

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

CAMILA LACERDA GOMES

**DOSAGEM DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS POR MEIO DO
MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL**

BELO HORIZONTE
2024

CAMILA LACERDA GOMES

**DOSAGEM DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS POR MEIO DO
MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Conrado de Souza Rodrigues
Coorientador: Prof. Dr. Augusto Cesar da Silva Bezerra

BELO HORIZONTE

2024

G633d Gomes, Camila Lacerda
Dosagem de concretos com agregados reciclados por meio do modelo de empacotamento compressível / Camila Lacerda Gomes. – 2024.
126 f. : il., gráfs, tabs., fotos.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Orientador: Conrado de Souza Rodrigues.

Coorientador: Augusto Cesar da Silva Bezerra.

Bibliografia: f. 97-110.

Tese (doutorado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Civil.

1. Agregados (Materiais de construção) – Teses. 2. Propriedades mecânicas – Teses. 3. Reciclagem – Teses. 4. Construção sustentável – Teses. I. Rodrigues, Conrado de Souza. II. Bezerra, Augusto Cesar da Silva. III. Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Departamento de Engenharia Civil. IV. Título.

CDD 624.1834

CAMILA LACERDA GOMES

**DOSAGEM DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS POR MEIO DO
MODELO DE EMPACOTAMENTO COMPRESSÍVEL**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Engenharia Civil.

Prof. Conrado de Souza Rodrigues

Orientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Augusto Cesar da Silva Bezerra

Coorientador

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Profa. Flávia Spitale Jacques Poggiali

Departamento de Engenharia Civil, CEFET-MG

Prof. Flávio de Andrade Silva

Departamento de Engenharia Civil e Ambiental, PUC-RIO

Prof. White José dos Santos

Departamento de Engenharia de Materiais e Construção Civil, UFMG

Belo Horizonte, fevereiro de 2024.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus pela minha vida e por tudo que sou capaz de realizar.

Aos meus pais e irmãos que me sempre me apoiam em todas as minhas escolhas. Amo muito vocês!

Aos professores e funcionários do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil que colaboraram para o meu crescimento e ajudaram resolver as questões burocráticas.

Agradeço especialmente meus orientadores, Conrado e Augusto, pela disponibilidade, respeito, confiança e companheirismo.

Aos colegas do programa que deram muito suporte nas moldagens: sem vocês não seria possível fazer as misturas e os corpos de prova.

Aos colegas que sempre marcavam presença no cafezinho do 4º andar e fizeram os dias mais leves.

Aos laboratoristas do DEC campus Nova Gameleira, do DET Campus Nova Suíça e do DEC campus Curvelo.

Ao Prof. Flávio de Andrade Silva e a equipe do Laboratório de Estruturas e Materiais da PUC-RIO por possibilitarem o uso do software de dosagem utilizado durante a pesquisa.

Ao CEFET-MG, à CAPES e à FAPEMIG pelo auxílio financeiro.

Às empresas que contribuíram fornecendo materiais para serem utilizados na pesquisa: Ecovia pelo agregado reciclado cimentício, Lafarge/Holcim pelo cimento, Master Buildings Solutions pelo aditivo químico e Pilecco Nobre pela cinza da casca de arroz.

“Continue a nadar.”

Dory, *Procurando Nemo* (2003)

RESUMO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) são um exemplo de resíduo gerado em elevada quantidade pelo setor da construção civil. O RCD pode ser reaproveitado pelo próprio setor na forma de agregado reciclado (AR). Além de reduzir o descarte de resíduos, o uso do AR contribui para reduzir a extração de matéria prima, contribuindo para o meio ambiente. Devido à variabilidade na composição desse resíduo, e consequentemente do AR, as normas nacionais permitem que apenas 20% do agregado natural seja substituído pelo agregado reciclado de concreto. Tais restrições buscam minimizar as incertezas decorrentes da variabilidade das propriedades dos RCD, permitindo o uso seguro do material. O presente trabalho busca subsidiar avanços no uso dos RCD através da análise do método de dosagem de forma a viabilizar a obtenção de concretos com as propriedades previstas. O Modelo de Empacotamento Compressível é utilizado para dosagem de concreto da classe de resistência C30 produzidas com diferentes agregados graúdos reciclados e agregado natural: agregado reciclados de concreto, cimentício e cerâmico e gnaisse. A composição dos AR graúdos é variada para avaliar a influência da fração de materiais cerâmicos nas propriedades do concreto reciclado. As misturas foram testadas para propriedades do concreto no estado fresco e endurecido. O método de dosagem utilizado possibilitou a obtenção de concretos com resistência mecânica semelhante para diferentes agregados graúdos, reciclados e natural, indicando a eficiência do método para o uso dos AR. A estimativa do módulo de elasticidade das misturas foi avaliada de acordo com NBR 6118 e um parâmetro α_E foi proposto para os AR. Com isso, há possibilidade de, a partir da maior previsibilidade das propriedades do concreto, considerar o uso de maior quantidade de AR em concretos estruturais.

Palavras-chave: agregado reciclado misto; comportamento mecânico; modelo de empacotamento compressível; sustentabilidade; MEC.

ABSTRACT

Construction and demolition waste (CDW) is an example of waste generated in large quantities by the construction industry. CDW can be reused by the sector itself in the form of recycled aggregate (RA). As well as reducing waste disposal, the use of RA helps to reduce the extraction of raw materials, thus contributing to the environment. Due to the variability in the composition of this waste, and consequently of RA, national standards allow only 20% of natural aggregate to be replaced by recycled concrete aggregate. These restrictions seek to minimize the uncertainties arising from the variability of CDW properties, allowing the material to be used safely. This work seeks to support advances in the use of CDW by analyzing the dosing method in order to make it possible to obtain concrete with the expected properties. The Compressible Packing Model is used for dosing concrete of strength class C30 produced with different recycled coarse aggregates and natural aggregate: recycled concrete, cementitious and ceramic aggregate and gneiss. The composition of the coarse aggregates was varied in order to assess the influence of the fraction of ceramic materials on the properties of the recycled concrete. The mixtures were tested for concrete properties in the fresh and hardened state. The dosing method used made it possible to obtain concretes with similar mechanical strength for different coarse aggregates, recycled and natural, indicating the efficiency of the method for using RA. The estimation of the modulus of elasticity of the mixtures was evaluated in accordance with NBR 6118 and a parameter α_E was proposed for the RAs. As a result, it is possible to consider the use of a greater quantity of reinforcing agents in structural concrete, based on the greater predictability of the concrete's properties.

Keywords: mixed recycled aggregate; mechanical behavior; compressible packing model; sustainability; CPM.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Composição cerâmica do ARM.....	25
Figura 2 - Massa específica.	26
Figura 3 - Absorção de água.....	27
Figura 4 - Perda por abrasão Los Angeles.....	27
Figura 5 - Relação com a massa específica.....	28
Figura 6 - Relação com o teor de cerâmico.....	28
Figura 7 - Perturbações no empacotamento: (a) efeito parede; (b) efeito de afrouxamento; (c) combinação dos efeitos.....	38
Figura 8 - Fluxograma das etapas experimentais.	43
Figura 9 - Fluxograma de caracterização dos materiais.....	44
Figura 10 - Aglomerantes: (a) CP V ARI e (b) CCA.	45
Figura 11 - Curva granulométrica dos cimentos.....	47
Figura 12 - Amostra do agregado miúdo.....	47
Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo.....	48
Figura 14 - Esquema do ensaio de vibração e compactação.....	48
Figura 15 - Pilha de homogeneização do ARCI.	50
Figura 16 - Amostra dos agregados graúdos.....	51
Figura 17 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.	51
Figura 18 - Ensaio de compatibilidade e saturação do SP.....	54
Figura 19 - Teor de saturação do SP.	54
Figura 20 - Fluxograma do estudo de compensação de água.	55
Figura 21 - Método de Mistura Dupla.	57
Figura 22 - Etapas para determinação dos parâmetros "p" e "q" dos agregados.....	58
Figura 23 - Criação do banco de dados dos materiais.....	60
Figura 24 - Etapas de dosagem e avaliação do concreto utilizando o MEC.	61
Figura 25 - Método de mistura.	63
Figura 26 - Perda de abatimento do tronco de cone para ARCO.....	67
Figura 27 - Perda de abatimento do tronco de cone para ARCI.....	68
Figura 28 - Perda de abatimento do tronco de cone para ARCE.....	69
Figura 29 - Resistência à compressão para o estudo de compensação de água na dosagem.....	69

Figura 30 - Resistência à compressão das argamassas para determinação dos parâmetros "p" e "q".	71
Figura 31 - Resistência à compressão dos concretos para determinação dos parâmetros "p" e "q".	71
Figura 32 - Resistência à compressão aos 28 dias em relação ao AGN.	72
Figura 33 - Calibração dos parâmetros "p" e "q" do agregado miúdo.	73
Figura 34 - Abatimento do tronco de cone.	75
Figura 35 - Resistência à compressão axial da 1ª etapa.	77
Figura 36 - Módulo de elasticidade.	78
Figura 37 - Correlação entre absorção e massa específica.	82
Figura 38 - Correlação entre índice de vazios e massa específica.	83
Figura 39 - Corte transversal das amostras.	84
Figura 40 - Vista longitudinal das amostras NAT, CON e CIM.	85
Figura 41 - Vista longitudinal das amostras MIX-10%CE, MIX-20%CE e MIX-30%CE.	86
Figura 42 - Resistência (a) e módulo de elasticidade (b) das misturas CIM das duas séries.	88
Figura 43 - Amostras da mistura II-CIM: (a) corte transversal e (b) vista longitudinal.	89
Figura 44 - Consumo de aglomerantes nas misturas.	90
Figura 45 - IL para as duas séries de dosagens.	91
Figura 46 - Módulo de elasticidade experimental x NBR 6118:2023.	91
Figura 47 - Módulo de elasticidade com $\alpha=0,7$ e intervalo de variação de 5%.	92
Figura 48 - E_{ci} experimental x E_{ci} calculado.	93
Figura A. 1 - Entrada de dados do CP V ARI Plus.	111
Figura A. 2 - Propriedades do cimento CP IV.	112
Figura A. 3 - Entrada de dados do superplastificante.	113
Figura A. 4 - Entrada de dados da areia.	114
Figura A. 5 - Entrada de dados do agregado gráúdo natural.	115
Figura A. 6 - Entrada de dados do agregado reciclado de concreto.	116
Figura A. 7 - Entrada de dados do agregado reciclado cimentício.	117
Figura A. 8 - Entrada de dados do agregado reciclado cerâmico.	118

Figura B.1 - Calibração dos parâmetros p e q da areia.....	119
Figura B.2 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado graúdo natural.....	120
Figura B.3 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado reciclado de concreto.	121
Figura B.4 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado reciclado cimentício. ..	122
Figura B.5 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado reciclado cerâmico.....	123
Figura C.1 - Dosagens com CP V ARI.	124
Figura C.2 - Dosagens com CP IV.	125

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Requisitos de propriedade física para as classes propostas.....	23
Tabela 2 - ARM utilizado em pesquisas no Brasil (continua).	24
Tabela 3 - Requisitos normativos internacionais para agregados reciclados.....	30
Tabela 4 - Propriedades químicas dos aglomerantes (%).....	45
Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos.....	46
Tabela 6 - Propriedades físicas do agregado miúdo.	49
Tabela 7 - Propriedades físicas dos agregados graúdos.	52
Tabela 8 - Classificação dos agregados graúdos segundo Silva et al. (2014a)	53
Tabela 9 - Composição granular dos traços do estudo de compensação.....	55
Tabela 10 - Consumo de água das misturas do estudo de compensação.....	56
Tabela 11 - Misturas para determinação dos parâmetros "p" e "q" do agregado miúdo.	58
Tabela 12 - Misturas para determinação dos parâmetros "p" e "q" dos agregados graúdos.	59
Tabela 13 – Dosagens da primeira série de misturas utilizando MEC (kg/m³).....	62
Tabela 14 - Dosagens da segunda série de misturas utilizando MEC (kg/m³).....	63
Tabela 15 - Parâmetros "p" e "q".....	74
Tabela 16 - ANOVA para resistência à compressão.	77
Tabela 17 - ANOVA para módulo de elasticidade.....	79
Tabela 18 - Teste de Tukey para módulo de elasticidade.....	79
Tabela 19 - Absorção, índice de vazios e massa específica.....	80
Tabela 20 - ANOVA para absorção e massa específica.	80
Tabela 21 - Teste de Tukey para absorção, índice de vazios e massa específica....	81
Tabela 22 - Intensidade do ligante.	87
 Tabela A.1 - Dados coletados da literatura.	 126

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a/c – Fator água/cimento

ABCP – Associação Brasileira de Cimento Portland

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

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

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

ACI – *American Concrete Institute*

AG – Agregado graúdo

AGN – Agregado graúdo natural

AM – Agregado miúdo

AN – Agregado natural

AR – Agregado reciclado

ARCE – Agregado reciclado de cerâmica

ARCI – Agregado reciclado cimentício

ARCO – Agregado reciclado de concreto

ARM – Agregado reciclado misto

CAD – Concreto de alto desempenho

CUAD – Concreto de ultra alto desempenho

CCA – Cinza de casca de arroz

CEFET-MG – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais

cm – centímetro

cm³ – centímetro cúbico

ef. – efetivo

EPA – *United States Environmental Protection Agency* (Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos)

g – grama

GPa – giga Pascal

h – hora

kg – quilograma

kN – quilonewton

m³ – metro cúbico

MEC – Modelo de Empacotamento Compressível

MEP – Modelo de Empacotamento de Partículas

min – minuto

mm – milímetro

µm – micrômetro

MPa – mega Pascal

MPT - Maximum Paste Thickness, em português: espessura máxima da pasta

NBR – Norma Brasileira

nm – nanômetro

RCD – Resíduo de construção e demolição

s – segundo

SP – Superplastificante

SSS – Saturado com superfície seca

ZTI – Zona de transição interfacial

LISTA DE SÍMBOLOS

A - absorção de água

a_{ij} - parâmetro que descreve o efeito de afrouxamento exercido pela classe j sobre a classe dominante i

b_{ij} - parâmetro que descreve o efeito parede exercido pela classe j sobre a classe dominante i

C - compacidade experimental

C_r - quantidade de AR no concreto ou argamassa

D - tamanho máximo do agregado

d_j - diâmetro da partícula da classe j

d_i - diâmetro da partícula da classe i

E - módulo de elasticidade do compósito

E_g - módulo de elasticidade do agregado

E_m - módulo de elasticidade da matriz

f_c - resistência à compressão do compósito

f_{cm} - resistência à compressão da matriz

f_{cg} - resistência à compressão intrínseca da rocha

f_{cp} - resistência à compressão da pasta de cimento

g^* - densidade de empacotamento

g - volume do agregado por unidade de volume do concreto

h - altura da camada de material compactada ao final do ensaio

IL - intensidade do ligante

I_v - índice de vazio

K - índice de compactação

K_1 - fração percentual de água absorvida nas primeiras horas pelo AR expressa em relação à sua absorção em 24 horas

m_a - massa de água

m_c - massa de cimento

m_i - massa da amostra imersa em água

M_s - massa de material seco

m_s - massa da amostra seca

m_{sat} - massa da amostra saturada

R_{c28} - resistência do cimento aos 28 dias, dada de acordo com a ISO

S - slump

v_c - volume de cimento

v_w - volume de água

v_a - volume de ar

$\emptyset$ - diâmetro interno do cilindro

ρ - massa específica do concreto do concreto fresco

ρ_c - massa específica do cimento

ρ_s - massa específica do material seco

y_j - fração volumétrica da classe i

β_i - densidade de empacotamento virtual da classe i

Φ - volume de sólido da mistura granular

γ_i - densidade de empacotamento da classe i

τ_0 - tensão de escoamento

α_E - parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivos específicos.....	19
1.2	RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA.....	20
1.3	ESTRUTURA DA TESE	20
2	AGREGADOS RECICLADOS E MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO.....	22
2.1	PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS	22
2.2	VARIABILIDADE DO ARM NO BRASIL	23
2.3	REQUISITOS NORMATIVOS PARA AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS	29
2.4	COMPENSAÇÃO DE ÁGUA NA MISTURA.....	31
2.5	DOSAGEM DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS.....	33
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	MATERIAIS	43
3.2	ESTUDO DA COMPENSAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO RECICLADO.....	55
3.3	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS “P” E “Q”	57
3.3.1	Misturas de argamassa para determinação dos parâmetros “p” e “q” do agregado miúdo	58
3.3.2	Misturas de concreto para determinação dos parâmetros “p” e “q” dos agregados graúdos.....	58
3.3.3	Calibração dos parâmetros “p” e “q”	59
3.4	DOSAGENS COM O MEC	60
3.4.1	Primeira série de dosagens.....	61
3.4.2	Segunda série de dosagens	62

3.4.3	Confecção das misturas	63
3.4.4	Ensaio no concreto	64
3.4.5	Análise estatística dos resultados.....	64
3.4.6	intensidade do ligante.....	64
3.4.7	Comparação do teor de clínquer nas misturas	65
3.5	PREVISIBILIDADE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	65
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	67
4.1	ESTUDO DA COMPENSAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO RECICLADO 67	
4.2	DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS “P” E “Q”	71
4.3	DOSAGENS COM O MEC	75
4.3.1	Primeira série de dosagens.....	75
4.3.2	Segunda série de dosagens	87
4.3.3	Comparação do teor de clínquer nas misturas	89
4.4	PREVISIBILIDADE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE	91
5	CONCLUSÕES	94
5.1	SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS.....	95
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	97
	APÊNDICE A.....	111
	APÊNDICE B.....	119
	APÊNDICE C.....	124
	ANEXO A	126

1 INTRODUÇÃO

Os resíduos de construção e demolição (RCD) representam um dos principais impactos ambientais do setor da construção civil. Segundo dados da *United States Environmental Protection Agency - EPA* (Agência de Proteção Ambiental do Estados Unidos), em 2018 foram gerados 600 milhões de toneladas de RCD nos EUA, sendo aproximadamente 52% reaproveitado como agregado, 24% destinado a aterros, 22% reaproveitado em produtos manufaturados e o restante foi direcionado para combustíveis, compostos e cobertura morta e correção do solo (EPA, 2020). No mesmo ano, os 28 países da União Europeia produziram mais de 370 milhões de toneladas de RCD (Eurostat, 2021a), sendo a taxa de reaproveitamento desses resíduos de 89% (Eurostat, 2021b).

No contexto brasileiro, houve um crescimento de 18,8% na quantidade total de RCD coletado para o período de 2012 a 2021, chegando a cerca de 48,3 milhões de toneladas (ABRELPE, 2012, 2022). Entretanto, nem todo o RCD produzido no país passa pelos sistemas de gerenciamento, fazendo com que os dados da ABRELPE sejam subestimados. A estimativa da Associação Brasileira para Reciclagem de Resíduos da Construção Civil e Demolição (ABRECON) é de uma produção de 105 milhões de toneladas de RCD em 2020, sendo que 16% desse resíduo foi transformado em AR (Oliveira; Santana, 2022).

Diversos países já adotam normas regulatórias para o emprego de agregados reciclados (AR) em concretos destinados a fins estruturais há mais de duas décadas. No Brasil, entretanto, apenas recentemente os agregados reciclados de RCD ganharam definição e aceitação para uso estrutural em norma. Em junho de 2021, a NBR 15116 (ABNT, 2021) foi revisada e incluiu classificação para os tipos de agregados reciclados de RCD, requisitos e limites para uso em argamassas e concretos de cimento Portland.

Muitas pesquisas e normas abordam o uso dos agregados reciclados de concreto (ARCO), que são obtidos de concretos fabricados em laboratório ou de resíduos que são previamente separados. Como no Brasil as demolições e disposição final de resíduos são normalmente feitas sem segregação dos RCD, torna-se importante viabilizar o uso dos agregados reciclados cimentícios (ARCI) e mistos (ARM), uma vez que nas condições atuais dos processos de desconstrução, a necessidade de segregação pode inviabilizar a aplicação.

A heterogeneidade do AR produzido no Brasil dificulta a confiabilidade do uso de maneira estrutural uma vez que as diferenças nas propriedades do agregado podem impossibilitar a dosagem do concreto pelos métodos convencionais. A falta de previsibilidade nas propriedades do concreto compromete a otimização da cadeia produtiva existente, desde o controle de qualidade das matérias primas até o uso eficiente do concreto nos projetos.

Geralmente as pesquisas sobre agregados reciclados não consideram as diferenças das propriedades desses agregados no processo de dosagem. Muitas fazem uma simples substituição do agregado natural pelo reciclado, em massa ou volume, no concreto dosado para o agregado natural (Bairagi; Ravande; Pareek, 1993; Kou; Poon, 2012; Kwan *et al.*, 2012; Paul; Panda; Garg, 2018; Salles *et al.*, 2021). Quando a dosagem é realizada considerando o uso dos AR, também ocorrem divergências nos resultados das misturas fabricadas, mostrando que os métodos tradicionais de dosagem não são adequados para o agregado reciclado (Bairagi *et al.*, 1990).

Algumas pesquisas propõem métodos de dosagem adaptados ao uso do AR (Fathifazl *et al.*, 2009; Gupta; Khaudhair; Ahuja, 2016; Pepe *et al.*, 2016). Entretanto, esses métodos não são adequados para a produção em escala industrial ou apresentam etapas que dificultam a aplicação de maneira abrangente, especialmente quando o AR apresenta heterogeneidade, como no caso brasileiro.

Modelos de empacotamento de partículas (MEP), normalmente aplicados em concretos de alto e ultra alto desempenho (CAD e CUAD, respectivamente) foram utilizados em concretos com agregados reciclados apresentando resultados melhores que os modelos de dosagem tradicionais (Amario *et al.*, 2017; Omary *et al.*, 2018; Pradhan; Kumar; Barai, 2017; Puente de Andrade *et al.*, 2020; Silva; Pepe; Toledo Filho, 2020; Sunayana; Barai, 2017). Esses estudos, entretanto, abordam o uso de ARCO, normalmente produzido em laboratório. Agregados reciclados de origens diversas, como ARCI e ARM, não foram avaliados.

O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC) desenvolvido por DE LARRARD (1999) é um método que utiliza os conceitos do empacotamento de partículas e já foi utilizado em pesquisas de concretos com diversos tipos de aplicações (Baghaee Moghaddam; Baaj, 2018; Bousleh *et al.*, 2023; Cordeiro *et al.*, 2018; El Euch Khay *et al.*, 2018; García-Cortés; García Estévez; San-José, 2022;

Hisseine; Tagnit-Hamou, 2020; Nanthagopalan; Santhanam, 2012; Van Der Putten *et al.*, 2017) , obtendo resultados satisfatórios, inclusive para uso de ARCO (Amario *et al.*, 2017; Omary *et al.*, 2018; Puente de Andrade *et al.*, 2020; Silva; Pepe; Toledo Filho, 2020).

Diante disso, esse estudo investigou o uso do Modelo de Empacotamento Compressível como um método de dosagem do concreto reciclado que forneça resultados confiáveis, reduzindo as variações na produção do concreto com ARM graúdo e possibilitando seu uso em concretos estruturais. O estudo abordou a variação da composição do AR, visando possibilitar a incorporação de um maior percentual de AR e também de uma parcela maior de resíduos cimentícios e cerâmicos na sua composição. Para tal, foram avaliadas misturas de concreto produzidas com diferentes agregados graúdos: natural, ARCO, ARCI e três tipos de ARM. Os ARM utilizados apresentam variação no teor de cerâmicos na sua composição, sendo esses percentuais de 10%, 20% e 30%. Assim, este estudo buscou responder a seguinte pergunta de pesquisa:

Como a variação da composição do AR graúdo influencia as propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido quando o Modelo de Empacotamento Compressível é utilizado para a dosagem?

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral da pesquisa é avaliar como a variação da composição do agregado reciclado graúdo influencia as propriedades do concreto quando o Modelo de Empacotamento Compressível é utilizado para a dosagem.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Avaliar as variações na composição, e consequentemente, das propriedades, dos ARM graúdos produzidos no Brasil;
- Avaliar a influência da composição do AR na compensação de água da mistura de concreto;

- Avaliar a resistência à compressão de misturas de concreto de duas classes diferentes, dosadas através do método da ABCP, para calibração dos parâmetros do Modelo de Empacotamento Compressível.
- Avaliar as misturas de concreto com diferentes agregados graúdos dosadas por meio do Modelo de Empacotamento Compressível;
- Avaliar a influência do AR na previsão do módulo de elasticidade estático do concreto reciclado.

1.2 RESTRIÇÕES E LIMITAÇÕES DA PESQUISA

A pesquisa se limita a avaliar a influência de agregados graúdos reciclados na dosagem do concreto. As variações provocadas por agregados miúdos não são abordadas.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

Capítulo 1: INTRODUÇÃO - Apresenta uma breve introdução sobre os resíduos de construção e demolição, sua utilização como agregados reciclados e os desafios da dosagem do concreto reciclado. São abordados os objetivos, limitações e a estrutura do trabalho.

Capítulo 2: AGREGADOS RECICLADOS E MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO - apresenta uma breve revisão da literatura, abordando as propriedades dos agregados reciclados, a variabilidade do agregado reciclado misto no Brasil, requisitos de normas para uso do AR em concretos, dosagem de concretos contendo agregados reciclados e o Modelo de Empacotamento Compressível (MEC).

Capítulo 3: MATERIAIS E MÉTODOS - apresenta todos os materiais utilizados na pesquisa: ligantes, agregado miúdo, agregados graúdos, aditivo superplastificante (SP) e água. A origem e/ou forma de produção e a preparação inicial dos agregados reciclados são descritos neste capítulo. Os procedimentos dos ensaios de caracterização dos materiais são indicados e detalhados. É apresentada a metodologia utilizadas no estudo da compensação de água na dosagem dos concretos com os diferentes agregados graúdos (natural (AN), agregado reciclado de concreto (ARCO), agregado reciclado cimentício (ARCI) e o agregado reciclado cerâmico (ARCE)). Neste capítulo também são apresentados os procedimentos utilizados nas dosagens utilizando o Modelo de Empacotamento Compressível e na

confeção e avaliação das misturas de concreto produzidas em laboratório. Por fim, é apresentada a metodologia para proposição de um índice α_E (parâmetro em função da natureza do agregado que influencia o módulo de elasticidade) para agregados reciclados, considerando o modelo de previsão do módulo de elasticidade de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2023).

Capítulo 4: RESULTADOS E DISCUSSÕES - apresenta os resultados obtidos para o estudo de compensação de água na dosagem de concretos utilizando os diferentes agregados graúdo, dosagens utilizando o Modelo de Empacotamento Compressível e também a proposição do índice α_E para agregados reciclados.

Capítulo 5: CONCLUSÕES - são apresentadas as principais conclusões obtidas no estudo, destacando a importância da pesquisa para dosagem de concretos com agregados reciclados de diversas origens, ampliando o conhecimento atual que se limita aos ARCO. Também são apresentadas sugestões para trabalhos futuros a fim de preencher lacunas ainda existentes.

2 AGREGADOS RECICLADOS E MÉTODOS DE DOSAGEM DO CONCRETO

2.1 PROPRIEDADES DOS AGREGADOS RECICLADOS

Parte da composição do agregado reciclado é de argamassa, geralmente aderida ao AN ou aos materiais cerâmicos. Essa argamassa aderida normalmente torna o AR mais poroso, com maior capacidade de absorção e menor massa específica quando comparado ao AN. A textura superficial do AR também é influenciada pela argamassa aderida, sendo mais porosa e rugosa (Bairagi; Ravande; Pareek, 1993).

Como o RCD é proveniente de diferentes origens, os agregados reciclados apresentam variações em suas propriedades. Um AR com menos pasta apresentará maior densidade que aquele com uma maior quantidade de pasta na composição, da mesma forma que um agregado reciclado em que a argamassa apresenta maior resistência terá menos poros e, conseqüentemente, maior densidade do que um agregado em que a argamassa seja menos resistente (de Brito; Saikia, 2013).

Geralmente, os materiais cerâmicos artificiais são mais porosos que as rochas naturais, fazendo com que a massa específica do AR reduza e que a capacidade de absorção aumente com o aumento da quantidade desses materiais (Agrela *et al.*, 2011).

Os materiais cerâmicos presentes na composição do ARM, principalmente os tijolos e telhas, influenciam a capacidade de absorção de água do agregado (de Brito; Saikia, 2013). A argamassa e os materiais cerâmicos presente fazem com que a capacidade de absorção de água desse tipo de agregado seja maior que do AN. A maior parte da absorção do ARM ocorre rapidamente, conforme mostrou o estudo de Salles *et al.* (2021), onde mais de 90% da absorção total ocorre em 5 minutos de submersão.

A resistência à abrasão Los Angeles é menor para os AR. Segundo De Brito e Saikia (2013), essa maior perda por abrasão do AR é devida à presença da argamassa aderida, que se desintegra mais facilmente durante a abrasão quando comparado às partículas do AN. Os materiais cerâmicos mais frágeis, como tijolos e telhas, fazem com o que a resistência à abrasão seja menor.

Após analisar estatisticamente os dados publicados de diversas pesquisas, (Silva; de Brito; Dhir, 2014a) propuseram uma classificação dos AR de acordo com três propriedades: massa específica, absorção e resistência à abrasão Los Angeles,

apresentada na Tabela 1. Segundo os autores, normalmente o ARCO é classificado nas classes “A” e “B”, o ARM nas classes “B” e “C” e o agregado reciclado de cerâmicas nas classes “C” e “D”.

Tabela 1 - Requisitos de propriedade física para as classes propostas.

Classe do agregado	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Massa específica seca mínima (kg/m³)	2600	2500	2400	2300	2200	2100	2000	1900	1800	Sem limite
Absorção de água máxima (%)	1,5	2,5	3,5	5	6,5	8,5	10,5	13	15	
Perda por abrasão LA máxima (%)	40			45			50			

Fonte: adaptado de (Silva; de Brito; Dhir, 2014a).

Em outro estudo, (Silva; de Brito; Dhir, 2014b) demonstraram que ARCO e ARM com propriedades físicas iguais produziram concretos com desempenho semelhantes quando pertencente à mesma classe de resistência à compressão. Isso demonstra que a classificação dos agregados feita de acordo com suas propriedades favorece que os diferentes tipos de AR sejam utilizados da melhor maneira, possibilitando uso mais racional desses materiais.

2.2 VARIABILIDADE DO ARM NO BRASIL

Para identificar as propriedades dos agregados graúdos reciclados mistos produzidos no Brasil, foi realizada uma revisão da literatura para obtenção de dados. O levantamento foi realizado nas plataformas de pesquisa de teses e dissertações nacionais e em artigos científicos publicados em periódicos disponíveis através do Portal de Periódicos Capes (CAPES, 2022).

Ao final, foram obtidos 75 artigos, teses e dissertações. Desse total, 40 utilizaram agregados reciclados de concreto (ARCO), 33 utilizaram agregados reciclados mistos (ARM) e 2 utilizaram os dois tipos de agregado reciclado.

No levantamento de dados foram considerados os seguintes itens: cidade de obtenção, composição (cinza e cerâmico) e propriedades físicas (massa específica, absorção de água, perda por abrasão).

A maioria das pesquisas utilizaram o ARCO, porém o foco desta etapa foi avaliar as variações do ARM, assim, os dados das pesquisas que utilizaram apenas ARCO não foram considerados para análise. O uso do ARM nas pesquisas não foi

exclusivamente em concreto, algumas utilizaram para produção de pavimentos, em solos ou camadas drenantes. Pela variação do uso do agregado, as propriedades descritas nas pesquisas são distintas, fazendo com que não fossem identificados os dados coletados em todas elas. As pesquisas que utilizaram ARM graúdo, local de produção do agregado e a composição estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - ARM utilizado em pesquisas no Brasil (continua).

Autor(es) - referência	Local de produção	Composição (%)	
		Cimentício /concreto	Cerâmico
Fucale e Proença (2014)	Camaragibe/PE	51	49
Medeiros-Júnior <i>et al.</i> (2017)	não informado	83	17
		46	54
Beja <i>et al.</i> (2020)	São Paulo/SP	87	13
Leite <i>et al.</i> (2017)	Teresina/PI	não informado	
Carneiro <i>et al.</i> (2000)	Salvador/BA	79	21
Viana Neto <i>et al.</i> (2018)	Aracajú/SE	78	22
		79	21
Souza <i>et al.</i> (2021)	Rio Branco/AC	53	47
Lima <i>et al.</i> (2021)	Natal/RN	94	6
Salles <i>et al.</i> (2021)	Belo Horizonte	84	16
Leite (2001)	Porto Alegre/RS	74	26
Vieira (2003)	Maceió/AL	49	51
Lovato (2007)	São Leopoldo/RS	67	33
	Porto Alegre/RS	64	36
	Novo Hamburgo/RS	77	23
Malysz (2018)	Montenegro/RS	74	26
	Porto Alegre/RS	62	38
	Porto Alegre/RS	78	22
Campos Filho (2017)	Belo Horizonte/MG	85	15
Hermann (2016)	Curitiba/PR	84	16
Loff (2018)	Porto Alegre/RS	não informado	
Lopes (2005)	Campinas/SP	91	9
Moreira (2010)	São Paulo/SP	não informado	
	Macaé/RJ	não informado	
Piovesan (2016)	Manau/ AM	não informado	
Ricci (2007)	São Bernardo do Campo/SP	não informado	

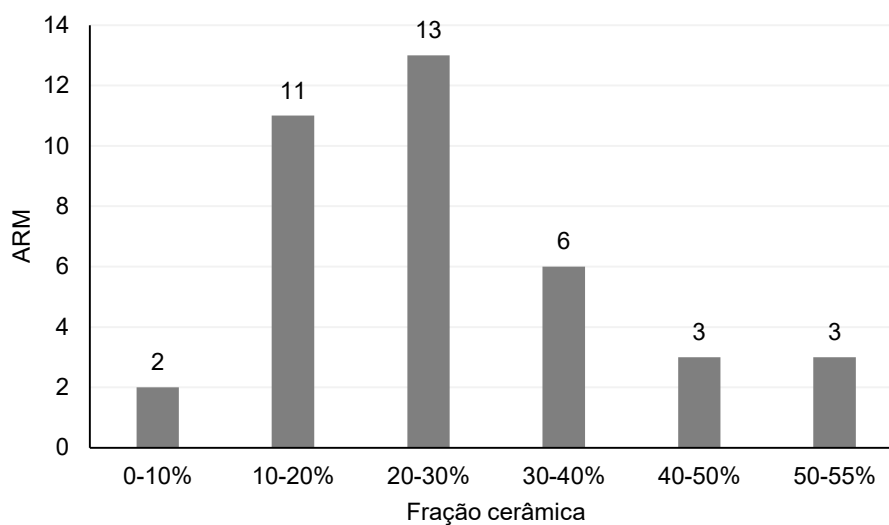
Tabela 3 - ARM utilizado em pesquisas no Brasil (continuação).

Rigo (2019)	Cascavel/PR	75	25
Viana Neto (2016)	Nossa Senhora do Socorro/SE	74	26
		69	31
Wasilewski (2019)	Campos Gerais/MG	63	37
Araújo (2015)	Belo Horizonte/MG	87	13
Aragão (2007)	Feira de Santana/BA	73	27
Ballista (2003)	Ribeirão Preto/SP	78	12
Carneiro (2011)	Feira de Santana/BA	74	26
Delongui (2012)	Santa Maria/RS	49	51
Latterza (1998)	Ribeirão Preto/SP	88	12
Nunes (2007)	Goiânia/GO	58	42
Sá (2006)	Recife/PE	66	34
Santiago (2008)	Feira de Santana/BA	87	13
Silva (2004)	Belo Horizonte/MG	79	21
Silva (2009)	Belo Horizonte/MG	89	11
Tenório (2007)	Maceió/AL	80	20
Gomes (2019)	Belo Horizonte/MG	84	16

Fonte: a autora.

A Figura 1 apresenta os dados dos agregados agrupados por faixas de fração cerâmica na composição dos ARM. Através da figura é possível perceber que a maior parte dos ARM utilizados nas pesquisas apresenta percentual de resíduos cerâmicos abaixo de 30%.

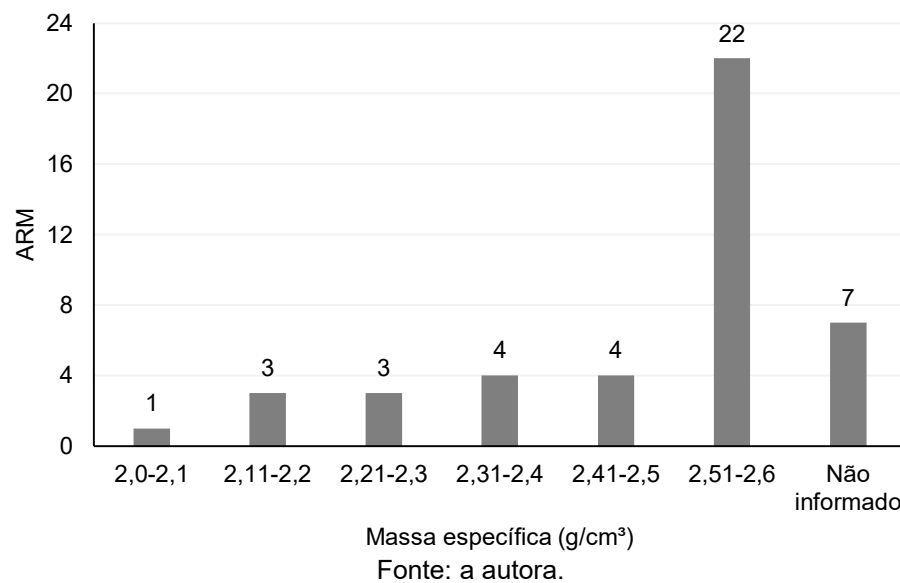
Figura 1 - Composição cerâmica do ARM



Fonte: a autora.

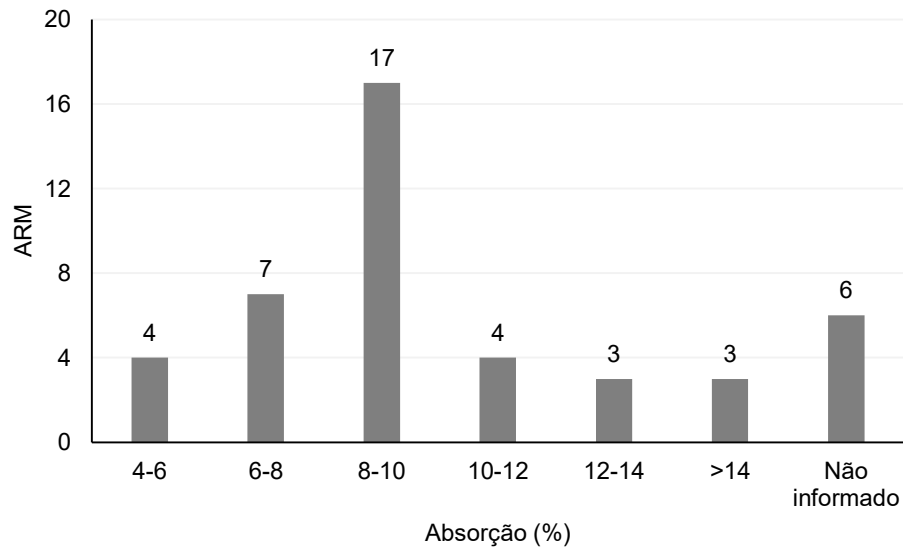
A Figura 2 apresenta a massa específica dos ARM agrupados por faixas. A maior parte dos agregados apresentam a massa específica entre 2,51 e 2,60 g/cm³. As rochas naturais normalmente utilizadas para os agregados possuem massa específica entre 2,6 e 2,7 g/cm³ (Mehta; Monteiro, 2014). A redução na massa específica dos AR em relação aos AN é devida, principalmente, à argamassa aderida e aos materiais cerâmicos, que são mais porosos que as rochas naturais (Agrela *et al.*, 2011; de Brito; Saikia, 2013).

Figura 2 - Massa específica.



A Figura 3 apresenta os dados de absorção de água dos agregados. O menor percentual apresentado foi de 4,3% e o maior de 18,83%. A maior parte dos ARM das pesquisas apresentaram absorção menor que 10%. Os materiais cerâmicos presentes na composição dos AR, principalmente tijolos e telhas, e a argamassa aderida influenciam a capacidade de absorção dos agregados (de Brito; Saikia, 2013).

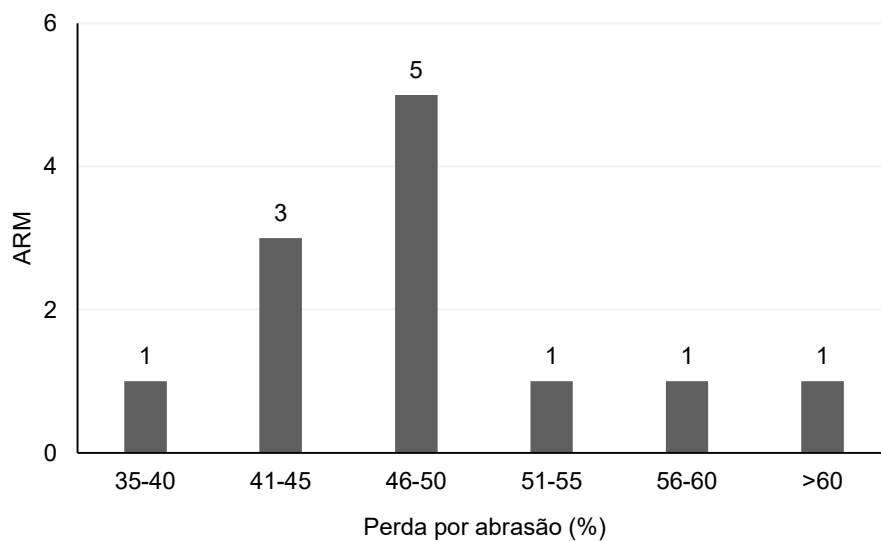
Figura 3 - Absorção de água.



Fonte: a autora.

A Figura 4 apresenta os dados de perda por abrasão Los Angeles dos agregados. Nos trabalhos avaliados, 32 não apresentaram informações sobre essa propriedade. A maior parte dos agregados que tiveram a perda relatada apresentaram percentuais abaixo de 50%, índice estabelecido pela NBR 7211 (NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação ABNT, 2022). Assim como as outras propriedades, a maior abrasão é devida à argamassa aderida e aos materiais cerâmicos mais frágeis (de Brito; Saikia, 2013).

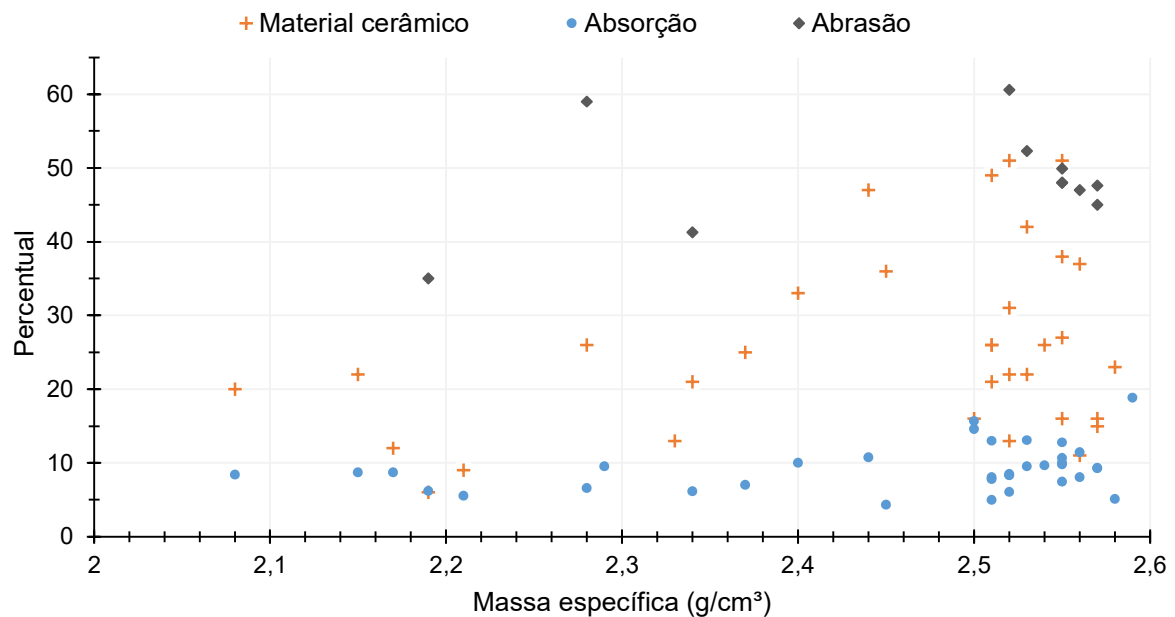
Figura 4 - Perda por abrasão Los Angeles.



Fonte: a autora.

A Figura 5 mostra os resultados de absorção de água, perda por abrasão e teor de material cerâmico em relação à massa específica dos ARM. É possível observar pelas distribuições dos resultados que nenhuma das propriedades apresentam uma tendência clara em relação à massa específica.

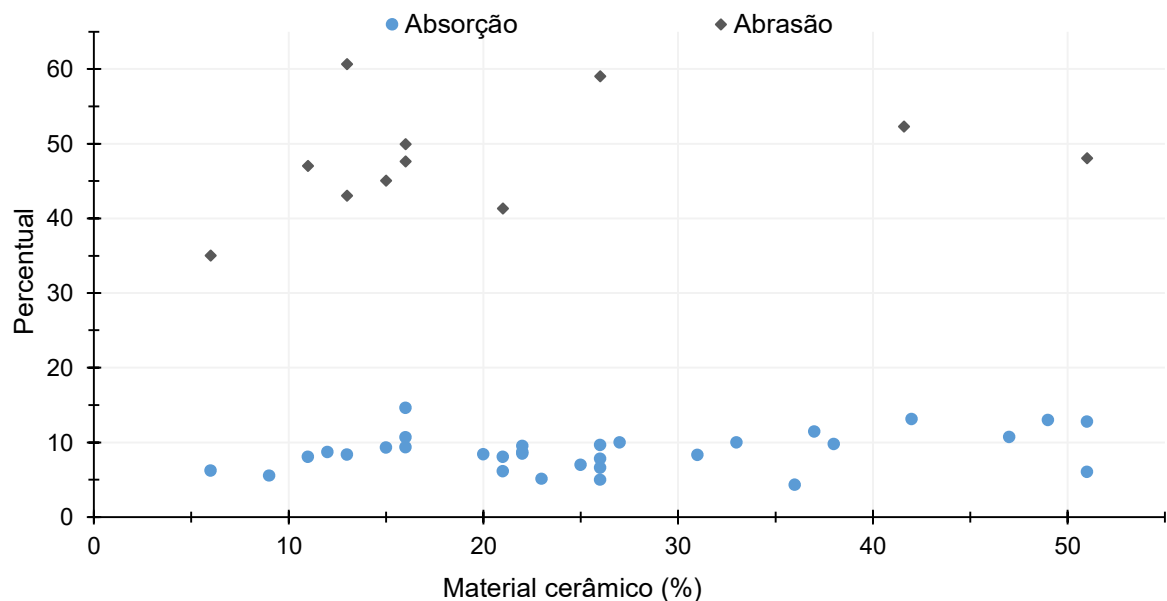
Figura 5 - Relação com a massa específica.



Fonte: a autora.

A Figura 6 mostra os resultados de absorção de água e perda por abrasão em relação ao teor de material cerâmico dos ARM. Nesse caso, também não se observa uma tendência clara entre as propriedades.

Figura 6 - Relação com o teor de cerâmico.



Fonte: a autora.

A heterogeneidade do ARM faz com que as relações entre propriedades não sejam claras. Os materiais cerâmicos presentes no ARM, por exemplo, podem ter diversas origens, fazendo com que suas propriedades sejam variadas para um mesmo teor de cerâmicos. Materiais provenientes de blocos de vedação apresentam menor massa específica e maiores absorção de água e abrasão que um resíduo de piso cerâmico, por exemplo. O mesmo ocorre para os materiais cimentícios e de concreto, que podem ser provenientes de diferentes classes de resistência, afetando mais ou menos as propriedades dos agregados reciclados.

2.3 REQUISITOS NORMATIVOS PARA AGREGADOS RECICLADOS EM CONCRETOS

Devido às diferenças entre os agregados naturais e os reciclados, vários países já estabeleceram normas específicas para os AR. Requisitos para a classificação dos tipos de AR e valores de referência para algumas propriedades são definidos para manter a qualidade e viabilizar o uso destes agregados de forma estrutural.

A Tabela 3 apresenta requisitos das normas de alguns países. Além dos critérios apresentados, geralmente são estipulados limites para teor de contaminantes, materiais orgânicos, cloretos e sulfatos.

Ao contrário de outros países, que já possuem regulamentações para os AR há mais de duas décadas, o Brasil somente emitiu uma norma sobre este material em junho 2021, quando a NBR 15116 (ABNT, 2021a) foi revisada. A partir desse momento, a norma passou a incluir classificações para diferentes tipos de agregados reciclados de RCD, assim como requisitos e limites para sua utilização em argamassas e concretos de cimento Portland. A classificação foi estabelecida da seguinte forma:

- ARCO: agregado reciclado de concreto, composto predominantemente por resíduos de concreto, sem presença de materiais cerâmicos.
- ARCI: agregado reciclado cimentício, composto predominantemente por materiais cimentícios, com a possibilidade de incluir cerâmicas vermelhas em proporção inferior a 10%.
- ARM: agregado reciclado misto, constituído por mistura de materiais cimentícios e cerâmicos, sendo que o teor de materiais cerâmicos deve ser inferior 40%.

Tabela 3 - Requisitos normativos internacionais para agregados reciclados.

País	Especificação	Classificação	Composição (%)		Densidade seca mínima (kg/m³)	Absorção de água máxima (%)
			ARCO+AN	ARCE		
Alemanha	DAfStb (1998)	ARCO	>90	<10	2000	10
	DIN-4226 (2002)	ARCO	>70	<30	2000	15
		ARCE	<20	>80	1800	20
		ARM	>80		1500	n.a
Hong-Kong	WBTC-No.12 (2002)	ARCO	<100	-	2000	10
Japão	JIS-5021 (2011)	ARCO	n.a.	2,0	2500	3
	JIS-5022 (2012)	ARCO	n.a.	2,0	2300	5
	JIS-5023 (2012)	ARCO	n.a.	3,0	n.a.	7
RILEM	RILEM (1994)	ARCE	-	<100	1500	20
		ARCO	<100	-	2000	10
		ARCO+AN	<20	<10	2400	3
Reino Unido	BS-8500 (2006)	ARCO	n.a.	<5	n.a.	n.a.
		AR	n.a.	<100	n.a.	n.a.
Holanda	NEN-5905 (2005)	ARCO	>95	<5	2000	n.a.
		ARM	n.a.	>65	2000	n.a.
Portugal	LNEC-E471 (2006)	ARCO	>90	<10	2200	7
		ARCO	>70	<30	2200	7
		ARM	>90		2000	7
Bélgica	PTV-406 (2003)	ARCO	>90	<10	2200	n.a.
		ARM	>40	>10	1900	n.a.
		ARCE	<40	>60	1600	n.a.
Austrália	HB-155 (2002)	ARCO	n.a.	-	2100	6
		ARM	n.a.	<30	1800	8
Noruega	NCA (1999)	ARCO	>94	<5	2000	10
		ARM	>90		1500	20
Espanha	EHE-08 (2010)	ARCO	-	<5	-	7
Suíça	OT-70085 (2006)	ARCO	<100	-	n.a.	n.a.
		ARM	<100	-	n.a.	n.a.
Dinamarca	DCA (1995)	ARCO	>95	-	2200	n.a.
		MRA	>95		1800	n.a.

Fonte: adaptado de Dhir *et al.*(2019) e Gonçalves; Brito (2010).

Para o concreto estrutural, a NBR 15116 (ABNT, 2021a) permite o uso apenas do ARCO, com um percentual máximo de 20% em relação à massa total dos agregados, e para concretos das classes de agressividade I e II da NBR 6118 (ABNT, 2023). No caso do concreto não estrutural, o uso de AR é permitido para todas as classes de agregados, podendo substituir até 100% dos agregados naturais.

Entre os limites estabelecidos pela NBR 15116 (ABNT, 2021a), estão de teor de materiais indesejados, que deve ser menor que 1%, e de absorção de água, que deve ser inferior a 7% para ARCO e inferior a 12% para ARCI e ARM. Além disso, a norma recomenda que seja feita a pré-molhagem ou compensação de água quando os AR são utilizados.

2.4 COMPENSAÇÃO DE ÁGUA NA MISTURA

Uma das principais diferenças nas propriedades dos agregados reciclados para os agregados naturais é a capacidade de absorção de água. Os AR são mais porosos que os AN, tendo maior capacidade de absorção. Durante o processo de mistura do concreto, os AR podem absorver água da mistura, alterando o fator a/c de dosagem e reduzindo a trabalhabilidade do concreto. Para que isso não ocorra, vários autores estudaram diferentes formas de compensar essa absorção da água pelos AR.

De Oliveira e Vazquez (1996) estudaram misturas de concreto com ARCO em estado seco, saturado e parcialmente saturado. Os autores observaram um decréscimo na resistência dos concretos feitos com agregados secos e saturados.

Poon et al. (2002) utilizaram diferentes teores de AR e três estados de umidade. O teor de cimento foi mantido constante para todas as misturas, e foram feitos incrementos de água de absorção dos agregados. Os autores observaram que ao utilizar os agregados reciclados no estado seco ao ar, a trabalhabilidade e resistência à compressão apresentaram pouca variação em relação ao AN. Já o uso do AR nos estados seco em estufa e saturado com superfície seca (SSS) afetaram as propriedades de maneira significativa. Também foi observada a possibilidade de sangramento com o uso do agregado na condição SSS, onde ocorre a transferência de água do agregado para a pasta.

Mefteh *et al.* (2013) avaliaram a influência do teor de umidade dos agregados em misturas de concreto com diferentes teores de ARCO. Para os agregados no estado seco, as misturas com alto teor de AR ($\geq 60\%$) apresentaram abatimento em

tronco de cone (slump) muito baixo (≤ 30 mm) ao final da mistura, enquanto as misturas com teores menores ficaram acima de 60 mm, chegando a 90 mm para a mistura com AN. Ao utilizar os agregados nos estados pre-molhado ou SSS, foi observado altos valores de abatimento em tronco de cone (slump) nas misturas contendo ARCO, chegando a 160 e 180 mm para as misturas com 100% de ARCO.

García-González *et al.* (2014) avaliaram diferentes tempos de pré-saturação e diferentes teores de AR. Os autores concluíram que pequenos intervalos de imersão em água (3 e 5 minutos) melhoraram a consistência enquanto a diminuição da resistência à compressão foi insignificante.

Brand *et al.* (2015) estudaram dois métodos de mistura e diferentes condições de umidade dos agregados. Foi observado que o método de mistura em dois estágios proporcionou melhorias na trabalhabilidade e nas resistências à compressão e flexão. O ARCO parcialmente saturado apresentou os melhores resultados entre os concretos reciclados. O método de mistura em dois estágios (two-stage mixing approach - TSMA), proposto por Tam *et al.* (2005), consiste em dividir a água de mistura em duas partes a serem acrescentadas em tempos diferentes de mistura, a primeira parte antes da adição do cimento e a segunda após.

Hou *et al.* (2021) avaliaram a influência do teor de umidade dos agregados reciclados nas propriedades reológicas do concreto fresco. Foram avaliados concretos que continham apenas ARCO e misturas com ARCO e ARCE. Os autores observaram que as misturas produzidas com ARCO tiveram as propriedades mais afetadas nos primeiros 45 minutos que as fabricadas com os dois tipos de AR. A alta taxa de absorção do ARCE no 1º minuto após o contato com a água limitou os efeitos nas características temporais avaliadas (Hou *et al.*, 2021).

Estudo de Amario *et al.* (2017) avaliou diferentes teores de compensação: agregado saturado com superfície seca, água absorvida em 10 minutos de submersão, água de 24h de submersão, 50% e 70% da água absorvida em 24h. Os testes realizados mostraram que a adição de 50% da água de absorção total produziu uma mistura com resultados comparáveis à mistura de referência. As demais compensações estudadas apresentaram resultados inferiores à referência. Todas as misturas propostas utilizaram aditivo superplastificante.

Montero e Laserna (2017) destacaram que é importante manter um controle preciso da umidade dos agregados para que o fator a_{efetivo}/c seja bem definido. Os

autores concluíram que o incremento de água total nas misturas com AR não irá influenciar a resistência do concreto, não sendo necessário o acréscimo de cimento nas misturas. Os autores também observaram que o método de mistura deve ser prolongado de acordo com a velocidade de absorção dos agregados.

Ferreira *et al.* (2011) sugeriram que, quando utilizado a pré-saturação, esta seja realizada dentro do misturador, evitando a água em excesso, problemas de homogeneidade e perda de partículas pequenas. Os autores relatam que a pré-saturação proporcionou comportamento nos estados fresco e endurecido piores que quando utilizada a compensação de água, porém as diferenças foram pequenas e não significativas para misturas feitas em larga escala.

A NBR 15116 (ABNT, 2021a) recomenda que seja feita a pré-molhagem ou compensação de água quando os AR forem utilizados. A quantidade de água necessária para pré-molhagem (C_{ar}) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$C_{ar} = C_r A K_1 \quad 1$$

Onde:

C_r é a quantidade de AR no concreto ou argamassa (kg/m^3);

A é a absorção de água do AR em percentual (%);

K_1 é a fração percentual de água absorvida nas primeiras horas pelo AR, expressa em relação à sua absorção em 24 horas.

Ainda segundo a norma, valores de K_1 próximos a 80% são adequados e que o tempo de pré-saturação é aproximadamente 10 minutos antes do contato da água com o cimento (ABNT, 2021a).

2.5 DOSAGEM DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS

Os métodos tradicionais de dosagem para concreto convencional não são apropriados para o uso em concretos com AR. Diversas pesquisas conduzidas utilizando métodos tradicionais de dosagem relatam menor resistência à compressão dos concretos com AR quando comparados aos concretos com AN (Bairagi *et al.*, 1990; Bidabadi; Akbari; Panahi, 2020; Gomes *et al.*, 2023; Salles *et al.*, 2021). Bairagi *et al.* (1990) realizaram uma comparação entre quatro métodos distintos e chegaram à conclusão que o método do ACI resultou em menores perdas de resistência à compressão, obtendo resultados cerca de 10% inferior no caso do uso do ARCO em

comparação ao concreto com AN. Os outros três métodos utilizados pelos pesquisadores apresentaram perdas de resistência entre 20% e 30%.

Em 1990, Bairagi et al. (1990) se surpreenderam com o fato de não haver literatura relacionada a metodologias de projeto de mistura para concretos com agregados reciclados. Atualmente, já é possível encontrar publicações de pesquisas que abordam a dosagem de concreto com AR com o intuito de reduzir as diferenças entre os parâmetros alvo e os resultados obtidos em ensaios. No entanto, é importante notar que essas pesquisas geralmente se baseiam no uso do ARCO, que possui composição e propriedades diferentes dos agregados reciclados cimentícios e mistos, que são os mais produzidos no Brasil.

Algumas pesquisas utilizam ferramentas matemáticas para analisar dados disponíveis na literatura e propor meios de prever a resistência à compressão e outras propriedades do concreto com AR (Gholampour; Gandomi; Ozbakkaloglu, 2017; González-Taboada *et al.*, 2016). Métodos matemáticos também são utilizados para desenvolver ou otimizar os métodos de dosagem (Chang *et al.*, 2011; Lin *et al.*, 2004). Esses métodos, entretanto, são pouco viáveis para o dia a dia do setor da construção civil, sendo necessário métodos mais práticos.

De acordo com Xu *et al.* (2019), os modelos existentes não preveem as propriedades mecânicas dos concretos reciclados com precisões desejáveis devido à ausência de consideração das características dos AR nos modelos baseados em código, e a limitação dos bancos de dados em termos do número limitado de resultados experimentais e da faixa de parâmetros nesses bancos de dados para o desenvolvimento dos modelos empíricos existentes.

Ao comparar diferentes métodos de predição da resistência à compressão, que não consideram as propriedades dos agregados, com os resultados experimentais, (de Brito; Kurda; da Silva, 2018) concluíram que tanto a origem geológica quanto a qualidade física dos agregados, sejam naturais ou reciclados, influenciam na resistência e devem ser considerados para a predição dessa propriedade. Essa observação dos autores reforça que os métodos propostos para o ARCO podem não ser aplicáveis ao ARM e ao ARCI pois eles apresentam diferenças na composição e nas propriedades.

O método “*Equivalent Mortar Volume*” (EMV), proposto por Fathifazl et al. (2009), considera a argamassa antiga presente no ARCO como parte da argamassa

do novo concreto. Assim, o concreto reciclado apresenta a mesma quantidade de argamassa que teria um concreto convencional com as mesmas propriedades. O uso desse método, portanto, não permite que todo o agregado graúdo natural seja substituído pelo agregado reciclado.

O método "*Equivalent Coarse Aggregate Mass*" (ECAM), proposto por Gupta et al. (2016), considera a argamassa presente no ARCO como parte da areia na mistura, fazendo um cálculo de massa equivalente do ARCO para considerar apenas as rochas naturais presentes no agregado.

Em sua pesquisa, Pepe et al. (2016) propõem uma formulação conceitual para prever e controlar a resistência à compressão baseado nas características dos ARCO. As formulações são baseadas em um conjunto de resultados experimentais. Os autores concluíram que a resistência pode ser prevista levando em conta apenas a "qualidade" do agregado, expressa em termos da capacidade de absorção, mas destacam que mais testes são necessários para comprovar a validade do método proposto de forma abrangente.

Os Modelos de Empacotamento de Partículas (MEP) são muito utilizados na dosagem de concretos de alto e ultra alto desempenho (CAD e CUAD). Diversos métodos foram desenvolvidos para melhorar o empacotamento das partículas do concreto e assim reduzir os vazios da mistura, melhorando as propriedades mecânicas. Alguns estudos já avaliaram o uso de MEP em concretos com agregados reciclados (Amario *et al.*, 2017; Omary *et al.*, 2018; Pradhan; Kumar; Barai, 2017; Puente de Andrade *et al.*, 2020; Silva; Pepe; Toledo Filho, 2020; Sunayana; Barai, 2017).

A estimativa da porosidade, mesmo com certo erro, permite introduzir na tecnologia de dosagem uma precisão no conhecimento do empacotamento de partículas muito superior às dosagens de concreto convencionais, nas quais essa porosidade não chega a ser nem citada (Damineli, 2013). A alta compactação do esqueleto granular implica em poucos espaços vazios na mistura de concreto, proporcionando maior resistência à compressão. Assim, quanto maior o grau de compactação do sistema adotado, maior será a resistência à compressão (Meddah; Zitouni; Belâabes, 2010).

O concreto, assim como outros materiais compósitos, é composto de uma matriz ligante que incorpora materiais granulares. Geralmente o objetivo é combinar

os grãos de forma que minimize a porosidade, permitindo o uso da menor quantidade de ligante possível (De Larrard, 1999).

O Modelo de Empacotamento Compressível (MEC – *Compressible packing model* – CPM, em inglês), desenvolvido por De Larrard (1999), é um método que utiliza empacotamento de partículas para dosagem de concretos. O MEC já foi utilizado em pesquisas de concreto com diferentes aplicações (Baghaee Moghaddam; Baaj, 2018; Bousleh *et al.*, 2023; Cordeiro *et al.*, 2018; El Euch Khay *et al.*, 2018; García-Cortés; García Estévez; San-José, 2022; Hisseine; Tagnit-Hamou, 2020; Nanthagopalan; Santhanam, 2012; Van Der Putten *et al.*, 2017). Em concretos reciclados, o método foi aplicado com resultados satisfatórios em concretos com agregados reciclados de concreto (Amario *et al.*, 2017; Omary *et al.*, 2018; Puente de Andrade *et al.*, 2020; Silva; Pepe; Toledo Filho, 2020). Diante das melhorias na estrutura do concreto e dos bons resultados já relatados, mostra-se promissor o estudo do uso desse modelo para concretos com ARCI e ARM, podendo ser uma alternativa para viabilizar o uso desses AR de maneira confiável em concretos estruturais.

O MEC se diferencia de outros modelos de empacotamento disponíveis, como os de Andreassen e Dewar, por abranger combinações de qualquer número de frações de agregados individuais, com qualquer tipo de distribuição granulométrica. O modelo considera que as partículas de todos os tamanhos interagem, afetando a densidade final. Além disso, considera as alterações do efeito parede, efeito de afrouxamento e da compactação da mistura (De Larrard, 1999).

O empacotamento virtual é o maior empacotamento possível para uma mistura, enquanto o empacotamento real é o máximo empacotamento obtido experimentalmente. O MEC relaciona o empacotamento virtual com o empacotamento real da mistura através do índice de compactação, que está associado ao procedimento experimental adotado. O índice de compactação (K) da mistura pode ser calculado pela equação (De Larrard, 1999):

$$K = \sum_{i=1}^n \frac{y_i / \beta_i}{1/\Phi - 1/\gamma_i} \quad 1$$

Onde:

y_j é a fração volumétrica da classe i ;

β_i é a densidade de empacotamento virtual da classe i ;

Φ é o volume de sólido da mistura granular;

γ_i é a densidade de empacotamento da classe i.

Como o índice K é característico do processo de empacotamento, a densidade de empacotamento se torna uma função de Φ .

Em partículas finas, ou seja, com diâmetro inferior a 100 μm , a densidade de empacotamento é determinada com um teste de demanda de água. O índice de empacotamento é então 6,7, se a demanda de água for medida em pasta homogênea, e 4,8 se medida em pasta padrão.

Para as frações grosseiras, com diâmetro superior a 100 μm , a densidade de empacotamento geralmente é medida em condições secas sob vibração ou choques e compressão. O índice de compactação é então 9. Caso o agregado apresente finos, a densidade de empacotamento desta fração é medida por um teste de demanda de água.

As perturbações que ocorrem no empacotamento, como os efeitos de parede e de afrouxamento, representados na Figura 7, são levados em consideração no empacotamento real. O afrouxamento ocorre quando os grãos menores estão em menor quantidade e afetam o empacotamento dos grãos maiores e é calculado utilizando a equação 2. O efeito de parede é uma perturbação que grãos maiores provocam no empacotamento quando estão em menor quantidade que os grãos menores e pode ser calculado pela equação 3 (De Larrard, 1999). Em misturas polidispersas, onde existem mais de dois tamanhos de grãos, os dois efeitos de afrouxamento e parede ocorrem ao mesmo tempo.

$$a_{ij} = \left(1 - \left(1 - \frac{d_j}{d_i} \right)^{1,02} \right)^{0,5} \quad 2$$

$$b_{ij} = 1 - \left(1 - \frac{d_i}{d_j} \right)^{1,50} \quad 3$$

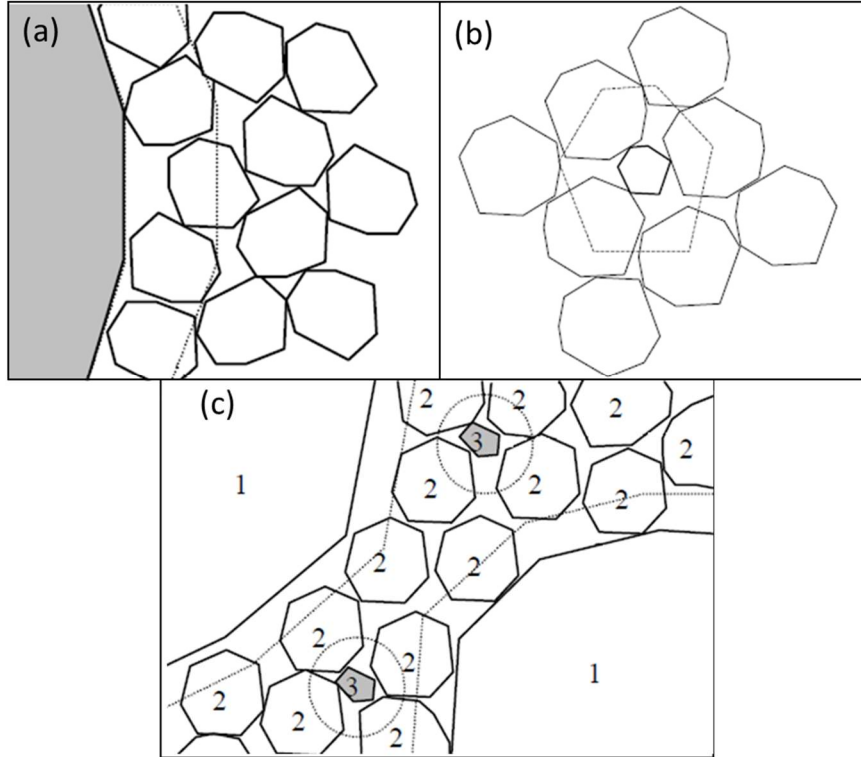
Onde:

a_{ij} parâmetro que descreve o efeito de afrouxamento exercido pela classe j sobre a classe dominante i;

b_{ij} parâmetro que descreve o efeito parede exercido pela classe j sobre a classe dominante i;

d_j é o diâmetro da partícula da classe j ;
 d_i é o diâmetro da partícula da classe i .

Figura 7 - Perturbações no empacotamento: (a) efeito parede; (b) efeito de afrouxamento; (c) combinação dos efeitos.



Fonte: adaptado de (De Larrard, 1999).

A densidade de empacotamento γ_i para uma combinação de n classes de tamanho, e i sendo a classe dominante, é calculado pela seguinte equação (De Larrard, 1999):

$$\gamma_i = \frac{\beta_i}{1 - \sum_{j=1}^{i-1} \left[1 - \beta_i + b_{ij} \beta_i \left(1 - \frac{1}{\beta_j} \right) \right] y_j - \sum_{j=i+1}^n \left[1 - a_{ij} \frac{\beta_i}{\beta_j} \right] y_j} \quad 4$$

Onde:

β_i é a densidade de empacotamento virtual da classe i ;

y_j é a fração volumétrica da classe i .

A resistência da pasta de cimento (f_{cp}) aos 28 dias é obtida pela equação (De Larrard, 1999):

$$f_{cp} = 11,4 R_{c28} \left(\frac{v_c}{v_c + v_w + v_a} \right)^{2,85} \quad 5$$

Onde:

R_{c28} é a resistência do cimento aos 28 dias, dada de acordo com a ISO;

v_c é o volume de cimento;

v_w é o volume de água;

v_a é o volume de ar.

O MEC considera a pasta de cimento através do parâmetro de “espessura máxima da pasta” (do inglês, *Maximum Paste Thickness - MPT*), que fisicamente representa a distância entre os agregados graúdos. O cálculo do MPT, apresentado na equação 6, considera a quantidade total dos agregados, tamanho máximo do agregado, forma e distribuição no interior da mistura (De Larrard, 1999).

$$MPT = D \left(\sqrt[3]{\frac{g^*}{g}} - 1 \right) \quad 6$$

Onde:

D é o tamanho máximo do agregado;

g^* é a densidade de empacotamento;

g é o volume do agregado por unidade de volume do concreto.

Em seus estudos De Larrard (1999) definiu que resistência da matriz (f_{cm}) pode ser calculada pela seguinte equação:

$$f_{cm} = f_{cp} MPT^{-0,13} \quad 7$$

O cálculo da resistência do concreto também considera a ligação entre pasta e agregado e a força intrínseca dos agregados através de duas constantes empíricas dependentes dos agregados, denominados como parâmetros “p” e “q”. Assim, chega-se à seguinte equação para a resistência do compósito (f_c) (De Larrard, 1999):

$$f_c = \frac{p f_{cm}}{q f_{cm} + 1} \quad 8$$

O parâmetro “p” é um coeficiente que caracteriza a ligação do agregado com a pasta de cimento. Este parâmetro é muito influenciado pela condição de limpeza da superfície do agregado, podendo ser reduzido caso o agregado esteja envolvido por

argila ou site, por exemplo. Este parâmetro é adimensional e apresenta magnitude entre 0,5 e 1,2.

O parâmetro “q” é um coeficiente que reflete a limitação da resistência do concreto devido à resistência do agregado. A unidade deste parâmetro é dada em MPa^{-1} e apresenta magnitude entre 0 e 0,006, sendo que agregados provenientes de rochas mais duras apresentam valores mais próximos de zero e agregados mais macios apresentam valores maiores.

Para determinação dos parâmetros “p” e “q”, devem ser realizadas duas moldagens prévias com classes de resistência distintas para cada agregado utilizado (misturas 1 e 2), sendo uma mistura de resistência normal e outra com alta resistência. A partir dos resultados de resistência das duas misturas (f_{c1} e f_{c2}) e da resistência das matrizes (f_{cm1} e f_{cm2}), é possível resolver as seguintes equações e obter os dois parâmetros (De Larrard, 1999):

$$f_{c1} = \frac{p f_{cm1}}{q f_{cm1} + 1} \quad 9$$

$$f_{c2} = \frac{p f_{cm2}}{q f_{cm2} + 1} \quad 10$$

Quando apenas uma mistura de concreto for produzida, é possível relacionar “p” e “q” com a resistência intrínseca da rocha (f_{cg}), caso ela seja conhecida (De Larrard, 1999):

$$\frac{p}{q} \approx 2,14 f_{cg} \quad 11$$

A partir dessa relação, os parâmetros “p” e “q” podem ser deduzidos pelas equações (De Larrard, 1999):

$$p = \frac{1}{f_{cm} \cdot \left(\frac{1}{f_c} - \frac{1}{2,14 \cdot f_{cg}} \right)} \quad 12$$

$$q = \frac{p}{2,14 \cdot f_{cg}} \quad 13$$

Além da resistência à compressão, o modelo também aborda outras propriedades do concreto no estado endurecido e propriedades de durabilidade. Nesta

pesquisa, entretanto, será avaliado, além da compressão, apenas o módulo de elasticidade, absorção e a massa específica. Pelo modelo, o módulo de elasticidade do compósito é calculado pela equação (De Larrard, 1999):

$$E = \left(1 + 2g \cdot \frac{E_g^2 + E_m^2}{(g^* - g)E_g^2 + 2(2 - g^*)E_gE_m + (g^* + g)E_m^2} \right) E_m \quad 14$$

Onde:

E_g é o módulo de elasticidade do agregado;

E_m é o módulo de elasticidade da matriz;

g é o volume de agregado por unidade de volume de concreto;

g^* é a densidade de empacotamento do agregado.

O volume de agregado (g) é obtido na composição da mistura de concreto. A densidade de empacotamento do agregado (g^*) pode ser mensurada diretamente ou avaliada com o modelo de empacotamento compressível. O módulo de elasticidade do agregado pode ser medido ou determinado pela calibração do modelo. Para obtenção do módulo da matriz (E_m) pode ser utilizada a equação (De Larrard, 1999):

$$E_m = 226fc \quad 15$$

O modelo também aborda as propriedades do concreto no estado fresco, como a viscosidade plástica, tensão de escoamento e abatimento pelo tronco de cone. O MEC relaciona o slump à tensão de escoamento e densidade do concreto fresco. A equação 16 proposta por (Hu, 1995) recebeu uma correção empírica feita por (Ferraris; DeLarrard, 1998) com base em um amplo plano experimental, resultando na equação 17, a ser adotada para abatimentos superiores a 100 mm.

$$S = 300 - 0,27 \frac{\tau_0}{\rho} \quad 16$$

$$S = 300 - 0,347 \frac{\tau_0 - 212}{\rho} \quad 17$$

Onde:

S é o slump (mm);

τ_0 é a tensão de escoamento (Pa);

ρ é a massa específica do concreto do concreto fresco (kg/m^3).

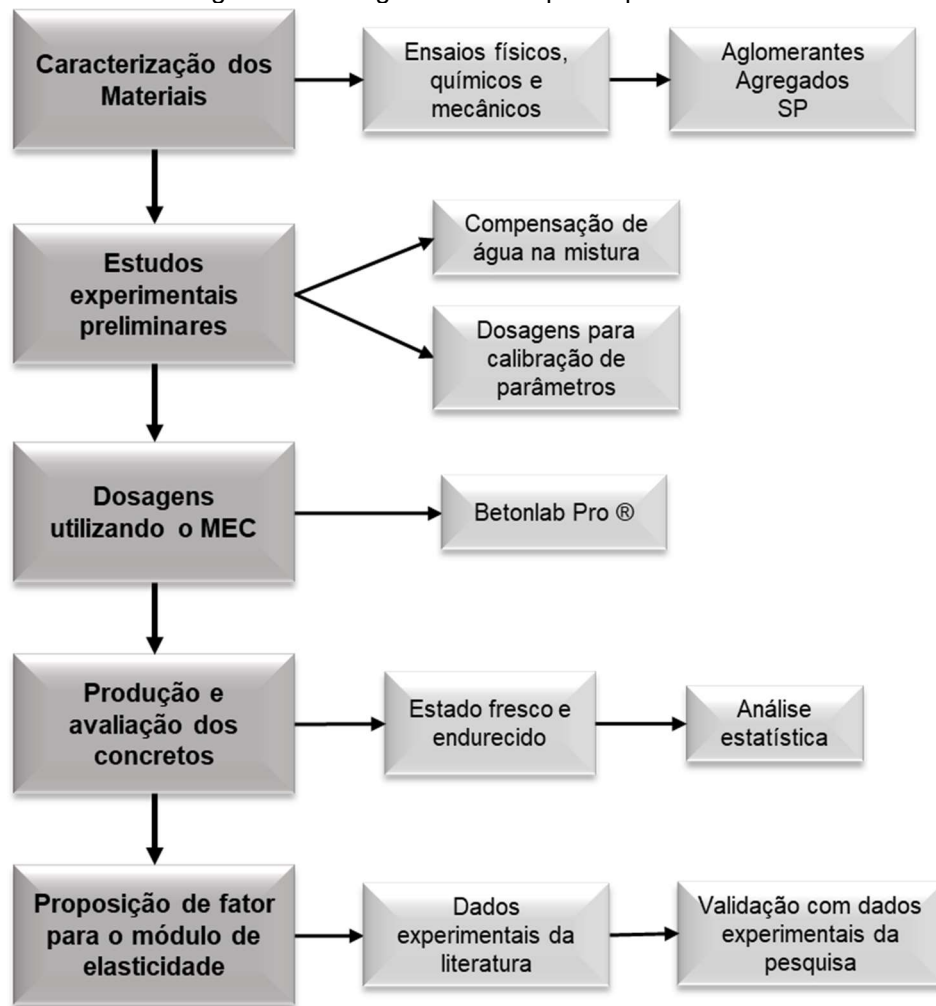
O MEC pode ser aplicado com o auxílio do software *Bétonlab Pro3*[®], que possibilita que o usuário crie um banco de dados de materiais com as propriedades de cada matéria prima a ser utilizada. Com base nesses dados, é possível fazer a otimização do traço de concreto e estimar diversas propriedades nos estados fresco e endurecido.

Além das propriedades dos materiais normalmente utilizadas na dosagem do concreto, como massa específica, absorção e granulometria, o MEC requer alguns parâmetros que devem ser definidos previamente. Ensaio de compactação dos materiais e misturas prévias são necessários para a entrada de dados e calibração dos parâmetros do modelo.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são apresentados os materiais e sua caracterização, os estudos experimentais preliminares necessários para a utilização do MEC, os critérios utilizados na dosagem com o MEC, a metodologia de produção e avaliação dos concretos e da proposição do fator do agregado reciclado para o cálculo do módulo de elasticidade desses concretos. Essas etapas estão apresentadas na Figura 8.

Figura 8 - Fluxograma das etapas experimentais.

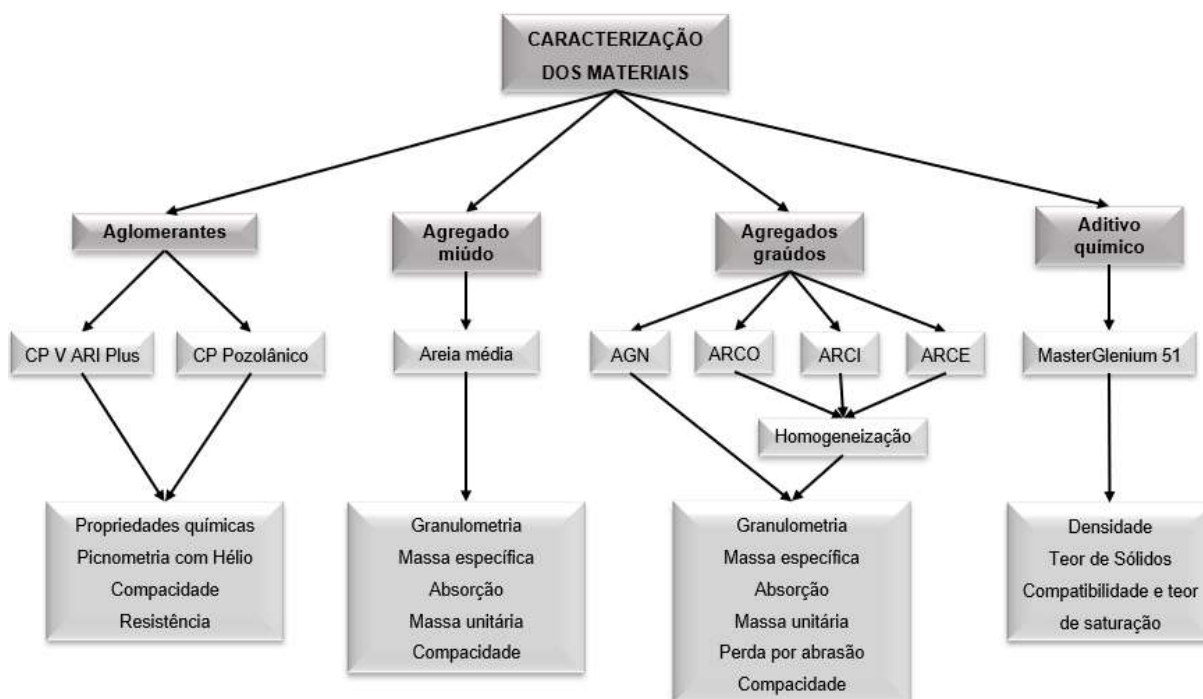


Fonte: a autora.

3.1 MATERIAIS

Os materiais utilizados são: cimentos CP V ARI e CP Pozolânico, areia média, agregado gráudo natural (AGN), ARCO, ARCI, ARCE e superplastificante (SP). A Figura 9 apresenta as etapas de caracterização dos materiais.

Figura 9 - Fluxograma de caracterização dos materiais.



Fonte: a autora.

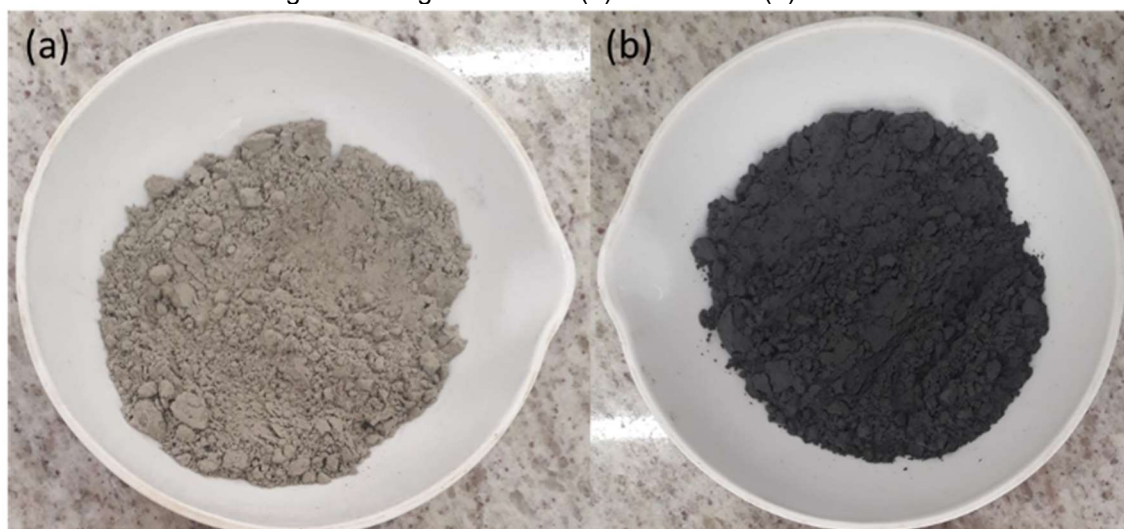
Aglomerantes

Foram utilizados dois tipos de cimento: CP V ARI Plus e CP Pozolânico. De acordo com NBR 16697, o CP V ARI é um cimento com baixo teor de adições, máximo de 10%, e alta resistência inicial. CP Pozolânico é um cimento Portland pozolânico produzido no laboratório, sua composição será apresentada a seguir. Assim é possível produzir misturas com um cimento mais puro e um outro composto, que é mais utilizado comercialmente, e avaliar a redução do CO₂ associado.

O cimento CP V ARI Plus foi fabricado pelo Grupo Lafarge/Holcim na cidade de Pedro Leopoldo, região metropolitana de BH. A análise química, fornecida em relatório técnico do fabricante, está apresentada na Tabela 4.

O CP Pozolânico utilizado foi obtido através da mistura do CP V ARI Plus com cinza de casca de arroz (CCA) como material pozolânico, em proporções de mistura de 80% e 20%, respectivamente, resultando em um cimento com resistência aos 28 dias de 32 MPa. A Figura 10 apresenta uma amostra dos materiais.

Figura 10 - Aglomerantes: (a) CP V ARI e (b) CCA.



Fonte: a autora.

As propriedades químicas da CCA, denominada Silica Nobre e produzida pela Silica Verde do Arroz SA, foram determinadas em ensaios durante pesquisa de Gomes *et al.* (2023) e são apresentadas na Tabela 4, que também mostra as propriedades do CP Pozolânico (CP Poz), obtidas através das combinações das propriedades dos materiais de origem.

Tabela 4 - Propriedades químicas dos aglomerantes (%).

Composto	CP V	CCA	CP Poz
CaO	62,53	0,68	50,16
SiO ₂	18,11	83,29	31,15
SO ₃	2,88	-	2,30
Al ₂ O ₃	4,55	1,66	3,97
Fe ₂ O ₃	3,28	0,08	2,64
Na ₂ O	0,14	-	0,11
MgO	0,60	-	0,48
K ₂ O	0,60	2,38	0,97
TiO ₂	0,24	-	0,20
P ₂ O ₅	0,27	0,42	0,30
Perda ao fogo	5,82	11,00	6,85

Fonte: a autora.

A densidade dos cimentos foi determinada através do ensaio de picnometria com gás hélio, utilizando o equipamento Quantachrome Multipycnometer.

A compacidade experimental foi obtida através do ensaio de demanda d'água. O objetivo do ensaio é encontrar a dosagem mínima de água que produza a pasta de

consistência normal, obtida seguindo as recomendações da NBR 16606 (ABNT, 2018a).

A compacidade experimental (C) do cimento é dada pela equação:

$$C = \frac{1}{1 + \rho_c \frac{m_a}{m_c}} \quad 18$$

Onde:

ρ_c é a massa específica do cimento;

m_a é a massa de água;

m_c é a massa de cimento.

A resistência à compressão dos cimentos foi determinada de acordo com a NBR 7215 (ABNT, 2019), sendo os corpos de prova elaborados com uma parte de cimento e três de areia normalizada, em massa, e relação a/c de 0,48. Os testes foram realizados aos 1, 3, 7 e 28 dias para o CP V e aos 7 e 28 dias para o CP Poz, utilizando uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade para 2000 kN.

As propriedades físicas e mecânicas dos cimentos utilizados são apresentadas na Tabela 5.

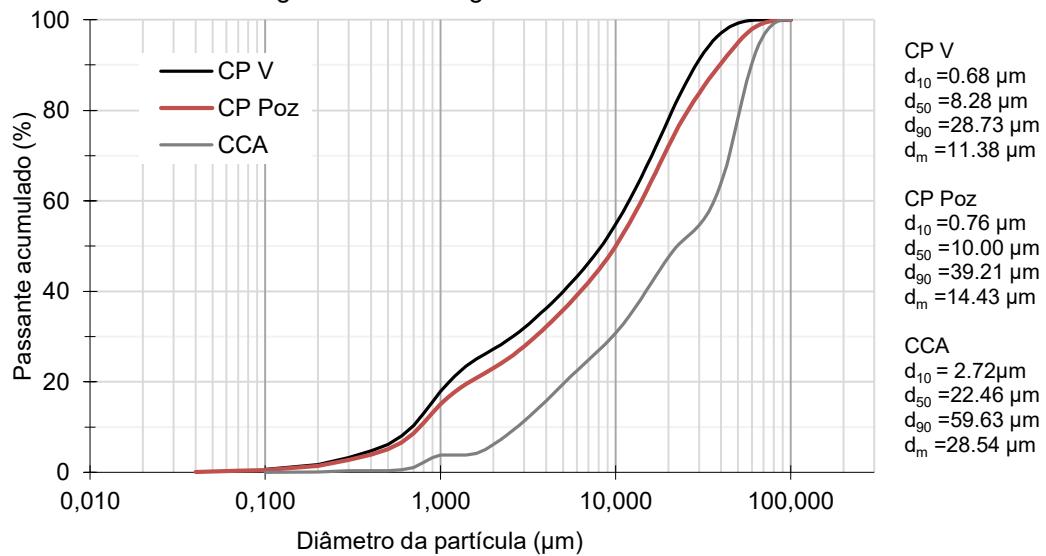
Tabela 5 - Propriedades físicas e mecânicas dos cimentos.

Propriedade	CP V	CP Poz
Densidade (g/cm³)	3,258	3,047
Compacidade sem superplastificante	0,494	0,507
Compacidade com superplastificante	0,619	0,629
Resistência à Compressão - 1 dia (MPa)	23,95(±0,38)	-
Resistência à Compressão - 3 dias (MPa)	32,65(±0,99)	-
Resistência à Compressão - 7 dias (MPa)	37,12(±1,55)	22,37(±1,24)
Resistência à Compressão - 28 dias (MPa)	46,94(±0,52)	32,25(±5,61)

Fonte: a autora.

A distribuição granulométrica, apresentada na Figura 11, foi determinada por meio de difração a laser, utilizando o equipamento CILAS Particle Size Analyzer 1090. As determinações foram por via úmida, utilizando álcool isopropílico para o CP V e água para CCA. A distribuição do CP IV foi determinada pela combinação das curvas do CP V e da CCA.

Figura 11 - Curva granulométrica dos cimentos.



Fonte: a autora.

Agregado miúdo

O agregado miúdo utilizado foi a areia média lavada, comercializada pela empresa Pura Sílica. A Figura 12 mostra uma amostra da areia.

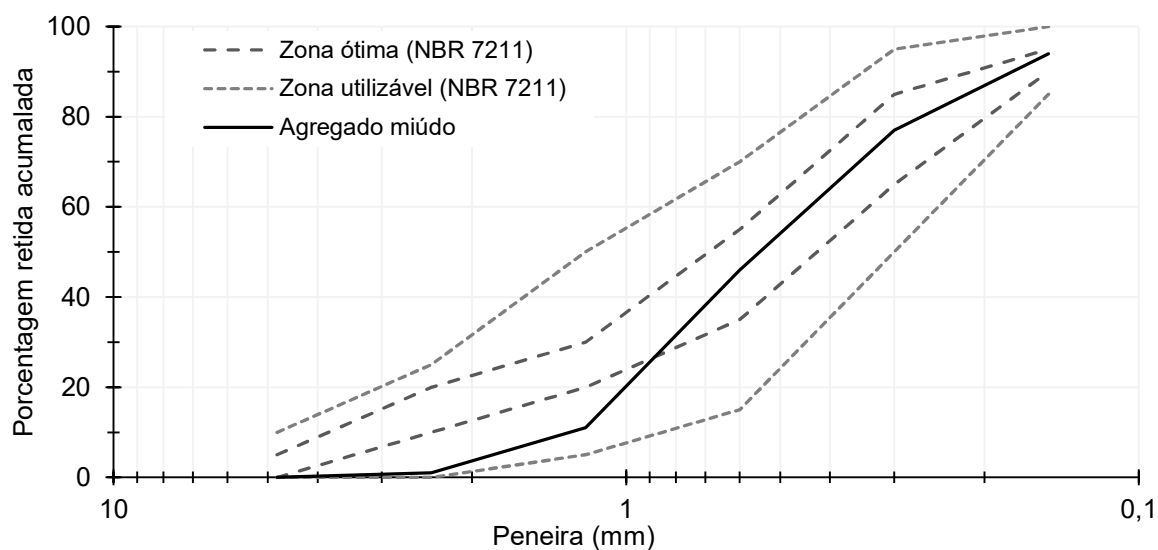
Figura 12 - Amostra do agregado miúdo.



Fonte: a autora.

A curva granulométrica e o módulo de finura foram determinados de acordo com as recomendações da NBR 17054 (ABNT, 2022a), utilizando peneirador mecânico. Na Figura 13 é possível observar que a granulometria da areia encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2022b).

Figura 13 - Curva granulométrica do agregado miúdo.

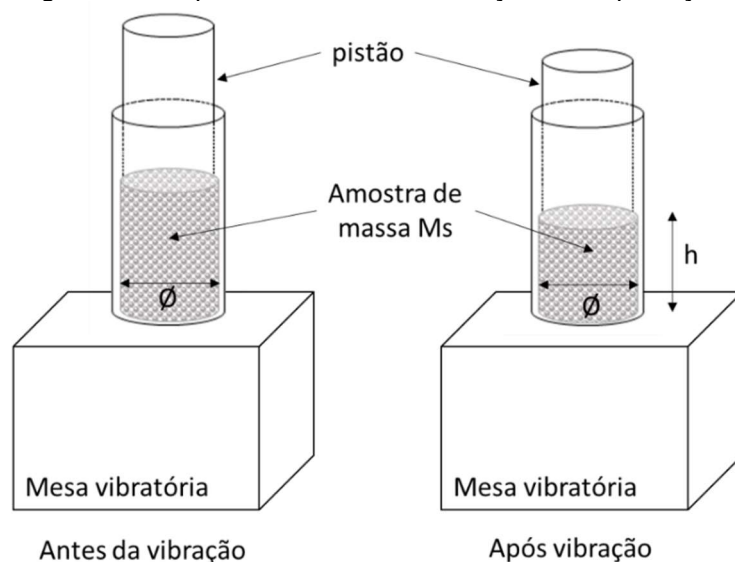


Fonte: a autora.

A massa específica e absorção do agregado miúdo foram determinadas seguindo as recomendações da NBR 16916 (ABNT, 2021b). A massa unitária foi determinada de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021c).

A compactidade experimental dos materiais com dimensões maiores que 100 μm deve ser determinada através do ensaio de vibração e compactação, descrito por (De Larrard, 1999) e esquematizado na Figura 14.

Figura 14 - Esquema do ensaio de vibração e compactação.



Fonte: a autora.

A amostra do material seco é colocada em um cilindro metálico e um pistão é posicionado sobre o material, gerando uma pressão. Em seguida, o cilindro é fixado

em uma mesa vibratória e submetido à vibração. Ao final, realiza-se uma leitura da altura do material. A compacidade experimental (C) é dada pela equação:

$$C = \frac{4 M_s}{\pi \emptyset^2 h \rho_s} \quad 19$$

Onde:

M_s é a massa de material seco;

$\emptyset$ é o diâmetro interno do cilindro;

h é a altura da camada de material compactada ao final do ensaio;

ρ_s é a massa específica do material.

As propriedades físicas da areia estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades físicas do agregado miúdo.

Propriedade física	Valor
Massa específica (g/cm ³)	2,54
Absorção (%)	0,46
Massa unitária (g/cm ³)	1,41
Módulo de finura	2,29
Compacidade	0,65

Fonte: a autora.

Agregados graúdos

Foram utilizados quatro tipos de agregados graúdos: natural (AN), reciclado de concreto (ARCO), reciclado cimentício (ARCI) e reciclado cerâmico (ARCE).

O agregado graúdo natural utilizado foi a brita de gnaiss, originária da Região Metropolitana de Belo Horizonte.

O agregado reciclado de concreto foi produzido no laboratório do CEFET-MG Campus Curvelo, utilizando corpos de prova de concreto. Após o recebimento, notou-se a presença de partículas grandes, que indicavam estar fora dos limites de brita 1. Assim, antes do uso, o ARCO passou por um peneiramento prévio para eliminar as partículas que estivessem fora dos limites obtidos para o AN utilizado. Foram utilizadas as peneiras de diâmetro de 25 e 4,5 mm nessa triagem do material onde todo o material retido na peneira de 25 e passante na 4,5 foi eliminado. Após, o material foi homogeneizado através do quarteamento e armazenado em sacos plásticos no laboratório do CEFET-MG.

O agregado reciclado cimentício foi fornecido pela empresa ECOVIA, localizada em Varginha/MG. Este agregado é constituído por materiais cimentícios diversos, como argamassa, concreto, blocos pré-moldados de concreto, etc.

O ARCI recebido apresentava muitas partículas finas e foi necessário fazer um peneiramento utilizando a peneira de diâmetro de 4,5 mm para eliminar essas partículas. Também foi realizado a homogeneização dos agregados, que pode ser visto na Figura 15. O processo de pilha alongada consiste em distribuir o material ao longo de uma pilha. A distribuição do material foi realizada de maneira alternada, variando o sentido do lançamento, sempre utilizando quantidades iguais. Após a distribuição de todo o material, o material depositado nas pontas é coletado e distribuído novamente.

Figura 15 - Pilha de homogeneização do ARCI.



Fonte: a autora.

O agregado cerâmico foi produzido no laboratório do CEFET-MG Campus II, utilizando blocos cerâmicos de vedação. O ARCE foi peneirado após sua produção e armazenado em sacos plásticos no laboratório.

A Figura 16 apresenta uma amostra dos quatro agregados graúdos utilizados.

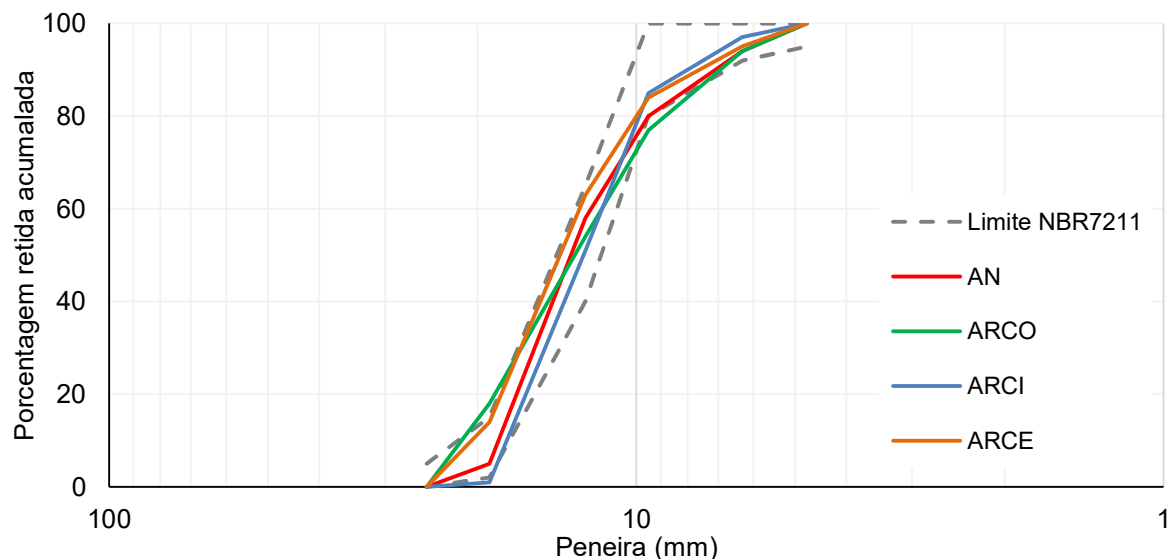
Figura 16 - Amostra dos agregados graúdos.



Fonte: a autora.

As curvas granulométricas dos agregados graúdos, determinadas de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022a), estão apresentadas na Figura 17. Todos os agregados apresentaram granulometria dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2022b) para a classificação como brita 1.

Figura 17 - Curva granulométrica dos agregados graúdos.



Fonte: a autora.

Os agregados graúdos tiveram a massa específica e absorção de água determinadas de acordo com as recomendações da NBR 16917 (ABNT, 2021d). A

massa unitária foi determinada de acordo com a NBR 16972 (ABNT, 2021c). A determinação da perda por abrasão foi realizada por meio do ensaio de abrasão Los Angeles, seguindo a NBR 16974 (ABNT, 2022c). A compactidade foi determinada utilizando o mesmo procedimento descrito para o agregado miúdo. As propriedades físicas dos agregados graúdos são apresentadas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades físicas dos agregados graúdos.

Propriedade física	AGN	ARCO	ARCI	ARCE
Massa específica (g/cm ³)	2,64	2,34	2,29	1,66
Absorção de água (%)	0,48	5,44	6,42	22,13
Massa unitária (g/cm ³)	1,41	1,31	1,31	0,94
Perda por abrasão (%)	12,44	20,43	38,18	52,60
Compactidade	0,55	0,57	0,55	0,53

Fonte: a autora.

A massa específica dos agregados reciclados é menor que do agregado natural, sendo a maior redução para o ARCE, seguido do ARCI e ARCO. A absorção de água aumenta para os agregados reciclados, sendo expressivamente mais elevada para o ARCE. A perda por abrasão também apresentou maiores percentuais para os AR, sendo que o ARCE apresentou a maior perda. Apesar dos valores mais elevados de perda por abrasão, o ARCO e ARCI apresentaram valores dentro do limite para uso em concretos estabelecido pela NBR 7211 (ABNT, 2022b).

O ARCE utilizado foi produzido utilizando blocos de vedação, que requerem baixa resistência por não apresentar uma função estrutural. Sendo assim, era esperado que este agregado apresentasse a menor massa específica e capacidade de absorção e perda por abrasão em níveis superiores quando comparado aos demais agregados utilizados.

Por possuir argamassa proveniente de concreto, que geralmente apresentam maior resistência que as argamassas de revestimento, o ARCO apresenta propriedades mais favoráveis ao uso estrutural que o ARCI. A diferença foi mais perceptível nas propriedades de absorção e perda por abrasão.

Após a caracterização dos agregados, eles foram classificados utilizando o sistema de classificação proposto por Silva; de Brito; Dhir (2014a) e apresentado na Tabela 1. As classes atribuídas aos quatro tipos de agregados graúdos são apresentadas na Tabela 8. Também são classificadas as combinações de agregados

a serem utilizadas nas dosagens, sendo elas: ARM1 – 90% ARCI e 10% ARCE; ARM2 – 80% ARCI e 20% ARCE; e ARM3 – 70% ARCI e 30% ARCE.

Tabela 8 - Classificação dos agregados graúdos segundo Silva et al. (2014a) .

Classe do agregado	A			B			C			D
	I	II	III	I	II	III	I	II	III	
Agregado	AN			ARCO ARCI			ARM1	ARM2	ARM3	ARCE

Fonte: a autora.

A classificação indica que os agregados ARCO e ARCI possuem propriedades semelhantes e poderiam ser destinados ao mesmo tipo de uso. À medida que o teor de ARCE é incorporado ao ARCI, ocorre uma redução da classe do agregado, evidenciada pela posição dos agregados ARM1, ARM2 e ARM3. O agregado ARCE está na classe inferior, indicando sua menor resistência quando comparado aos demais.

Aditivo superplastificante

O aditivo químico utilizado foi o superplastificante MasterGlenium 51, composto por policarboxilatos modificados, classificado como superplastificante tipo II (SP-II), e fornecido pela Master Builders Solutions. O aditivo é um líquido de cor amarelada, com densidade média de 1,07 g/cm³, teor de sólidos de 30% e pH entre 5,0 e 7,0.

Para avaliar a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento Portland e determinar a dosagem de saturação foi realizado o ensaio de escoamento de pasta com o cone de Marsh (De Larrard, 1999), mostrado na Figura 18.

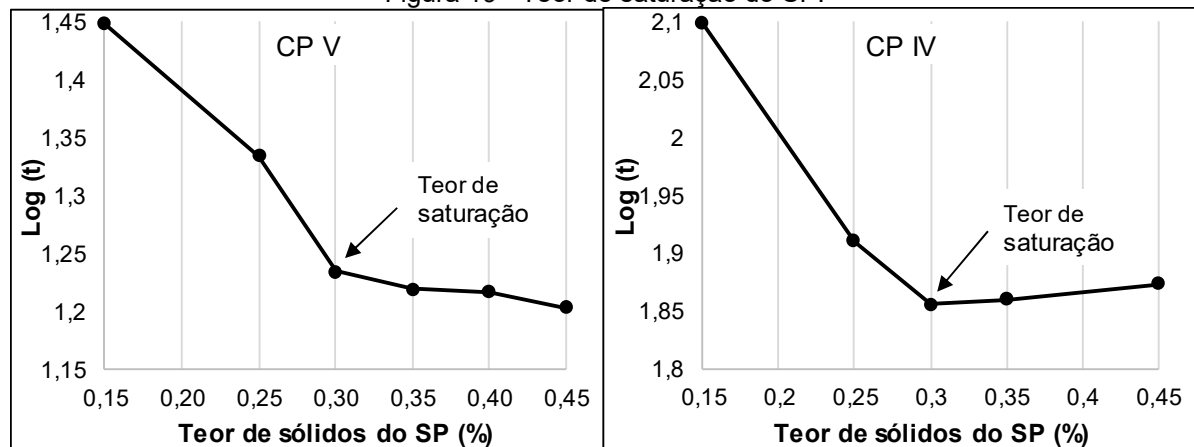
A confecção das pastas foi feita com relação a/c de 0,35 e o teor de aditivo foi variado entre 0,5 e 1,5%, em relação à massa do cimento. Os testes foram feitos 5, 15, 30, 45 e 60 minutos após a mistura das pastas. O tempo de escoamento de 1000 ml de pasta foi medido. O teor de saturação obtido foi de 0,30% de sólidos/kg de aglomerante para os dois tipos de cimento utilizados, conforme apresentado na Figura 19.

Figura 18 - Ensaio de compatibilidade e saturação do SP.



Fonte: a autora.

Figura 19 - Teor de saturação do SP.



Fonte: a autora.

Água

A água utilizada foi fornecida pelo sistema de abastecimento municipal, sob responsabilidade da Companhia de Saneamento de Minas Gerais (COPASA MG).

3.2 ESTUDO DA COMPENSAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO RECICLADO

Nesta etapa, resumida na Figura 20, foram produzidas diferentes misturas de concreto para avaliar o teor de água a ser utilizado para compensar a água absorvida pelos agregados durante as misturas.

Figura 20 -Fluxograma do estudo de compensação de água.



Fonte: a autora.

As dosagens das misturas de concreto foram feitas utilizando o Método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)(Rodrigues, 1993). A composição volumétrica, fator a/c e consumo de cimento foram mantidos constantes para a dosagem das misturas com os diferentes agregados graúdos. A Tabela 9 apresenta o consumo de cimento, agregado miúdo (AM) e agregado graúdo (AG) para cada tipo de agregado utilizado na mistura.

Tabela 9 - Composição granular dos traços do estudo de compensação.

Tipo de AG	Prefixo utilizado na mistura	Material (kg/m³)		
		CP V	AM	AG
Natural	AN	325,0	753,7	1078,6
ARCO	CO	325,0	764,4	945,4
ARCI	CI	325,0	749,1	941,0
ARCE	CE	325,0	759,22	673,92

Fonte: a autora.

A variação do teor de água total adicionada nas misturas foi feita com base nos traços granulares apresentados. Para cada tipo de agregado foram propostas misturas com diferentes quantidades de água adicional, baseado na capacidade de absorção em 24 horas dos agregados graúdos. As misturas produzidas e os teores de água adicionado são apresentados na Tabela 10. O prefixo da mistura se refere ao tipo de agregado graúdo utilizado e ABSXX indica o percentual de água adicionado em relação à capacidade de absorção do agregado reciclado em 24 horas. São

considerados como água adicional a água adicionada para absorção dos agregados miúdos e graúdos (AM e AG, respectivamente). Para os agregados naturais (brita de gnaiss e areia) foram considerados 100% do percentual de absorção, de 0,48% e 0,46%, respectivamente.

Tabela 10 - Consumo de água das misturas do estudo de compensação.

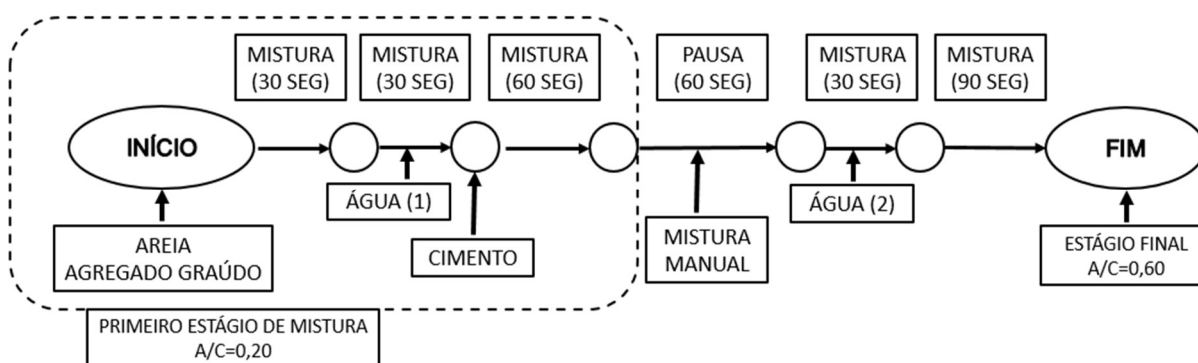
Mistura	Quantidade de água (kg/m³)				Acréscimo em relação a AN-Ref
	Livre	AM	AG	Total	
AN-Ref	195	3,47	5,18	203,65	0
CO-ABS80	195	3,52	41,14	239,66	17,68%
CO-ABS70	195	3,52	36,00	234,52	15,16%
CO-ABS60	195	3,52	30,86	229,38	12,63%
CI-ABS80	195	3,45	47,73	246,18	20,88%
CI-ABS70	195	3,45	41,76	240,21	17,95%
CI-ABS60	195	3,45	35,80	234,25	15,03%
CE-ABS100	195	3,49	149,14	347,63	70,70%
CE-ABS90	195	3,49	134,23	332,72	63,38%

Fonte: a autora.

Inicialmente foi produzida uma mistura com compensação de 60% da capacidade de absorção do ARCE, porém a mistura não apresentou trabalhabilidade, impedindo sua moldagem. Assim, foram propostas as misturas com 90% e 100% de compensação para este agregado.

As misturas foram confeccionadas utilizando o Método de Mistura Dupla (Double Mixing Method), descrito por Otsuki *et al.* (2003) e apresentado na Figura 21. O método é semelhante ao método de mistura em dois estágios proposto por Tam *et al.* (2005), diferindo apenas nos intervalos de cada etapa e na adição de uma etapa de “mistura manual”, para que o material aderido ao misturador seja raspado. A água adicional é inserida na mistura ao mesmo tempo que a “Água 1”.

Figura 21 - Método de Mistura Dupla.



Fonte: adaptado de Otsuki *et al.* (2003).

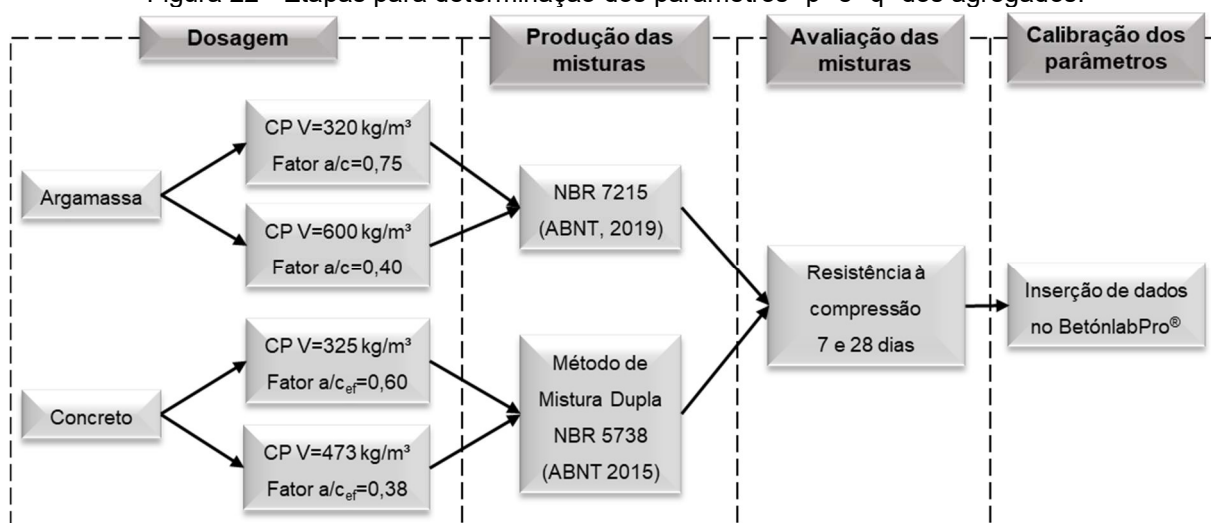
Para avaliar a trabalhabilidade das misturas foram utilizados os ensaios de consistência pelo abatimento do tronco de cone, descrito pela NBR 16889 (ABNT, 2020), e perda de abatimento, descrito pela NBR 10342 (ABNT, 2012). O abatimento foi medido ao final da mistura e a cada 15 minutos até completar 1 hora.

A resistência à compressão foi determinada aos 7 e 28 dias, utilizando uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade para 2000 kN. A velocidade de carregamento foi de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s, conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018b).

3.3 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS “p” E “q”

Os parâmetros “p” e “q” devem ser definidos para cada tipo de agregado utilizado, sendo realizadas misturas de argamassa para definição dos parâmetros do agregado miúdo e misturas de concreto para os agregados graúdos. As etapas necessárias para a determinação dos parâmetros são apresentadas na Figura 22, onde pode-se ver que após a avaliação das misturas de concreto e argamassa ocorre a etapa de calibração. Esta última etapa utiliza o software BétonlabPro 3[®], que aplica o MEC para dosagem e foi desenvolvido por .(De Larrard, 1999).

Figura 22 - Etapas para determinação dos parâmetros "p" e "q" dos agregados.



Fonte: a autora.

3.3.1 Misturas de argamassa para determinação dos parâmetros “p” e “q” do agregado miúdo

A composição das argamassas produzidas para a determinação dos parâmetros da areia é apresentada na Tabela 11. O prefixo da mistura se refere à classe de resistência, sendo “C” para convencional e “AD” para alta resistência, e o termo seguinte “AM” faz referência ao agregado miúdo.

Tabela 11 - Misturas para determinação dos parâmetros "p" e "q" do agregado miúdo.

Mistura	Materiais (kg/m³)			
	CP V	AM	Água	SP
C-AM	320,0	1783,0	240,0	3,2
AD-AM	600,0	1551,0	240,0	6,0

Fonte: a autora.

Os corpos de prova de argamassa foram moldados com 5 cm de diâmetro e 10 cm de altura, seguindo as recomendações da NBR 7215 (ABNT, 2019). A resistência à compressão axial das misturas foi determinada aos 7 e 28 dias, utilizando uma máquina universal de ensaios, com capacidade para 2000 KN.

3.3.2 Misturas de concreto para determinação dos parâmetros “p” e “q” dos agregados graúdos

A composição dos concretos produzidos para a determinação dos parâmetros dos agregados graúdos é apresentada na Tabela 12. Assim como para a argamassa, o prefixo da mistura se refere à classe de resistência e o termo seguinte faz referência ao agregado graúdo, sendo “AGN” para o agregado graúdo natural; “ARCO, ARCI e

ARCE” para os agregados graúdos reciclados. O MEC considera que os agregados na condição seca para o cálculo da água efetiva na dosagem e adiciona o teor de água que o agregado absorve, por isso a Tabela 12 apresenta água efetiva e água total.

Tabela 12 - Misturas para determinação dos parâmetros "p" e "q" dos agregados graúdos.

Mistura	Agregado graúdo	Materiais (kg/m³)					
		CP V	AG	AM	Água _{ef}	Água _{tot}	SP
C-AGN	Natural	325,00	1078,56	753,71	195,00	203,64	0
AD-AGN	Natural	437,00	1048,60	768,99	166,00	174,57	4,37
C-ARCO	Concreto	325,00	945,36	764,42	195,00	234,52	0
AD-ARCO	Concreto	437,00	919,10	779,40	166,00	204,58	4,37
C-ARCI	Cimentício	325,00	941,04	749,08	195,00	240,21	0
AD-ARCI	Cimentício	437,00	914,90	764,48	166,00	210,12	4,37
C-ARCE	Cerâmico	325,00	673,92	759,22	195,00	332,72	0
AD-ARCE	Cerâmico	437,00	655,20	774,35	166,00	300,06	4,37

Água_{tot} = água efetiva + água de absorção dos agregados

Fonte: a autora.

As misturas de concreto foram produzidas utilizando o Método de Mistura Dupla, apresentado na Figura 21. Os corpos de prova de concreto foram moldados de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando moldes metálicos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. A resistência à compressão foi determinada aos 7 e 28 dias, utilizando uma máquina universal de ensaios, com capacidade para 2000 kN, seguindo as recomendações da NBR 5739 (ABNT, 2018b).

3.3.3 Calibração dos parâmetros “p” e “q”

O Modelo de Empacotamento Compressível foi aplicado utilizando o software BétonlabPro 3[®]. Para a criação do banco de dados dos materiais, primeiro é escolhido o tipo de material e sua faixa granulométrica, conforme pode ser visto na Figura 23. Após essa definição o usuário deve nomear o material e inserir suas propriedades. O banco de dados dos materiais criado para a pesquisa pode ser visto no Apêndice A. Destaca-se que a absorção de água dos agregados ARCO e ARCI inserida é de 70% da capacidade de 24 horas, e para o agregado ARCE o valor foi de 90%, teores estes obtidos do estudo de compensação de água.

Figura 23 - Criação do banco de dados dos materiais.

Constituents database

Type of constituent

- ☒ Gravel
- ☐ Sand
- ☐ Cement
- ☐ Fly ash
- ☐ Limestone filler
- ☐ Siliceous filler
- ☐ Blastfurnace Slag
- ☐ Silica fume
- ☐ Superplastificizer

Number of fractions: 1

Fraction 1: 4,5 mm / 20 mm

OK Cancel

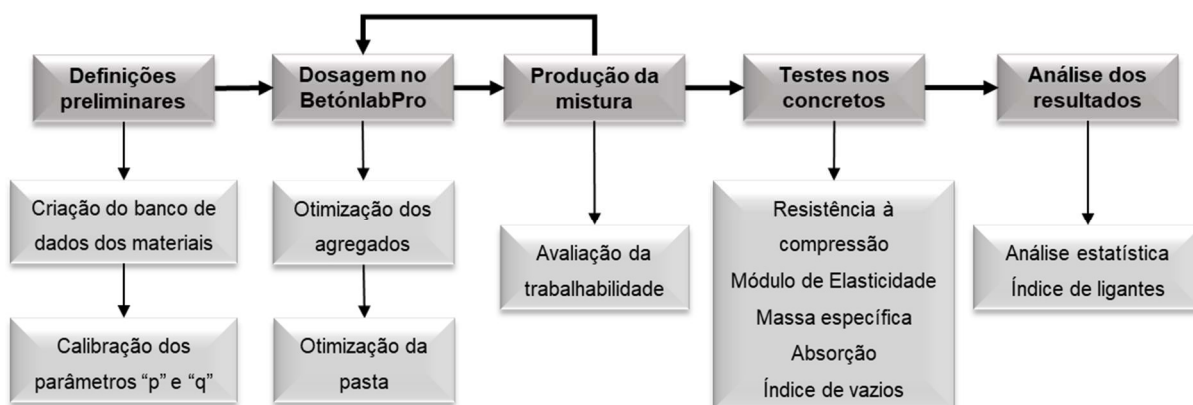
Fonte: a autora.

Para a calibração dos parâmetros no BétonlabPro 3®, primeiro são selecionados os materiais utilizados na mistura. Em seguida, os dados de composição da mistura e a resistência à compressão obtida nas duas idades ensaiadas são inseridos e a calibração é então realizada. O procedimento de calibração deve ser realizado para cada agregado, iniciando pela areia uma vez que suas propriedades influenciam nas propriedades dos concretos, afetando assim a calibração do agregado graúdo.

3.4 DOSAGENS COM O MEC

A dosagem e avaliação do Modelo de Empacotamento Compressível em concretos com agregados reciclados seguiu as etapas apresentadas na Figura 24, que são detalhadas neste item. Foram realizadas duas séries de dosagens, a primeira utilizando o cimento CP V ARI e a segunda com o cimento pozolânico, ambas as séries visando a produção de concretos com resistência de 30 MPa.

Figura 24 - Etapas de dosagem e avaliação do concreto utilizando o MEC.



Fonte: a autora.

Foram escolhidas seis diferentes combinações de agregados graúdos para realizar as duas séries de dosagens com o Modelo de Empacotamento Compressível:

- NAT – mistura contendo apenas agregados naturais;
- CON – mistura com a totalidade dos agregados graúdos de ARCO;
- CIM – mistura com a totalidade dos agregados graúdos de ARCI;
- MIX-10%CE – mistura com agregado graúdo misto, composto por 90% de ARCI e 10% de ARCE;
- MIX-20%CE – mistura com agregado graúdo misto, composto por 80% de ARCI e 20% de ARCE;
- MIX-30%CE – mistura com agregado graúdo misto, composto por 70% de ARCI e 30% de ARCE.

O percentual máximo de 30% foi escolhido com base nos dados obtidos no item 2.2, onde se observou que a maioria dos agregados reciclados mistos avaliados apresenta teor de materiais cerâmicos menor que 30% da sua composição.

3.4.1 Primeira série de dosagens

A primeira série de misturas foram dosadas utilizando o CP V ARI para classe de resistência C30. O teor máximo de SP foi escolhido como o teor de saturação, assim nenhuma mistura utilizaria mais que 1% de SP. A classe de abatimento escolhida foi a S100.

Para a otimização dos traços no BétonlabPro 3®, inicialmente são selecionados os materiais a serem utilizados. Uma primeira otimização foi realizada para maximizar o empacotamento do esqueleto granular. Em seguida, uma nova otimização foi realizada mantendo fixo os percentuais de agregados obtidos e ajustando os teores

da pasta para atingir os critérios de dosagem definidos. Nesta última otimização, buscou-se a menor quantidade de cimento possível para o traço.

Uma primeira mistura utilizando somente agregados graúdos de ARCI foi produzida para testar os critérios escolhidos. Ao medir o Slump, obteve-se um resultado de 180 mm, valor consideravelmente acima do estipulado. Assim, os parâmetros de dosagem foram ajustados, adotando um valor de Slump de 20 mm na simulação para tentar obter misturas que apresentassem o valor desejado (100 mm). Com os novos parâmetros, foi produzida uma nova mistura teste, que obteve abatimento de 150 mm, ainda acima do valor estabelecido. Para manter o abatimento mais próximo da classe S100, optou-se por reduzir o teor de SP utilizado nas misturas, passando de 1 para 0,5% do teor de cimento. Assim, foram obtidos os traços definidos na Tabela 13.

Tabela 13 – Dosagens da primeira série de misturas utilizando MEC (kg/m³).

Mistura	CP V	Água _{ef}	Água _{tot}	AM	AGN	ARCO	ARCI	ARCE	SP
I-NAT	266,0	182,9	190,8	757,9	1107,2	0	0	0	1,33
I-CON	284,6	172,8	214,3	719,7	0	1027,4	0	0	1,42
I-CIM	302,6	175,2	219,9	753,3	0	0	954,3	0	1,51
I-MIX-10%CE	319,4	172,6	230,1	750,3	0	0	820,2	94,2	1,60
I-MIX-20%CE	339,1	169,3	237,8	747	0	0	703,2	175,9	1,70
I-MIX-30%CE	359,1	166,1	244,6	743,6	0	0	595,1	250,9	1,80

Água_{tot} = água efetiva + água de absorção dos agregados

Fonte: a autora.

Como a resistência à compressão foi um parâmetro fixo para as dosagens, as misturas obtidas apresentaram diferentes quantidades de cimento. As misturas utilizando AR apresentaram acréscimo de cimento entre 7% e 35% em relação à mistura produzida apenas com agregados naturais.

3.4.2 Segunda série de dosagens

Após a verificação dos resultados das misturas confeccionadas com CP V ARI e constatação que o método foi assertivo para a dosagem com uso dos diferentes tipos de AR, foram realizadas as dosagens com uso do CP Poz para avaliar o método com um cimento composto, que são cimentos mais usuais e que possuem menor teor de emissão de CO₂ associado. Os parâmetros de dosagem foram os mesmos estabelecidos anteriormente, alterando apenas o tipo de cimento utilizado. Os

percentuais de agregados foram os mesmos da primeira série de dosagens e foi realizada uma nova otimização do teor de pasta para atingir a resistência desejada com o uso do novo cimento. Os traços obtidos na dosagem estão na Tabela 14. Nesta etapa, optou-se por confeccionar apenas uma das misturas, a II-CIM, que utiliza os agregados ARCI.

Tabela 14 - Dosagens da segunda série de misturas utilizando MEC (kg/m³).

Mistura	CP Poz	Água _{ef}	Água _{tot}	AM	AGN	ARCO	ARCI	ARCE	SP
II-NAT	291,4	168,1	174,9	752,3	1099,0	0	0	0	2,85
II-CON	312,0	158,7	198,6	712,3	0	1016,9	0	0	3,06
II-CIM	330,3	160,3	203,4	745,4	0	0	944,3	0	3,23
II-MIX-10%CE	349,2	157,9	213,3	740,7	0	0	809,7	93,0	3,42
II-MIX-20%CE	371,7	155,1	221,1	735,0	0	0	691,9	173,1	3,64
II-MIX-30%CE	394,6	152,6	228,2	729,5	0	0	583,7	246,2	3,89

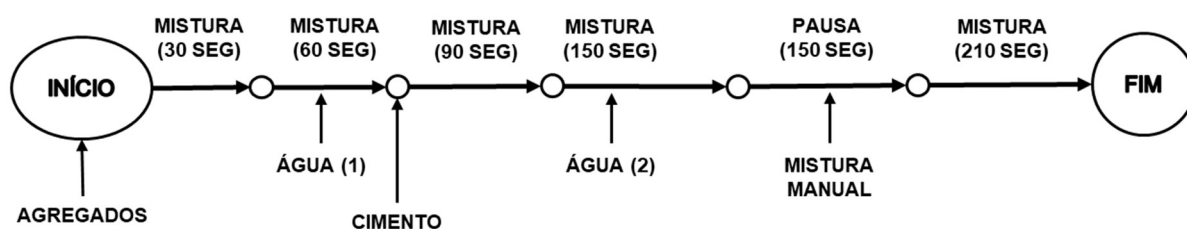
Água_{tot} = água efetiva + água de absorção dos agregados

Fonte: a autora.

3.4.3 Confeção das misturas

O método de mistura utilizado na confecção dos concretos foi uma adaptação do Método de Mistura dupla (*Double Mixing Method*) (Otsuki; Miyazato; Yodsudjai, 2003) e do Método de Mistura em Dois Estágios (*Two-Stage Mixing Method*) (Tam; Gao; Tam, 2005) e está representado na Figura 25. O tempo de mistura foi ampliado para garantir a ação do aditivo SP, sendo a mistura finalizada após 11 minutos e 30 segundos do início. Após a colocação do aditivo SP, que ocorre junto com a “água 2”, foram 8 minutos de mistura para garantir a dispersão máxima.

Figura 25 - Método de mistura.



Fonte: a autora.

Os corpos de prova de concreto foram moldados de acordo com as prescrições da NBR 5738 (ABNT, 2015), utilizando moldes metálicos com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura. O adensamento foi realizado em duas camadas, utilizando mesa vibratória. Após 24 horas da moldagem, os corpos de prova foram desmoldados e

submetidos a cura úmida submersa em solução saturada com hidróxido de cálcio até a data de ensaio.

3.4.4 Ensaios no concreto

A determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone foi realizada de acordo com a NBR 16889 (ABNT, 2020). O molde especificado pela norma foi preenchido por três camadas de concreto, sendo cada camada compactada através de 25 golpes feitos com haste padronizada.

A resistência à compressão axial dos concretos foi determinada de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018b). Os testes foram realizados aos 7 e 28 dias, utilizando quatro corpos de prova para cada idade e velocidade de carregamento de $(0,45 \pm 0,15)$ MPa/s.

O módulo de elasticidade estático foi determinado pelo método de tensão fixa, realizado de acordo com a NBR 8522 (ABNT, 2021e). Os testes foram realizados aos 28 dias, utilizando três corpos de prova.

Para a realização dos ensaios mecânicos, foi utilizada uma máquina universal de ensaios da marca EMIC, com capacidade para 2000 kN.

O ensaio de absorção (A), índice de vazios (I_v) e massa específica do concreto seco (ρ_s) foi realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005). Os testes foram realizados aos 28 dias.

3.4.5 Análise estatística dos resultados

Para verificar se os resultados obtidos nos ensaios apresentaram diferenças estatisticamente significativas, foi realizado primeiramente o teste ANOVA para a comparação das médias. Quando o teste indicou a existência de diferenças estatísticas, foi então realizado o teste de Tukey para avaliar quais das misturas apresentaram essa diferença. Ambos os testes foram realizados para um nível de significância de 95%.

3.4.6 intensidade do ligante

A Intensidade do Ligante (IL) relaciona a quantidade de ligante requerido, em kg.m^{-3} , com resistência à compressão, em MPa, dos concretos. Quanto maior o IL, maior será o teor de ligante necessário para a realização da mesma função, tendo

assim uma eco-eficiência do concreto (Damineli, 2013). O cálculo é feito através da equação:

$$IL = \frac{\text{cimento (kg/m}^3\text{)}}{\text{Resistência à compressão (MPa)}} \quad 20$$

Este parâmetro é importante em termos de sustentabilidade do concreto, considerando que a produção do cimento é um dos grandes emissores de CO₂ na atmosfera.

3.4.7 Comparação do teor de clínquer nas misturas

Pensado nas emissões de CO₂ do setor cimentício, foi realizada uma comparação entre o teor de cimento Portland nas misturas através do percentual de CP V presente nelas. O objetivo é verificar qual o potencial que o uso da adição mineral com o CP V tem para reduzir o teor de cimento (e consequentemente de clínquer) para misturas de concreto dosadas com mesma resistência e diferentes tipos de agregado reciclado.

3.5 PREVISIBILIDADE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Uma das propriedades do concreto que mais impactam no projeto de estruturas é o módulo de elasticidade. Diversas normas possuem equações para estimar o módulo a partir da resistência do concreto. A norma brasileira, NBR 6118 (ABNT, 2023) determina que o módulo de elasticidade pode ser estimado pela resistência do concreto através das seguintes equações:

$$E_{ci} = \alpha_E \cdot 5600 \sqrt{f_{ck}} \quad \text{Para concretos com } f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \quad 21$$

$$E_{ci} = 21,5 \cdot 10^3 \cdot \alpha_E \cdot \left(\frac{f_{ck}}{10} + 1,25 \right)^{1/3} \quad \text{Para concretos com } f_{ck} > 50 \text{ MPa} \quad 22$$

Sendo:

$\alpha_E = 1,2$ para basalto e diabásio

$\alpha_E = 1,0$ para granito e gnaiss

$\alpha_E = 0,9$ para calcário

$\alpha_E = 0,7$ para arenito

Onde E_{ci} e f_{ck} são dados em megapascal (MPa).

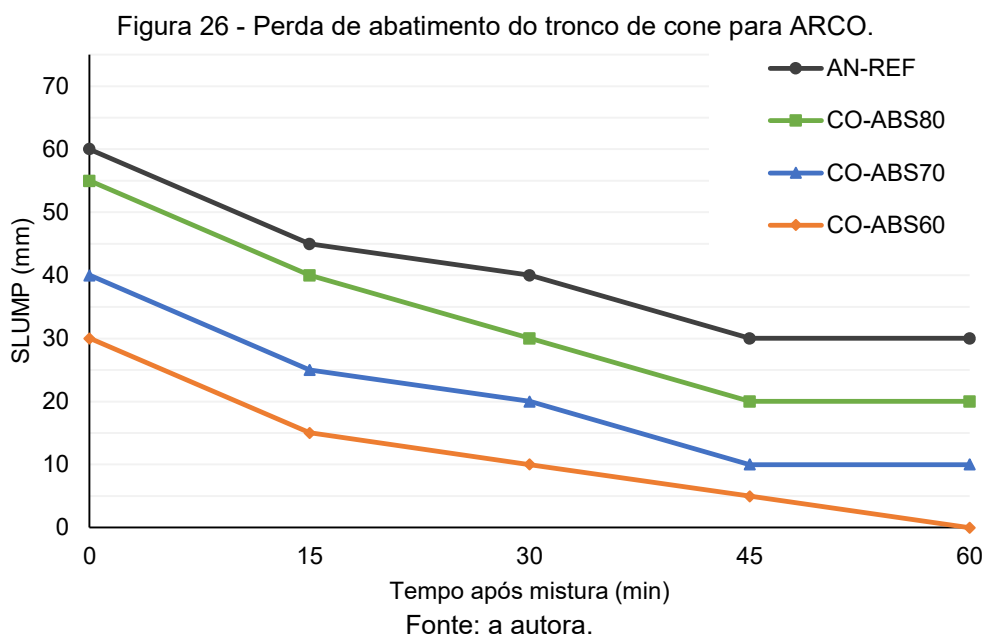
Para avaliar a influência do uso do agregado reciclado de concreto no módulo de elasticidade, foram coletados dados da literatura de concretos com resistência até 50 MPa. Os dados utilizados, juntamente com a referência em que foram obtidos estão apresentados no Anexo A.

Os dados obtidos na literatura foram utilizados como referência para avaliar o fator α_E que melhor se adequa aos concretos reciclados. Os resultados experimentais obtidos para as misturas produzidas foram então avaliados com o α_E proposto.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 ESTUDO DA COMPENSAÇÃO DE ÁGUA NO CONCRETO RECICLADO

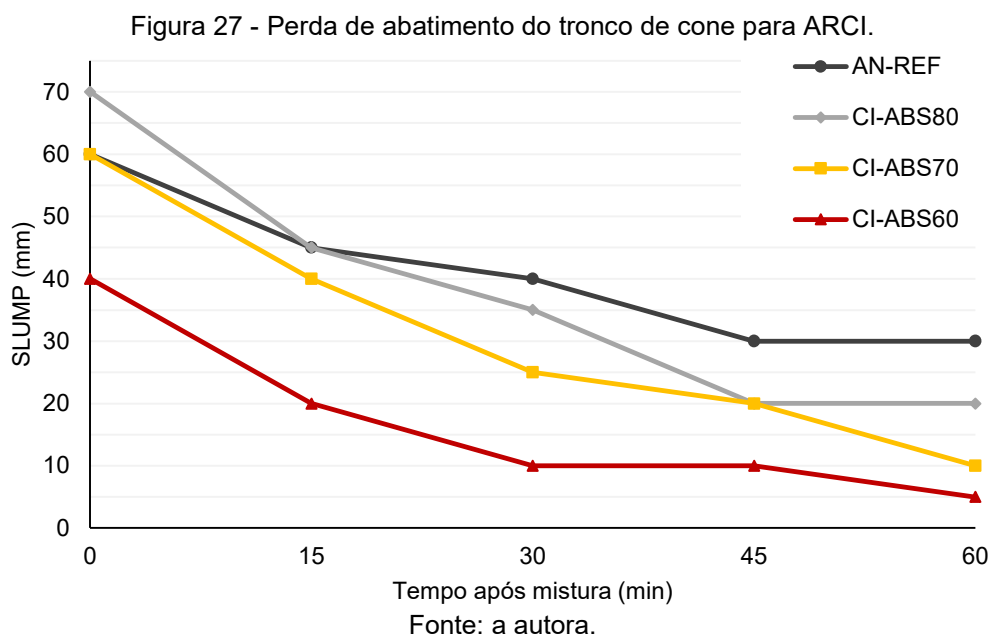
Os resultados do abatimento do tronco de cone para as misturas produzidas com ARCO estão apresentados na Figura 26. As misturas contendo este agregado apresentaram comportamento semelhante à mistura AN-REF.



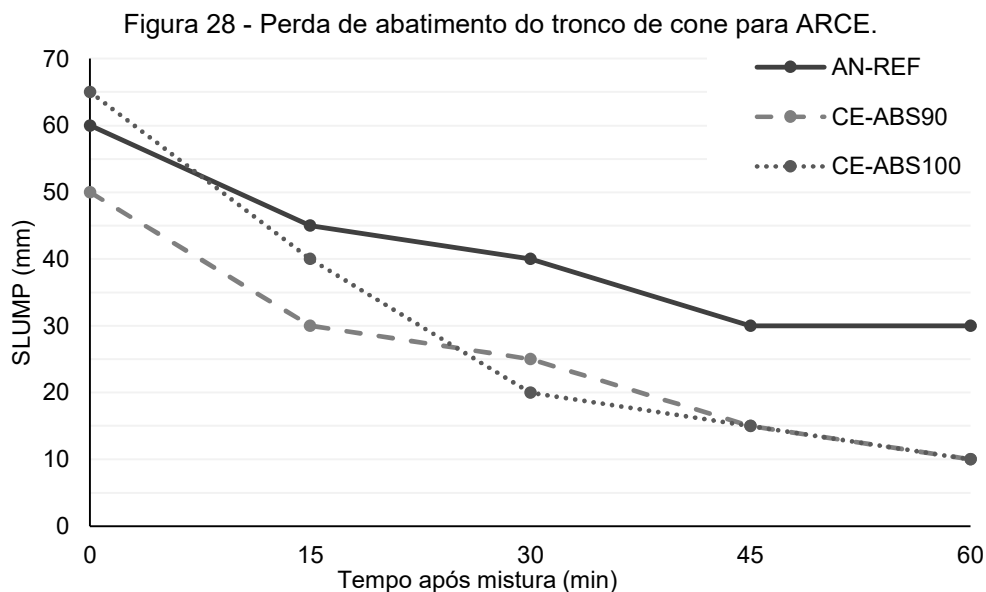
O uso de 80% da capacidade de absorção para a compensação de água, mistura CO-ABS80, se mostrou adequado, ficando próximo aos valores obtidos para a mistura AN-REF. As demais misturas apresentaram menores valores de abatimento, o que pode indicar que os agregados ainda estão absorvendo água da mistura. Apesar de ter apresentado abatimento inferior a 40 mm, estando fora dos limites recomendados para o ensaio, mistura CO-ABS60 foi acompanhada durante o período de ensaio. A partir dos resultados é possível observar que o período de 15 minutos após a mistura é quando a perda de trabalhabilidade ocorre de maneira mais acentuada. Entre 45 e 60 minutos é possível notar uma estabilização na maioria das misturas. O acompanhamento durante 1 hora mostrou que as misturas com ARCO tiveram perda considerável da trabalhabilidade. A mistura CO-ABS60 apresentou abatimento de 10mm após 30 minutos e de 0 mm em 1 hora do final da mistura.

Os resultados do abatimento para as misturas com ARCI estão apresentados na Figura 27. Nas misturas com ARCI, observa-se que as misturas CI-ABS80 e CI-ABS-70 apresentaram resultados semelhantes ao AN-REF logo após a mistura. Nas

medições seguintes, entretanto, nota-se que as duas misturas apresentam elevados valores de perda, chegando a um abatimento de apenas 10mm para a mistura CI-ABS-70. As misturas com uso do ARCI apresentaram perda de trabalhabilidade mais acentuada nos 30 primeiros minutos após a mistura. Após 30 minutos a perda de trabalhabilidade ocorre de maneira mais lenta.



Os resultados do abatimento para as misturas com ARCE estão apresentados na Figura 28. Nas misturas com ARCE, observa-se que o uso de 100% de água para a compensação proporciona abatimento superior ao AN-REF na primeira medição. Já o uso de 90% de água apresentou resultado inferior. Ao longo do tempo, as duas misturas com agregados cerâmicos apresentaram perda de abatimento acentuada, apresentando resultados inferiores ao AN-REF. Após uma hora, observa-se que as misturas com ARCE apresentaram trabalhabilidade reduzida, medindo apenas 10mm.

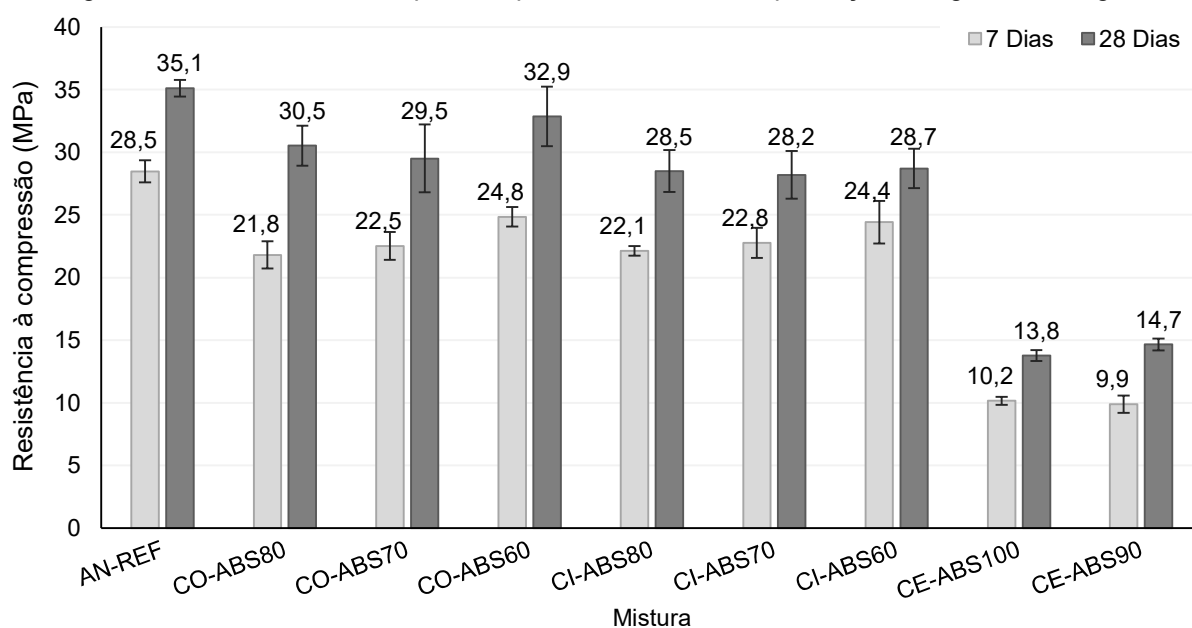


Fonte: a autora.

O teor de compensação de água de 80% da capacidade de absorção do agregado reciclado em 24h, indicado pela NBR 15116 (NBR 15116. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios ABNT, 2021), se mostrou próximo aos valores obtidos para a mistura produzida com AN, tanto para o ARCO quanto para o ARCI. Para as misturas com o ARCE, o teor de compensação indicado pela norma se mostrou insuficiente, devendo ser realizado em teores superiores aos 80%.

Os resultados de resistência à compressão estão apresentados na Figura 29.

Figura 29 - Resistência à compressão para o estudo de compensação de água na dosagem.



Fonte: a autora.

A partir dos resultados de 7 dias é possível observar que o ARCO e ARCI apresentaram resultados semelhantes para um mesmo teor de acréscimo de água. Como o cimento utilizado é de alta resistência inicial, aos 7 dias as misturas sem ARCE já apresentam mais de 20 MPa de resistência. As misturas com 60% de acréscimo apresentaram os maiores valores de resistência entre as misturas com AR, ficando próximas de 25 MPa. Com o menor acréscimo de água, a absorção dos agregados pode ter ocasionado a redução do fator a/c dessas misturas, fazendo com que a resistência fosse maior em relação às misturas com maior teor de água, e consequentemente, maior fator a/c.

Aos 28 dias, as misturas com ARCI e ARCO apresentaram resultados entre 80,3 e 93,6% do valor obtido para a mistura AN-REF. Entre as misturas com ARCO, a CO-ABS60 apresentou o melhor resultado, porém esta melhoria em relação às misturas CO-ABS80 e CO-ABS70 se deu devido à redução do fator a/c. As misturas CO-ABS80 e CO-ABS70, que apresentaram trabalhabilidade mais próxima à AN-REF, apresentaram reduções de 13 e 15,9% na resistência à compressão, respectivamente, em comparação à AN-REF.

As misturas com ARCI obtiveram resultados próximos aos 28 dias. As três misturas apresentaram reduções entre 18,2 e 19,7 % em relação à mistura AN-REF. Em comparação ao ARCO, as misturas com ARCI apresentaram reduções entre 4,4 e 12,6 %. O melhor desempenho do ARCO em comparação ao ARCI pode ser explicado pelas melhores propriedades mecânicas do agregado, como a resistência à abrasão, em que o ARCO apresentou perda cerca de 55% menor que o ARCI.

A perda de trabalhabilidade das misturas CO-ABS60 e CI-ABS60, mostra que elas não seriam viáveis para o uso em obras, onde requer maior período de tempo para que o concreto seja adensado nas formas, diferente do que ocorre no ambiente de laboratório. As misturas com 70 e 80% de compensação de água obtiveram trabalhabilidade mais próxima à mistura AN-REF e a resistência à compressão entre os dois teores de acréscimo de água foi equiparável.

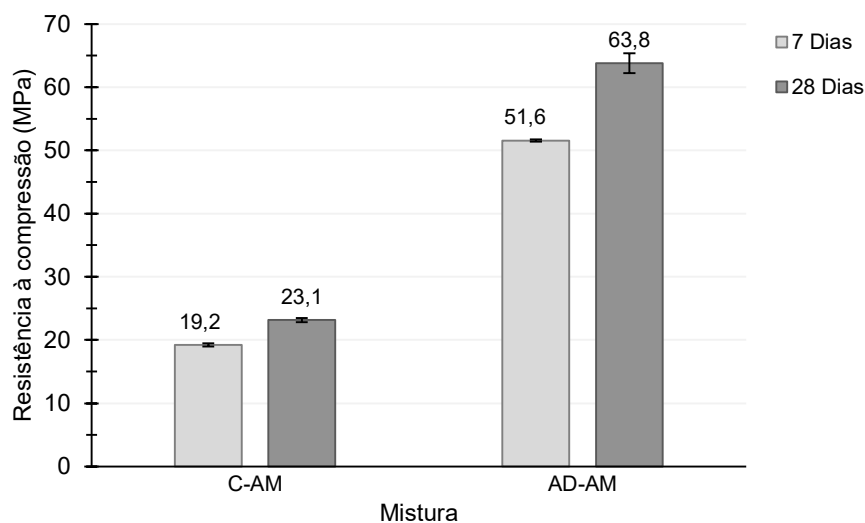
As misturas com ARCE apresentaram redução de cerca de 60% da resistência em relação ao AN-REF. A mistura com 90% de compensação de água apresentou resultado superior ao uso de 100% de água. Os resultados mostram que este agregado não pode ser utilizado como único agregado graúdo no concreto. O objetivo desta etapa do estudo, entretanto, foi avaliar a compensação de água mais adequada

para o agregado em questão afim de melhorar os parâmetros de mistura quando eles forem utilizados em combinação com outros agregados, e não sozinhos.

4.2 DETERMINAÇÃO DOS PARÂMETROS “p” E “q”

Os resultados de resistência à compressão das misturas de argamassa estão apresentados na Figura 30. Enquanto a mistura convencional obteve resistência de 23,1 MPa aos 28 dias, a mistura de alto desempenho apresentou 63,8 MPa.

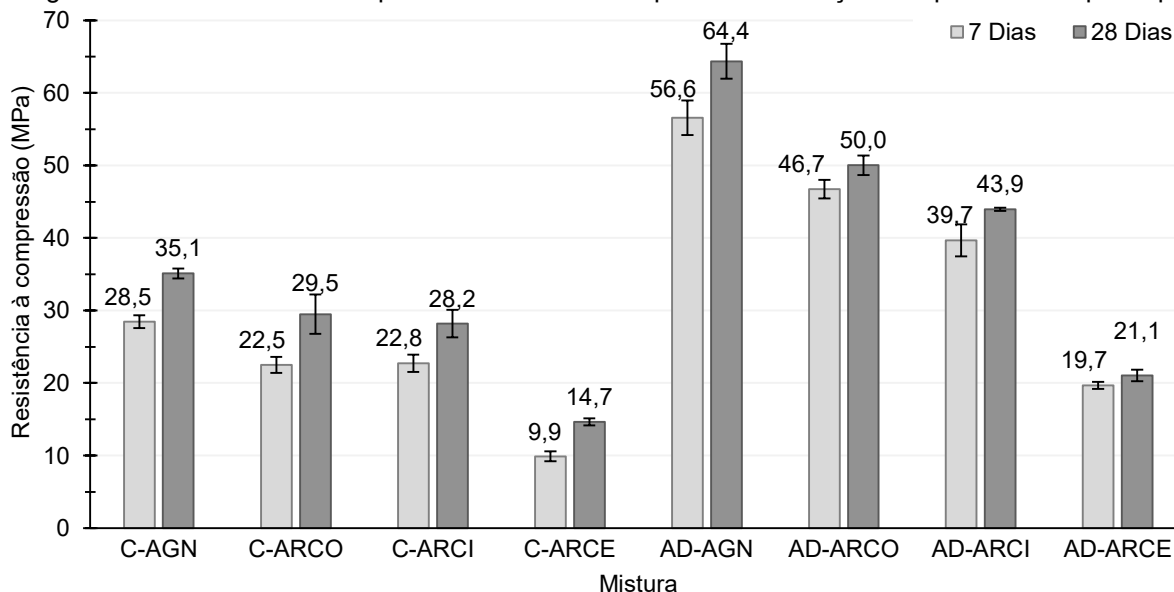
Figura 30 - Resistência à compressão das argamassas para determinação dos parâmetros “p” e “q”.



Fonte: a autora.

Os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias para os concretos com diferentes agregados graúdos estão apresentados na Figura 31.

Figura 31 - Resistência à compressão dos concretos para determinação dos parâmetros “p” e “q”.

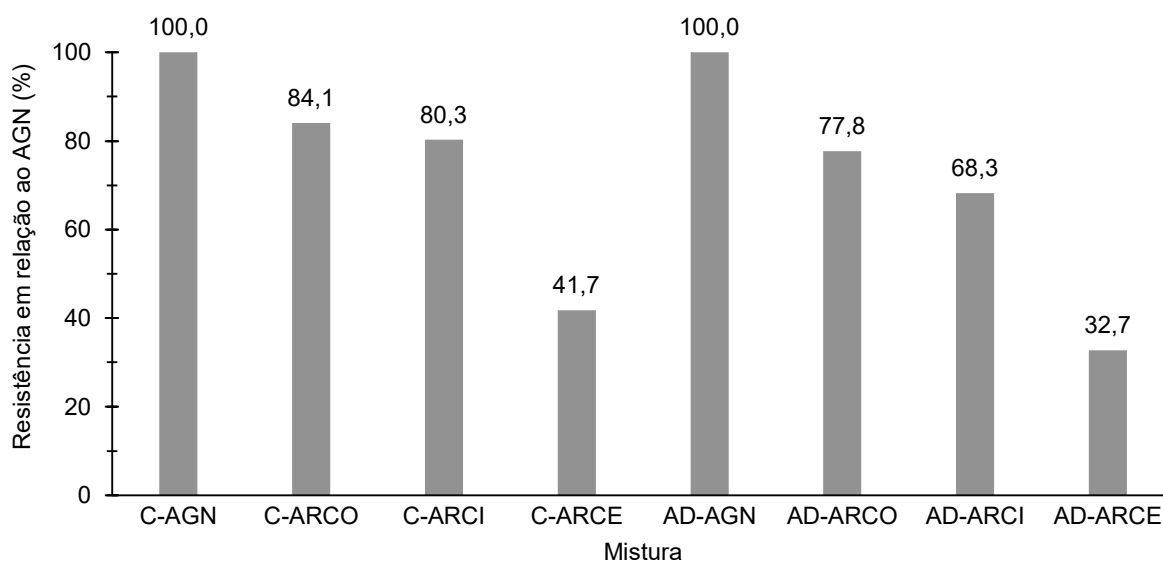


Fonte: a autora.

Os resultados de resistência à compressão (Figura 31) evidenciam a maior influência dos agregados graúdos na resistência à compressão dos concretos de classes mais elevadas. Concretos de classes de resistência mais baixas tendem a romper na Zona de transição interfacial, enquanto os concretos de resistência mais elevados apresentam rompimento dos agregados, uma vez que a pasta presente nesses concretos é mais resistente e adere melhor ao agregado.

A Figura 32 apresenta os resultados de resistência à compressão aos 28 dias das misturas com relação à respectiva mistura com AGN. Enquanto os concretos de resistência mais baixa apresentaram redução de 16 e 20% em relação ao natural, para o ARCO e ARCI, respectivamente, as reduções para a classe mais elevada foram de 22 e 31%. A diferença entre os dois tipos de AR também ficou mais pronunciada para o concreto de resistência mais alta.

Figura 32 - Resistência à compressão aos 28 dias em relação ao AGN.



Fonte: a autora.

Como esperado, as misturas produzidas com o ARCE apresentaram resultados consideravelmente inferiores às demais. As reduções em relação ao natural foram de 58 e 67% para as classes de menor e maior resistência, respectivamente.

A ineficiência dos métodos tradicionais de mistura também fica evidenciada nos resultados apresentados. Apesar de serem dosados para uma mesma resistência, nem os concretos convencionais nem o de alta resistência produzidos com agregados reciclados obtiveram resistência equivalente ao natural. As diferenças entre o desempenho experimental e o previsto pelo método ocorrem devido ao método não

considerar as particularidades dos AR. As maiores reduções obtidas para a classe C60 mostram que o agregado gráudo e interface exercem maior influência nos concretos de resistência mais elevada. Em concretos de resistência mais baixa, a ruptura tende a ocorrer na zona de transição interfacial. Nas misturas de classes mais altas, a matriz é mais resistente e proporciona uma melhor aderência ao agregado, resultando na maior demanda do agregado gráudo.

Com os resultados de resistência à compressão das misturas de argamassa e concreto, foi realizada a calibração dos parâmetros “p” e “q” dos agregados. A Figura 33 apresenta a calibração dos parâmetros da areia, enquanto os demais agregados são apresentados no Apêndice B.

Figura 33 - Calibração dos parâmetros "p" e "q" do agregado miúdo.

The screenshot shows the 'Calibration' window of a software application. It is divided into several sections:

- Constituents:** A list of materials with their paths:
 - S1: materiais camila.cst\AREIA
 - C1: materiais camila.cst\CPV-ARI PLUS
 - SP1: materiais camila.cst\Master Glenium 51
- Composition:** Input fields for the mass of each constituent:
 - S1 (kg): 1551
 - C1 (kg): 600
 - SP1 (kg): 6
 - W (kg): 240
- Air entraining agent?:** Radio buttons for 'No' (selected) and 'Yes'.
- Strength:** Input fields for compressive strength:
 - fc7 (MPa): 51,56
 - fc28 (MPa): 63,81
 - fc90 (MPa): (empty)
- Buttons:** 'Enter', 'Modify n°', 'Remove', 'Export', 'Calibrate', and 'Cancel'.
- Table:** A table with columns for 'Concrete n°' and two columns for test results (1 and 2). The rows include:

Concrete n°	1	2				
S1 (kg)	1783	1551				
C1 (kg)	320	600				
SP1 (kg)	3,2	6				
W (kg)	240	240				
Total air (%)						
AEA	No	No				
fc1 (MPa)						
fc2 (MPa)						
fc3 (MPa)						
fc7 (MPa)	19,21	51,56				
fc28 (MPa)	23,14	63,81				
fc90 (MPa)						
fc360 (MPa)						

A dialog box is open in the foreground, displaying the following text:

The calibration leads to the following values:
 p=1,7182
 q=0,01199
 Do you accept these values?

Buttons 'Sim' and 'Não' are at the bottom of the dialog box.

Fonte: a autora.

Os resultados dos parâmetros obtidos para os todos os agregados estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros "p" e "q".

Agregado	p (admens.)	q (MPa⁻¹)
Areia	1,7182	0,01199
AGN	1,5074	0,00663
ARCO	1,1891	0,01155
ARCI	1,4836	0,02692
ARCE	0,0426	0,02548

Fonte: a autora.

O resultado do parâmetro "p" indicou que o ARCI possui melhor aderência com a pasta que o ARCO, uma vez que o parâmetro é maior para o ARCI. Enquanto isso, o resultado do parâmetro "q" indicou que o ARCO proporciona menor redução na resistência final do concreto devido ao agregado que o ARCI, uma vez que o parâmetro é menor para o ARCO. Valores maiores do parâmetro "p" significam maior resistência, enquanto menores valores para o parâmetro "q" significam maior resistência. Assim, apesar do ARCI apresentar maior valor de "p", ele também apresenta maior "q" que o ARCO, o que faz com que a resistência final do concreto com ARCO não seja inferior à resistência do concreto com ARCI quando a quantidade de cimento utilizada nas misturas é mesma.

Os resultados dos parâmetros "p" e "q" refletem que o AN possui propriedades mais favoráveis à resistência do concreto, tendo este agregado obtido maior valor de "p", indicando melhor aderência entre matriz e agregado, e menor valor "q", indicando maior resistência intrínseca do agregado. Entre os agregados reciclados, o ARCI apresentou melhores resultados de aderência que o ARCO, porém sua resistência intrínseca foi menor.

Como esperado, o ARCE foi o agregado que apresentou as propriedades menos favoráveis à produção de concretos. O ARCE apresentou "p" consideravelmente menor que os demais agregados, evidenciando sua maior fragilidade e, conseqüentemente, menor resistência dos concretos produzidos com seu uso. Como este agregado apresenta baixa resistência e as duas misturas apresentaram resultado de compressão baixo e relativamente próximos, presume-se que a determinação dos parâmetros "p" e "q" não seja tão eficiente quanto aos demais uma vez que o modelo necessita de duas dosagens com resistências distantes.

O parâmetro "q" também fornece uma indicação da dureza dos agregados, sendo que quanto menor seu valor, maior a dureza. Relacionando os resultados desse parâmetro com a perda por abrasão dos agregados, apresentados na Tabela 7, tem-

se que os agregados com menores perdas, ou seja, mais resistentes, apresentaram menores valores de “q”.

Valores dos parâmetros para o agregado miúdo encontrados na literatura estão entre 1,1573 e 0,8092 para o parâmetro “p” e entre 0 e 0,00665 para “q” (Amario, 2019; Amario *et al.*, 2017; Cordeiro, 2006; Puente de Andrade *et al.*, 2020).

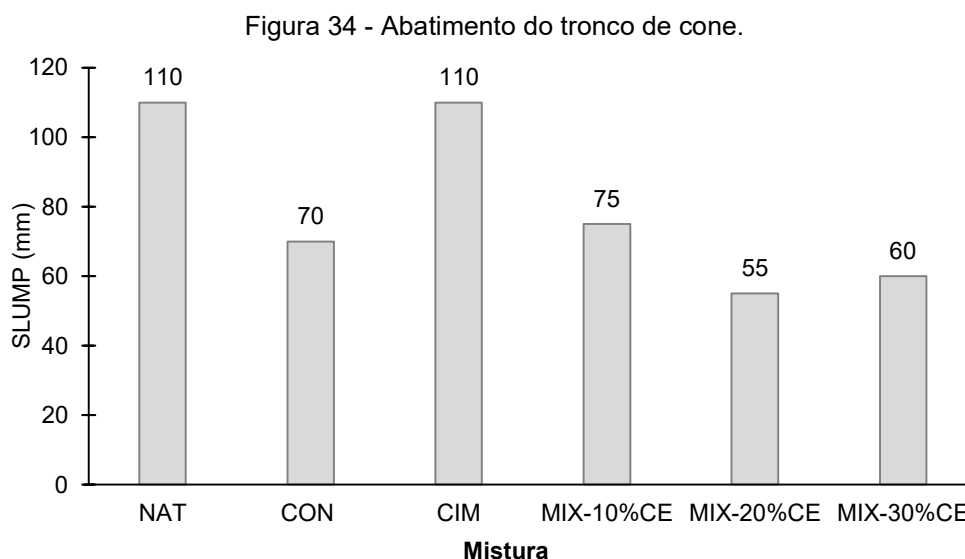
Para o agregado graúdo natural, não foi encontrado valor para os parâmetros “p” e “q” para agregado de gnaiss. Os estudos obtidos utilizaram agregados graúdos de granito, sienito e calcário. Para estes agregados, foram obtidos parâmetro “p” entre 0,9885 e 1,9867 e “q” entre 0 e 0,00884 (Amario, 2019; Amario *et al.*, 2017; Cordeiro, 2006; Puente de Andrade *et al.*, 2020). Em relação aos agregados reciclados, foram encontrados valores para o ARCO, tendo “p” variado entre 0,9435 e 1,3837, e o “q” entre 0 e 0,00666 (Amario, 2019; Amario *et al.*, 2017).

4.3 DOSAGENS COM O MEC

4.3.1 Primeira série de dosagens

Trabalhabilidade

Os resultados do abatimento do tronco de cone das misturas estão apresentados na Figura 34.



Fonte: a autora.

As misturas NAT e CIM foram as que mais se aproximaram do abatimento estabelecido e as demais misturas apresentaram valores abaixo dos 100 mm. Esse comportamento foi semelhante ao observado no estudo de compensação (item 3.2),

onde as misturas com ARCO e ARCE apresentaram resultados de abatimento inferiores ao natural e ao ARCI. Apesar do menor abatimento, todas as misturas apresentaram um bom aspecto visual e puderam ser moldadas sem intercorrências. Como o teor de SP está abaixo do limite que pode ser utilizado, existe margem que sejam feitas alterações para ajuste da trabalhabilidade.

Assim como observado nesta pesquisa, outros autores (Amario, 2015; Rangel, 2015) também relataram divergências entre os valores de abatimento simulado e o obtido experimentalmente. De acordo com manual do BétonlabPro3®, uma diferença de 4 a 5 cm pode ser verificada entre o valor simulado e experimental para misturas sem aditivos ou com superplastificantes de primeira geração. Entretanto, nada é relato para os outros tipos de aditivos, como o utilizado nesta pesquisa. (Amario *et al.*, 2017) sugerem que outros parâmetros de entrada devem ser considerados no modelo para que a trabalhabilidade esperada seja atingida.

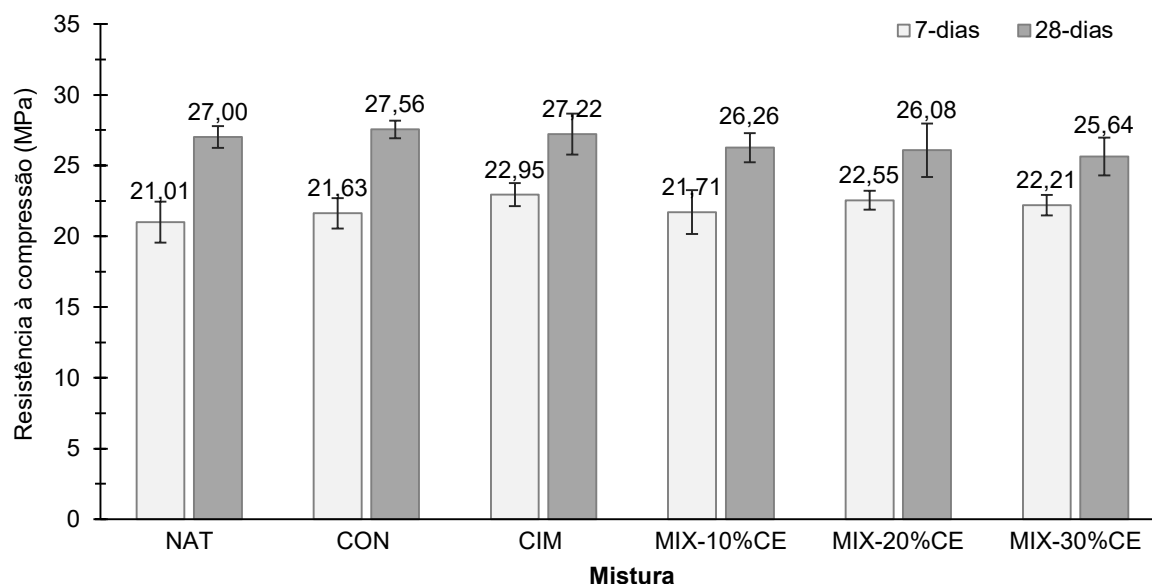
Para desenvolvimento e calibração do MEC, foram utilizados concretos com slump igual ou superior à 100 mm. O fato do valor utilizado nessa pesquisa se encontrar no limite pode ter influenciado para que o cálculo do slump não fosse assertivo nas misturas aqui propostas.

Para avaliar as misturas em seu estado fresco também podem ser utilizados a viscosidade plástica e a resistência ao cisalhamento, parâmetros estes que são calculados pelo software e poderiam servir para verificar a compatibilidade do método ao resultado experimental. O cálculo para estimar o slump realizado pelo MEC utiliza estes parâmetros, assim essa avaliação poderia indicar se a equação para estimar o slump não está adequada para os misturas com trabalhabilidade inferiores a 100 mm ou se os demais parâmetros também não estão sendo previstos de maneira adequada para as misturas com agregados reciclados propostas neste trabalho.

Resistência à compressão

Os resultados de resistência à compressão das misturas estão apresentados na Figura 35. Aos 7 dias, todas as misturas apresentaram valores similares. Aos 28 dias, as misturas NAT, CON e CIM apresentaram valores dentro do limite de erro indicado entre valor simulado e experimental, que é 2-3 MPa. Já as misturas MIX-10%CE, MIX-20%CE e MIX-30%CE, apresentaram resultados fora do limite, porém próximos às demais.

Figura 35 - Resistência à compressão axial da 1ª etapa.



Fonte: a autora.

Como o p-valor obtido no teste estatístico ANOVA, apresentado na Tabela 16, foi maior que 0,05, não existe diferença estatisticamente significativa na resistência à compressão das misturas para uma mesma idade avaliada.

Tabela 16 - ANOVA para resistência à compressão.

Idade avaliada	Fonte	SQ	gl	MQ	F	P-valor
7 dias	Agregado	9,798	5	1,960	1,62	0,26
	Erro	21,817	18	1,212		
	Total	31,615	23			
28 dias	Agregado	11,10	5	2,221	1,39	0,274
	Erro	28,71	18	1,595		
	Total	39,81	23			

Obs.: SQ - soma dos quadrados; gl - graus de liberdade; MQ – média dos quadrados.

Fonte: a autora.

A partir dos resultados apresentados para resistência à compressão, observa-se que o MEC foi satisfatório para a dosagem de concretos com os diferentes tipos de agregados utilizados. As misturas com os agregados reciclados avaliados apresentaram valores semelhantes à mistura com agregado natural e dentro dos limites de resistência estabelecidos na dosagem.

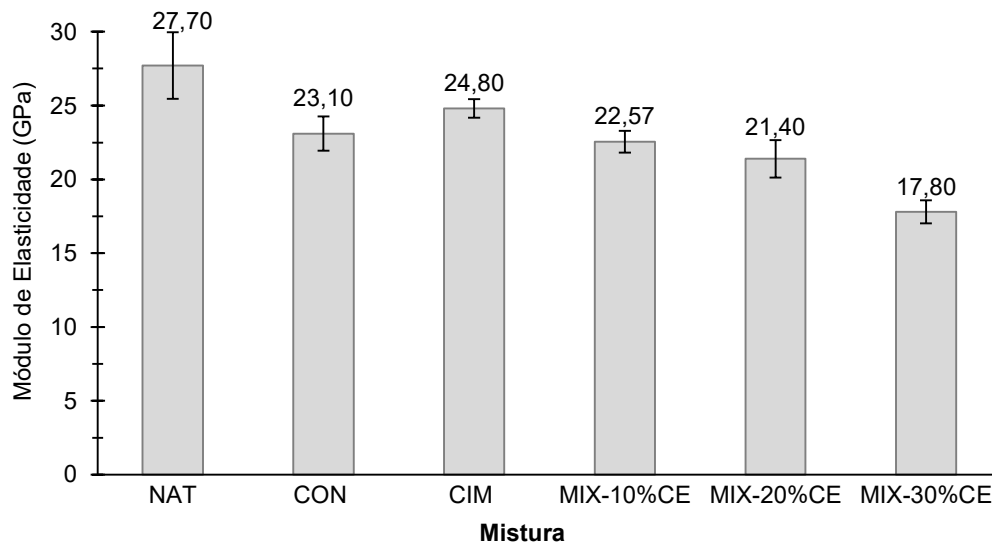
Silva; Pepe; Toledo Filho (2020) produziram misturas com 50% e 100% de ARCO como agregado graúdo em concretos de duas classes de resistência diferentes e obtiveram resistência dentro do limite de variação indicado pelo MEC. Amario *et al.*

(2017) também obtiveram resultados de resistência à compressão para concreto reciclado dentro do limite de variação do método. A pesquisa utilizou agregados de ARCO e teores de substituição de até 60% do agregado graúdo natural em concretos com diferentes classes de resistência.

Módulo de elasticidade

Os resultados do módulo de elasticidade estático das misturas estão apresentados na Figura 36. Mesmo estando na mesma faixa de resistência, as misturas com AR apresentaram menor módulo de elasticidade que a mistura com AN. O módulo reduziu conforme o teor de ARCE aumentou na mistura. Este comportamento está dentro do esperado, uma vez que o módulo de elasticidade do concreto é influenciado pelo módulo do agregado graúdo, mesmo quando o concreto apresenta mesma resistência à compressão.

Figura 36 - Módulo de elasticidade.



Fonte: a autora.

Como o p-valor obtido no teste estatístico ANOVA, apresentado na Tabela 17, foi menor que 0,05, existe diferença estatisticamente significativa no módulo de elasticidade das misturas.

Tabela 17 - ANOVA para módulo de elasticidade.

Fonte	SQ	gl	MQ	F	P-valor
Agregado	162,82	5	32,564	20,37	0,000
Erro	17,59	11	1,599		
Total	180,40	16			

Obs.: SQ - soma dos quadrados; gl - graus de liberdade; MQ - média dos quadrados.

Fonte: a autora.

Como o teste de variância ANOVA indicou que existe diferença, foi realizado o teste de Tukey para avaliar se existem misturas que o módulo pode ser considerado igual ou se todos são diferentes. A Tabela 18 apresenta os resultados deste teste, onde os grupos de mesma letra indicam que as misturas possuem módulo estatisticamente iguais. Uma mesma mistura pode estar em mais de um grupo, como acontece para as misturas CIM e MIX-20%CE. Através deste resultado, observa-se que a mistura CIM foi a única que apresentou módulo equivalente à mistura com agregados naturais.

Tabela 18 - Teste de Tukey para módulo de elasticidade.

Mistura	Grupo	
NAT	A	
CON	B	
CIM	A	B
MIX-10%CE	B	
MIX-20%CE	B	C
MIX-30%CE	C	

Fonte: a autora.

Ao comparar concretos com agregado ARCO proveniente de vigas estruturais, (Amario *et al.*, 2017) obtiveram valores similares para o módulo de elasticidade de misturas com teores entre 20% e 60% de agregado graúdo reciclado, considerando a mesma classe de resistência. (Silva; Pepe; Toledo Filho, 2020) produziram concretos com o mesmo ARCO e também obtiveram valores semelhantes para as misturas com 50% e 100% de substituição do AN.

Outras pesquisas indicam a diminuição do módulo de elasticidade quando os agregados naturais são substituídos, seja por ARCO ou outros tipos de AR (Chakradhara Rao; Bhattacharyya; Barai, 2011; ETXEBERRIA *et al.*, 2007; Gomes *et al.*, 2023; Kou; Poon, 2015; Salles *et al.*, 2021; Thomas; Thaickavil; Wilson, 2018).

Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Os resultados de absorção, índice de vazios e massa específica das misturas estão apresentados na Tabela 19. A capacidade de absorção de água e índice de vazios das misturas aumentaram à medida que a massa específica do concreto reduziu. O aumento do teor de ARCE fez o índice de vazios aumentar e, consequentemente, o concreto absorver mais água.

Tabela 19 - Absorção, índice de vazios e massa específica.

Mistura	A (%)	I_v (%)	ρ_s (g/cm³)
NAT	6,75	15,15	2,24
CON	7,85	16,72	2,13
CIM	7,93	16,81	2,12
MIX-10%CE	8,81	18,34	2,08
MIX-20%CE	10,16	20,70	2,04
MIX-30%CE	10,43	21,17	2,03

Fonte: a autora.

Como o p-valor obtido no teste estatístico ANOVA, apresentado na Tabela 20, foi menor que 0,05, para todas as propriedades, existe diferença estatisticamente significativa para a absorção, índice de vazios, e massa específica das misturas.

Tabela 20 - ANOVA para absorção e massa específica.

Propriedade	Fonte	SQ	gl	MQ	F	P-valor
Absorção	Agregado	20,5295	5	4,10591	72,92	0,000
	Erro	0,3378	6	0,05631		
	Total	20,8674	11			
Índice de vazios	Agregado	57,057	5	11,4115	66,70	0,000
	Erro	1,027	6	0,1711		
	Total	58,084	11			
Massa específica	Agregado	0,062125	5	0,012425	79,54	0,000
	Erro	0,000937	6	0,000156		
	Total	0,063063	11			

Obs.: SQ - soma dos quadrados; gl - graus de liberdade; MQ - média dos quadrados.

Fonte: a autora.

Como o teste de variância ANOVA indicou que existe diferença para essas propriedades, foi realizado o teste de Tukey para avaliar se existem misturas que alguma pode ser considerada igual ou se todas são diferentes. A Tabela 21 apresenta os resultados deste teste, onde os grupos de mesma letra indicam que as misturas

possuem propriedades estatisticamente iguais. Para as três propriedades avaliadas, nenhuma mistura apresentou resultado equivalente à mistura NAT.

Tabela 21 - Teste de Tukey para absorção, índice de vazios e massa específica.

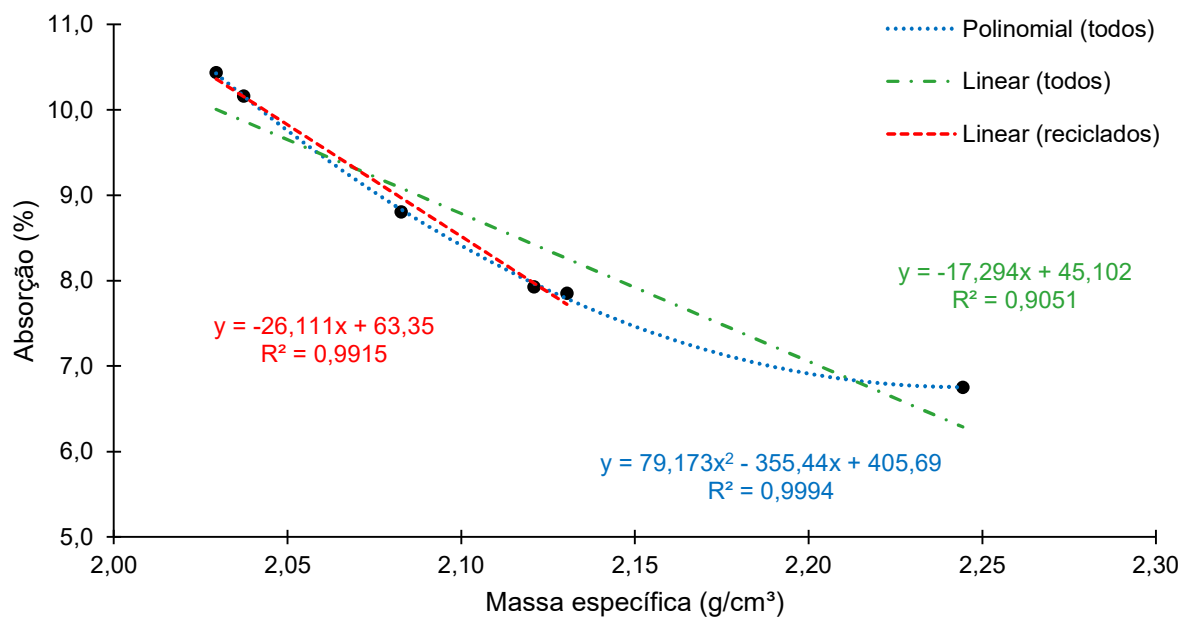
Mistura	Grupo					
	Absorção		Índice vazios		Massa específica	
NAT	A		A		A	
CON	B		B		B	
CIM	B	C	B		B	
MIX-10%CE	C		B		B	C
MIX-20%CE	D		C		C	D
MIX-30%CE	D		C		D	

Fonte: a autora.

Os resultados do teste de Tukey ressaltam a influência da ARCE nas propriedades de absorção, índice de vazios e massa específica. Quando este agregado é utilizado em teor de 10%, as propriedades são equivalentes à mistura CIM, já com os teores de 20% e 30%, as propriedades das misturas se distanciam de maneira mais evidente, ficando em outros grupos de igualdade (C e/ou D).

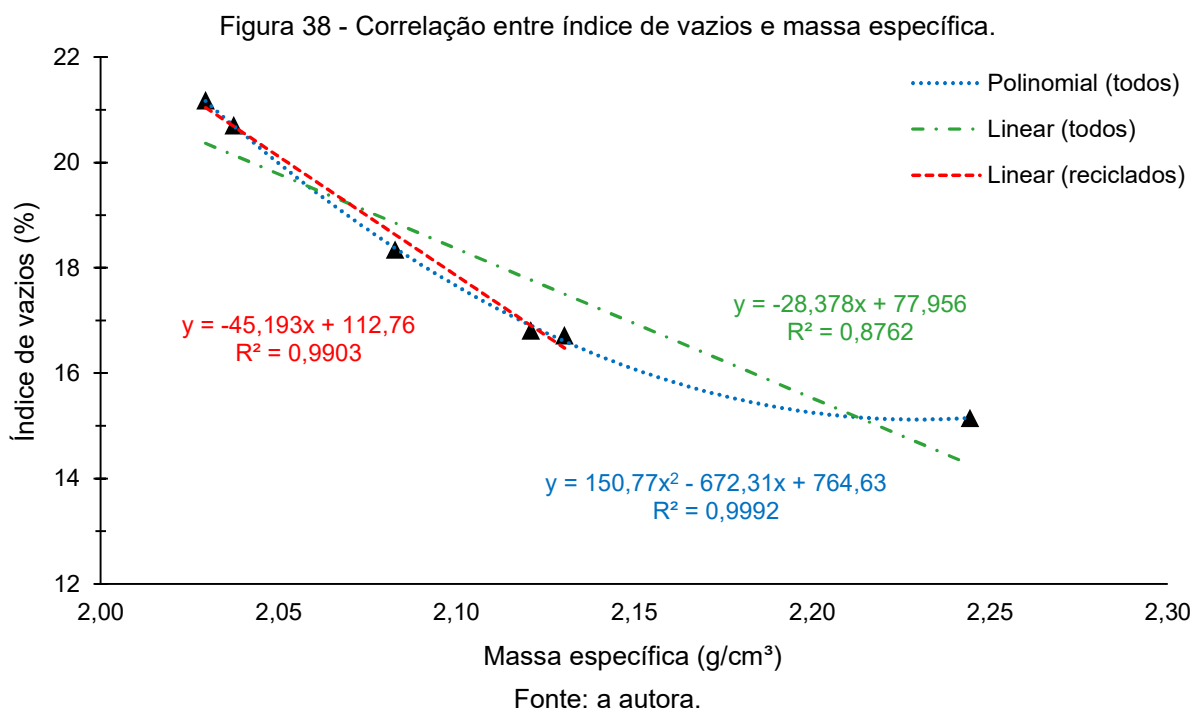
Foi realizada uma análise para avaliar a correlação entre as propriedades de absorção e massa específica. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 37. Ao considerar todas as misturas, a melhor regressão obtida foi a polinomial (linha azul), com valor de $R^2=0,9994$, que indica uma boa aproximação. A regressão linear considerando todas as misturas não se mostrou tão adequada quanto a polinomial, obtendo $R^2=0,9051$ (linha verde). Ao considerar apenas as misturas com agregados reciclados, a regressão linear já se mostrou mais adequada, obtendo R^2 de 0,9915 (linha vermelha).

Figura 37 - Correlação entre absorção e massa específica.



Fonte: a autora.

Também foi avaliada a correlação entre o índice de vazios e a massa específica. Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 38, onde observa-se tendência semelhante à correlação entre absorção e massa específica. Ao considerar todas as misturas, a melhor regressão obtida foi a polinomial (linha azul), com valor de $R^2=0,9992$, que indica uma boa aproximação. A regressão linear considerando todas as misturas não se mostrou tão adequada quanto a polinomial, obtendo $R^2=0,8762$ (linha verde). Ao considerar apenas as misturas com agregados reciclados, a regressão linear já se mostrou mais adequada, obtendo R^2 de 0,9903 (linha vermelha).



A mesma tendência de aumento da absorção de água e diminuição da massa específica com a utilização de agregados reciclados é observada em outros estudos (Ferreira; De Brito; Barra, 2011; Gomes *et al.*, 2023; Salles *et al.*, 2021).

Análise visual das amostras

A Figura 39 apresenta um corte transversal das amostras de concreto produzidas. Os agregados se mostram bem distribuídos na seção, onde também é possível observar a presença de alguns poros de visíveis. Na amostra da mistura “CON”, produzida com ARCO, percebe-se que a presença de partículas do agregado semelhante à pasta é reduzida, sendo predominante a presença das partículas naturais. Nas amostras contendo ARCI, a identificação dos agregados requer maior atenção pois fração considerável das partículas do agregado se assemelham à nova pasta.

A Figura 40 e Figura 41 apresentam uma vista longitudinal das amostras de concreto após o rompimento do corpo de prova por compressão diametral. Os agregados se mostram bem distribuídos na seção. Nas figuras também é possível observar que a ruptura na zona de transição interfacial ocorre predominantemente para as partículas de agregados naturais. No caso das partículas de agregados cimentícios ou cerâmicos, o mais observado foi a ruptura dos agregados, evidenciando a maior resistência das partículas de agregados naturais.

Figura 39 - Corte transversal das amostras.

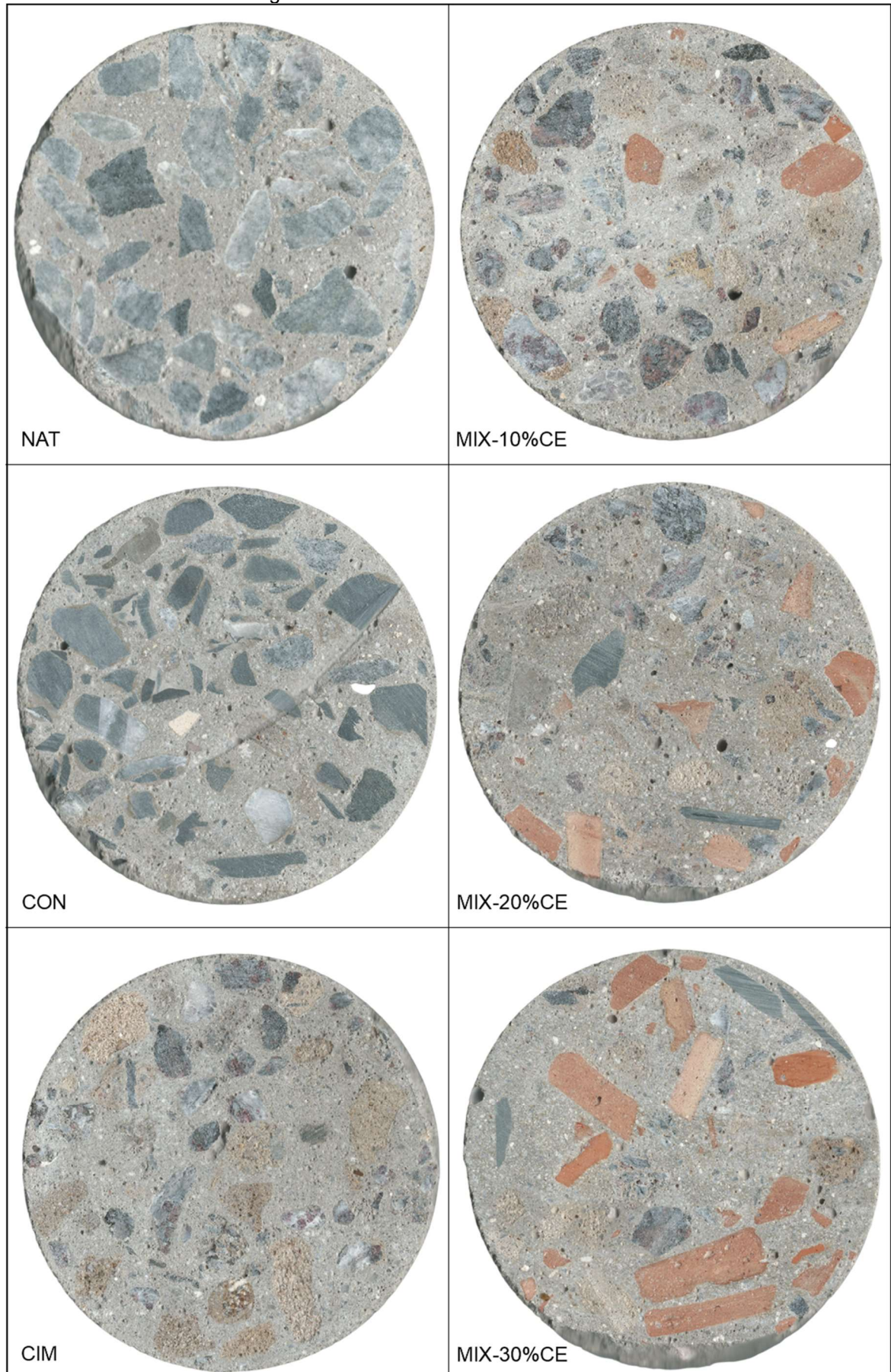


Figura 40 - Vista longitudinal das amostras NAT, CON e CIM.



Fonte: a autora.

Figura 41 - Vista longitudinal das amostras MIX-10%CE, MIX-20%CE e MIX-30%CE.



Fonte: a autora.

Intensidade do ligante

O índice de intensidade do ligante para as misturas produzidas foi calculado e está apresentado na Tabela 22.

Tabela 22 - Intensidade do ligante.

Mistura	IL (kg/MPa)	Varição em relação ao NAT (%)
NAT	9,85	-
CON	10,33	+4,85
CIM	11,12	+12,84
MIX-10%CE	12,17	+23,49
MIX-20%CE	13,00	+31,98
MIX-30%CE	14,01	+42,20

Fonte: a autora.

Pela tabela anterior, observasse uma variação muito pequena entre as misturas NAT e CON. Considerando o ganho ambiental de se substituir totalmente os agregados graúdos naturais por reciclados, o aumento de cimento necessário para se manter a resistência não foi tão significativo com o ARCO. As demais misturas apresentaram aumento de IL superior a 10%, sendo necessário que uma análise mais detalhada seja feita para avaliar a sustentabilidade final das misturas.

Uma alternativa para tornar as misturas com AR mais sustentável seria utilizar cimentos compostos, que possuem menor teor de clínquer e de emissão de CO₂ associada à sua produção. Para avaliar essa questão, foi realizada a segunda etapa de dosagens utilizando um cimento pozolânico, que é apresentada no próximo item.

4.3.2 Segunda série de dosagens

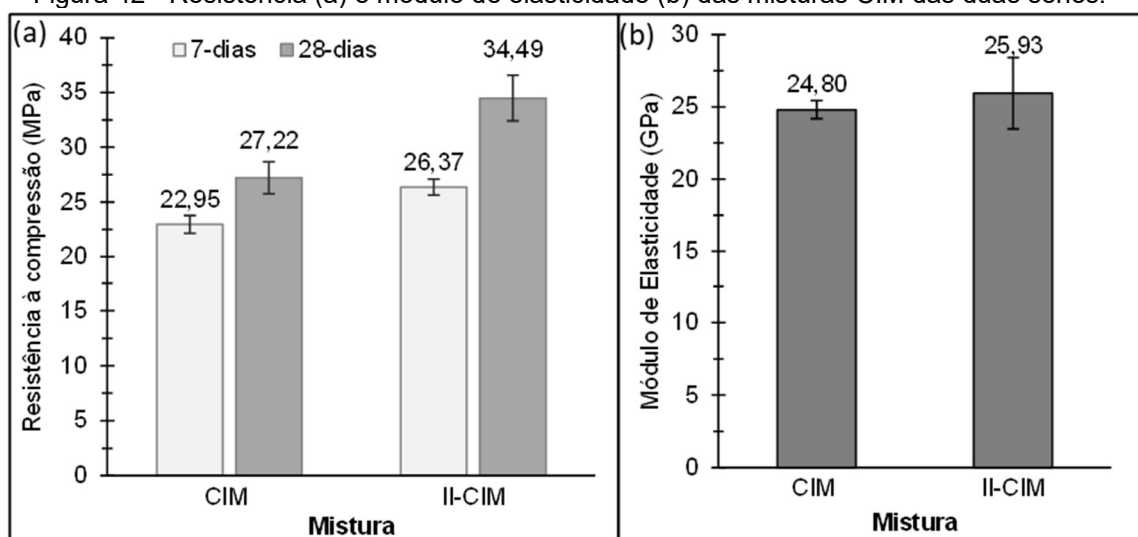
A mistura II-CIM apresentou abatimento de 30 mm. Apesar do abatimento menor que as misturas realizadas anteriormente, a mistura apresentou bom adensamento nos moldes. Como a trabalhabilidade não pode ser fixada pelo método, as misturas não possuíam um valor de referência que pudesse aproximar os resultados experimentais, gerando assim a falta de previsibilidade dessa propriedade.

Os resultados de resistência à compressão aos 7 e 28 dias da mistura estão apresentados na Figura 42. O resultado experimental aos 28 dias (34,49 MPa) foi superior ao calculado (30 MPa) e pode ser devido aos desvios inerentes ao método, conforme exposto anteriormente. Também é possível que se tenha uma influência dos parâmetros “p” e “q” utilizados. Esses parâmetros são determinados para cada tipo de

agregado, porém são influenciados pela matriz cimentícia, conforme evidenciado na equação 7. Porém, esses parâmetros foram determinados apenas com uso do CP V ARI. A utilização de um cimento pozolânico pode gerar melhorias na zona de transição interfacial, melhorando assim a aderência entre pasta e agregado, que pode acarretar diferenças nesses parâmetros para um mesmo agregado quando comparado ao cimento CP V.

O módulo de elasticidade obtido para a mistura II-CIM (25,93 MPa) se mostrou próximo ao obtido pela mistura CIM (24,8 MPa), conforme apresentado na Figura 42. Como o concreto obteve maior resistência, o módulo também apresentou a mesma tendência.

Figura 42 - Resistência (a) e módulo de elasticidade (b) das misturas CIM das duas séries.



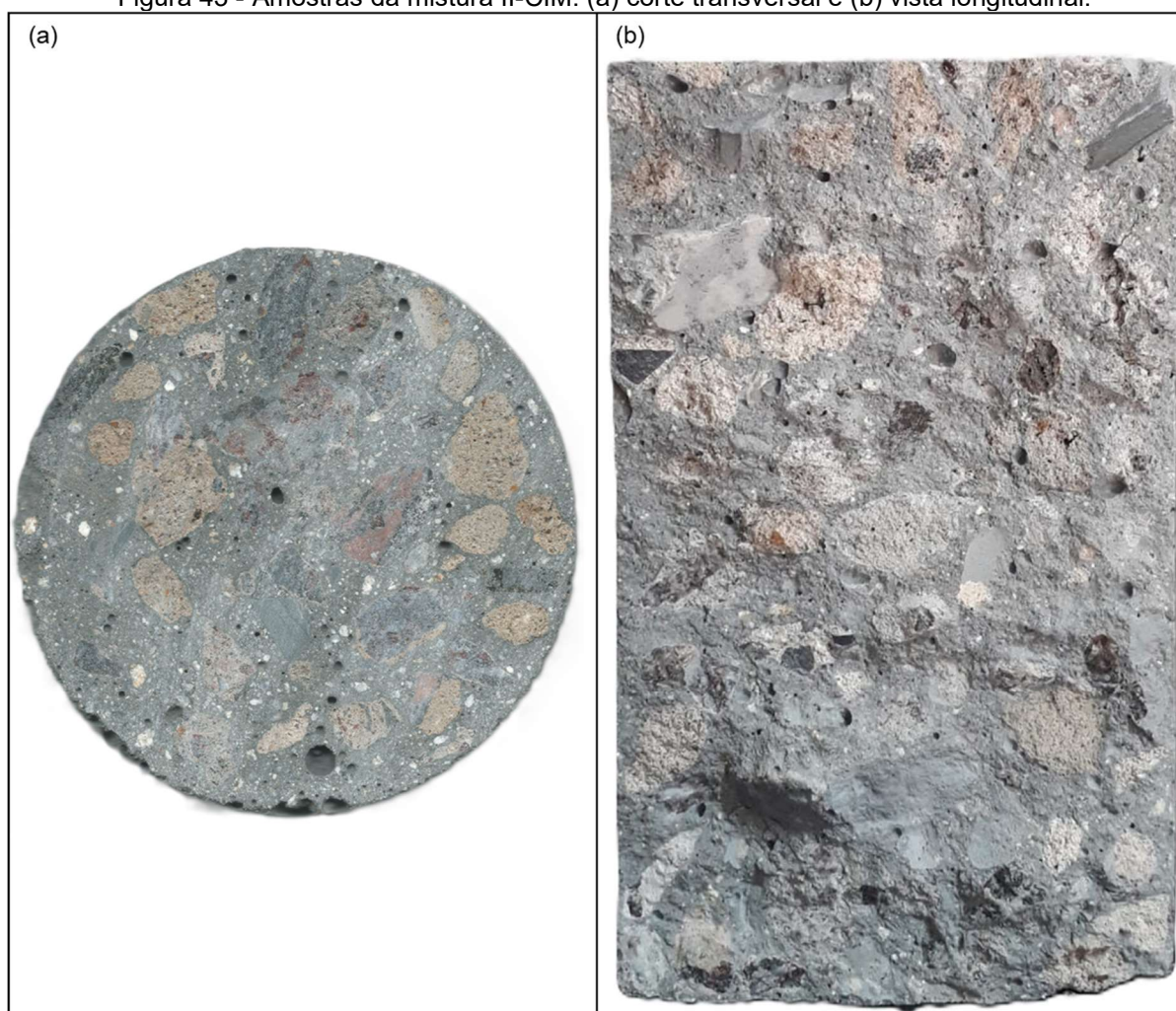
Fonte: a autora.

A capacidade de absorção foi de 8,5% e a massa específica foi 2,12 g/cm³. Esses resultados também são coerentes com os resultados das misturas apresentadas anteriormente.

A intensidade do ligante obtida para a mistura foi de 9,57 kg.m⁻³/MPa, valor menor que o da mistura produzida com mesmo agregado e CP V ARI, que obteve 11,12 kg.m⁻³/MPa, e próximo à mistura natural utilizando o CP V ARI, que apresentou 9,85 kg.m⁻³/MPa.

Assim como para as misturas da primeira série, o corte transversal e a vista longitudinal da amostra de concreto produzida nesta etapa (Figura 43a e Figura 43b) apresentam os agregados bem distribuídos na seção, a presença de alguns poros visíveis e a ruptura ocorrendo tanto nos agregados quanto na zona de transição interfacial (Figura 43b).

Figura 43 - Amostras da mistura II-CIM: (a) corte transversal e (b) vista longitudinal.



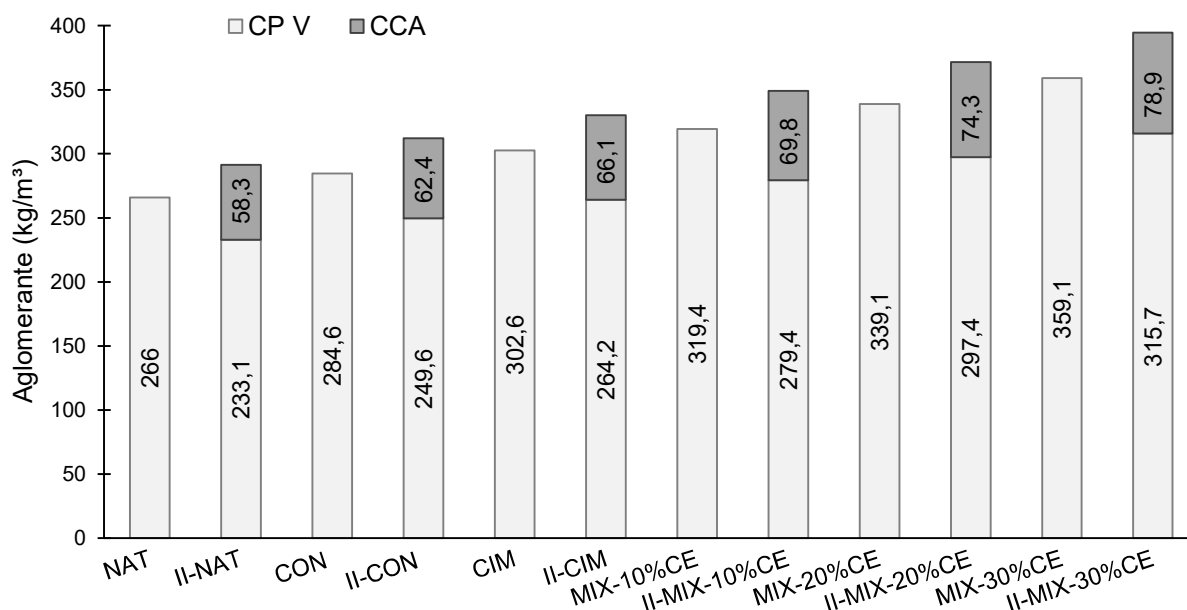
Fonte: a autora.

A partir dos resultados das misturas realizadas com o CP V ARI e desta mistura com o CP IV, admite-se que o método é assertivo tanto para os AR utilizados nesta pesquisa quanto para os dois diferentes tipos de cimento.

4.3.3 Comparação do teor de clínquer nas misturas

A Figura 44 apresenta os teores de CP V e CCA presente nas misturas das duas séries. Conforme observado, o teor de CP V foi sempre menor nas misturas da segunda etapa de dosagens, ou seja, as que utilizaram o CP IV, sendo que as reduções ficaram entre 12-13%. Com o uso da cinza é possível manter as propriedades do concreto e reduzir o teor de clínquer associado à sua produção. Como o cimento é o maior emissor de CO_2 da cadeia produtiva do concreto, essa prática tem potencial para reduzir os impactos ambientais associados ao setor.

Figura 44 - Consumo de aglomerantes nas misturas.



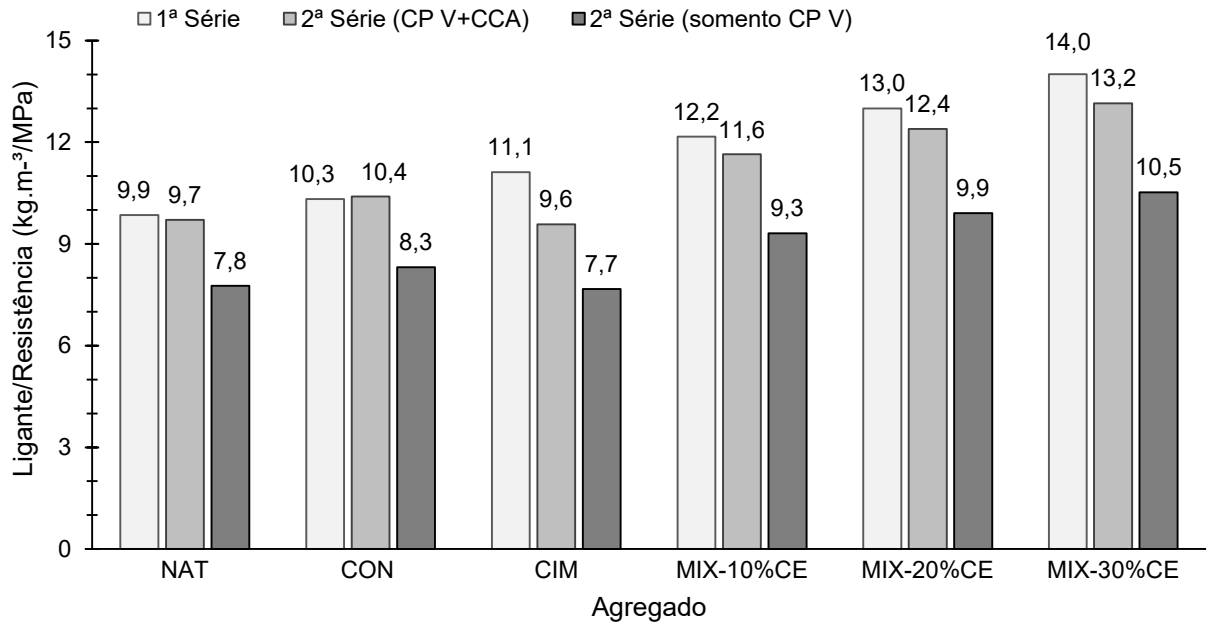
Fonte: a autora.

Como os resultados experimentais de resistência a compressão para o ARCI foram superiores para a mistura com o uso da CCA, o potencial de redução do CP V pode ser ainda maior quando as misturas com o uso da cinza forem dosadas com os parâmetros “p” e “q” calculados para esta matriz, considerando que esse ajuste nos parâmetros possibilitaria a dosagem com a resistência mais próxima entre as misturas.

Para evidenciar o potencial de redução das emissões associadas ao cimento, foi realizado o cálculo da intensidade do ligante para todas as misturas dosadas com CP IV, considerando a resistência experimental para a mistura com ARCI e a resistência de dosagem para as demais misturas. A figura apresenta os valores de IL para as duas etapas de dosagens, sendo que para a segunda etapa a intensidade foi calculada para o teor total de ligantes (CP V ARI + CCA) e também considerando apenas o teor de CP V ARI na mistura.

Considerando o teor total de ligante, as misturas produzidas com CP IV apresentaram valores semelhantes ou menores que a mistura produzida com mesmo agregado e CP V ARI. Comparando o IL para o teor de CP V ARI na mistura, as dosagens da segunda etapa apresentaram reduções entre 20% e 30% em relação à primeira etapa, evidenciando o potencial de redução de emissões de CO₂ associado.

Figura 45 - IL para as duas séries de dosagens.

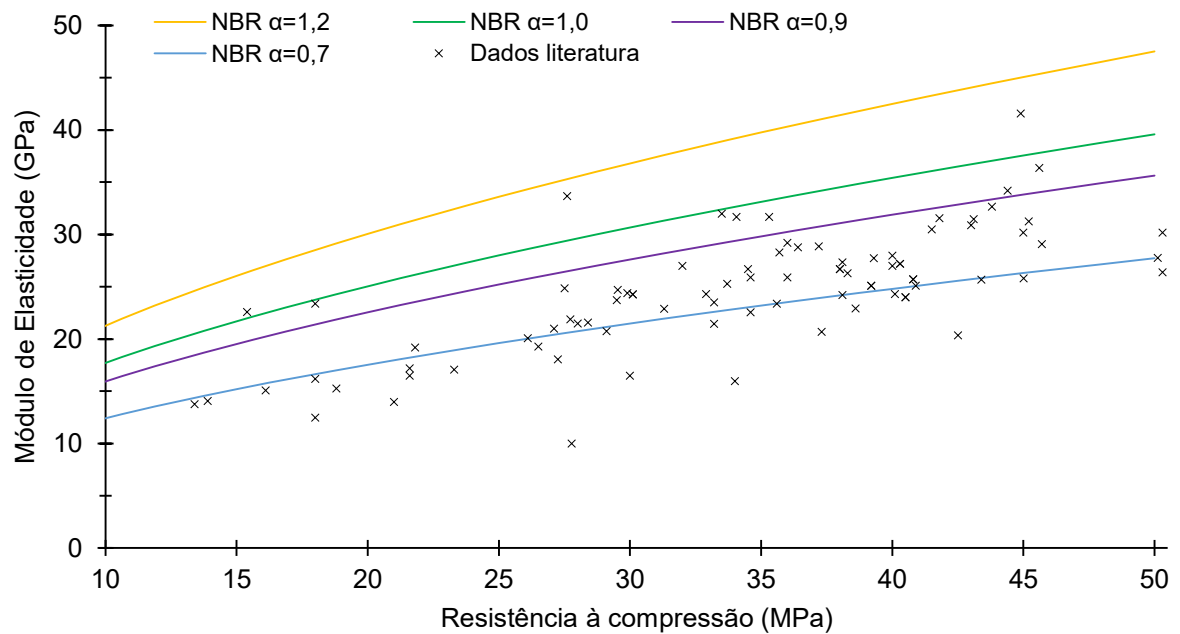


Fonte: a autora.

4.4 PREVISIBILIDADE DO MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os dados obtidos foram plotados na Figura 46, onde também são destacados os valores estimados utilizando a equação 21, recomendada pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

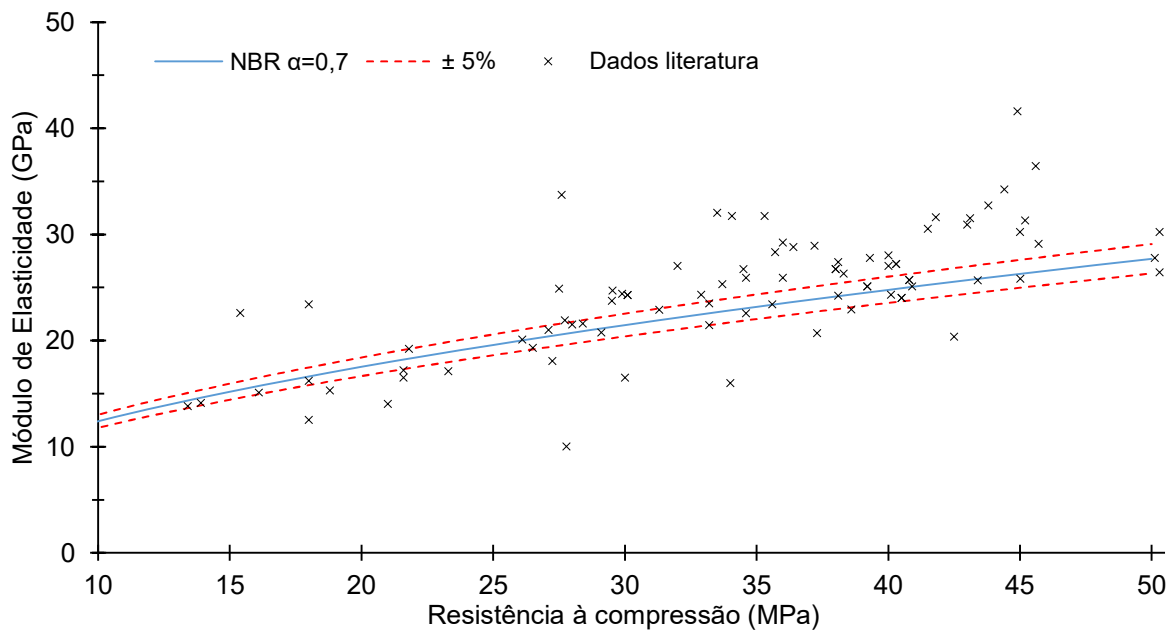
Figura 46 - Módulo de elasticidade experimental x NBR 6118:2023.



Fonte: a autora.

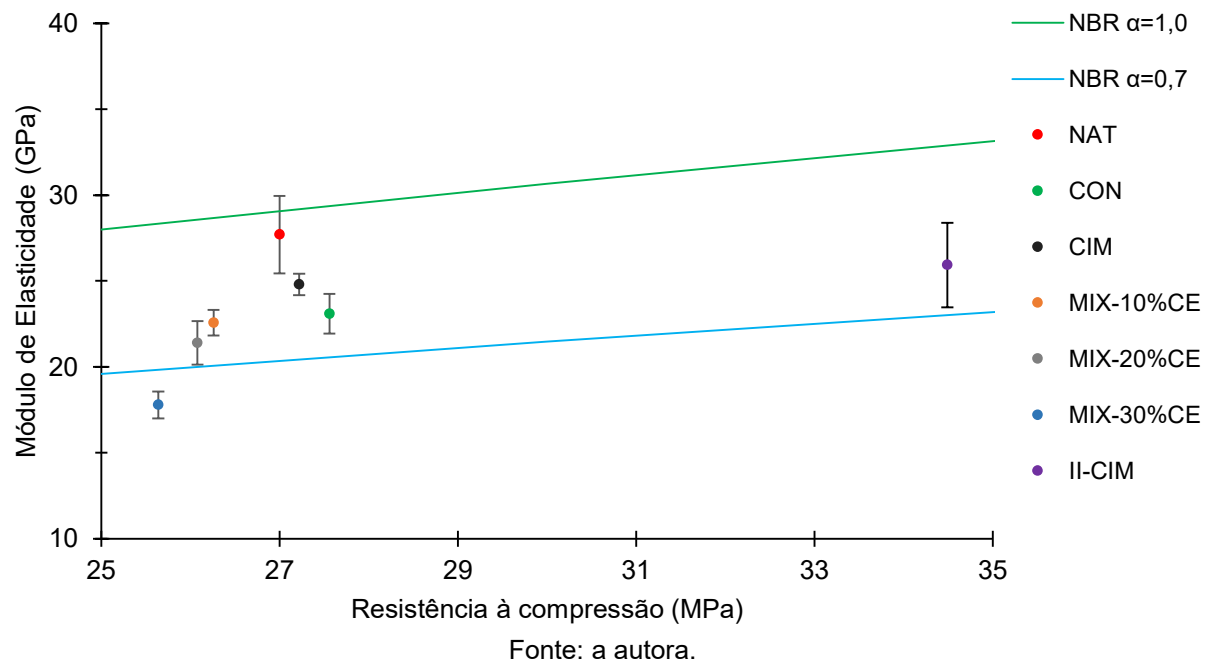
Pela análise da figura acima, observa-se que o valor de $\alpha_E = 0,7$, menor valor proposto atualmente pela NBR 6118 (ABNT, 2023), atenderia com segurança a maior parte dos dados obtidos. Fazendo um intervalo de variação de 5% para α_E , obtém-se o intervalo apresentado na Figura 47. Considerando o intervalo, poucos resultados estão abaixo do limite, o que demonstra que o valor proposto pode ser um bom multiplicador para o ARCO. Um valor de α_E menor subestimaria muito os resultados, sendo assim antieconômico.

Figura 47 - Módulo de elasticidade com $\alpha=0,7$ e intervalo de variação de 5%.



Fonte: a autora.

Os resultados experimentais do módulo de elasticidade, com seus respectivos desvios, e o valor estimado pela equação da NBR 6118 (ABNT, 2023) para $\alpha_E=1,0$ e $\alpha_E=0,7$ estão apresentados na Figura 40. O módulo obtido experimentalmente para a mistura NAT, considerando o desvio padrão do ensaio, pode ser considerado equivalente ao módulo estimado para esta mistura, com $\alpha_E=1,0$ por se tratar de agregado de gnaiss. As misturas com agregados reciclados, exceto MIX3, estão acima do valor esperado quando utilizado o $\alpha_E=0,7$, demonstrando que este valor estaria a favor da segurança ao ser utilizado para os agregados reciclados avaliados.

Figura 48 - E_{ci} experimental x E_{ci} calculado.

Diante dos resultados experimentais obtidos nessa pesquisa, o valor de $\alpha_E = 0,7$ seria uma boa aproximação para os concretos com AR, indicando que a previsão do módulo de elasticidade é possível de acordo com a equação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2023).

5 CONCLUSÕES

A maioria das pesquisas realizadas com AR no Brasil utilizou o ARCO e as que utilizaram outros tipos de AR apresentavam usos diversos, sendo poucas voltadas para concreto. Esse panorama observado evidencia a importância de pesquisas voltadas ao uso do ARCI E ARM em concretos com fins estruturais. Outros fatores importantes observados foi o percentual de materiais cerâmicos presente no ARM, em que a maioria é inferior à 30%, e o fato da absorção dos agregados ficar na faixa entre 8 e 10%.

O estudo de compensação de água nas misturas mostrou que realizando a compensação é possível que a trabalhabilidade inicial das misturas com AR seja equivalente à mistura com AN. Entretanto, mesmo compensando a água, as misturas com AR demonstraram perda de trabalhabilidade com o tempo um pouco mais acentuada que a mistura de referência.

Em relação à compensação, foi possível observar também que o percentual de água recomendado pela NBR 15116 representa uma boa aproximação para misturas com ARCO e ARCI, em que a absorção dos agregados estava em torno de 6%. Para o ARCE, que possui capacidade de absorção elevada, o teor de compensação precisou ser maior. Isso indica que para agregados com maior capacidade de absorção, como os ARM com maiores percentuais de materiais cerâmicos por exemplo, um estudo da compensação de água é recomendado para avaliar o teor a ser utilizado, garantindo a trabalhabilidade adequada das misturas.

Em relação à resistência à compressão dos concretos dosados pelo método ABCP, somente as misturas com agregados naturais apresentaram resultado dentro do esperado. As misturas com AR apresentaram reduções em relação ao AN, sendo mais acentuada para as misturas com maior resistência, onde a o agregado graúdo passa a ser mais demandado, o que faz com que sua resistência exerça maior influência na resistência do concreto. Os resultados demonstraram que o ARCO apresentou resultados semelhantes ao ARCI para a mistura de menor resistência, e resultados superiores para a resistência mais alta.

O modelo de empacotamento compressível, aplicado através do software BétonlabPro3®, se mostrou uma metodologia eficiente para a dosagem dos concretos de classe C30 com diferentes agregados reciclados produzidos nesta pesquisa. As misturas fabricadas com agregados reciclados apresentaram resistência à

compressão estatisticamente iguais ao concreto produzido somente com agregados naturais. O uso dessa ferramenta se mostra uma maneira promissora de resolver as inconsistências dos métodos tradicionais de dosagem em relação ao emprego de agregados reciclados. Ao considerar mais propriedades dos agregados como parâmetros para os cálculos, o método se torna mais assertivo, diminuindo as diferenças dos resultados previstos para os obtidos experimentalmente.

Como esperado para concretos com agregados reciclados, as misturas com os AR apresentaram módulo de elasticidade inferior ao obtido para o natural. Mesmo estando na mesma classe de resistência, o módulo sofre a influência do agregado gráudo, que no caso dos reciclados, é menor que o natural. Contudo, estes efeitos podem ser previstos utilizando o fator $\alpha_E = 0,7$ para o calcular do módulo de elasticidade estimado, conforme equação prevista na NBR 6118, para as misturas com até 20% de materiais cerâmicos.

Assim como o módulo, as demais propriedades avaliadas apresentaram os mesmos padrões já observados para concretos reciclados: maior capacidade de absorção e índice de vazios e menor massa específica. As diferenças das propriedades em relação ao concreto produzido com agregados naturais foram mais acentuadas à medida que o teor de materiais cerâmicos presente no concreto aumentou. No entanto, os testes estatísticos demonstraram que com o uso de 10% de ARCE as propriedades ainda se assemelham ao ARCO e ARCI.

Uma vez que os resultados experimentais apresentaram valores compatíveis com a resistência alvo, indica-se que o MEC é um método de dosagem eficiente para as misturas de concreto reciclado, dentro das características dos agregados reciclados aqui utilizados. O modelo se mostra uma ferramenta capaz de abordar as diferenças nas propriedades dos agregados gráudos de diferentes origens e composições, sendo uma forma de produzir misturas de concreto reciclado confiáveis, com propriedades previsíveis.

5.1 SUGESTÕES DE PESQUISAS FUTURAS

Apesar dos resultados promissores obtidos nessa pesquisa, somente misturas da classe de resistência C30 foram avaliadas. Assim é importante que o Modelo de Empacotamento Compressível seja aplicado para concretos de outras classes de

resistência. Também podem ser utilizados agregados de outras origens e percentuais de materiais cerâmicos distintos.

Apesar de não ter sido um impeditivo ao uso do MEC, a trabalhabilidade das misturas produzidas não foi condizente com os valores previstos pelo modelo. É necessário que essa propriedade seja mais explorada para averiguar se as diferenças foram devido ao valor estipulado na pesquisa estar no limite definido pelo método ou se a previsão do abatimento não está adequada. Além do slump, ensaios de tensão de escoamento e viscosidade plástica podem ser utilizados para avaliar o comportamento das misturas no estado fresco.

Sugere-se que sejam feitos estudos para avaliar os parâmetros “p” e “q” dos agregados reciclados, aumentando a compreensão sobre eles. Experimentos com diferentes classes de resistências e tipos variados de cimento podem ajudar na melhor interpretação desses parâmetros, proporcionando maior segurança no uso do método.

É também necessário que sejam realizados ensaios para avaliar as propriedades de durabilidade das misturas, principalmente do ARCI e ARM, que são agregados pouco abordados na literatura.

O uso do MEC para concretos com agregados reciclados finos pode aumentar a capacidade de incorporação de agregados reciclados em concretos, sendo importante realizar pesquisas que avaliem o uso do modelo para dosagem de concretos que incorporem os agregados reciclados finos, melhorando assim a sustentabilidade do concreto.

Sugere-se também que o comportamento dos concretos com os diferentes agregados reciclados seja analisado em elementos estruturais em escala real, visando maior confiabilidade no emprego dos AR em teores elevados.

Como o teor de cimento das misturas precisa ser aumentado para manter a resistência do concreto com elevados teores de AR, é importante que sejam realizados estudos de análise de ciclo de vida para avaliar os teores de emissões e a sustentabilidade das misturas de concreto reciclado. Diferentes tipos de cimentos podem ser utilizados a fim de se obter uma melhor intensidade do ligante, reduzindo o teor de clínquer das misturas.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. **NBR 10342. Concreto — Perda de abatimento — Método de ensaio.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2012.

ABNT. **NBR 15116. Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland — Requisitos e métodos de ensaios.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021.

ABNT. **NBR 16606. Cimento Portland - Determinação da pasta de consistência normal.** Rio de Janeiro: ABNT (Technical Standards Brazilian Association), 2018.

ABNT. **NBR 16889. Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** [S. l.: s. n.], 2020.

ABNT. **NBR 16916. Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021.

ABNT. **NBR 16917. Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021.

ABNT. **NBR 16972. Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2021.

ABNT. **NBR 16974. Agregados - Ensaio de resistência ao impacto e à abrasão Los Angeles.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2022.

ABNT. **NBR 17054. Agregados - Determinação da composição granulométrica - Método de ensaio.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2022.

ABNT. **NBR 5738. Concreto -Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2015.

ABNT. **NBR 5739. Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2018.

ABNT. **NBR 6118 - Projeto de estruturas de concreto.** Rio de Janeiro, Brazil: [s. n.], 2023.

ABNT. **NBR 7211. Agregados para concreto - Especificação.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2022.

ABNT. **NBR 7215. Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2019.

ABNT. **NBR 8522-1. Concreto endurecido - Determinação dos módulos de elasticidade e de deformação. Parte 1: Módulos estáticos à compressão.** Rio de

Janeiro: [s. n.], 2021.

ABNT. **NBR 9778. Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro: [s. n.], 2005.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2021. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, Brasil, São Paulo, Brasil, 2012.** Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>.

ABRELPE. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2022. **Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais, São Paulo, Brasil, [s. l.], 2022.**

AGRELA, F. *et al.* Limiting properties in the characterisation of mixed recycled aggregates for use in the manufacture of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 25, n. 10, p. 3950–3955, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.027>.

AMARIO, Mayara. Dosagem científica de concretos estruturais contendo agregado de resíduo de concreto (ARC). **Dissertação de Mestrado**, Rio de Janeiro, Brasil, p. 213, 2015.

AMARIO, Mayara *et al.* Optimization of normal and high strength recycled aggregate concrete mixtures by using packing model. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 84, p. 83–92, 2017. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0958946516302748>.

AMARIO, Mayara. Propriedades do estado fresco e de longa duração de concretos de resistência normal e alto desempenho contendo agregados de resíduo de concreto de diferentes origens. **Tese de Doutorado**, Rio de Janeiro, Brasil, p. 206, 2019.

ARAGÃO, Helio Guimarães. Análise estrutural de lajes pré-moldadas produzidas com concreto reciclado de construção e demolição. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/382>.

ARAÚJO, Regina Célia Coura de. **Avaliação experimental de concretos sustentáveis utilizando resíduo de construção e demolição como agregado graúdo, resíduo de mármore como agregado miúdo e com adição de fibra**

sintética. 2015. 190 f. - Universidade Federal de Viçosa, [s. l.], 2015.

BAGHAEE MOGHADDAM, Taher; BAAJ, Hassan. Application of compressible packing model for optimization of asphalt concrete mix design. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 159, p. 530–539, 2018. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817322122>.

BAIRAGI, N.K. K *et al.* Mix design procedure for recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 4, n. 4, p. 188–193, 1990.

BAIRAGI, N. K.; RAVANDE, Kishore; PAREEK, V. K. Behaviour of concrete with different proportions of natural and recycled aggregates. **Resources, Conservation and Recycling**, [s. l.], v. 9, n. 1–2, p. 109–126, 1993.

BALLISTA, Luiz Paulo Zuppani. **Avaliação de algumas propriedades de concretos estruturais com agregados graúdos reciclados modificados com látex estireno-butadieno**. 2003. 152 f. - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, [s. l.], 2003.

BEJA, Igor Amorim; MOTTA, Rosângela; BERNUCCI, Liedi Bariani. Application of recycled aggregates from construction and demolition waste with Portland cement and hydrated lime as pavement subbase in Brazil. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 258, p. 119520, 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119520>.

BIDABADI, M.S.; AKBARI, M.; PANAHI, O. Optimum mix design of recycled concrete based on the fresh and hardened properties of concrete. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 32, 2020.

BOUSLEH, Amal *et al.* A new approach to predict the indirect tensile strength of Portland cement concretes. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [s. l.], v. 27, n. 9, p. 2872–2886, 2023. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/19648189.2020.1839567>.

BRAND, Alexander S.; ROESLER, Jeffery R.; SALAS, Andres. Initial moisture and mixing effects on higher quality recycled coarse aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 79, p. 83–89, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.01.047>.

CAMPOS FILHO, Ricardo Dias. Verificação da aderência entre aço e concreto com a utilização de agregado graúdo reciclado. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2017.

CAPES. **Portal de Periódicos CAPES**. [S. l.: s. n.], 2022. Disponível em: http://www.periodicos.capes.gov.br/?option=com_phome&Itemid=68&.

CARNEIRO, A. P. *et al.* Construction waste characterisation for production of recycled aggregate-Salvador/Brazil. **Waste Management Series**, [s. l.], v. 1, n. C, p. 825–835, 2000.

CARNEIRO, Jodilson Amorim. Uso de agregado reciclado e fibras de aço em concreto simples e concreto armado sob flexão. **Dissertação de mestrado**, Feira de Santana, 2011.

CHAKRADHARA RAO, M.; BHATTACHARYYA, S. K.; BARAI, S. V. Influence of field recycled coarse aggregate on properties of concrete. **Materials and Structures/Materiaux et Constructions**, Dordrecht, v. 44, n. 1, p. 205–220, 2011. Disponível em: <https://search.proquest.com/docview/856428975?accountid=26629>.

CHANG, C. Y. *et al.* Application of a weighted Grey-Taguchi method for optimizing recycled aggregate concrete mixtures. **Cement and Concrete Composites**, [s. l.], v. 33, n. 10, p. 1038–1049, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2011.06.005>.

CORDEIRO, G C *et al.* Long-Term Compressive Behavior of Concretes with Sugarcane Bagasse Ash as a Supplementary Cementitious Material. **Journal of Testing and Evaluation**, [s. l.], v. 46, n. 2, p. 20160316, 2018. Disponível em: <http://www.astm.org/doiLink.cgi?JTE20160316>.

CORDEIRO, Guilherme Chagas. **Utilização De Cinzas Ultrafinas Do Bagaço De Cana-De-Açúcar E Da Casca De Arroz Como Aditivos Minerais Em Concreto**. 2006. [s. l.], 2006.

DAMINELI, Bruno Luís. **Conceitos para formulação de concreto com baixo consumo de ligantes: controle reológico, empacotamento e dispersão de partículas**. 2013. 237 f. - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013.

DE BRITO, Jorge; KURDA, Rawaz; DA SILVA, Pedro Raposeiro. Can we truly predict the compressive strength of concrete without knowing the properties of aggregates?. **Applied Sciences (Switzerland)**, [s. l.], v. 8, n. 7, p. 1–21, 2018.

DE BRITO, Jorge; SAIKIA, Nabajyoti. **Recycled Aggregate in Concrete: Use of Industrial, Construction and Demolition Waste**. 1a. ed. London: Springer London, 2013. (Green Energy and Technology). Disponível em:

<http://link.springer.com/10.1007/978-1-4471-4540-0>.

DE LARRARD, Francois. **Concrete Mixture Proportioning: A scientific approach**. 1a. ed. London: E & FN SPON, 1999. (Modern Concrete Technology - vol 9).

DE OLIVEIRA, M. Barra; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**, [s. l.], v. 16, n. 1–3, p. 113–117, 1996.

DELONGUI, Lucas. Caracterização e adequação dos resíduos da construção civil produzidos no município de Santa Maria-RS para aplicação em pavimentação. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2012. Disponível em: <http://repositorio.ufsm.br/handle/1/7784>.

DENG, Zhiheng *et al.* Mechanical behavior and constitutive relationship of the three types of recycled coarse aggregate concrete based on standard classification. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, [s. l.], v. 22, n. 1, p. 30–45, 2020. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1007/s10163-019-00922-5>.

DHIR, Ravindra K. *et al.* **Sustainable Construction Materials: Recycled Aggregates**. [S. l.]: Woodhead Publishing, 2019.

DUARTE, Gonçalo *et al.* Mechanical performance of shotcrete produced with recycled coarse aggregates from concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 210, p. 696–708, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819306476>.

EL EUCH KHAY, Saloua *et al.* Characterization and Modeling of Tensile Strength of High-Limestone Filler Concretes for Pavement. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 30, n. 9, 2018. Disponível em: <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%29MT.1943-5533.0002439>.

EPA. **Advancing Sustainable Materials Management: 2018 Fact Sheet**. Washington, DC, USA: [s. n.], 2020. Disponível em: <https://www.epa.gov/facts-and-figures-about-materials-waste-and-recycling/advancing-sustainable-materials-management>.

ETXEBERRIA, M. *et al.* Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 37, n. 5, p. 735–742, 2007.

EUROSTAT. **Generation of waste by waste category, hazardousness and**

NACE Rev. 2 activity [env_wasgen]. European Union Statistical Office - Eurostat: [s. n.], 2021. Disponível em: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wasgen&lang=en. Acesso em: 17 maio 2021.

EUROSTAT. Treatment of waste by waste category, hazardousness and waste management operations [env_wastrt]. European Union Statistical Office - Eurostat: [s. n.], 2021. Disponível em: http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/show.do?dataset=env_wastrt&lang=en. Acesso em: 20 maio 2021.

FATHIFAZL, G. *et al.* New Mixture Proportioning Method for Concrete Made with Coarse Recycled Concrete Aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 21, n. 10, p. 601–611, 2009. Disponível em: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290899-1561%282009%2921%3A10%28601%29>.

FERRARIS, Chiara; DELARRARD, F. **Testing and Modeling of Fresh Concrete Rheology.** Gaithersburg, MD: NIST Interagency/Internal Report (NISTIR), National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1998.

FERREIRA, Luis; DE BRITO, Jorge; BARRA, Marilda. Influence of the pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on concrete properties. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 63, n. 8, p. 617–627, 2011.

FUCALE, Stela; PROENÇA, Felipe Torres. Analysis of physical and mechanical properties of recycled aggregates from construction and demolition waste for paving work. **Electronic Journal of Geotechnical Engineering**, [s. l.], v. 19 P, n. 2003, p. 3797–3806, 2014.

GARCÍA-CORTÉS, Verónica; GARCÍA ESTÉVEZ, David; SAN-JOSÉ, José T. Assessment of particle packing models for aggregate dosage design in limestone and EAFS aggregate-based concretes. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 328, p. 126977, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822006626>.

GARCÍA-GONZÁLEZ, Julia *et al.* Pre-saturation technique of the recycled aggregates: Solution to the water absorption drawback in the recycled concrete manufacture. **Materials**, [s. l.], v. 7, n. 9, p. 6224–6236, 2014.

GHOLAMPOUR, Aliakbar; GANDOMI, Amir H; OZBAKKALOGLU, Togay. New

formulations for mechanical properties of recycled aggregate concrete using gene expression programming. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 130, p. 122–145, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.10.114>.

GOMES, Camila Lacerda. Avaliação mecânica e de durabilidade de concretos fabricados com resíduo de construção e demolição e cinza de casca de arroz. **Dissertação de mestrado**, Belo Horizonte, 2019.

GOMES, Camila Lacerda *et al.* Mechanical and durability properties of concrete produced with construction and demolition waste and rice husk ash. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 406, n. September, p. 133471, 2023. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061823031884>.

GONÇALVES, P.; BRITO, J.de. Recycled aggregate concrete (RAC) – comparative analysis of existing specifications. **Magazine of Concrete Research**, [s. l.], v. 62, n. 5, p. 339–346, 2010. Disponível em: <https://www.icevirtuallibrary.com/doi/10.1680/mac.2008.62.5.339>. Acesso em: 26 nov. 2020.

GONZÁLEZ-TABOADA, Iris *et al.* Prediction of the mechanical properties of structural recycled concrete using multivariable regression and genetic programming. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 106, p. 480–499, 2016.

GUPTA, Pramod K. P.K. Pramod K. P.K.; KHAUDHAIR, Ziyad A. Z.A. Ziyad A.; AHUJA, Ashok K. A.K. Ashok K. A new method for proportioning recycled concrete. **Structural Concrete**, [s. l.], v. 17, n. 4, p. 677–687, 2016. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.201400076>.

HERMANN, Aline. Empacotamento de agregados reciclados para concretos vibrocompactados. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2016. Disponível em: <http://repositorio.utfpr.edu.br:8080/jspui/handle/1/1846>.

HISSEINE, Ousmane A; TAGNIT-HAMOU, Arezki. Development of ecological strain-hardening cementitious composites incorporating high-volume ground-glass pozzolans. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 238, p. 117740, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061819331939>.

HOU, Shaodan *et al.* Effect of moisture condition and brick content in recycled coarse aggregate on rheological properties of fresh concrete. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 35, 2021. Disponível em:

<https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2020.102075>.

HU, Chong. **Rhéologie des bétons fluides**. 1995. - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, [s. l.], 1995. Disponível em: <https://pastel.hal.science/tel-00523283>.

KHAN, Asad-ur-Rehman ur Rehman *et al.* Behaviour and Residual Strength Prediction of Recycled Aggregates Concrete Exposed to Elevated Temperatures. **Arabian Journal for Science and Engineering**, [s. l.], v. 45, n. 10, p. 8241–8253, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/10.1007/s13369-020-04682-5>.

KOU, Shi-cong; POON, Chi-sun. Effect of the quality of parent concrete on the properties of high performance recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 77, p. 501–508, 2015. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061814013373>.

KOU, S.C. C.; POON, C.S. S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 35, p. 69–76, 2012. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061812001092>. Acesso em: 30 nov. 2020.

KWAN, W.H. Wai Hoe W.H. *et al.* Influence of the amount of recycled coarse aggregate in concrete design and durability properties. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 26, n. 1, p. 565–573, 2012.

LATTERZA, Luciano de Mello. Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos de construção e demolição: um novo material para fabricação de painéis leves de vedação. **Dissertação de mestrado**, São Carlos, 1998. Disponível em: <http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18134/tde-21122017-120645/>.

LEITE, Mônica Batista. Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Tese de doutoramento - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil**, [s. l.], 2001.

LIANG, Chaofeng *et al.* Enhancing the elastic modulus of concrete prepared with recycled coarse aggregates of different quality by chemical modifications. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 360, p. 129590, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061822032469>.

LIMA, C E De *et al.* Concreto Asfáltico a Quente Dosado Com Resíduos De

Construção E Demolição (Rcd) Aplicado Em Pavimento Flexível. **Holos (Natal, RN)**, [s. l.], v. 37, n. 1, p. 1–18, 2021.

LIN, Yong Huang *et al.* An assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 8, p. 1373–1380, 2004.

LÖFF, Juarez Fernando. **Investigação da influência da aplicação de aditivos na absorção de água de blocos de concreto para pavimentação produzidos com resíduos de construção e demolição (RCD)**. 2018. 119 f. - UNIVERSIDADE LUTERANA DO BRASIL, [s. l.], 2018.

LOPES, Luís Ricardo. Avaliação da interferência dos finos no desempenho de concretos com resíduos de construção e demolição. **Dissertação de mestrado**, Londrina, Brasil, 2005.

LOVATO, Patrícia Silveira. Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2007. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/10609>.

LUZANA LEITE, Brasileiro *et al.* Concrete production of hot asphalt using recycled aggregates CDW. **Materials Science Forum**, [s. l.], v. 881 MSF, p. 346–350, 2017.

MALYSZ, Gabriela Nunes. Estudo da influência da jigagem nas propriedades do concreto com agregado graúdo reciclado. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2018. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/197457>.

MEDDAH, Mohammed Seddik; ZITOUNI, Salim; BELÂABES, Saïd. Effect of content and particle size distribution of coarse aggregate on the compressive strength of concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 24, n. 4, p. 505–512, 2010. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.10.009>.

MEDEIROS-JUNIOR, Ronaldo A.; BALESTRA, Carlos E.T.; LIMA, Maryangela G. Applicability of recycled aggregates in concrete piles for soft soil improvement. **Waste Management and Research**, [s. l.], v. 35, n. 1, p. 56–64, 2017.

MEFTEH, Houria *et al.* Influence of moisture conditioning of recycled aggregates on the properties of fresh and hardened concrete. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 54, p. 282–288, 2013. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652613003168>.

MEHTA, P Kumar; MONTEIRO, Paulo J M. **Concrete: Microstructure, Properties, and Materials**. 4th ed.ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014. Disponível em:

<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9780071797870>.

MONTERO, J.; LASERNA, S. Influence of effective mixing water in recycled concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 132, p. 343–352, 2017. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061816319122>.

MOREIRA, Lucia Hiromi Higa. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. 2010. 81 f. - UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO, [s. l.], 2010.

NANTHAGOPALAN, Prakash; SANTHANAM, Manu. An empirical approach for the optimisation of aggregate combinations for self-compacting concrete. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 45, n. 8, p. 1167–1179, 2012. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-012-9824-3>.

NUNES, Wesley Carlos. Influência do agregado graúdo reciclado de resíduos da construção predial nas propriedades do concreto fresco e endurecido. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://repositorio.bc.ufg.br/tede/handle/tde/671>.

OLIVEIRA, L S; SANTANA, Lidiane. **Pesquisa setorial ABRECON 2020: a reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil**. [S. l.]: Universidade de São Paulo. Escola Politécnica, 2022. Disponível em: <https://www.livrosabertos.sibi.usp.br/portaldelivrosUSP/catalog/book/839>.

OMARY, Safiullah *et al.* Mix Design and Recycled Aggregates Effects on the Concrete's Properties. **International Journal of Civil Engineering**, [s. l.], v. 16, n. 8, p. 973–992, 2018.

OTSUKI, Nobuaki; MIYAZATO, Shin-ichi; YODSUDJAI, Wanchai. Influence of Recycled Aggregate on Interfacial Transition Zone, Strength, Chloride Penetration and Carbonation of Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, [s. l.], v. 15, n. 5, p. 443–451, 2003.

PAUL, Suvash Chandra; PANDA, Biranchi; GARG, Akhil. A novel approach in modelling of concrete made with recycled aggregates. **Measurement**, [s. l.], v. 115, p.

64–72, 2018. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0263224117306577>.

PEPE, Marco *et al.* A novel mix design methodology for Recycled Aggregate Concrete. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 122, n. 2016, p. 362–372, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.061>.

PIOVESAN, Jayne Carlos. **Otimização multivariada da substituição de agregados de resíduos de construção e demolição em concreto**. 2016. 90 f. - Universidade Federal do Amazonas, [s. l.], 2016.

POON, C. S. *et al.* Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 34, n. 1, p. 31–36, 2004. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0008884603001868>.

POON, C.S.; SHUI, Z.H.; LAM, L. Strength of concretes prepared with natural and recycled aggregates at different moisture conditions. **Advances in Building Technology**, [s. l.], v. 2, p. 1407–1414, 2002.

PRADHAN, Subhasis; KUMAR, Shailendra; BARAI, Sudhirkumar V S.V. Sudhirkumar V. Recycled aggregate concrete: Particle Packing Method (PPM) of mix design approach. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 152, p. 269–284, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061817313120>.

PUENTE DE ANDRADE, Gabriella *et al.* Design of structural concrete mixtures containing fine recycled concrete aggregate using packing model. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 252, p. 119091, 2020. Disponível em: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0950061820310965>.

RANGEL, Caroline Santana. Influência de agregados graúdos reciclados nas propriedades estruturais de concretos de resistência normal e de alto desempenho. **Dissertação de mestrado**, Rio de Janeiro, Brasil, p. 204, 2015.

REVILLA-CUESTA, Víctor *et al.* Multi-criteria feasibility of real use of self-compacting concrete with sustainable aggregate, binder and powder. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 325, p. 129327, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652621035125>.

RICCI, Gino. **Estudo de características mecânicas do concreto compactado com rolo com agregados reciclados de construção e de demolição**

para pavimentação. 2007. - Universidade de São Paulo, [s. l.], 2007.

RIGO, Eduardo. Avaliação do potencial de captura de CO₂ de concretos com resíduos de construção e demolição devido à carbonatação. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2019. Disponível em: <https://dspace.unila.edu.br/handle/123456789/5392>.

RODRIGUES, Púbio Penna Firme. **Parâmetros da dosagem racional do concreto**. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND (ABCP). Reunião de técnicos da indústria do cimento, 34^a: São Paulo, 1993.

ROZIERE, Emmanuel *et al.* Assessing the relaxation of recycled aggregates concrete from free and restrained shrinkage tests. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 64, p. 105549, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352710222015558>.

SÁ, Wallace Borges de. **Estudo da interação solo-muro em concreto convencional, com resíduo de construção e demolição (RCD) e alvenaria de pedra**. 2006. - UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO, [s. l.], 2006.

SALLES, Pedro Valle *et al.* A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. **Ambiente Construído**, [s. l.], v. 21, n. 3, p. 177–196, 2021. Disponível em: <https://seer.ufrgs.br/ambienteconstruido/article/view/101137>.

SANTIAGO, Ediele Quinteiro Ribeiro. Utilização de agregados de EVA e RCD para a obtenção de concretos leves. **Dissertação de mestrado**, Feira de Santana, 2008.

SILVA, Cesar Augusto Rodrigues da. Estudo do agregado reciclado de construção civil em misturas betuminosas para vias urbanas. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/jspui/handle/123456789/4223>.

SILVA, Luiz Ricardo Amaro da. Utilização do entulho como agregado para a produção de concreto reciclado. **Dissertação de mestrado**, Niterói, 2004.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 65, p. 201–217, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. The influence of the use of recycled

aggregates on the compressive strength of concrete: a review. **European Journal of Environmental and Civil Engineering**, [s. l.], v. 19, n. 7, p. 825–849, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/19648189.2014.974831>.

SILVA, Jéssica Beatriz da; PEPE, Marco; TOLEDO FILHO, Romildo Dias. High temperatures effect on mechanical and physical performance of normal and high strength recycled aggregate concrete. **Fire Safety Journal**, [s. l.], v. 117, p. 103222, 2020. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0379711220303660>.

SOUZA, Fernando da Silva *et al.* Application of construction and demolition waste in civil construction in the brazilian amazon—case study of the city of rio branco. **Materials**, [s. l.], v. 14, n. 9, 2021.

SUNAYANA, Sushree; BARAI, Sudhirkumar V. Recycled aggregate concrete incorporating fly ash: Comparative study on particle packing and conventional method. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 156, p. 376–386, 2017. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S095006181731735X>.

TAM, Vivian W.Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. **Cement and Concrete Research**, [s. l.], v. 35, n. 6, p. 1195–1203, 2005.

TENÓRIO, Jonathas Judá Lima. Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufal.br/jspui/handle/riufal/385>.

THOMAS, Job; THAICKAVIL, Nassif Nazeer N.N. Nassif Nazeer N.N.; WILSON, P.M. M. Strength and durability of concrete containing recycled concrete aggregates. **Journal of Building Engineering**, [s. l.], v. 19, n. May, p. 349–365, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2018.05.007>. Acesso em: 30 nov. 2020.

VAN DER PUTTEN, J *et al.* Determination of packing profiles for the verification of the compressible packing model in case of UHPC pastes. **Materials and Structures**, [s. l.], v. 50, n. 2, p. 118, 2017. Disponível em: <http://link.springer.com/10.1617/s11527-016-0986-2>.

VIANA NETO, Luís Antônio da Cunha. **Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre as propriedades físicas, químicas e mecânicas do concreto de cimento portland**. 2016. 111 f. - FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE

SERGIPE, [s. l.], 2016.

VIANA NETO, Luís Antônio da Cunha; SALES, Angela Teresa Costa; SALES, Lucila Costa. Efeitos da variabilidade de agregados de RCD sobre o desempenho mecânico do concreto de cimento Portland. **Revista Materia**, [s. l.], v. 23, n. 1, 2018.

VIEIRA, Geilma Lima. Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Dissertação de mestrado**, [s. l.], 2003. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/4062>.

WASILEWSKI, Gabriel Biglia. Influência do recobrimento de agregado de resíduo de construção e demolição (RCD) na qualidade de água e esgoto Ambiental. **Dissertação de mestrado**, Ponta Grossa, 2019. Disponível em: <https://www3.unicentro.br/ppgesa/2020/03/20/uepg-influencia-do-recobrimento-de-agregado-de-residuo-de-construcao-e-demolicao-rcd-na-qualidade-de-agua-e-esgoto/>.

XU, Jinjun *et al.* Parametric sensitivity analysis and modelling of mechanical properties of normal- and high-strength recycled aggregate concrete using grey theory, multiple nonlinear regression and artificial neural networks. **Construction and Building Materials**, [s. l.], v. 211, p. 479–491, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.234>.

ZABEN, Abdulrahman *et al.* Influence of mix composition on the properties of recycled aggregate concrete. **Structural Concrete**, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 2939–2951, 2021. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/suco.202000062>.

APÊNDICE A

Figura A. 1 - Entrada de dados do CP V ARI Plus.

The figure displays four screenshots of the 'Properties of cement' software interface, arranged in a 2x2 grid. Each window has a title bar 'Properties of cement' and a close button 'X'.

Top-left window (General tab): Shows fields for Name (CPV-ARI PLUS), Date (29/08/2022 11:07:01), Comments (Superplasticizer used: Master Glenium 51), and Cost (Euro/t). Buttons for Save, Cancel, and Tools are on the right.

Top-right window (Composition tab): Shows 'Constituents' and 'Bogue composition' sections. Constituents include % Clinker (K) [95], % Fly ash (V) [0], % Limestone (L) [0], % Natural pozzolan (Z) [8], % Blastfurnace slag (S) [0], % Silica fume (D) [0], and % Others [5]. Bogue composition includes % C3S, % C2S, % C3A, % C4AF, % Others, mean % of active alkali, and maximum % of active alkali. Buttons for Save, Cancel, and Tools are on the right.

Bottom-left window (Properties tab): Shows 'Comp. strength' at various ages (1 day: 23.95, 2 days, 3 days: 32.65, 7 days: 37.12, 28 days: 46.94, 90 days, 360 days), Density (kg/m3) [3258], Heat capacity (kJ/K/Kg), Saturation amount (%) [0.3], and Autogeneous shrinkage Kc (MPa). Buttons for Save, Cancel, and Tools are on the right.

Bottom-right window (Fraction 1 tab): Shows 'Fraction' [0.04 μ / 71 μ], 'Without admixture' (Experimental packing density [0.4935], Packing index [4.8], Confinement [No]), and 'With saturation amount' (Experimental packing density [0.6189], Packing index [4.8], Confinement [No]). Buttons for Save, Cancel, and Tools are on the right.

Figura A. 2 - Propriedades do cimento CP IV.

The figure displays four screenshots of the 'Properties of cement' software interface, arranged in a 2x2 grid. Each window has a title bar 'Properties of cement' and a close button 'X'. The tabs are 'General', 'Composition', 'Properties', 'Skeleton', and 'Fraction 1'.

Top-left window (General tab):

- Name: CP IV
- Date: 13/04/2023 12:08:24
- Comments: Superplasticizer used: Master Glenium 51
- Cost (Euro/t): []
- Buttons: Save, Cancel, Tools

Top-right window (Composition tab):

- Constituents:
 - % Clinker (K): 76
 - % Fly ash (V): 0
 - % Limestone (L): 0
 - % Natural pozzolan (Z): 20
 - % Blastfurnace slag (S): 0
 - % Silica fume (D): 0
 - % Others: 4
- Bogue composition:
 - % C3S: []
 - % C2S: []
 - % C3A: []
 - % C4AF: []
 - % Others: []
- mean % of active alkali: []
- maximum % of active alkali: []
- Buttons: Save, Cancel, Tools

Bottom-left window (Properties tab):

- Comp. strength at 1 day: []
- Comp. strength at 2 days: []
- Comp. strength at 3 days: []
- Comp. strength at 7 days: 22.37
- Comp. strength at 28 days: 32.25
- Comp. strength at 90 days: []
- Comp. strength at 360 days: []
- Density (kg/m³): 3047
- Heat capacity (kJ/K/Kg): []
- Saturation amount (%): 0.3
- Autogeneous shrinkage:
 - K_c (MPa): []
- Buttons: Save, Cancel, Tools

Bottom-right window (Fraction 1 tab):

- Fraction: 0.04 μ / 100 μ
- Without admixture:
 - Experimental packing density: 0.5068632
 - Packing index: 4.8
 - Confinement: No
- With saturation amount:
 - Experimental packing density: 0.6293472
 - Packing index: 4.8
 - Confinement: No
- Buttons: Save, Cancel, Tools

Figura A. 3 - Entrada de dados do superplastificante.

Superplasticizer properties

General

Name: Master Glenium 51

Date: 29/08/2022 12:20:39

Comments:

Cost (Euro/kg):

Solid content (%): 30

Density (kg/l): 1,07

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save

Cancel

Figura A. 4 - Entrada de dados da areia.

The figure displays four screenshots of the 'Properties of sand' software interface, showing different tabs and input fields for sand properties.

Top Left Screenshot (General tab):

- Name: AREIA
- Date: 06/03/2022 14:19:10
- Comments: (Empty text area)
- Cost (Euro/t): (Empty input field)

Top Right Screenshot (Properties tab):

- Bond coef. p: 1,7182
- Ceiling coef. q (MPa⁻¹): 0,01199
- Traction coef. Kt (MPa^{-0.43}): (Empty input field)
- Elastic modulus (GPa): (Empty input field)
- Density (kg/m³): 2539
- Water absorption (%): 0,46
- Heat capacity (kJ/K/Kg): (Empty input field)
- mean % of active alkali: (Empty input field)
- maximum % of active alkali: (Empty input field)

Bottom Left Screenshot (Skeleton tab):

Diameter	Passing %	β	β^*
80 μ	0	0,5866	
90 μ	1	0,5866	
100 μ	1,9	0,5866	
112 μ	2,9	0,5866	
125 μ	3,9	0,5866	
140 μ	4,8	0,5866	
160 μ	6	0,5866	
180 μ	9	0,5866	
200 μ	11,6	0,5866	
224 μ	14,4	0,5866	
250 μ	17,2	0,5866	
280 μ	20	0,5866	
315 μ	23	0,5866	
355 μ	28,3	0,5866	

☒ Residual packing densities constant for each fraction

Bottom Right Screenshot (Fraction 1 tab):

- Fraction: 80 μ / 4,5 mm
- Without admixture:
 - Experimental packing density: 0,65
 - Packing index: 9
 - Confinement: Cylinder
 - Enter the dimensions of the cylinder in mm:
 - ϕ : 160
 - H: 320

Figura A. 5 - Entrada de dados do agregado graúdo natural.

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name

NATURAL

Date

29/08/2022 11:07:01

Comments

Cost (Euro/t)

Save

Cancel

Tools

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Bond coef. p

1,5074

Ceiling coef. q (MPa⁻¹)

0,00663

Traction coef. Kt (MPa^{-0.43})

Elastic modulus (GPa)

Density (kg/m³)

2641

Water absorption (%)

0,48

Heat capacity (kJ/K/Kg)

mean % of active alkali

maximum % of active alkali

Save

Cancel

Tools

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter

Passing %

β

β^*

4,5 mm	0	0,5817
5 mm	1,9	0,5817
5,6 mm	3,9	0,5817
6,3 mm	6	0,5817
7,1 mm	10,7	0,5817
8 mm	15,4	0,5817
9 mm	20	0,5817
10 mm	27,1	0,5817
11,2 mm	34,6	0,5817
12,5 mm	42	0,5817
14 mm	58,5	0,5817
16 mm	77,9	0,5817
18 mm	95	0,5817
20 mm	100	0,5817

Graph

Tools

☒ Residual packing densities constant for each fraction

Save

Cancel

Tools

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction

4,5 mm / 20 mm

Without admixture

Experimental packing density

0,55

Packing index

9

Confinement

Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

$\varnothing$

160

H

320

Save

Cancel

Tools

Figura A. 6 - Entrada de dados do agregado reciclado de concreto.

The figure displays four screenshots of the 'Properties of gravel' software interface, arranged in a 2x2 grid. Each window has a title bar 'Properties of gravel' and a close button 'X'.

Top-left window (General tab): Shows fields for 'Name' (ARCO), 'Date' (29/08/2022 11:07:01), 'Comments' (Agregado Reciclado de Concreto, Absorção 70%), and 'Cost (Euro/t)'.

Top-right window (Properties tab): Shows material properties: Bond coef. p (1.1881), Ceiling coef. q (MPa⁻¹) (0.01155), Traction coef. Kt (MPa^{-0.43}), Elastic modulus (GPa), Density (kg/m³) (2339), Water absorption (%) (3.81), Heat capacity (kJ/K/Kg), mean % of active alkali, and maximum % of active alkali.

Bottom-left window (Skeleton tab): Shows a table of sieve analysis data. A 'Graph' button is visible on the right.

Diameter	Passing %	β	β^*
4.5 mm	0	0.5956	
5 mm	1.9	0.5956	
5.6 mm	3.9	0.5956	
6.3 mm	6	0.5956	
7.1 mm	11.7	0.5956	
8 mm	17.4	0.5956	
9 mm	23	0.5956	
10 mm	30.4	0.5956	
11.2 mm	38.3	0.5956	
12.5 mm	46	0.5956	
14 mm	57.2	0.5956	
16 mm	70.4	0.5956	
18 mm	82	0.5956	
20 mm	100	0.5956	

☒ Residual packing densities constant for each fraction

Bottom-right window (Fraction 1 tab): Shows fraction-specific data: Fraction (4.5 mm / 20 mm), Without admixture, Experimental packing density (0.57), Packing index (9), Confinement (Cylinder), and dimensions of the cylinder (D: 160, H: 320).

Figura A. 7 - Entrada de dados do agregado reciclado cimentício.

The figure displays four screenshots of the 'Properties of gravel' software interface, showing different tabs and input fields for entering data for a recycled cementitious aggregate.

Top Left Screenshot (General tab):

- Name: ARCI
- Date: 29/08/2022 11:07:01
- Comments: AGREGADO RECICLADO CIMENTICIO, Absorção 70%
- Cost (Euro/t):

Top Right Screenshot (Properties tab):

- Bond coef. p: 1.4836
- Ceiling coef. q (MPa⁻¹): 0.02692
- Traction coef. Kt (MPa^{-0.43}):
- Elastic modulus (GPa):
- Density (kg/m³): 2294
- Water absorption (%): 4.436
- Heat capacity (kJ/K/Kg):
- mean % of active alkali:
- maximum % of active alkali:

Bottom Left Screenshot (Skeleton tab):

Diameter	Passing %	β	β^*
4.5 mm	0	0.5905	
5 mm	0.9	0.5905	
5.6 mm	1.9	0.5905	
6.3 mm	3	0.5905	
7.1 mm	7	0.5905	
8 mm	11	0.5905	
9 mm	15	0.5905	
10 mm	25.9	0.5905	
11.2 mm	37.6	0.5905	
12.5 mm	49	0.5905	
14 mm	64.5	0.5905	
16 mm	82.8	0.5905	
18 mm	99	0.5905	
20 mm	100	0.5905	

☒ Residual packing densities constant for each fraction

Bottom Right Screenshot (Fraction 1 tab):

- Fraction: 4.5 mm / 20 mm
- Without admixture
- Experimental packing density: 0.55
- Packing index: 9
- Confinement: Cylinder
- Enter the dimensions of the cylinder in mm:
 - ϕ : 160
 - H: 320

Figura A. 8 - Entrada de dados do agregado reciclado cerâmico.

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Name: ARCE

Date: 29/08/2022 11:07:01

Comments: AGREGADO RECICLADO CERÂMICO
Absorção 90%

Cost (Euro/t):

Save

Cancel

Tools

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Bond coef. p: 0.0426

Ceiling coef. q (MPa⁻¹): 0.02548

Traction coef. Kt (MPa^{-0.43}):

Elastic modulus (GPa):

Density (kg/m³): 1659

Water absorption (%): 19.92

Heat capacity (kJ/K/Kg):

mean % of active alkali:

maximum % of active alkali:

Save

Cancel

Tools

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Diameter	Passing %	β	β^*
4.5 mm	0	0.5623	
5 mm	1.6	0.5623	
5.6 mm	3.2	0.5623	
6.3 mm	5	0.5623	
7.1 mm	8.7	0.5623	
8 mm	12.4	0.5623	
9 mm	16	0.5623	
10 mm	22.7	0.5623	
11.2 mm	30	0.5623	
12.5 mm	37	0.5623	
14 mm	52.2	0.5623	
16 mm	70.2	0.5623	
18 mm	86	0.5623	
20 mm	100	0.5623	

Graph

Tools

Residual packing densities constant for each fraction

Properties of gravel

General | Properties | Skeleton | Fraction 1

Fraction: 4.5 mm / 20 mm

Without admixture

Experimental packing density: 0.53

Packing index: 9

Confinement: Cylinder

Enter the dimensions of the cylinder in mm

Ø: 160

H: 320

Save

Cancel

Tools

APÊNDICE B

Figura B.1 - Calibração dos parâmetros p e q da areia.

Calibration

Constituents

S1	materiais.camila.cst\AREIA
C1	materiais.camila.cst\CPV-ARI PLUS
SP1	materiais.camila.cst\Master Glenium 51

Calibrate
Cancel

Composition

S1 (kg)	1551
C1 (kg)	600
SP1 (kg)	6
W (kg)	240

Enter
Modify n*

No batch
Remove
Export

Air entraining agent?
☒ No
☐ Yes

Strength

fc7 (MPa)	51.56
fc28 (MPa)	63.81
fc90 (MPa)	

Concrete n°	1	2				
S1 (kg)	1783	1551				
C1 (kg)	320	600				
SP1 (kg)	3.2	6				
W (kg)	240	240				
Total air (%)						
AEA	No	No				
fc1 (MPa)						
fc2 (MPa)						
fc3 (MPa)						
fc7 (MPa)	19.21	51.56				
fc28 (MPa)	23.14	63.81				
fc90 (MPa)						
fc360 (MPa)						

The calibration leads to the following values:
 p=1,7182
 q=0,01199
 Do you accept these values?

Sim Não

Figura B.2 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado graúdo natural.

BétonlabPro 3

File Edition Constituents Selection Calculations Options ?

Calibration

Constituents

G1	materiais camila.cst\NATURAL
S1	materiais camila.cst\AREIA
C1	materiais camila.cst\CPV-ARI PLUS
SP1	materiais camila.cst\Master Glenium 51

Composition

G1 (kg)	1048,6
S1 (kg)	768,99
C1 (kg)	437
SP1 (kg)	4,37
W (kg)	174,57

Air entraining agent?

☒ No
☐ Yes

Strength

fc3 (MPa)	
fc7 (MPa)	56,6
fc28 (MPa)	64,4

Buttons: Enter, Modify n°, No batch, Remove, Export, Calibrate, Cancel

Concrete n°	1	2				
G1 (kg)	178,5601	1048,6				
S1 (kg)	753,71	768,99				
C1 (kg)	325	437				
SP1 (kg)	0	4,37				
W (kg)	203,64	174,57				
Total air (%)						
AEA	No	No				
fc1 (MPa)						
fc2 (MPa)						
fc3 (MPa)						
fc7 (MPa)	28,5	56,6				
fc28 (MPa)	35,1	64,4				
fc90 (MPa)						
fc360 (MPa)						

The calibration leads to the following values:
 $p=1,5074$
 $q=0,00663$
 Do you accept these values?

Sim Não

Figura B.3 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado reciclado de concreto.

BétonlabPro 3

File Edition Constituents Selection Calculations Options ?

Calibration

Constituents

G1	materiais camila.cst\ARCO
S1	materiais camila.cst\AREIA
C1	materiais camila.cst\CPV-ARI PLUS
SP1	materiais camila.cst\Master Glenium 51

Calibrate

Cancel

Composition

G1 (kg)	919,1
S1 (kg)	779,4
C1 (kg)	437
SP1 (kg)	4,37
W (kg)	204,58

Enter

Modify n°

No batch

Remove

Export

Air entraining agent?

☒ No

☐ Yes

Strength

fc3 (MPa)	
fc7 (MPa)	46,7
fc28 (MPa)	50,0

Concrete n°	1	2				
G1 (kg)	945,36	919,1				
S1 (kg)	764,42	779,4				
C1 (kg)	325	437				
SP1 (kg)	0	4,37				
W (kg)	234,52	204,58				
Total air (%)						
AEA	No	No				
fc1 (MPa)						
fc2 (MPa)						
fc3 (MPa)						
fc7 (MPa)	22,5	46,7				
fc28 (MPa)	29,5	50				
fc90 (MPa)						
fc360 (MPa)						

The calibration leads to the following values:
 $p=1,1891$
 $q=0,01155$
 Do you accept these values?

Sim Não

Figura B.4 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado reciclado cimentício.

BétonlabPro 3

File Edition Constituents Selection Calculations Options ?

Calibration

Constituents

G1	materiais camila.cst\ARCI
S1	materiais camila.cst\AREIA
C1	materiais camila.cst\CPV-ARI PLUS
SP1	materiais camila.cst\Master Glenium 51

Composition

G1 (kg)	914,9
S1 (kg)	764,48
C1 (kg)	437
SP1 (kg)	4,37
W (kg)	210,12

Enter

Modify n° 2

Batch n° 2

Remove

Export

Air entraining agent?

☒ No

☐ Yes

Strength

fc3 (MPa)	
fc7 (MPa)	39,7
fc28 (MPa)	43,9

Calibrate

Cancel

Concrete n°	1	2				
G1 (kg)	941,4	914,9				
S1 (kg)	749,08	764,48				
C1 (kg)	325	437				
SP1 (kg)	0	4,37				
W (kg)	240,21	210,12				
Total air (%)						
AEA	No	No				
fc1 (MPa)						
fc2 (MPa)						
fc3 (MPa)						
fc7 (MPa)	22,8	39,7				
fc28 (MPa)	28,2	43,9				
fc90 (MPa)						
fc360 (MPa)						

The calibration leads to the following values:
 $p=1,4836$
 $q=0,02692$
 Do you accept these values?

Sim Não

Figura B.5 - Calibração dos parâmetros p e q do agregado reciclado cerâmico.

BétonlabPro 3

File Edition Constituents Selection Calculations Options ?

Calibration

Constituents

G1	materiais camila.cst\VARCE
S1	materiais camila.cst\AREIA
C1	materiais camila.cst\CPV-ARI PLUS
SP1	materiais camila.cst\Master Glenium 51

Calibrate
Cancel

Composition

G1 (kg)	655,2
S1 (kg)	774,35
C1 (kg)	437
SP1 (kg)	4,37
W (kg)	300,06

Enter
Modify n° 2
Batch n° 2
Remove
Export

Air entraining agent?
☒ No
☐ Yes

Strength

fc3 (MPa)	
fc7 (MPa)	19,7
fc28 (MPa)	21,1

Concrete n°	1	2				
G1 (kg)	673,92	655,2				
S1 (kg)	759,22	774,35				
C1 (kg)	325	437				
SP1 (kg)	0	4,37				
W (kg)	332,72	300,06				
Total air (%)						
AEA	No	No				
fc1 (MPa)						
fc2 (MPa)						
fc3 (MPa)						
fc7 (MPa)	9,9	19,7				
fc28 (MPa)	14,7	21,1				
fc90 (MPa)						
fc360 (MPa)						

The calibration leads to the following values:
 $p=0,0426$
 $q=0,02548$
 Do you accept these values?

Sim Não

APÊNDICE C

Figura C.1 - Dosagens com CP V ARI.

Name of constituents

G1	réouverture temporaire.cst\VARCE
G2	réouverture temporaire.cst\VARCI
G3	réouverture temporaire.cst\VARCO
G4	réouverture temporaire.cst\NATURAL
S1	réouverture temporaire.cst\AREIA
C1	réouverture temporaire.cst\CPV-ARI PLUS
SP1	réouverture temporaire.cst\Master Glenium 51

misturas CPV.btl

Composition

G1 (%)	21,5
G2 (%)	36,87
G3 (%)	0
G4 (%)	0
S1 (%)	41,63
C1 (kg/m3)	359,1
SP1 (%)	0,15
Eff. w (kg/m3)	166,1

Air entraining agent?

☒ No

☐ Yes

Environment

Fixed cost

mean % of active alkali in water

maximum % of active alkali in water

Confinement: Cylinder (mm)

$\varnothing$

H

Batch

Optimise

Concrete n°6

Grading

Filling

Concrete n°	1	2	3	4	5	6
G1 (kg/m3)	0	0	0	94,2	175,9	250,9
G2 (kg/m3)	0	0	954,3	820,2	703,2	595,1
G3 (kg/m3)	0	1027,4	0	0	0	0
G4 (kg/m3)	1107,2	0	0	0	0	0
S1 (kg/m3)	757,9	719,7	753,3	750,3	747	743,6
C1 (kg/m3)	266	284,6	302,6	319,4	339,1	359,1
SP1 (kg/m3)	1,33	1,42	1,51	1,6	1,7	1,8
W (kg/m3)	190,8	214,3	219,9	230,1	237,8	244,6
G1 (%)	0	0	0	8	15	21,5
G2 (%)	0	0	58,37	50,37	43,37	36,87
G3 (%)	0	60,78	0	0	0	0
G4 (%)	58,41	0	0	0	0	0
S1 (%)	41,59	39,22	41,63	41,63	41,63	41,63
Saturation amount (%)	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Superplasticizer content (%)	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15
Eff water	182,9	172,8	175,2	172,6	169,3	166,1
Total air (%)	1,7	1,7	1,9	1,9	1,9	2
AEA	No	No	No	No	No	No
G/S ratio	1,461	1,428	1,267	1,219	1,177	1,138
W/eff/C	0,688	0,607	0,579	0,54	0,499	0,463
Environment	X0	X0	X0	X0	X0	X0
C + kA	266	285	303	319	339	359
W/eff / (C + kA)	0,688	0,607	0,579	0,54	0,499	0,463
Specific gravity	2,323	2,247	2,232	2,216	2,205	2,195
Shear yield stress (Pa)	3183	3208	3255	3314	3430	3547
Plastic viscosity (Pa.s)	533	557	545	560	583	606
Slump (cm)	0	0	0	0	0	0
fc7 (MPa)	20,2	23	24,6	25,5	26,3	27
fc28 (MPa)	29,9	30	30	30	30	30
fc90 (MPa)	37,3	35,1	33,7	33,1	32,6	32,2
fc360 (MPa)	45,2	40,5	37,4	36,3	35,2	34,4
Segregation index (confined)	0,992	0,991	0,992	0,992	0,99	0,989
Packing index of unconfined concrete	8,643	8,723	8,688	8,739	8,815	8,891
Packing index of confined concrete	10,502	10,648	10,444	10,501	10,575	10,64
Fines contribution K'f	1,096	1,265	1,339	1,454	1,599	1,756
Coarse gravel contribution K'gg	4,129	4,115	4,393	4,395	4,186	4,166
Packing of unconfined skeleton Ø*	0,8187	0,828	0,8257	0,8276	0,8299	0,8321
Aggregate packing g*	0,7629	0,7696	0,7637	0,7628	0,762	0,7612

Figura C.2 - Dosagens com CP IV.

Name of constituents

G1	réouverture temporaire.cst\ARCE
G2	réouverture temporaire.cst\ARCI
G3	réouverture temporaire.cst\ARCO
G4	réouverture temporaire.cst\NATURAL
S1	réouverture temporaire.cst\AREIA
C1	réouverture temporaire.cst\CP Poz
SP1	réouverture temporaire.cst\Master Glenium 51

misturas CP IV.btl

Composition

G1 (%)	0
G2 (%)	58.37
G3 (%)	0
G4 (%)	0
S1 (%)	41.63
C1 (kg/m3)	330.3
SP1 (%)	0.29
Eff. W (kg/m3)	160.3

Batch

Optimise

Concrete n°6

Grading

Filling

Air entraining agent?

☒ No

☐ Yes

Environnement >0

Fixed cost 0

mean % of active alkali in water 0

maximum % of active alkali in water 0

Confinement: Cylinder (mm)

D 100

H 200

Concrete n°	1	2	3	4	5	6
G1 (kg/m3)	0	0	93	173.1	246.2	0
G2 (kg/m3)	0	0	809.7	691.9	583.7	944.3
G3 (kg/m3)	0	1016.9	0	0	0	0
G4 (kg/m3)	1099	0	0	0	0	0
S1 (kg/m3)	752.3	712.3	740.7	735	729.5	745.4
C1 (kg/m3)	291.4	312	349.2	371.7	394.6	330.3
SP1 (kg/m3)	2.85	3.06	3.42	3.64	3.89	3.19
W (kg/m3)	174.9	198.6	213.3	221.1	228.2	203.4
G1 (%)	0	0	8	15	21.5	0
G2 (%)	0	0	50.37	43.37	36.87	58.37
G3 (%)	0	60.78	0	0	0	0
G4 (%)	58.41	0	0	0	0	0
S1 (%)	41.59	39.22	41.63	41.63	41.63	41.63
Saturation amount (%)	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
Superplasticizer content (%)	0.29	0.29	0.29	0.29	0.3	0.29
Eff water	168.1	158.7	157.9	155.1	152.6	160.3
Total air (%)	1.8	1.7	2	2	2	1.9
AEA	No	No	No	No	No	No
G/S ratio	1.461	1.428	1.219	1.177	1.138	1.267
W/eff/C	0.577	0.509	0.452	0.417	0.387	0.485
Environment	>0	>0	>0	>0	>0	>0
Specific gravity	2.32	2.243	2.209	2.196	2.186	2.227
Shear yield stress (Pa)	2927	2676	2615	2478	2343	2741
Plastic viscosity (Pa.s)	600	600	600	600	600	600
Slump (cm)	0	0	0	0	1.2	0
f _{c7} (MPa)	19.6	22.6	25.3	26.1	26.9	24.3
f _{c28} (MPa)	30	30	30	30	30	30
f _{c90} (MPa)	37.8	35.4	33.3	32.7	32.2	33.9
f _{c360} (MPa)	46	41	36.6	35.5	34.5	37.8
Segregation index (confined)	0.992	0.991	0.991	0.989	0.988	0.992
Packing index of unconfined concrete	8.868	8.868	8.87	8.871	8.871	8.87
Packing index of confined concrete	10.649	10.659	10.479	10.431	10.377	10.508
Fines contribution K _f	1.374	1.586	1.825	2.009	2.204	1.68
Coarse gravel contribution K _{gg}	3.999	3.918	4.133	3.866	3.776	4.185
Packing of unconfined skeleton Ø*	0.8306	0.8403	0.8407	0.8436	0.8462	0.8383
Aggregate packing g*	0.7629	0.7696	0.7628	0.762	0.7612	0.7637

ANEXO A

Tabela A.1 - Dados coletados da literatura.

Referência	F _{ck} (MPa)	E _{ci} (GPa)	Referência	F _{ck} (MPa)	E _{ci} (GPa)
(Roziere <i>et al.</i> , 2023)	27,6	33,7		21	14
	45,01	25,8		30	16,5
(Liang <i>et al.</i> , 2022)	50,12	27,78		34	16
	44,9	41,6		45,2	31,28
(Revilla-Cuesta <i>et al.</i> , 2021)	45,6	36,4		38,6	22,92
	36	25,9		38,1	27,37
	21,8	19,2		39,3	27,77
(Zaben <i>et al.</i> , 2021)	26,1	20,1		38,3	26,3
	27,1	21		32,9	24,3
	34,06	31,7		33,2	23,5
(Deng <i>et al.</i> , 2020)	29,53	24,7		31,3	22,9
	27,72	21,9		28,4	21,6
(Khan <i>et al.</i> , 2020)	27,78	10		28	21,5
(Duarte <i>et al.</i> , 2019)	27,25	18,08		26,5	19,3
	41,8	31,59		23,3	17,1
	34,5	26,7		21,6	17,2
	40	27		21,6	16,5
	34,6	25,9		18	16,2
	40,1	24,3		18,8	15,3
	35,3	31,7	(Gholampour; Gandomi; Ozbakkaloglu, 2017)	16,1	15,1
	18	23,4		13,4	13,8
	15,4	22,6		13,9	14,1
	36,4	28,8		45	30,2
	35,7	28,3		32	27
	44,4	34,2		41,5	30,5
	43,8	32,7		33,5	32
	38,1	24,2		40	28
(Gholampour; Gandomi; Ozbakkaloglu, 2017)	43,4	25,67		40,9	25,1
	36	29,22		50,3	26,4
	29,5	23,72		29,1	20,75
	45,7	29,1		27,5	24,86
	30,1	24,26		29,9	24,4
	40,5	23,99		50,3	30,2
	30,1	24,26		43,1	31,5
	40,5	23,99		40,3	27,2
	42,5	20,35		38	26,7
	33,2	21,45		40,8	25,7
	35,6	23,4		39,2	25,1
	34,6	22,55		43	30,9
	37,3	20,7		37,2	28,9
	18	12,5		33,7	25,3