kg/m<sup>3</sup> de concreto);
- 1,55: Proporção em massa de agregado miúdo (kg/m<sup>3</sup> de concreto);
- 2,78: Proporção em massa de agregado graúdo (kg/m<sup>3</sup> de concreto);
- a/c: Fator água/cimento.

- *Dosagem de concreto para a realização de ensaios nos estados fresco e endurecido:*

A Tabela apresenta o consumo dos materiais para a dosagem de 40 L de concreto segundo do traço em massa obtido. Este volume é suficiente para a realização de ensaios de abatimento do tronco de cone e de moldagens de corpos de prova para a determinação de resistência à compressão nas idades de 7, 14 e 28 dias.

Em termos de consumo de agregados reciclados indicada na Tabela , foi adotada a metodologia de Leite (2001) pela Equação 6. A simples substituição da massa do agregado convencional pelo reciclado ocasiona o consumo de maiores volumes de agregados reciclados por comumente apresentarem menores valores de massas específicas em comparação aos agregados convencionais.

**Tabela 8:** Consumo dos materiais para dosagem de 40 L de concretos convencional e reciclado.

Traço em massa		1: 1,55: 2,78, a/c: 0,50 L/kg	
Materiais	Concreto convencional	Concreto reciclado RCD	
Cimento	16,71 kg	16,71 kg	
Areia	25,90 kg	26,90 kg	
Brita	46,45 kg	37,13 kg	
Água	8,36 kg	8,36 kg	

Fonte: Do autor.

$$M_{RCC} = M_{\text{agregado convencional}} \times \frac{\gamma_{RCC}}{\gamma_{\text{agregado convencional}}} \quad (6)$$

Sendo,

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

$M_{\text{agregado convencional}}$ : Consumo em massa dos agregados convencionais (kg);

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

$\gamma_{\text{agregado convencional}}$ : Massa específica dos agregados convencionais (g/cm<sup>3</sup>).

### 3.4. DEFINIÇÃO DE PRÉ-MOLHAGEM DOS AGREGADOS RECICLADOS

Devido aos valores de absorção de água dos agregados reciclados e com o intuito de se minimizar a perda de trabalhabilidade dos concretos no estado fresco, a ABNT NBR 15116:2004, versão da norma em que o trabalho foi realizado, estabelece a necessidade de uma pré-molhagem dos agregados reciclados. Para tanto, a pré-molhagem sugerida pela referida norma é a adição suplementar de água referente a 80% do teor de absorção de água do agregado reciclado. Vale lembrar que na versão atual da norma o cálculo da pré-molhagem é feito por uma equação proposta.

O tempo de pré-molhagem não é estabelecido pela referida norma, mas algumas publicações remetem de 10-15 minutos previamente a mistura do concreto (LEITE,



2001). A partir de valores de absorção de água de 5,92% da areia e de 4,73% da brita recicladas, a pré-molhagem (Figura 34) foi feita com adição suplementar de água de 1,59 kg na areia e de 1,76kg na brita.

**Figura 34:** Pré-molhagem dos agregados reciclados



Fonte: Do autor.

### 3.5. PROCEDIMENTO DE MISTURA DO CONCRETO EM BETONEIRA

Após a definição do traço e de consumos dos materiais para dosagens de concreto convencional e reciclado, realizou-se a mistura em betoneira (Figura 35) conforme a sequência abaixo:

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

**Figura 35:** Dosagem dos concretos em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 400L.



Fonte: Do autor.

### 3.6. DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO FRESCO

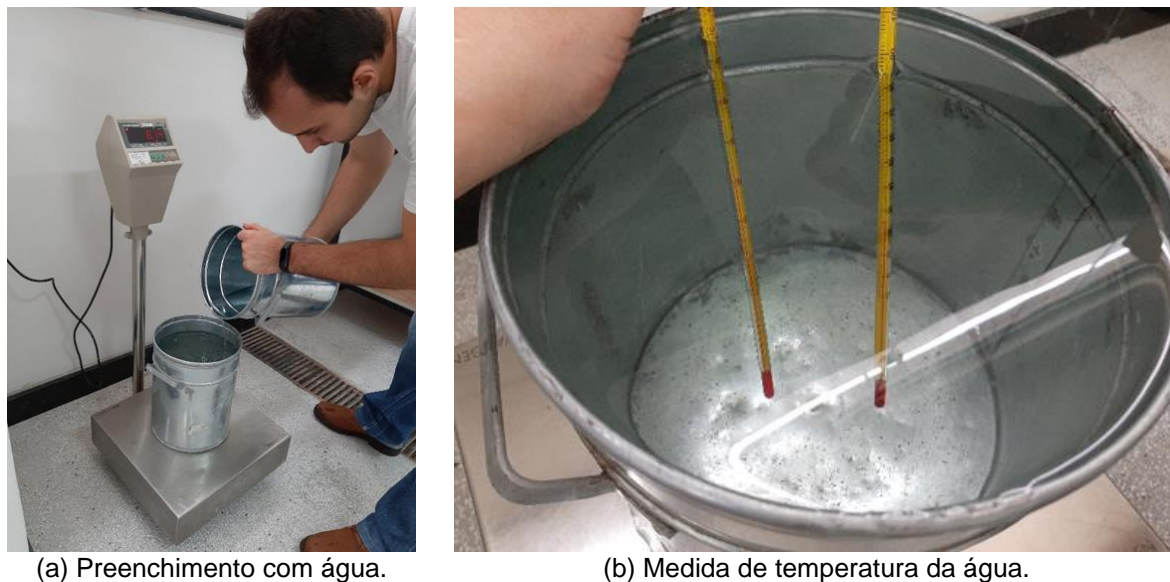
#### 3.6.1. Massa específica no concreto fresco

Foi feita a determinação da massa específica do concreto no estado fresco conforme a ABNT NBR 9833:2008. Inicialmente, realizou-se a calibração do recipiente cilíndrico, que consistiu no preenchido com água e determinado a massa do conjunto (Figura 36). Pela medida da temperatura da água igual a 18,3°C, obteve-se a sua massa específica igual a 998,54 kg/m<sup>3</sup> (ABNT NBR 9833:2008). Com isso, o volume do recipiente foi obtido.

O recipiente cilíndrico foi preenchido com o concreto fresco em 3 camadas iguais e adensados com 25 golpes por camada pelo uso de haste metálica. Em seguida, o

recipiente arrasado, limpo na superfície externa e medida a massa do conjunto (Figura 37).

**Figura 36:** Procedimento de calibração do recipiente cilíndrico.



Fonte: Do autor.

**Figura 37:** Determinação da massa específica do concreto fresco.



Fonte: Do autor.

A massa específica do concreto fresco é calculada pela Equação 7:

$$\rho_{ap} = \frac{m}{v} \times 1000 \quad (7)$$

Sendo:

$\rho_{ap}$ : Massa específica aparente do concreto ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

$m$ : Massa do concreto (kg);

$v$ : Volume do recipiente ( $\text{dm}^3$ ).

### 3.6.2. Consistência pelo abatimento do tronco de cone

Após a mistura do concreto, verificou-se a consistência do concreto pelo abatimento do tronco de cone, segundo a ABNT NBR 16889:2020. Consistiu no preenchimento do molde tronco-cônico em três camadas, sendo cada camada adensada com 25 golpes. Posteriormente, foi medida a altura de abatimento com a inversão do molde tronco-cônico e posicionamento na horizontal da haste de adensamento (Figura 38). Foram feitas duas determinações para o ensaio de abatimento de tronco de cone para ambos os traços dosados.

**Figura 38:** Determinação do abatimento do tronco de cone.



Fonte: Do autor.

## 3.7. DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES DO CONCRETO NO ESTADO ENDURECIDO

### 3.7.1. Resistência à compressão axial

As resistências do concreto à compressão foram fornecidas por moldagens de corpos de prova cilíndricos de 100mm x 200mm, que consistiu no preenchimento dos

corpos-de-prova com duas camadas e adensamento com 12 golpes por camada, além de golpes laterais para adensamento adequado (ABNT NBR 5738:2015). Foram moldados 4 corpos de prova para cada idade de rompimento de 7, 14 e 28 dias e tipos de concretos.

Após o preparo, os corpos de prova de concreto foram identificados, protegidos de exsudação e, após 24 horas, desmoldados e colocados em cura úmida (tanque de imersão com água e adição de cal hidratada) até atingir as idades de rompimentos. A Figura 39 exemplifica esses procedimentos.

**Figura 39:** Moldagem de corpos de prova de concreto.



(a) Preenchimento do molde cilíndrico



(b) Adensamento das camadas



(c) Identificação dos corpos de prova



(d) Proteção contra à exsudação.

Fonte: Do autor.

Alcançadas as idades de 7, 14 e 28 dias, os corpos de prova foram retirados da cura úmida para a realização de ensaios de resistência à compressão (ABNT NBR 5739:2018). Realizou-se as medidas de diâmetro (d) e alturas (h) dos corpos de prova (Figura 40) de modo a verificar a necessidade de correção dos resultados de resistência à compressão por fator de correção.

Os corpos de prova foram capeados por discos de neoprene nas superfícies superior e inferior e rompidos à compressão em prensa hidráulica com a velocidade constante de  $0,45 \pm 0,15$  MPa/s (ABNT NBR 5739:2018), apresentado na Figura 41.

**Figura 40:** Corpos de prova para ensaios de resistência à compressão



Fonte: Do autor.

**Figura 41:** Ensaio de resistência à compressão em prensa hidráulica.



Fonte: Do autor.

A resistência à compressão dos concretos convencional e reciclado foi calculada segundo a Equação 8:

$$F_c = \frac{4F}{\pi * D^2} \quad (8)$$

Sendo:

F<sub>c</sub>: Resistência à compressão (MPa);

F: Força máxima alcançada (N);

D: Diâmetro do corpo de prova (mm).

### 3.7.2. Estimativas de demais parâmetros mecânicos

Devido a impossibilidade de realização de resistência à tração, bem como da determinação do módulo de elasticidade, realizou-se estimativas destas propriedades a partir de equações normativas apresentadas na ABNT NBR 6118:2014 para a idade de 28 dias. A Equação 9 foi adotada para estimativa da resistência à tração. O módulo de elasticidade foi estimado pela Equação 10.

$$F_{ct,m} = 0,3 * (F_{ck})^{2/3} \quad (9)$$

Sendo,

F<sub>ct,m</sub>: Resistência média à tração do concreto (MPa);

F<sub>ck</sub>: Resistência à compressão do concreto aos 28 dias (MPa).

$$E_{ci} = \alpha_e * 5600\sqrt{F_{ck}} \quad (10)$$

Sendo:

E<sub>ci</sub>: Módulo de elasticidade (GPa);

α<sub>e</sub>: Agregado graúdo de gnaiss, adotado igual a 1,0;

F<sub>ck</sub>: Resistência à compressão do concreto aos 28 dias (MPa).

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS

Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados estão sumarizados na Tabela . Figura 42 e Figura 43 apresentam as curvas granulométricas das areias e britas, respectivamente, em relação aos limites estabelecidos em norma. Na Figura 44 tem-se a composição percentual da brita reciclada obtida por análise tátil-visual.

**Tabela 9:** Caracterização física dos agregados.

Parâmetros	Norma	Areia natural	Areia reciclada	Brita convencional	Brita reciclada
Massa específica	ABNT NBR 52:2009; ABNT NBR 53:2009	2,59 g/cm <sup>3</sup>	2,69 g/cm <sup>3</sup>	2,89 g/cm <sup>3</sup>	2,31 g/cm <sup>3</sup>
Massa unitária	ABNT NBR 45:2006	1,44 g/cm <sup>3</sup>	1,46 g/cm <sup>3</sup>	1,57 g/cm <sup>3</sup>	1,20 g/cm <sup>3</sup>
Dimensão máxima característica	ABNT NBR NM 248:2003	2,36 mm	4,75 mm	19 mm	19 mm
Módulo de finura	ABNT NBR NM 248:2003	2,06	2,03	6,94	6,79
Teor de material pulverulento	ABNT NBR NM 46:2003	0,9 %	11,1 %	0,2 %	1,2%

Fonte: Do autor.

Com base nos resultados apresentados na Tabela , é possível verificar que:

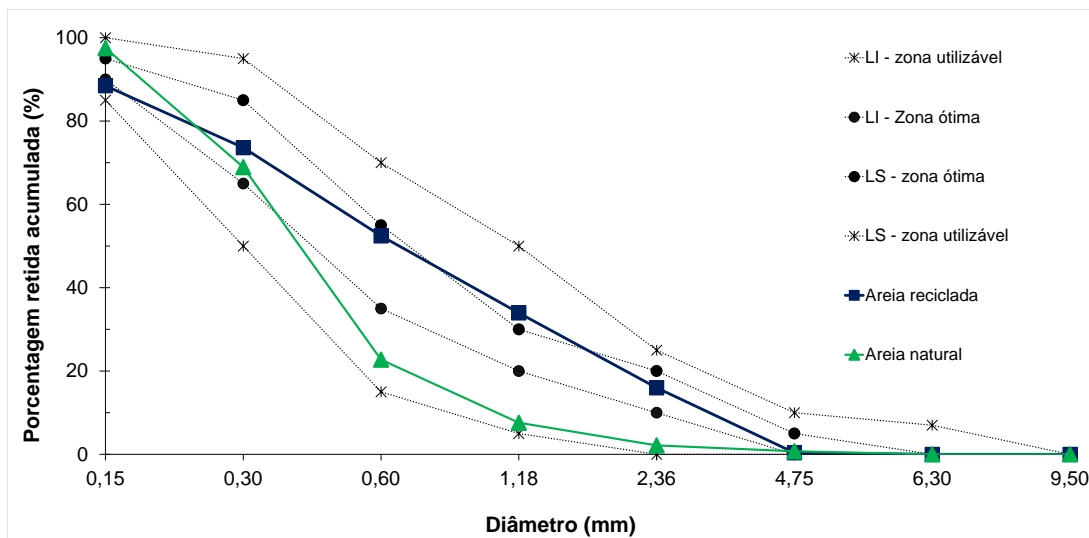
- **Massa específica:** A massa específica da brita convencional é maior do que da brita reciclada devido à origem do agregado, com a redução de 6,7% da massa específica reciclada (2,31g/cm<sup>3</sup>) em relação ao convencional (2,89 g/cm<sup>3</sup>), resultado que concorda com o proposto por Cabral *et al.* (2007), ilustrado na Tabela 2, e Vieira, Dal Molin e Lima (2004). A areia reciclada apresentou massa específica maior em relação à areia natural, fato que decorre do fato da mistura de resíduos utilizada para fazer o agregado apresentar compostos não homogêneos, o que discorda da conclusão obtida por Rodrigues e Fucale (2014) e Cabral *et al* (2007), conforme a Tabela 2.
- **Massa unitária:** Os agregados miúdos podem ser considerados normais, visto que os valores da massa unitária de ambos os agregados são 1,44 g/cm<sup>3</sup> (areia natural) e 1,46 g/cm<sup>3</sup> (areia RCD), resultado que concorda com o obtido por Cabral *et al.* (2007), ilustrado na Tabela 2. Já os agregados graúdos



apresentaram disparidade nos valores,  $1,57 \text{ g/cm}^3$  da brita convencional e  $1,20 \text{ g/cm}^3$  da brita RCD, que vai de acordo com os dados obtidos por Cabral *et al.* (2007), na Tabela 2. Neste caso, a brita 1 reciclada apresenta maior quantidade de vazios e, por isso, é necessário maior quantidade do material para igualar as propriedades do concreto convencional.

- **Dimensão máxima característica (DMC):** O valor da DMC é maior na areia reciclada (4,75 mm), do que na areia natural (2,36 mm), enquanto em ambas as britas 1 o valor da DMC foi o mesmo, 19 mm.
- **Módulo de finura (MF):** A areia reciclada e a areia natural mostram valores próximos de MF. Em relação aos agregados graúdos, a brita convencional apresentou maior resultado (6,94) em relação à brita RCD (6,79).
- **Teor de material pulverulento:** O teor de material pulverulento foi maior na areia reciclada (11,1%) em relação aos demais agregados: areia natural (< 1%), brita convencional (< 1%) e brita RCD (1,2%). Associado ao teor de material pulverulento está à absorção de água: quanto maior a taxa de finos presentes no material, mais ele absorve água. Portanto, concretos dosados com a areia reciclada tendem a absorver mais a água de dosagem e, assim, diminuindo a trabalhabilidade do concreto reciclado. Importante ressaltar que a norma ABNT NBR 7211:2019 indica que valores de impurezas acima 3% para concretos submetidos a desgaste superficial e 5% para concretos protegidos ao desgaste superficial, as areias não devem ser utilizadas em obras para fins estruturais. Apesar de tais resultados mostrarem valores indesejáveis, outros aspectos de viabilização também devem ser investigados.

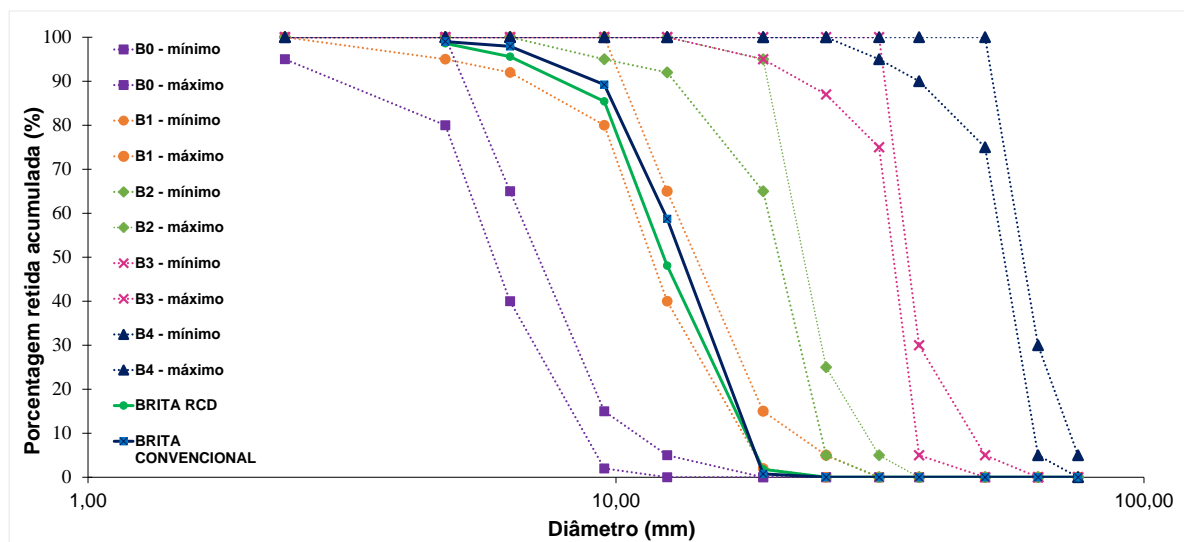
**Figura 42:** Composição granulométrica das areias natural e reciclada.



Fonte: Do autor.

Em relação aos agregados miúdos, a areia reciclada encontra-se predominantemente dentro da zona ótima; em contrapartida, a areia natural situa-se na zona utilizável. Assim, pode-se inferir que os agregados artificiais apresentam partículas bem distribuídas em tamanho (Figura 42). Este fato, se investigado, pode resultar em diminuição de poros do concreto nos estados fresco e endurecido, impactando em resistência à compressão, melhoria de trabalhabilidade, dentre outros.

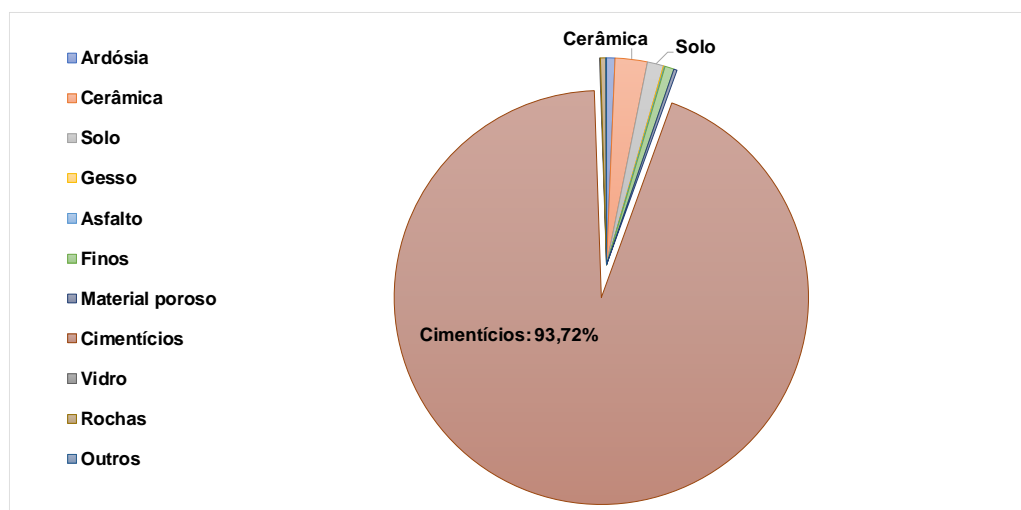
**Figura 43:** Composição granulométrica das britas convencional e reciclada.



Sendo: B0 – Brita 0; B1 – Brita 1; B2 – Brita 2; B3 – Brita 3; B4 – Brita 4.

Fonte: Do autor.

Em relação aos agregados graúdos convencional e reciclado, ambos se encontram na zona de identificação de brita 1 (Figura 43).

**Figura 44:** Materiais componentes da brita reciclada por agregados mistos.

Fonte: Do autor.

Para a análise tátil-visual da composição da brita reciclada, verificou-se o percentual cimentício em torno de 93,72%, composição cerâmica de 2,51% e presença de solo em percentual de 1,26%. Apesar da maior composição ser cimentícia, a presença de demais materiais nesta brita reciclada pode influenciar diretamente na resistência à compressão de concretos, bem como na fragilidade da zona de transição interfacial (ZTI).

## 4.2. PARÂMETROS DOS CONCRETOS DOSADOS

### 4.2.1. Propriedades no estado fresco

Os resultados do ensaio de consistência pelo abatimento do tronco de cone estão apresentados na Tabela . Nos ensaios, por motivos de estudos e comparação, a relação água/cimento foi mantida igual a 0,50, mesmo que agregados reciclados impactam na diminuição de trabalhabilidade.

**Tabela 10:** Índice de consistência pelo abatimento do tronco de cone.

Tipo de concreto	Norma	Abatimento (mm)	Relação água/cimento (%)
Concreto convencional	ABNT NBR 16889:2020	90	0,50
Concreto reciclado	ABNT NBR 16889:2020	19	

Fonte: Do autor.

O concreto convencional apresentou valor de abatimento do tronco de cone de acordo com o valor de abatimento definido na dosagem experimental ( $100 \pm 20\text{mm}$ ),

ao contrário do concreto reciclado, que se tornou menos plástico. Esse fato ocorreu provavelmente pela composição heterogênea dos agregados reciclados e o maior teor de material pulverulento para a areia reciclada. Mesmo com o procedimento de pré-hidratação, os agregados reciclados impactaram na perda de trabalhabilidade. Os resultados apresentados concordam com os apresentados na revisão da literatura propostos por Gerin, Sales e Nardin (2019), ilustrado na Figura 21, e Frotte *et al.* (2017). Como fator importante, é necessário o ajuste de abatimento (mm) para valores que viabiliza o seu lançamento e adensamento, por exemplo, com uso de aditivos plastificantes.

Os resultados da determinação da massa específica pelo método gravimétrico são apresentados na Tabela 51. Observa-se menor valor de massa específica para concreto dosado com agregados reciclados, devido aos valores de massas específicas evidenciadas na Tabela .

**Tabela 51:** Massa específica pelo método gravimétrico.

<b>Tipo de concreto</b>	<b>Norma</b>	<b>Massa específica aparente (kg/m<sup>3</sup>)</b>
Concreto convencional	ABNT NBR 9833:2008	2.463,5
Concreto reciclado	ABNT NBR 9833:2008	2.207,8

Fonte: Do autor.

Os resultados expostos na Tabela 11 estão de acordo com os dados propostos na literatura por Frotte *et al.* (2017), ilustrado na Tabela 7, e Rodrigues e Fucale (2014), expresso na Figura 22, que obtiveram menor massa específica para concretos em função do percentual de material RCD substituído na massa.

#### **4.2.2. Propriedades no estado endurecido**

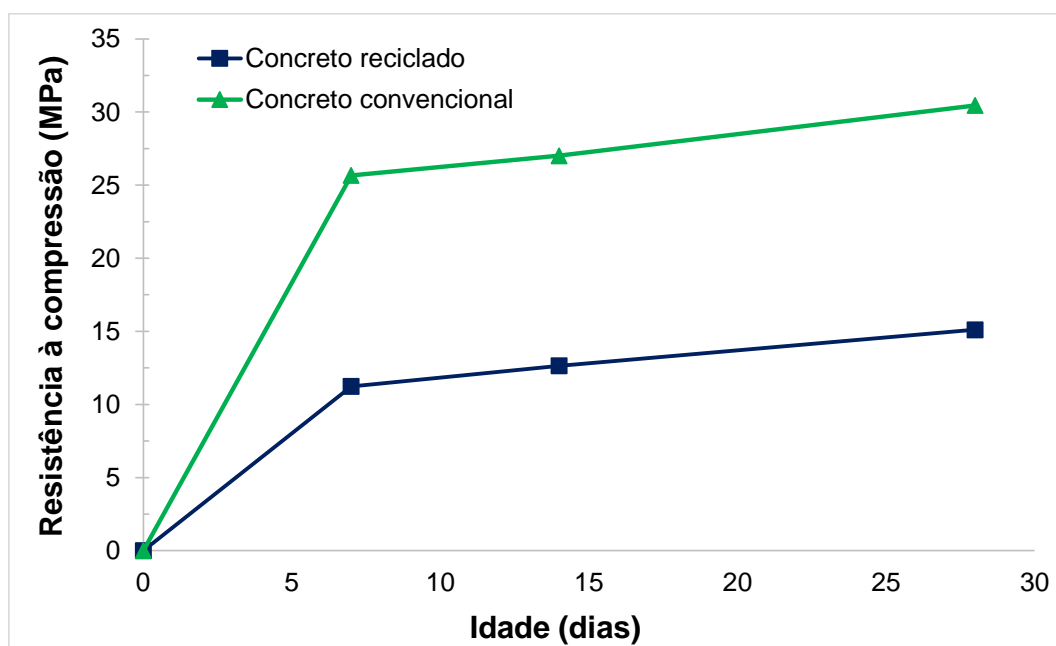
A Tabela 6 sumariza os resultados de resistência à compressão obtidos nas idades de 7, 14 e 28 dias. A Figura 45 apresenta resultados de taxa de resistência à compressão entre as idades de 7 aos 28 dias. Na Figura 46, tem-se os valores de resistência à compressão média.

**Tabela 6:** Resultados de resistência à compressão.

Tipo de concreto	Norma	Idades*		
		7 dias	14 dias	28 dias
Concreto convencional	ABNT NBR 5739:2018	25,67 MPa (4,2%)	27,02 MPa (5,9%)	30,46 MPa (7,6%)
Concreto reciclado	ABNT NBR 5739:2018	11,24 MPa (12,3%)	12,64 MPa (5,9%)	15,11 MPa (0,6%)

\*OBSERVAÇÃO: Entre parêntesis os respectivos coeficientes de variação.

Fonte: Do autor.

**Figura 45:** Taxa de ganho de resistência à compressão.

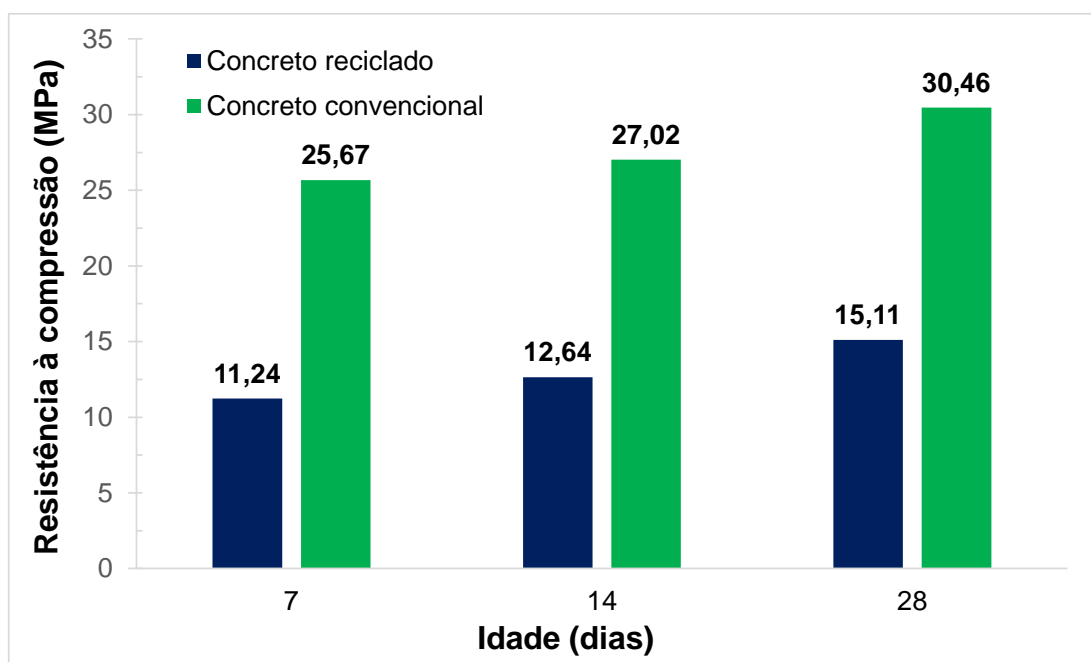
Fonte: Do autor.

Os resultados de resistências foram superiores, em todas as idades, no concreto convencional em relação ao reciclado, resultado que vai de encontro com os publicados por Frotte *et al.* (2017), ilustrado na Figura 24a, Vieira, Dal Molin e Lima (2004), na Figura 25, e Gerin, Sales e Nardin (2019), na Figura 26, cujos dados ilustram que a resistência a compressão dos concretos diminui em função do aumento percentual da substituição dos agregados convencionais pelos reciclados. Contudo, para ambos os concretos, é possível verificar uma tendência de ganho de resistência (Figura 45), o que também foi verificado por Gerin, Sales e Nardin, conforme a Figura 26, além dos resultados apresentados aos 7 dias indicarem uma boa estimativa para a resistência à compressão esperada aos 28 dias (Figura 46),.

A resistência à compressão média aos 7 dias para o concreto reciclado correspondeu a 74% da resistência obtida aos 28 dias e, para o concreto

convencional, o percentual obtido correspondeu a 84%. Esta consideração se torna pertinente para otimizar estudos de composições de traços experimentais, direcionando-se análises preliminares aos 7 dias e, posteriormente a ajustes necessários, análises aos 28 dias e em demais idades.

**Figura 46:** Resultados de resistência à compressão média.



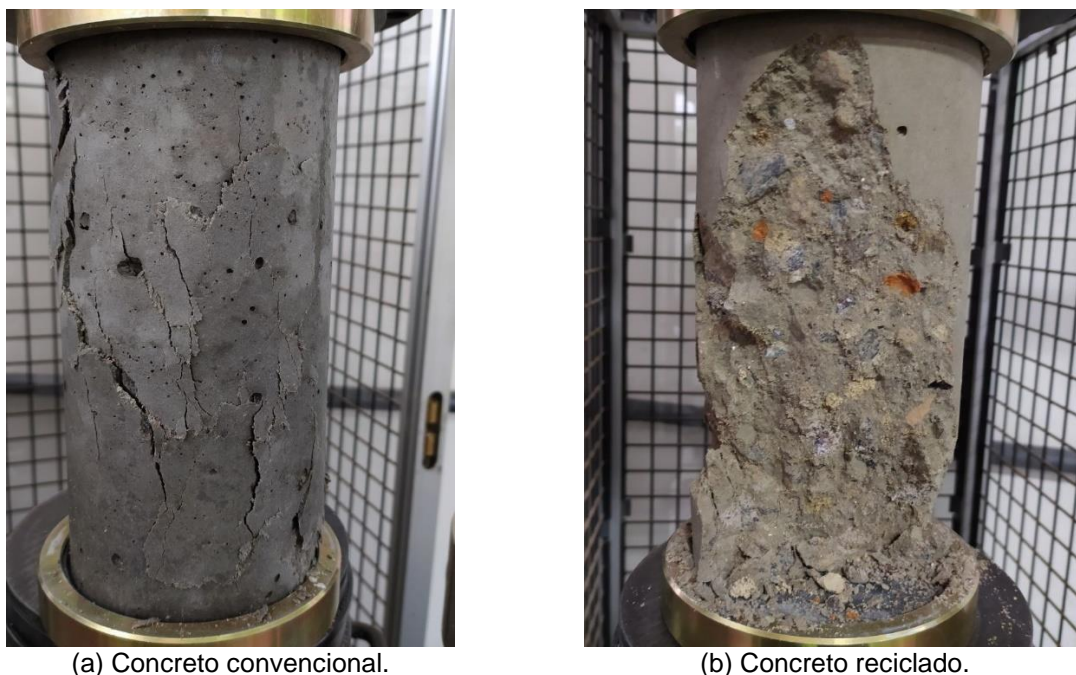
Fonte: Do autor.

Outro ponto importante é que, mesmo os valores de resistência à compressão do concreto reciclado ser em torno de 50% dos valores obtidos para o concreto convencional nas idades de 7, 14 e 28 dias, destaca-se que o uso de agregados reciclados por substituição total ainda obteve resistência à compressão de 15,11 MPa. Este valor corresponde à classe C15 destacada em norma para fins não estruturais. Portanto, o uso de agregados mistos de granulometrias miúda e graúda com substituição total ainda é viável ao se atingir resistência à compressão que atende a usos de concretos para fins não estruturais. Dado esse resultado, concretos dosados com teores parciais de agregados RCD tendem a atingir valores de resistência mecânica a compressão que permita aplicação para fins estruturais.

A Figura 47 exemplifica o comportamento dos corpos de prova produzidos com agregados convencionais (Figura 47a) e com agregados reciclados (Figura 47b) após o rompimento. Verifica-se que o concreto convencional absorveu maiores cargas de compressão do que o reciclado devido ao tipo de rompimento de característica rígida

em toda à seção do corpo de prova, ao contrário do concreto reciclado. Isso ocorreu devido a composição da brita reciclada conter materiais com maior índice de porosidade e, conseqüentemente, baixa resistência mecânica, como cerâmica e solo (Figura 44), que fragilizam a ZTI por conta do aumento de cristais de água e hidróxidos de cálcio que ocupam esses vazios, diminuindo a resistência do concreto.

**Figura 47:** Corpos de prova de concreto após ensaios de resistência à compressão.



(a) Concreto convencional.

(b) Concreto reciclado.

Fonte: Do autor.

A Tabela 7 apresenta os resultados estimados para resistência à tração (Equação 9) e módulo de elasticidade (Equação 10) aos 28 dias. Os parâmetros estimados, como dependem diretamente do comportamento de resistência à compressão aos 28 dias, evidenciam que, para os agregados reciclados empregados e por substituição total, houve diminuição de resistência à tração e módulo de elasticidade do concreto reciclado em relação ao concreto convencional.

**Tabela 7:** Resultados estimados de resistência à tração e módulo de elasticidade.

Tipo de concreto	Norma	Resistência à tração	Módulo de elasticidade
Concreto convencional	ABNT NBR 6118:2014	2,93 MPa	30,93 GPa
Concreto reciclado	ABNT NBR 6118:2014	1,83 MPa	21,76 GPa

Fonte: Do autor.

Ambos os resultados estão de acordo com os publicados na literatura por Frotte *et al.* (2017), conforme a Figura 24b e Gerin, Sales e Nardin, ilustrado nas Figuras 26b

e 27, em que foi verificado que a resistência à tração e o módulo de elasticidade de concretos diminuem em função do teor de substituição dos agregados convencionais pelos reciclados.

### 4.3. ANÁLISE DA VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA

A Tabela 8 apresenta o custo para a dosagem de 1m<sup>3</sup> de concreto de classe de resistência à compressão igual a 25MPa, considerando os valores para aquisição dos materiais cotados na cidade de Varginha no mês de agosto de 2021, bem como o custo de concreto usinado para a classe C25 em torno de R\$349,00/m<sup>3</sup>.

**Tabela 8:** Custo unitário dos materiais para dosagem de 1m<sup>3</sup> de concreto.

Traço em massa	1: 1,55: 2,78, a/c: 0,50 L/kg			
	Materiais	Concreto convencional		Concreto reciclado
		Consumo	Valor	Consumo
Cimento	417,76 kg	R\$ 0,58/kg	417,76 kg	R\$ 0,58/kg
Areia	647,50 kg	R\$ 0,05/kg	672,50 kg	R\$ 0,03/kg
Brita	1161,25 kg	R\$ 0,05/kg	928,25 kg	R\$ 0,05/kg
Água	209,00 L	R\$ 0,01/L	209,00 L	R\$ 0,01/L
<b>Custo total</b>		<b>R\$ 334,83</b>		<b>R\$ 310,98</b>

OBSERVAÇÃO: Custos usados como referência (cotação feita no comércio de Varginha e na empresa ECOVIA Reciclagem de Resíduos da Construção Civil Ltda, em agosto de 2021):

- **Cimento:** R\$29,20/saco, então R\$ 0,58/kg;
- **Areia média natural:** R\$78,33/m<sup>3</sup> e considerando massa unitária de 1440kg/m<sup>3</sup> (resultado de caracterização da Tabela 8), obteve-se R\$0,05/kg. Usou-se massa unitária pois é feita medida volumétrica na compra direta;
- **Areia média reciclada:** R\$50,00/m<sup>3</sup> e considerando massa unitária de 1460kg/m<sup>3</sup> (resultado de caracterização da Tabela 8), obteve-se R\$0,03/kg. Usou-se massa unitária pois é feita medida volumétrica na compra direta;
- **Brita nº1 convencional:** R\$85,94/m<sup>3</sup> e considerando massa unitária de 1570kg/m<sup>3</sup> (resultado de caracterização da Tabela 8), obteve-se R\$0,05/kg. Usou-se massa unitária pois é feita medida volumétrica na compra direta;
- **Brita nº1 reciclada:** R\$58,50/m<sup>3</sup> e considerando massa unitária de 1200kg/m<sup>3</sup> (resultado de caracterização da Tabela 1), obteve-se R\$0,05/kg. Usou-se massa unitária pois é feita medida volumétrica na compra direta;
- **Água potável:** R\$9,860/m<sup>3</sup> com tarifa comercial para consumo > 200 m<sup>3</sup>. Então, se 1 m<sup>3</sup> é igual a 1000 dm<sup>3</sup> (ou 1000L), obteve-se R\$ 0,01/L. (Disponível em: [http://www.copasa.com.br/media2/Tarifa/CNOR\\_Resol\\_136\\_Reajuste\\_2020.pdf](http://www.copasa.com.br/media2/Tarifa/CNOR_Resol_136_Reajuste_2020.pdf). Acesso em: 10 ago. 2021).

Fonte: Do autor.

Pelos resultados, há uma economia de cerca de 7,12% no custo de concreto dosado com a substituição total de agregados convencionais (areia e brita) por agregados reciclados.

Vale ressaltar que nessa pesquisa de mercado foram considerados os preços dos materiais com base no consumo por atacado visando simular uma situação cotidiana dentro do contexto da construção civil.



Diante do recente cenário de elevação dos custos de insumos da construção civil, a relação percentual entre o concreto reciclado e o convencional apresentado foi diretamente impactado. Contudo, para o atual contexto pela busca de práticas sustentáveis na indústria da construção civil, é necessária a ponderação dos benefícios ambientais conjuntamente às viabilidades técnica e econômica.

Os principais ganhos ambientais gerados pela reinserção dos RCD na indústria da construção civil é a diminuição de impactos ambientais causados pela exploração dos recursos naturais para a produção de agregados empregados na indústria e a prática de reciclagem e reinserção destes insumos na cadeia produtiva da indústria da construção civil.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

### **5.1. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

A aplicabilidade de agregados alternativos, tais como areia e brita recicladas de resíduos de construção e demolição, tem sido apontada nos últimos anos como uma alternativa promissora para a mitigação de impactos ambientais causados pela construção civil. Torna-se de grande relevância o conhecimento referente ao comportamento desses agregados em dosagens experimentais de concretos, de modo a compreender as suas propriedades para um direcionamento mais adequado, em atendimento aos requisitos de projeto e desempenhos esperados.

A partir da revisão da literatura, a composição dos agregados reciclados influencia diretamente no comportamento de concretos reciclados nos estados fresco e endurecido, de modo que quanto maior o percentual de composição cimentícia, esperam-se comportamentos compatíveis a concretos dosados com agregados convencionais.

Para os agregados utilizados nesta pesquisa, infere-se que a composição mista da brita reciclada impactou em menores resultados de resistência à compressão, pelo fato de ser composto por partículas lamelares e angulares, além de demais composições que enfraquecem a zona de transição interfacial. Também, a presença de elevados percentuais de pulverulentos na areia reciclada afetou diretamente a resistência da fase argamassa do concreto, mesmo apresentando massa específica superior ao da areia média natural.

Os resultados obtidos foram condizentes a dados experimentais reportados na literatura e a realização dos ensaios de laboratório foram de grande importância para a compreensão das propriedades dos materiais reciclados e suas influências em dosagens experimentais de concretos.

Ao se optar pela realização de substituição total dos agregados miúdo e graúdo por agregados reciclados, a pesquisa visou evidenciar a abrangência de alterações nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido e, a partir disso, ser possível estabelecer novos planejamentos experimentais para a viabilização de dosagens que possam alcançar comportamentos mínimos esperados aos concretos para fins estruturais. De modo complementar, o valor médio de resistência à

compressão aos 28 dias obtido no concreto reciclado indica a viabilidade da incorporação total de agregados reciclados em aplicações para fins não-estruturais (classe de resistência de C15), cuja aplicação é presente em volumes representativos em obras prediais brasileira.

Esse trabalho almejou agregar, com embasamento técnico e científico, para a atual necessidade de quebra de paradigmas do reuso de resíduos de construção e demolição na forma de agregados reciclados, contribuindo na mitigação de impactos econômicos, ambientais e sociais negativos que a indústria da construção civil vem ocasionando nos últimos anos.

Reporta-se a constante geração de grandes volumes destes resíduos sólidos urbanos, paralelamente a extrações consideráveis de areias por dragagens de rios ou desmontes hidráulicos, atualmente considerados escassos em algumas regiões brasileiras, assim como de obtenção de britas graduadas por rochas britadas.

Além do reuso de agregados reciclados ser uma realidade em demais países europeus, é importante a pesquisa continuada com parcerias público-privada buscando-se meios de adequar as propriedades dos agregados reciclados e estabelecer limites de substituições de agregados convencionais por reciclados para as granulometrias miúda e graúda. Portanto, ser possível alcançar a meta estabelecida pelo recente lançamento do Plano Nacional de Resíduos Sólidos de aumentar a reciclagem dos resíduos da construção civil a níveis de 25% até o ano de 2040.

Espera-se contribuir para minimizar os possíveis entraves conceituais que ainda existentes dentre os atuais e futuros profissionais da indústria da construção civil em relação aos reuso de resíduos de construção e demolição e seus derivados, possibilitando o seu maior emprego conjuntamente às demandas construtivas no mercado brasileiro.

Devido a atual situação pandêmica iniciada em março de 2020, não foi possível a realização de ensaios para avaliação de diferentes substituições parciais de agregados reciclados em novas dosagens experimentais. A continuidade desses estudos contemplaria análises com agregados reciclados de composição cimentícia que já foram obtidos por moagens de blocos intertravados separadamente na usina de reciclagem de entulhos de Varginha. O agregado graúdo reciclado foi caracterizado

por resistência à abrasão Los Angeles e que apresentou resultado compatível ao agregado britado de rocha gnaisse de mesma granulometria.

## **5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

Considerando-se a pertinência desta temática para os futuros engenheiros civil, são apresentadas sugestões para a continuidade desta pesquisa na Instituição:

- Identificar e caracterizar a natureza, o tamanho, a forma e o arranjo das partículas dos agregados reciclados presentes nos concretos para averiguar as propriedades físico-químicas dessas microestruturas;
- Avaliar as propriedades de concretos nos estados fresco e endurecido para diferentes percentuais de agregados convencionais e reciclados miúdo e/ou graúdo em dosagens de concreto para fins estruturais;
- Realizar o estudo de dosagem para agregados reciclados de composição cimentícia com substituição total de agregados, de modo a comparar com os resultados obtidos para agregados reciclados mistos;
- Estudar o efeito de aditivos químicos comumente empregados em dosagens estruturais de concretos e sua contribuição para ganhos de trabalhabilidade e resistências nos concretos reciclados.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **O que é entulho**. ABRECON. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/entulho/o-que-e-entulho/>>. Acesso em: 26 e jun. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Relatório Pesquisa Setorial 2014/2015**. ABRECON. São Paulo. 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RECICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO. **Tabela resolução CONAMA N° 307, 05 de julho de 2002**. ABRECON. 15 de agosto de 2017. Disponível em: <[https://abrecon.org.br/wp-content/uploads/abrafati\\_abrecon.pdf](https://abrecon.org.br/wp-content/uploads/abrafati_abrecon.pdf)>. Acesso em: 14 fev. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2018/2019**. ABRELPE. São Paulo: [s.n.]. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/download-panorama-2018-2019/>>. Acesso em: 10 jul. 2021.

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

ÂNGULO, S.C. *et al.* **Metodologia da Caracterização de Resíduos de Construção e Demolição**. In: Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil, 6., São Paulo. **Anais [...]**. São Paulo: IBRACON, 2003

ÂNGULO, S.C.; FIGUEIREDO, A.D. **Concreto com agregados reciclados**. In: *Concreto: Ciência e tecnologia*. 2. Ed. São Paulo: Instituto Brasileiro do Concreto. IBRACON, p. 1731-1767, jan. 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/293811678\\_CONCRETO\\_COM\\_AGREGADOS\\_RECICLADOS](https://www.researchgate.net/publication/293811678_CONCRETO_COM_AGREGADOS_RECICLADOS)>. Acesso em: 30 abr. 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Manual de ensaios de agregados, concreto fresco, concreto endurecido**. ABCP, MT -6. São Paulo, 118 p, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5738**: Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2016.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 5739**: Concreto: ensaios de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto armado - Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 7211**: Agregados para concreto: especificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 8953**: Concreto para fins estruturais: classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9833**: Concreto fresco: determinação da massa específica, do rendimento e do teor de ar pelo método gravimétrico. Rio de Janeiro: ABNT, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 9935**: Agregados: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 12655**: Concreto de cimento Portland: preparo controle, recebimento e aceitação: procedimento. Rio de Janeiro, Rio de Janeiro: ABNT, 2015.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland - Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 16889**: Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 2020.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 45:** Agregados: determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro: ABNT, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 46:** Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75um, por lavagem. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 52:** Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 53:** Agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro: ABNT, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 248:** Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro: ABNT, 2003.

BAUER, L.A.F. **Materiais de construção.** 5ª Edição revisada. Rio de Janeiro: LTC, 2008. 490 p. V. 1.

BESSA, S.A.L.; MELLO, T.A.G.; LOURENÇO, K.K. **Análise quantitativa e qualitativa dos resíduos de construção e demolição gerados em Belo Horizonte.** Revista Brasileira de Gestão Urbana, v. 11, e20180099. 2019.

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

BUTTLER, A.M. **Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto:** influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados. 23. 187 f. São Paulo. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BUTTLER, A.M. **Concreto com Agregados Graúdos Reciclados de Concreto:** influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos

reciclados. 23. 187 f. São Paulo. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia de Estruturas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.

BUTTLER, A.M; CORRÊA, M.R.S; RAMALHO, M.A. Agregados reciclados na produção de artefatos de concreto. **Revista Concreto**, São Paulo, v. dez./jan./fe 2005, n. 37, p. 24-27, 2005.

BRASIL. **Resolução Conama nº 307, de 5 de julho de 2002**. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diário Oficial da União, Brasília, n. 136, p. 95-96, 17 jul. 2002.

BRASIL. **Resolução Conama nº 469, de 29 de julho de 2015**. Altera a Resolução CONAMA nº 307, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos resíduos da construção civil. CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE. Diário Oficial da União, Brasília, n. 1, p. 1, 29 jul. 2015.

BRASIL. **Lei nº 12.305, em 02 de agosto de 2010**. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA, Casa Civil, Superintendência para Assuntos Jurídicos, 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 19 jun. 2021.

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília: MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, Secretaria de Qualidade Ambiental. Brasília, 2020. 187 p.

CABRAL, A.E.B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D.C.C.; RIBEIRO, J.L.D. **Modelagem da resistência à compressão de concretos produzidos com agregados reciclados de RCD**. Minerva. v. 4 (1), p. 75-84, 2007.

CABRAL, A.E.B *et al.* **Mechanical Properties Modeling of Recycled Aggregate Concrete**. Construction and Building Materials, v. 24, n. 4, p. 421-430, abr. 2010.

CHEN, J.; WANG, Y.; ROEDER, C.W.; MA, J. **Behavior of normal strength recycled aggregate concrete filled steel tubes under loading**. Engineering Structures, v. 130, pp.23-40. 2017.



DEUTSCHE INSTITUT FUR NORMUG (DIN). DIN 4226-100: aggregates for mortar and concrete – part 100: recycled aggregates. Germany, 2002.

DNPM. **Anuário Mineral Brasileiro**. Departamento Nacional de Produção Mineral – DNPM. Ministério de Minas e Energia. Brasília, 2010. 871 p.

ETXEBERRIA, M. *et al.* **Influence of Amount of Recycled Coarse Aggregates and Production Process and Properties of Recycled Aggregate Concrete**. Cement and Concrete Research, v. 37, n. 5, p. 735-742, 2007

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. **Durability Performance of Concrete Made With Fine Recycled Concrete Aggregates**. Cement and Concrete Composites, v. 32, n. 1, p. 9-14, 2010.

FERNANDES, T.; CARVALHO, D. Paraguaios vêm ao Brasil discutir preço de energia em Itaipu. **Folha de S. Paulo**. 31 de jul. de 2019. Disponível em: <<https://www1.folha.uol.com.br/mercado/2019/07/paraguaios-vem-ao-brasil-discutir-preco-de-energia-de-itaipu.shtml>>. Acesso em: 14 de fev. de 2020.

FROTTE, C.; NÚBILA, C.S.A.D.; NAGGALI, A.; MAZER, W.; MACIOSKI, G.; OLIVEIRA, L.O.S. **Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD**. revista Matéria, v.22, n.2, 2017.

GERIN, M.; SALES, A.; DE NARDIN. S. **Mechanical and physical properties of recycled aggregates concrete**. In: Revista Tecnológica, Universidade Estadual de Maringá. 2019

KATZ, A. **Properties of Concrete Made With Recycled Aggregate from Partially Hydrated Old Concret**. Cement and Concrete Research, New York, v. 33, n. 5, p. 703-71, 2003.

ISAIA, G.C. **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais**. São Paulo: IBRACON. 2007. V. 2.

JAILON, L.; POON, C. S.; CHIANG, Y. H. **Quantifying the waste reduction potential of using prefabrication in building construction in Hong Kong**. In: Waste Management, v. 23, p. 309 – 320, 2009.

KWAN, W. H.; RAMLI, M.; KAM, K. J.; SULIEMAN, M. Z. **Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties.** Construction and Building Materials, n. 26, p. 565–573, 2012.

LATTERZA, M.B. **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação.** 1998. 130f. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998.

LEITE, M. B. **Avaliação de Propriedades Mecânicas de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição.** 2001. 270 f. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MALTA, J.L.; SILVA, V.S.; GONÇALVES, J.P. **Argamassa contendo agregado miúdo reciclado de resíduo de construção e demolição.** Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais. v. 1(2), p. 176-188, 2013.

MARQUES, M. L.; CAMPOS, K. D. A. **Estudo da adição do pó de pedra em argamassas de revestimento e assentamento.** In: Revista Pindorama, v. 3, p. 150-164, 2012.

MANCIN, R, C. **Estagnação das pesquisas na área gera expectativas negativas.** 2012. Disponível em: <<http://www.sebrae-sc.com.br/ideais/default.asp?vcdtexto=2820>>. Acesso em: 19 jun. de 2021.

MEHTA, P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais.** 2ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MIRANDA, L.F.R.; TORRES, L.; VOGT, V.; BROCARD, F.L.M.; BARTOLI, H. **Panorama atual do setor de reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil.** In: XVI encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. São Paulo. 2016.

MOVIECO. **Cartilha Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).** Movieco - Movimento Ecológico, p.26, 2013. Disponível em: <[www.movieco.org.br](http://www.movieco.org.br)>. Acesso em: 19 jun. 2021.

NAGGALI, A. **Gerenciamento de resíduos sólidos na construção civil.** São Paulo: Oficina de textos, 2014.

NEVILLE, A.M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013. 448 p.

OSSA, A.; GARCÍA, J.L.; BOTERO, E. **Use of recycled construction and demolition waste (CDW) aggregates: A sustainable alternative for the pavement construction industry**. Journal of Cleaner Production. V. 135, p. 379-386, 2016.

PREFEITURA DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Viaduto do chá**. Disponível em: <<http://www.saopaulo.sp.gov.br/conhecasp/pontos-turisticos/viaduto-do-cha/>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

RODRIGUES, C.R.S; FUCALE, S. **Dosagem de concretos produzidos com agregado miúdo reciclado de resíduo da construção civil**. Ambiente Construído, Porto Alegre, v. 14, n. 1, p. 99-111, jan./mar. 2014.

REDAÇÃO VEJA SÃO PAULO. Ponte Estaiada ganha decoração de Natal com estrelas de 4 metros. **Revista Veja**, São Paulo, 6 de dez. de 2019. Disponível em: <<https://vejasp.abril.com.br/cultura-lazer/ponte-estaiada-decoracao-natal/>>. Acesso em: 14 fev. 2020.

SADATI, S.; KHAYAT, H.H. **Field performance of concrete pavement incorporating recycled concrete aggregate**. Construction and Building Materials. Vol. 126, pp. 691-700. 2016.

SOARES, D.; BRITO, D.; FERREIRA, J.; *et al.* **Use of coarse recycled aggregates from precast concrete rejects: Mechanical and durability performance**. Construction and Building Materials, v.71, pp.263-272, 2014.

SINDUSCON-MG. **Alternativas para a destinação de resíduos da construção civil**. SINDUSCON-MG. 3º ed. Belo Horizonte, 2014. 116 p.

TOMOSAWA, F. *et al.* **The Way Concrete Recycling Should Be**. Journal of Advanced Concrete Technology, v. 3, n.1. 2005. P. 3-16.

VIEIRA, G.L.; DAL MOLIN, D.C.C.; LIMA, F.B. **Resistência e Durabilidade de Concretos Produzidos com Agregados Reciclados Provenientes de Resíduos de Construção e Demolição**. Engenharia Civil - UM, n. 19, 2004.

VIEIRA, E. G; REZENDE, E.N. **Exploração mineral de areia e um meio ambiente ecologicamente equilibrado: e possível conciliar.** Revista Sustentabilidade em Debate. Brasília, v.6, n.2, p. 171-192, 2015.

WILSON, L. Considerado “o pai da ponte” Rio-Niterói, engenheiro Carlos Henrique Siqueira ministra palestra em Joinville. **Revista área.** 23 de abril de 2018. Disponível em: < <https://revistaarea.com.br/considerado-o-pai-da-ponte-rio-niteroi-engenheiro-carlos-henrique-siqueira-ministra-palestra-em-joinville/>>. Acesso em: ago. 2021.

XIAO, J.; LI, J.; ZHANG, C. **Mechanical Properties of Recycled Depth of Concrete Containig Low-Calcium Fly Ash.** Construction and Building Materials, v. 23, p. 725-733, 2009.

YUAN, F; SHEN, L. Y; LI Q. M. **Emergy analysis of the recycling options for construction and demolition waste.** Waste Management, v. 31, n. 11, p. 2503 - 2511, 2011.

YUAN, H.; CHINI, A. R.; L. U, Y.; SHEN, L. **A dynamic model for assessing the effecets of management strategies on the reduction of construction and demolition waste.** Waste Management, v. 32, n. 3, p. 521-531, 2012.

## APÊNDICE A: DOSAGEM EXPERIMENTAL DE CONCRETO

### Introdução

A dosagem do concreto é o processo de obtenção da combinação correta de cimento, agregados, água, adições e aditivos visando produzir concretos com as especificações requisitadas (MEHTA; MONTEIRO, 2014). O objetivo das dosagens pode ser definido como produzir concretos que consigam cumprir os requisitos pré-determinados, sendo os principais a trabalhabilidade das massas no estado fresco e a resistência e conseqüente durabilidade do material ante os esforços mecânicos, ao menor custo possível; ou seja, selecionar os componentes adequados entre os materiais disponíveis e determinar a mistura mais econômica visando produzir concreto com características mínimas de desempenho (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Atualmente, existem distintos métodos para a realização da dosagem do concreto, com o intuito de se obter o traço, ou seja, a proporção dos materiais para a mistura do concreto, tais como ACI/ABCP e IPT, sendo o ACI/ABCP o mais utilizado. A Tabela A1 ilustra as proporções típicas empregadas de materiais para diferentes dosagens.

**Tabela A1:** Proporções empregadas em dosagens de diferentes resistências.

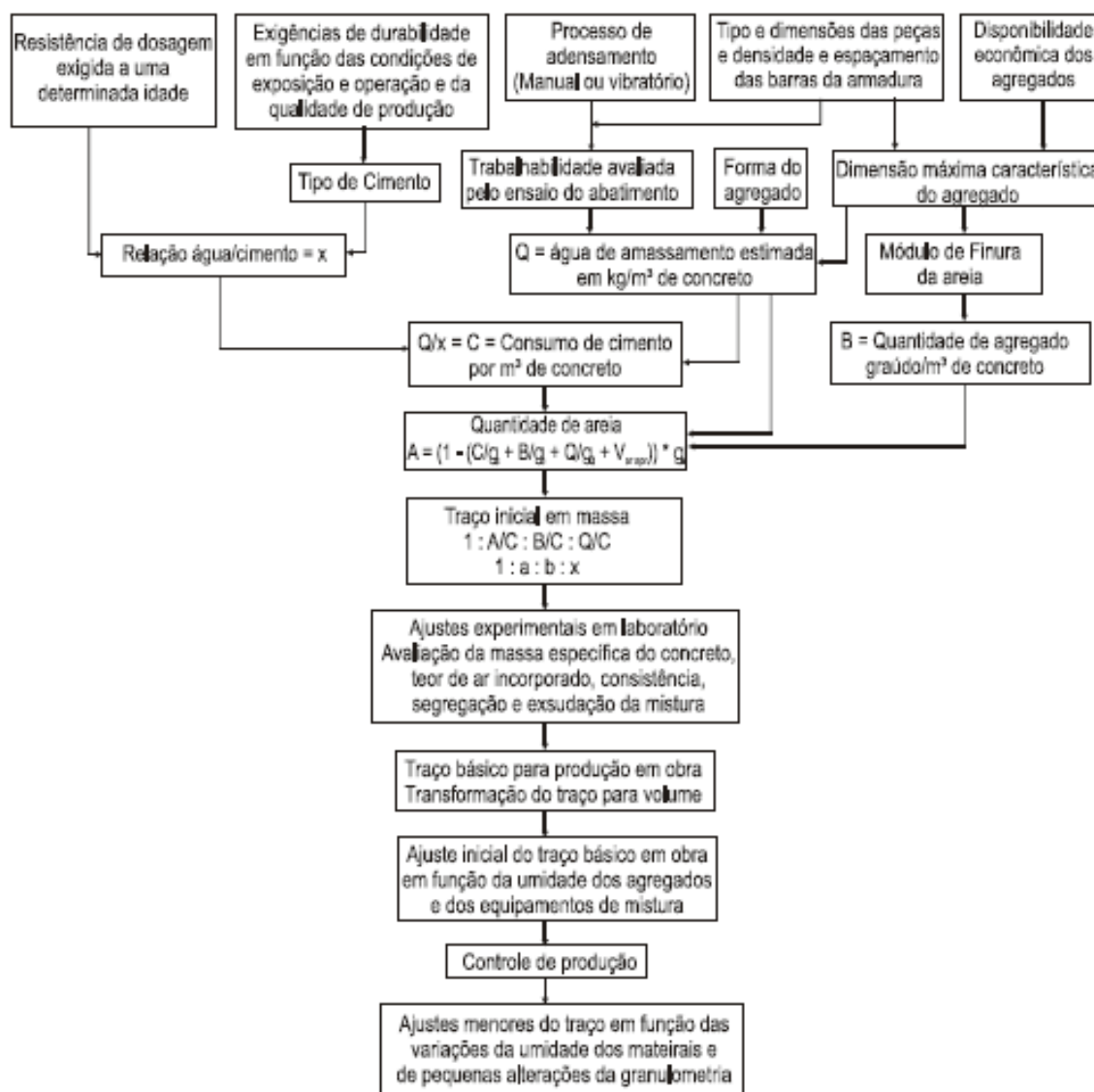
<b>Materiais</b>	<b>Baixa resistência (kg/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Resistencia moderada (kN/m<sup>3</sup>)</b>	<b>Alta resistência (kN/m<sup>3</sup>)</b>
Cimento	255	356	510
Água	178	178	178
Ag. Miúdo	801	848	890
Ag. Graúdo	1169	1032	872
<u>Proporção da pasta de cimento</u>			
% em massa	18	22,10	28,1
%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

Fonte: MEHTA; MONTEIRO, 2014, adaptada.

### Dosagens com agregados convencionais

O método de dosagem ABCP/ACI se preocupa com a trabalhabilidade do concreto por meio de diversos fatores, tais como: os materiais empregados, as condições de execução e adensamento e às dimensões das peças. Além disso, o método vincula, para cada granulometria da areia e da brita, um valor máximo do agregado seco para cada m<sup>3</sup> de concreto, fornecendo traços com baixos teores de areia e misturas mais econômicas. A Figura A1 a seguir apresenta o fluxograma simplificado do método ABCP/ACI.

**Figura A1:** Fluxograma simplificado do método de dosagem da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP).



Fonte: BOGGIO, 2000, adaptada.

Seguindo método ABCP/ACI, a dosagem do concreto foi calculada nas seguintes etapas:

### 1. Resistência de dosagem exigida para uma determinada idade:

O valor de resistência para o traço do concreto para uma determinada idade é obtido a partir da Equação A1:

$$f_{cmj} = f_{ckj} + 1,65 * sd \quad (A1)$$

Sendo:

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

$f_{ckj}$ : Resistência característica do concreto à compressão, aos  $j$  dias (MPa);

$s_d$ : Desvio padrão da dosagem (MPa);

$j$ : Idade de rompimento do concreto, expresso em dias.

## **2. Escolha do tipo de cimento:**

A escolha do tipo de cimento deve ser definida visando atender as especificações técnicas exigidas em projeto e considerando a disponibilidade do material na região.

## **3. Fixação da consistência adequada de trabalho:**

A definição do valor do índice de consistência adotado deve visar a aplicabilidade do material no contexto da obra.

## **4. Escolha da Dimensão Máxima Característica (DMC) do agregado graúdo:**

A definição da dimensão do agregado graúdo visa potencializar as características do concreto de forma a atender de forma mais eficiente possível sua demanda em obra.

## **5. Cálculo da quantidade de água de amassamento por $m^3$ de concreto:**

A estimativa do consumo de água de amassamento é determinada mediante uso de tabelas da literatura, ou determinações em laboratório, de consumo de água em função da dimensão máxima característica (DMC) dos agregados graúdos e a relação com a faixa de abatimento requerida. A Tabela A2 é utilizada para a primeira estimativa do consumo de água de dosagem.

**Tabela A2:** Quantidade de água de amassamento do concreto, com e sem ar incorporado, em função do abatimento e DMC do agregado graúdo.

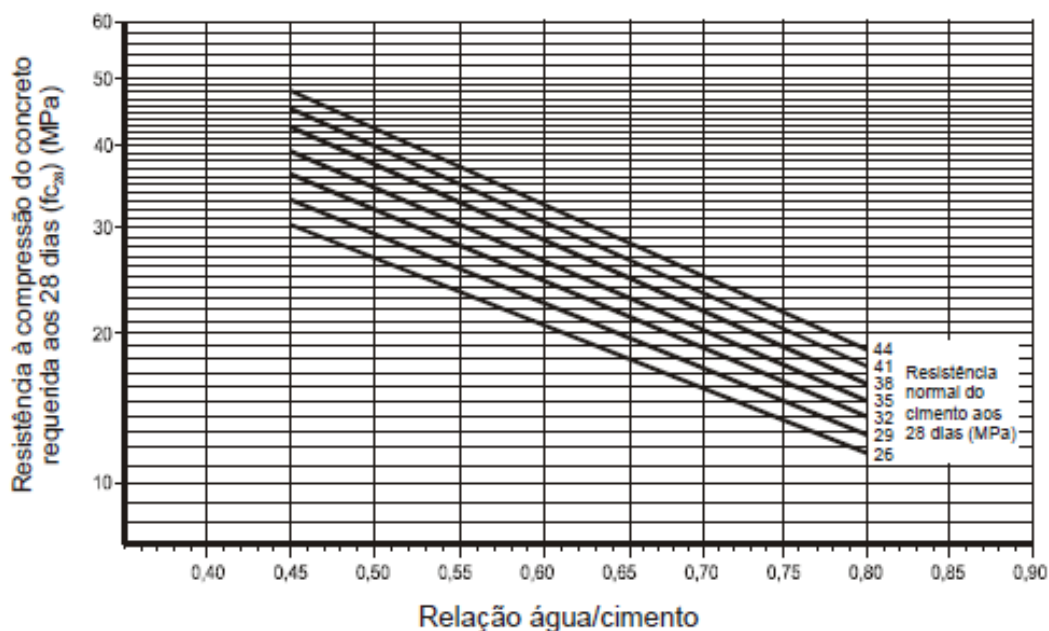
Abatimento (mm)	Dimensão máxima característica (DMC) do agregado graúdo (mm)				
	9,5	12,5	19	25	38
<u>Concreto sem ar incorporado</u>					
25 a 50	208 kg/m <sup>3</sup>	199 kg/m <sup>3</sup>	187 kg/m <sup>3</sup>	178 kg/m <sup>3</sup>	163 kg/m <sup>3</sup>
75 a 100	228 kg/m <sup>3</sup>	216 kg/m <sup>3</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>
<u>Concreto com ar incorporado</u>					
25 a 50	181 kg/m <sup>3</sup>	175 kg/m <sup>3</sup>	166 kg/m <sup>3</sup>	160 kg/m <sup>3</sup>	148 kg/m <sup>3</sup>
75 a 100	202 kg/m <sup>3</sup>	193 kg/m <sup>3</sup>	181 kg/m <sup>3</sup>	175 kg/m <sup>3</sup>	163 kg/m <sup>3</sup>
150 a 175	216 kg/m <sup>3</sup>	205 kg/m <sup>3</sup>	193 kg/m <sup>3</sup>	184 kg/m <sup>3</sup>	172 kg/m <sup>3</sup>

Fonte: ACI 211.1-81 *apud* MEHTA; MONTEIRO, 2014, adaptada.

## 6. Cálculo da relação água/cimento:

Para o cálculo da relação água/cimento são utilizadas as curvas de Walz (Figura A2)

**Figura A2:** Gráfico para a determinação da relação água/cimento (a/c) em função das resistências do concreto e do cimento aos 28 dias de idade.



Fonte: RODRIGUES, 1998, *apud* ASSUNÇÃO, 2002.

## 7. Cálculo do consumo de cimento (Cc) por m<sup>3</sup> de concreto:

O consumo de cimento é calculado utilizando à Equação A2:

$$C_c = \frac{C_a}{a/c} \left( \frac{Kg}{m^3} \right) \quad (A2)$$



Sendo:

$C_c$ : Consumo de cimento ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

$C_a$ : Consumo de água ( $\text{Kg}/\text{m}^3$ );

$a/c$ : fator água/cimento.

### 8. Proporcionamento de agregados graúdo e miúdo por $\text{m}^3$ de concreto:

A quantidade do agregado graúdo utilizado foi calculada segundo a Equação A3:

$$C_b = V_{cs} * MU \left( \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right) \quad (\text{A3})$$

Sendo:

$C_b$ : Consumo de brita (Kg);

$V_{cs}$ : Volume compactado seco do agregado graúdo seco ( $\text{m}^3$ ), obtido na Tabela A2;

MU: Massa unitária compactada do agregado graúdo (Kg).

A quantidade do agregado miúdo no traço é calculada segundo a Equação A4:

$$C_m = \left[ 1 - \left( \frac{C_c}{\gamma_c} + \frac{C_b}{\gamma_b} + \frac{C_a}{\gamma_a} + \text{Var aprisionado} \right) \right] * \gamma_m \quad (\text{A4})$$

Sendo:

$C_m$ : Quantidade de agregado miúdo (Kg);

$C_c$ : Quantidade de cimento (Kg);

$C_a$ : Quantidade de água (Kg);

Var aprisionado: Volume de ar aprisionado;

$\gamma_c$ : Massa específica do cimento;

$\gamma_b$ : Massa específica da brita;

$\gamma_a$ : Massa específica da água;

$\gamma_m$ : Massa específica da areia.

**Tabela A3.** 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: RODRIGUES, 1990, *apud* BOGGIO, 2000.

### 9. Traço em massa:

O traço em massa é obtido a partir da seguinte Equação A5:

$$\frac{C_c}{C_c} : \frac{C_m}{C_c} : \frac{C_b}{C_c} // \frac{a}{c} \quad (A5)$$

Depois de definido o traço, é feito cálculo do consumo dos materiais para testes de abatimento do tronco de cone e da moldagem de pares de corpos-de-prova de concreto conforme a Equação A6:

$$M_{\text{cimento}} = \frac{V_{\text{concreto}}}{\frac{1}{\gamma_c} + \frac{a}{\gamma_a} + \frac{b}{\gamma_b} + \frac{a/c}{\gamma_w}} \quad (A6)$$

Sendo:

$V_{\text{concreto}}$ : volume total de concreto a ser dosado;

$\gamma_c$ : massa específica do cimento;

$\gamma_a$ : massa específica da areia;

$\gamma_b$ : massa específica da brita;

$\gamma_w$ : massa específica da água.