



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

JOÃO EMANUELL ARAÚJO MARCIANO

**DOSAGEM DE CONCRETO COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL:
Aplicação de curvas granulométricas otimizadas**

Recife
2022

JOÃO EMANUELL ARAÚJO MARCIANO

**DOSAGEM DE CONCRETO COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL:
Aplicação de curvas granulométricas otimizadas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do título de título de mestre em Engenharia Civil.

Área de concentração: Estruturas com Ênfase em Construção Civil.

Orientador: Prof^o. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Recife

2022

Catálogo de Publicação na Fonte. UFPE - Biblioteca Central

Marciano, João Emanuell Araújo.

Dosagem de concreto com resíduos da construção civil: aplicação de curvas granulométricas otimizadas / João Emanuell Araújo Marciano. - Recife, 2022.

146f.: il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, 2022.

Orientação: Arnaldo Manoel Pereira Carneiro.

Inclui referências e apêndices.

1. Resíduos da construção civil; 2. Agregado reciclado misto; 3. Curvas granulométricas; 4. Concreto sustentável. I. Carneiro, Arnaldo Manoel Pereira. II. Título.

UFPE-Biblioteca Central

JOÃO EMANUELL ARAÚJO MARCIANO

**DOSAGEM DE CONCRETO COM RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL:
Aplicação de curvas granulométricas otimizadas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito para obtenção do título de mestre em Engenharia Civil, Área de Concentração Estruturas.

Aprovada em 28/02/2022.

BANCA EXAMINADORA

participação por videoconferência
Prof^o. Dr. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro (Orientador)
Universidade Federal de Pernambuco

participação por videoconferência
Prof^o. Dr^o. Márcio Santos Barata (Examinador Externo)
Universidade Federal do Pará

participação por videoconferência
Prof^a. Dr^a. Karoline Alves de Melo Moraes (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Alagoas

À Deus, meu alicerce. Jesus, pedra angular.

À minha mãe Luciene e minhas irmãs Anny e Luany.

Aos amigos Arnaldo, Jáder, Dhiego e Pedro.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar minha gratidão ao professor Arnaldo Carneiro pela orientação deste trabalho. Sua contribuição foi fundamental para o meu amadurecimento acadêmico e profissional. Sou imensamente grato por toda sabedoria e conhecimento compartilhado.

À Prof.^a Dr.^a Karoline de Melo Moraes, minha gratidão pela minuciosa dedicação na revisão. Seu cuidado e atenção a cada detalhe foram essenciais para a aprimorar a clareza da escrita, a organização das ideias e a aplicação precisa dos conceitos dentro dos conceitos dentro do contexto do tema da dissertação.

Ao Prof. Dr. Márcio Barata, expresso minha sincera gratidão pelo olhar atento e preciso na identificação de aspectos a serem aprimorados, assim como pela assistência na correção desses pontos. Sua habilidade em apontar lacunas e sugerir melhorias foi essencial para o aperfeiçoamento da qualidade deste trabalho.

Às empresas Ciclo Ambiental, Votorantim Cimentos e Pedreira Guarani pelo fornecimento dos materiais necessários.

Ao CNPq e à CAPES pelo apoio financeiro ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil da UFPE, o que possibilitou a realização deste trabalho.

A todos que – direta ou indiretamente – dedicaram parte de seu tempo, conhecimento e apoio, minha profunda gratidão, por contribuírem para que esta pesquisa fosse realizada da melhor forma possível.

*“Numa usina se aprende como a carne
mastiga o osso, se aprende como mãos
amassam a pedra, o caroço;
numa usina se assiste à vitória, de dor
maior, do brando sobre o duro, do grão
amassando a mó;
numa usina se assiste à vitória maior e
pior, que é a de pedra dura furada pelo
suor.”*

*João Cabral de Melo Neto
“O Rio. Encontro com a Usina”
(1953).*

RESUMO

A crescente geração de resíduos da construção civil e a demanda por práticas mais sustentáveis no setor motivaram o desenvolvimento deste estudo, cujo objetivo foi avaliar a viabilidade técnica do uso de agregados reciclados mistos (ARM) na produção de concretos, com base em dosagens formuladas a partir de curvas granulométricas otimizadas. A pesquisa focou na análise da influência da distribuição granulométrica dos agregados — com ênfase nos reciclados — sobre as propriedades mecânicas do concreto, visando contribuir para a formulação otimizada de seus traços. O estudo foi conduzido em duas etapas experimentais. A primeira consistiu em um estudo piloto para seleção da curva granulométrica mais adequada, utilizando modelos matemáticos baseados no modelo de Furnas (1931), em associação com o método de dosagem IPT/EPUSP. Na segunda etapa, experimental, foram produzidos concretos com substituição parcial ou total dos agregados naturais por reciclados — gráúdo (AGR) e miúdo (AMR) — adotando-se um teor de argamassa fixado em 60% e traços 1:3, 1:5 e 1:6, com dosagens realizadas tanto em massa quanto em volume. As curvas dos agregados gráúdos foram definidas por séries geométricas com razões $Pr = 0,70, 0,80, 0,85$ e $0,90$. Foram analisadas quatro composições principais: 100% NAT (referência com agregados naturais), cAGR (substituição apenas do agregado gráúdo), cAMR (substituição apenas do agregado miúdo) e 100% REC (substituição total). Os dados obtidos foram submetidos a análises estatísticas (Shapiro-Wilk, Levene, ANOVA e Kruskal-Wallis com pós-teste de Dunn) para garantir a confiabilidade dos resultados e avaliar a viabilidade técnica do uso dos ARM. A composição cAMR, dosada em volume, apresentou o melhor desempenho técnico, atingindo 39,8 MPa aos 28 dias e 45,4 MPa após 1 ano no traço 1:3, superando os valores da referência (100% NAT), que registrou 37,1 MPa e 42,3 MPa, respectivamente. O uso do AMR mostrou-se mais promissor em comparação ao AGR, reforçando a necessidade da avaliação do potencial técnico dos agregados reciclados mistos na produção de concretos sustentáveis. A abordagem experimental adotada evidenciou a importância do controle granulométrico e contribuiu na compreensão da variabilidade dos resultados.

Palavras-chave: resíduos da construção civil, agregado reciclado misto, curvas granulométricas, concreto sustentável.

ABSTRACT

The growing generation of construction waste and the demand for more sustainable practices in the sector motivated the realization of this study, the purpose of which was to assess the technical feasibility of using mixed recycled aggregates (MRA) in the production of concrete, based on mixes formulated from optimized granulometric curves. The study focused on analyzing the influence of the particle size distribution of aggregates - with an emphasis on recycled aggregates - on the mechanical properties of concrete, with the intention of contributing to the optimized design of concrete mixes. The study was conducted in two experimental stages. The first consisted of a pilot study to select the most optimal particle size curve, using mathematical models based on the Furnas model (1931), in association with the IPT/EPUSP proportioning method. In the second experimental stage, concrete was produced with partial or total replacement of natural aggregates with recycled ones - coarse (AGR) and fine (AMR) - adopting a mortar content set at 60% and mixes of 1:3, 1:5 and 1:6, with the mixes made in both mass and volume. The coarse aggregate curves were defined by geometric series with ratios $Pr = 0.70, 0.80, 0.85$ and 0.90 . Four main compositions were analyzed: 100% NAT (reference with natural aggregates), cAGR (replacement of coarse aggregate only), cAMR (replacement of fine aggregate only) and 100% REC (total replacement). The data obtained was subjected to statistical analysis (Shapiro-Wilk, Levene, ANOVA and Kruskal-Wallis with Dunn's post-test) to ensure the accuracy of the results and evaluate the technical viability of the use of MRAs. The cAMR composition, proportioned by volume, showed the best technical performance, getting 39.8 MPa at 28 days and 45.4 MPa after 1 year in the 1:3, exceeding the reference values (100% NAT), which registered 37.1 MPa and 42.3 MPa, respectively. The use of AMR proved to be more promising than AGR, reinforcing the need to evaluate the technical potential of mixed recycled aggregates in the production of sustainable concrete. The experimental approach adopted highlighted the importance of particle size control and helped to understand the variability of the results.

Keywords: construction and demolition waste, mixed recycled aggregates, particle size distribution, sustainable concrete.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 –	Fluxograma do processo de produção de agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição	29
Figura 2 –	Planta estacionária para cominuição e separação de partículas de RCC, para produção de agregados reciclados	30
Figura 3 –	Disposição em pilhas cônicas de agregado reciclado misto, miúdo e graúdo, em planta de usina de reciclagem na cidade de Recife - PE	31
Figura 4 –	Principais categorias de agregado graúdo reciclado.....	32
Figura 5 –	Forma e textura superficial de agregados naturais e reciclados	42
Figura 6 –	Diagrama esquemático da adesão da fase argamassa à superfície do agregado natural	44
Figura 7 –	Ilustração do “efeito parede” e zona de transição interfacial (ZTI) baseado em Scrivener <i>et al.</i> (2004)	47
Figura 8 –	Ilustração do agregado reciclado de concreto empregado no concreto reciclado	50
Figura 9 –	(a) Relação entre taxa de substituição do agregado graúdo reciclado e resistência à compressão relativa, e (b) análise exploratória via <i>box plot</i>	52
Figura 10 –	Fluxograma das atividades desenvolvidas nos estudos piloto e experimental	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 –	Correlação entre absorção de água e densidade da fração graúda do ARCO e ARM	45
Gráfico 2 –	Correlação entre absorção de água e densidade da fração miúda do ARCO	45
Gráfico 3 –	Distribuição da frequência relativa e acumulada da densidade de partículas de agregados de concreto reciclado 4/32 mm	49
Gráfico 4 –	Curvas granulométricas dos agregados do estudo piloto ..	57
Gráfico 5 –	Curvas granulométricas teóricas	60
Gráfico 6 –	Curva granulométrica teórica 0,85 <i>versus</i> curvas de distribuição granulométrica das composições do estudo experimental	64
Gráfico 7 –	Relação <i>a/c versus</i> MU no estado fresco do estudo piloto	70
Gráfico 8 –	Abatimento de tronco de cone para cada tipo de curva empregada no esqueleto granular dos concretos do estudo piloto	71
Gráfico 9 –	Relação <i>a/c versus</i> MU no estado fresco do estudo experimental em massa	74
Gráfico 10 –	Abatimento de tronco de cone para cada composição do estudo experimental em massa	75
Gráfico 11 –	Relação <i>a/c versus</i> MU no estado fresco do estudo experimental em volume	76
Gráfico 12 –	Abatimento de tronco de cone para cada composição do estudo experimental em volume	77
Gráfico 13 –	Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do estudo piloto aos 28 dias	78
Gráfico 14 –	Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão do estudo piloto a 1 ano	79
Gráfico 15 –	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à	

	compressão do estudo piloto aos 28 dias	80
Gráfico 16 –	Massa específica no estado fresco versus resistência à compressão do estudo piloto a 1 ano	81
Gráfico 17 –	Relação entre os traços do estudo piloto, 28 dias e 1 ano, e resistência à compressão	82
Gráfico 18 –	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias do estudo experimental em massa	83
Gráfico 19 –	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão a 1 ano do estudo experimental em massa	83
Gráfico 20 –	Relação entre os traços do estudo experimental em massa, 28 dias e 1 ano, e resistência à compressão	84
Gráfico 21 –	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias do estudo experimental em volume	85
Gráfico 22 –	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão a 1 ano do estudo experimental em volume	86
Gráfico 23 –	Relação entre os traços do estudo experimental em volume, 28 dias e 1 ano, e resistência à compressão	87
Gráfico 24 –	<i>Box plots</i> para todas as curvas granulométricas aos 28 dias	90
Gráfico 25 –	<i>Box plots</i> para todas as curvas granulométricas a 1 ano	91
Gráfico 26 –	Intervalos de confiança para todas as curvas granulométricas do estudo piloto: a) 28 dias; b) 1 ano	94
Gráfico 27 –	<i>Box plots</i> para as composições do estudo em massa a) 28 dias	106
Gráfico 28 –	<i>Box plots</i> para as composições do estudo experimental em massa b) 1 ano	106

Gráfico 29 –	Intervalos de confiança para todas as composições do estudo experimental em massa: a) 28 dias; b) 1 ano	110
Gráfico 30 –	<i>Box plots</i> para as composições do estudo experimental em volume a) 28 dias; b) 1 ano	117
Gráfico 31 –	Intervalos de confiança para todas as composições do estudo experimental em volume: a) 28 dias; b) 1 ano	121
Gráfico 32 –	Comparação entre resistências à compressão dos concretos dosados em massa <i>versus</i> volume, aos 28 dias e 1 ano	127
Gráfico 33 –	Taxas de absorção das faixas granulométricas 19/25 e 4,75/12,5	139
Gráfico 34 –	Curvas de ajuste do modelo de regressão para os traços a) 1:3 (28 dias); b) 1:5 (28 dias); c) 1:6 (28 dias) e d) 1:6 (1 ano)	144
Gráfico 35 –	Distribuição de probabilidade de ocorrência da resistência à compressão da curva 0,85 nos traços a) 1:3 (28 dias); b) 1:3 (1 ano)	146

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 –	Valores máximos e mínimos de densidade	34
Tabela 2 –	Características do cimento CP II F 40 (dados fornecidos pelo fabricante)	54
Tabela 3 –	Caracterização dos agregados miúdos	56
Tabela 4 –	Caracterização quanto à composição granulométrica de todos os agregados utilizados.....	57
Tabela 5 –	Arranjo experimental para determinação da composição granulométrica ideal do esqueleto granular da fração inerte do concreto	58
Tabela 6 –	Porcentagens passantes das curvas teóricas	59
Tabela 7 –	Coeficiente de uniformidade das curvas granulométricas do estudo piloto	60
Tabela 8 –	Abatimento em função do ajuste do teor de água de mistura	61
Tabela 9 –	Esqueleto granular com base nas porcentagens retida da composição granulométrica teórica 0,85	63
Tabela 10 –	Coeficiente de uniformidade das curvas granulométricas do estudo experimental.....	64
Tabela 11 –	Tipos de trabalhabilidade em função das variações no abatimento	72
Tabela 12 –	Valores de abatimento de tronco (mm) de cone para as misturas variando-se relação a/c para as respectivas composições do estudo experimental em massa	74
Tabela 13 –	Valores de abatimento de tronco (mm) de cone para as misturas variando-se relação a/c para as composições do estudo experimental em volume	76
Tabela 14 –	Valores de resistências à compressão (MPa) por cada traço e curva, nas idades de 28 dias e 1 ano	88
Tabela 15 –	Indicadores estatísticos tradicionais da resistência à	

	compressão em MPa das curvas do estudo piloto, em cada idade	89
Tabela 16 –	<i>p</i> -valor para os testes de normalidade da resistência à compressão do estudo piloto, em cada idade	91
Tabela 17 –	Intervalos de confiança de 95% para a média de resistência à compressão em MPa das curvas do estudo piloto, em cada idade	93
Tabela 18 –	Resultado de homogeneidade do estudo piloto, em cada idade	96
Tabela 19 –	Matriz de correlação do estudo piloto (curva x resistência à compressão), em cada idade	97
Tabela 20 –	Resultados dos testes ANOVA e Kruskal-Wallis do estudo piloto, em cada idade	99
Tabela 21 –	Valores de resistências à compressão (MPa) por cada composição e traço do estudo experimental em massa, nas idades de 28 dias e 1 ano	103
Tabela 22 –	Indicadores estatísticos tradicionais da resistência à compressão em MPa das composições do estudo experimental em massa, em cada idade	104
Tabela 23 –	<i>p</i> -valor para os testes de normalidade da resistência à compressão do estudo experimental em massa, para cada idade	107
Tabela 24 –	Intervalos de confiança de 95% para a média de resistência à compressão em MPa das composições do estudo experimental em massa, para cada idade	108
Tabela 25 –	Resultado de homogeneidade do estudo experimental em massa, para cada idade	111
Tabela 26 –	Resultados dos testes ANOVA e Kruskal-Wallis do estudo experimental em massa, para cada idade	112
Tabela 27 –	Valores de resistências à compressão (MPa) para cada composição e traço do estudo experimental em volume, nas idades de 28 dias e 1 ano	115
Tabela 28 –	Indicadores estatísticos tradicionais da resistência à	

	compressão em MPa das composições do estudo experimental em volume, em cada idade	116
Tabela 29 –	<i>p</i> -valor para os testes de normalidade da resistência à compressão do estudo experimental em volume, para cada idade	118
Tabela 30 –	Intervalos de confiança de 95% para a média de resistência à compressão em MPa das composições do estudo experimental em volume, para cada idade	119
Tabela 31 –	Resultado de homogeneidade do estudo experimental em volume, para cada idade	122
Tabela 32 –	Resultados dos testes ANOVA e Kruskal-Wallis do estudo experimental em volume, para cada idade	123
Tabela 33 –	Intervalos de confiança de 95% para a média de resistência à compressão em MPa das composições do estudo experimental em volume, para cada idade	126
Tabela 34 –	Taxas de absorção de faixas granulométricas adotadas intencionalmente no estudo	139
Tabela 35 –	Proporções de mistura (kg/m ³) dos concretos produzidos no estudo piloto	140
Tabela 36 –	Proporções de mistura (kg/m ³) dos concretos produzidos no estudo experimental em massa	140
Tabela 37 –	Cálculo da compensação de água necessária – dosagem em massa	141
Tabela 38 –	Cálculo da relação água/cimento efetiva – dosagem em massa	141
Tabela 39 –	Proporções de mistura (kg/m ³) dos concretos produzidos no estudo experimental em volume	141
Tabela 40 –	Cálculo da quantidade de compensação de água necessária – dosagem em volume	142
Tabela 41 –	Cálculo da relação água/cimento efetiva – dosagem em volume	142
Tabela 42 –	Resumo das porcentagens dos agregados reciclados nas composições dosadas em massa e volume	142

Tabela 43 –	Modelos de regressão cúbicas para resistência a compressão e razão <i>Pr</i> das curvas granulométricas aos 28 dias e 1 ano	143
Tabela 44 –	Erro padrão e percentual das resistências médias obtidos no estudo piloto em relação às resistências obtidas no estudo experimental	145
Tabela 44 –	Valores de resistência característica obtidos para as a partir do ajuste à distribuição normal das misturas avaliadas	146

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 –	Características requeridas para o AR nas normas e regulamentos nacionais	33
------------	--	----

LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E SIGLAS

ABS	absorção de água
a/c	relação água/cimento
a/ce	relação água/cimento efetiva
AGR	Agregado graúdo reciclado
AMR	Agregado miúdo reciclado
AN	Agregado natural
ANOVA	Análise de Variância
AR	Agregado reciclado
ARA	Agregado reciclado de alvenaria
ARCI	Agregado reciclado cimentício
ARCO	Agregado reciclado de concreto
ARM	Agregado reciclado misto
cAGR	Composição agregado graúdo reciclado
cAMR	Composição agregado miúdo reciclado
CAN	Concreto com agregado natural
CAR	Concreto com agregado reciclado
c-médio	comprimento médio
CP	Corpo de prova
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
CSIRO	Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization
Cu	Coeficiente de uniformidade
DEF	<i>Delayed ettringite formation</i>
e-médio	espessura média
EPUSP	Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
H ₀	Hipótese nula
PIB	Produto Interno Bruto (PIB)
RCD	Resíduos de construção e demolição
RSU	Resíduos sólidos urbanos

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	24
1.1	Objetivos	26
1.1.1	Objetivo geral	26
1.1.2	Objetivos específicos	26
2	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	27
2.1	Agregados reciclados de resíduos da construção civil	27
2.1.1	Processo de fabricação dos agregados reciclados	28
2.2	Composição e classificação dos agregados reciclados	31
2.3	Critérios de qualidade para uso dos agregados reciclados	32
2.3.1	Características físicas dos agregados reciclados	30
2.3.1.1	Densidade	34
2.3.1.2	Absorção de água	35
2.3.1.3	Porosidade	36
2.3.2	Comportamento mecânico dos agregados reciclados	37
2.3.2.1	Abrasão Los Angeles	37
2.3.3	Estabilidade química dos agregados reciclados	38
2.3.3.1	Compostos de enxofre	38
2.3.3.2	Cloretos	39
2.3.3.3	Torrões de argila	39
2.3.3.4	Materiais indesejáveis	40
2.3.4	Propriedades geométricas dos agregados reciclados	40
2.3.4.1	Tamanho do agregado	41
2.3.4.2	Teor de areia reciclada	41
2.3.4.3	Forma e textura superficial	41
2.3.4.4	Teor de finos	43
3	PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS	43
3.1	Propriedades do concreto no estado fresco usando agregados reciclados	44
3.1.1	Influência da absorção do agregado reciclado na demanda de água do concreto	44
3.1.1.1	Compensação de água de mistura	46

3.1.2	Efeito parede	46
3.1.3	Trabalhabilidade	48
3.2	Propriedades do concreto reciclado no estado endurecido	49
3.2.1	Resistência mecânica dos concretos com agregados reciclados	50
4	MATERIAIS E MÉTODO	54
4.1	Materiais utilizados na dosagem dos concretos	54
4.1.1	Cimento	54
4.1.2	Agregados	55
4.1.2.1	Agregados graúdos	55
4.1.2.2	Agregados miúdos	56
4.2	Método de dosagem	58
4.2.1	Estudo piloto	58
4.2.2	Estudo experimental	62
4.3	Análise estatística	67
4.3.1	Normalidade	67
4.3.2	Homogeneidade	67
4.3.3	Estatística paramétrica	67
4.3.3.1	ANOVA e pós-teste de Tukey	68
4.3.4	Estatística não-paramétrica	69
4.3.4.1	Kruskal-Wallis e pós-teste de Dunn	69
5	ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS	70
5.1	Estado fresco	70
5.1.1	Estudo piloto	70
5.1.1.1	Relação <i>a/c versus</i> massa unitária no estado fresco do estudo piloto	70
5.1.1.2	Abatimento do tronco de cone do estudo piloto	70
5.1.2	Estudo experimental em massa	73
5.1.2.1	Relação <i>a/c versus</i> massa específica no estado fresco do estudo experimental em massa	73
5.1.2.2	Abatimento do tronco de cone do estudo experimental em massa	74
5.1.3	Estudo experimental em volume	75
5.1.3.1	Relação <i>a/c versus</i> massa específica no estado fresco do estudo experimental em volume	75

5.1.3.2	Abatimento do tronco de cone do estudo experimental em volume	76
5.2	Estado endurecido	78
5.2.1	Estudo piloto	78
5.2.1.1	Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão aos 28 dias do estudo piloto	78
5.2.1.2	Relação <i>a/c versus</i> resistência à compressão a 1 ano do estudo piloto	78
5.2.1.3	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias do estudo piloto	79
5.2.1.4	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão a 1 ano do estudo piloto	80
5.2.1.5	Traço do estudo piloto em massa <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano	81
5.2.2	Estudo experimental em massa	82
5.2.2.1	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano do estudo experimental em massa	82
5.2.2.2	Traços do estudo experimental em massa <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano	84
5.2.3	Estudo experimental em volume	85
5.2.3.1	Massa específica no estado fresco <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano do estudo experimental em volume	85
5.2.3.2	Traços do estudo experimental em volume <i>versus</i> resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano	86
5.3	Análise estatística	88
5.3.1	Análises Estatísticas do estudo piloto	88
5.3.1.1	Indicadores estatísticos do estudo piloto	89
5.3.1.2	Normalidade do estudo piloto	91
5.3.1.3	Intervalos de confiança do estudo piloto.....	93
5.3.1.4	Homogeneidade do estudo piloto	96
5.3.1.5	Correlação do estudo piloto.....	97
5.3.1.6	A influência da curva granulométrica e traço na resistência à compressão do estudo piloto	98
5.3.2	Análises Estatísticas do estudo experimental em massa	103

5.3.2.1	Indicadores estatísticos do estudo experimental em massa	104
5.3.2.2	Normalidade do estudo experimental em massa	107
5.3.2.3	Intervalos de confiança do estudo experimental em massa	108
5.3.2.4	Homogeneidade do estudo experimental em massa	111
5.3.2.5	A influência da composição e traço na resistência à compressão do estudo experimental em massa	112
5.3.3	Análises Estatísticas do estudo experimental em volume	115
5.3.3.1	Indicadores estatísticos do estudo experimental em volume	116
5.3.3.2	Normalidade do estudo experimental em volume	118
5.3.3.3	Intervalos de confiança do estudo experimental em volume	119
5.3.3.4	Homogeneidade do estudo experimental em volume	122
5.3.3.5	A influência da composição e traço na resistência à compressão do estudo experimental em volume	122
6	CONCLUSÕES	128
	REFERÊNCIAS	132
	APÊNDICE A – TAXA DE ABSORÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO GRAÚDO	139
	APÊNDICE B – PROPORÇÕES DE MISTURA DOS CONCRETOS PRODUZIDOS	140
	APÊNDICE C – PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DO ESTUDO PILOTO	143

1 INTRODUÇÃO

A construção civil, além de ser uma das principais responsáveis pela geração de grandes volumes de resíduos oriundos de atividades de construção e demolição, também se destaca pelo elevado consumo de recursos naturais não renováveis. Esse cenário tem provocado impactos ambientais significativos, contribuindo diretamente para a degradação do meio ambiente. Nas últimas décadas, a geração de resíduos sólidos da construção tem se intensificado em decorrência do rápido crescimento das obras de infraestrutura, agravado, em grande parte, pela ineficiência na gestão e destinação adequada desses resíduos em muitos países, especialmente em contextos urbanos em expansão (MAH; FUJIWARA; HO, 2016).

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil, publicado pela ABRELPE (2021), em 2020 foram coletadas aproximadamente 47 milhões de toneladas de Resíduos da Construção Civil (RCC) pelos municípios brasileiros. Esse volume representa um aumento de 5,5% em relação ao levantamento anterior e corresponde a uma média de 221,2 kg de RCC por habitante ao ano, evidenciando a expressiva geração de resíduos no setor e a necessidade de medidas mais eficazes de gestão e reaproveitamento desses materiais.

O Brasil apresenta uma das maiores taxas de geração de resíduos da construção civil no mundo, com valores que variam entre 230 e 760 kg por habitante/ano, segundo o IPEA (2012). Para fins comparativos, outros países apresentam índices consideravelmente inferiores, como os Estados Unidos (136–171 kg/hab/ano), Alemanha (79–300), Japão (99), Itália (35–40) e Portugal (3,2–4,4). Esses dados reforçam o cenário preocupante da geração de resíduos no Brasil e a necessidade de medidas mais eficazes de controle e reaproveitamento.

Os números evidenciam a sobrecarga que os resíduos da construção civil (RCC) impõem aos sistemas de limpeza urbana. Quando dispostos de forma inadequada, esses resíduos geram impactos negativos de ordem estética, ambiental e sanitária, comprometendo a qualidade do espaço urbano e a saúde pública. Segundo a Resolução CONAMA nº 307/2002 (BRASIL, 2005b), estima-se que, no Brasil, os RCC possam representar entre 50% e 70% da massa total dos resíduos sólidos

urbanos (RSU), reforçando a urgência de estratégias eficientes de gestão e destinação para esses materiais.

Os resíduos provenientes das atividades de construção e demolição são majoritariamente gerados em áreas urbanas, onde há constante demanda por novas habitações. Nesse contexto, há uma pressão social crescente para a redução das distâncias de transporte entre os locais de produção e de consumo de materiais, com o objetivo de minimizar as emissões de CO₂ e o impacto do tráfego de caminhões pesados sobre a infraestrutura viária urbana. O reaproveitamento do RCC em novas construções surge, portanto, como uma alternativa estratégica, viabilizando tanto a "exportação" quanto a "importação" de materiais reciclados dentro do próprio meio urbano (LARRARD; COLINA, 2019).

Embora o uso de resíduos da construção civil seja estudado há mais de meio século, a utilização de agregados naturais ainda predomina, principalmente devido ao baixo custo desses materiais. Conseqüentemente, a inserção de agregados reciclados na escala produtiva ainda encontra resistência, motivada não apenas pelo custo reduzido de disposição do RCC em aterros sanitários, mas também pela ausência de atualizações nas regulamentações técnicas vigentes. Além disso, os agregados reciclados podem conter impurezas potencialmente deletérias ao concreto de cimento Portland, o que reforça a necessidade de atendimento aos limites estabelecidos pelas normas técnicas para garantir a qualidade e segurança das aplicações (PACHECO-TORGAL, 2013).

Nos últimos vinte anos, os estudos sobre resíduos da construção civil têm concentrado atenção na aplicação dos agregados reciclados mistos (ARM) — materiais que contêm, além de partículas de concreto, frações cerâmicas e pequenas quantidades de contaminantes, como madeira, gesso, asfalto, vidro e plástico. Diversas pesquisas indicam que a presença desses componentes pode comprometer as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto. No entanto, os ARM podem ser utilizados de forma viável, desde que sua qualidade seja previamente avaliada e controlada, atendendo aos critérios estabelecidos por normas técnicas e exigências de desempenho específicas. (AGRELA; ALAEJOS; JUAN, 2013).

Com o propósito de contribuir para o avanço do conhecimento acerca do uso de agregados reciclados na produção de concreto, este trabalho foi conduzido sob a perspectiva do proporcionamento racional de misturas, com base em curvas granulométricas otimizadas. Para tanto, foram utilizados resíduos da construção civil (RCC) como substitutos tanto da fração miúda quanto da graúda dos agregados convencionais. Optou-se por empregar o material exatamente como disponibilizado pela usina de reciclagem, a fim de avaliar sua influência direta sobre as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo geral

Estudar a influência da distribuição granulométrica dos agregados utilizados na construção civil — com ênfase no agregado reciclado misto — sobre as propriedades mecânicas do concreto, por meio de curvas granulométricas geradas a partir de modelo matemático, com o objetivo de contribuir para a formulação otimizada de traços que atendam aos requisitos de desempenho desejado.

1.1.2 Objetivos específicos

1. Estudar o efeito da variação do perfil da curva granulométrica no esqueleto granular dos concretos, gerados por modelo matemático baseado no somatório de uma série geométrica dos diâmetros das partículas constituintes;
2. Realizar estudos de análise de variância, com base nos resultados de resistência à compressão axial, para avaliar o desempenho de concretos produzidos com diferentes teores de substituição dos agregados naturais (graúdos e miúdos) por reciclados;

2. RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

Atualmente, há uma ênfase crescente na melhoria na reciclagem dos resíduos da construção civil. Com a mobilização global em favor da proteção ambiental e da adoção de práticas sustentáveis, um número crescente de pesquisas vem sendo conduzido para aprofundar o entendimento dos mecanismos, bem como das propriedades mecânicas, físicas e químicas dos agregados reciclados. (WANG, 2021).

2.1 Agregados reciclados de resíduos da construção civil

Segundo a NBR 15116 (ABNT, 2021), o agregado reciclado (AR) é um material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção classe A: “que pela Resolução nº 307 do CONAMA (BRASIL, 2002), são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados”, com características técnicas para aplicação em obras de engenharia, classificados pela norma em subcategorias de acordo com a predominância de seus materiais constituintes.

Ainda conforme à NBR 15116 (ABNT, 2021), os agregados reciclados são classificados em diferentes tipos com base nos materiais predominantes em sua composição:

- **Agregado Reciclado de Concreto (ARCO):** Constituído predominantemente por resíduos de concreto;
- **Agregado Reciclado Cimentício (ARCI):** Composto principalmente por materiais cimentícios diversos, como concreto, argamassas, blocos pré-moldados de concreto, entre outros. Esse agregado pode conter também uma pequena quantidade de cerâmica vermelha;
- **Agregado Reciclado Misto (ARM):** Formado por uma mistura de materiais cimentícios (como concreto, argamassas e blocos pré-moldados de concreto) e materiais cerâmicos (como blocos e telhas de cerâmica vermelha).

Uma outra classificação que a norma apresenta a respeito dos agregados reciclados no contexto da distribuição granulométrica dos agregados reciclados é a de Agregado reciclado total.

- **Agregado reciclado total:** resultante do beneficiamento de resíduos cuja distribuição granulométrica é constituída por agregados graúdos e miúdos, permitindo o ajuste da curva granulométrica em função das características do agregado e do produto a ser preparado com esse material.

Para serem utilizados na formulação de novos concretos, os agregados reciclados devem estar em conformidade a requisitos técnicos, expressos em normas e regulamentos, estando potencialmente livres de contaminantes (MULDER *et al.*, 2007). Em geral, a qualidade do agregado reciclado depende da qualidade do concreto original do qual foi obtido (GRDIC *et al.*, 2010).

Os agregados reciclados não contêm apenas os agregados originais, mas também a pasta de cimento hidratada que aderiu à sua superfície, tornando a pasta de ARs mais porosa que a dos agregados naturais. Os ARs são caracterizados como um tipo de agregado com maior porosidade, maior absorção de água, menor densidade e menor resistência mecânica em comparação aos agregados naturais (AN) (GESOGLU *et al.*, 2015).

2.1.1 Processo de fabricação dos agregados reciclados

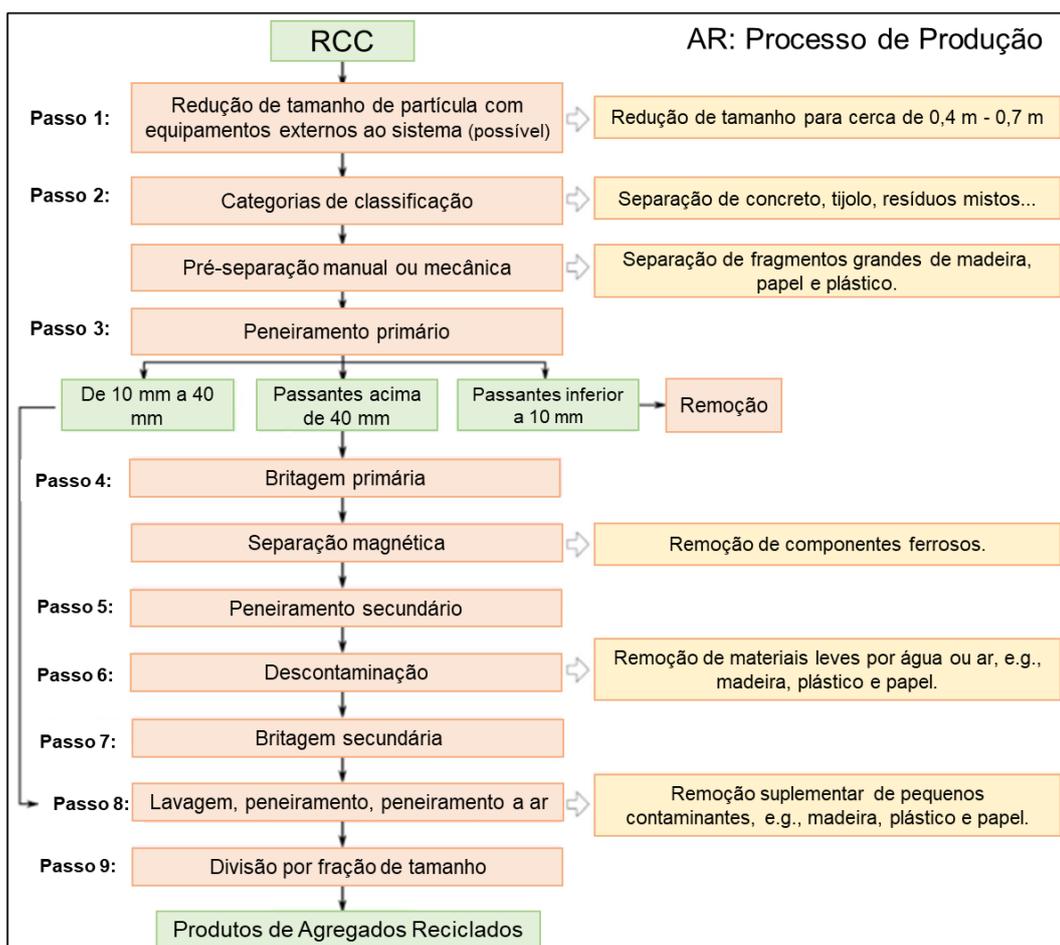
Existem principalmente dois tipos de unidades de processamento dos resíduos da construção civil. Esses resíduos são tratados em instalações móveis ou estacionárias. As plantas móveis geralmente operam no local da demolição e precisam ser transportados até o local de processamento. As plantas estacionárias são empregadas onde a quantidade de resíduos da construção é alta, por exemplo, em grandes centros ou complexos urbanos. Em alguns casos, as usinas estacionárias operam em paralelo à extração e ao processamento de agregados naturais em pedreiras (MÜLLER; MARTINS, 2022).

A Figura 1 ilustra as várias etapas do processo de produção dos agregados reciclados, que Wang (2021) sequencia em nove passos, a partir da **(1)** redução de tamanho dos fragmentos maiores por meio de britador hidráulico ou martelo pneumático, seguido pela **(2)** pré-separação de materiais como aço, madeira, plástico e papel. Após isso, realiza-se um **(3)** peneiramento primário para remover partículas menores, como solo e gesso. Por meio da **(4)** cominuição primária, os resíduos são reduzidos ainda mais e os materiais ferrosos são removidos

magneticamente. O quinto passo **(5)** contempla peneiramento secundário, com graduação de 10 mm, remove com maior precisão contaminantes como solo e gesso. Em **(6)**, tem-se a descontaminação para remoção de componentes leves, no passo **(7)**, a cominuição final reduz ainda mais o tamanho dos resíduos. O passo **(8)** inclui lavagem, peneiramento e peneiramento ao ar que visa eliminar os contaminantes remanescentes, antes do último passo, **(9)** ocorre a separação final dos agregados em diferentes frações de tamanhos.

Wang (2021) ainda destaca que no processo de peneiramento primário (etapa 3), a fração 10 mm/40 mm do peneiramento primário pode ser movida diretamente para a etapa de lavagem final, passo **(8)**. As frações acima de 40 mm devem passar por cominuição adicional. E frações abaixo de 10 mm descartada, compostas principalmente por solo e gesso, devem ser descartadas.

Figura 1 – Fluxograma do processo de produção de agregados reciclados a partir de resíduos de construção e demolição



Fonte: Wang, 2021.

A Figura 2 apresenta de planta estacionária, onde ocorre pesagem, esvaziamento das caçambas em área de transbordo e triagem para remoção de possíveis contaminantes. Então o resíduo passa pelo processo de britagem e separação balística dos agregados reciclados em faixas de tamanho padronizadas, a serem comercializados na Região Metropolitana do Recife (RMR) (AMBIENTAL, 2021).

Figura 2 – Planta estacionária para cominuição e separação de partículas de RCC, para produção de agregados reciclados



Fonte: Elaboração própria

Tecnologias mais sofisticadas para o tratamento dos RCC podem ser implementadas em plantas estacionárias, a exemplo da produção de diferentes grupos de tamanho de partículas por peneiramento vibratório. A classificação dimensional agregados reciclados da construção civil são classificados de acordo com o tamanho de partícula. As mesmas faixas granulométricas que são utilizadas para classificar agregados naturais se aplicam aos agregados reciclados (MÜLLER; MARTINS, 2022).

A Figura 3 ilustra os agregados reciclados a partir de resíduos da construção civil provenientes da RMR, dispostos em pilhas cônicas, nas frações graúdas e miúda, respectivamente. Os resíduos são constituídos por uma mistura de materiais cimentícios e materiais cerâmicos, e classificados pela NBR 15116 (ABNT, 2021) como agregados reciclados mistos.

Figura 3 – Disposição em pilhas cônicas de agregado reciclado misto, miúdo e graúdo, em planta de usina de reciclagem na cidade de Recife - PE



a) Agregado graúdo reciclado

b) agregado miúdo reciclado

Fonte: Elaboração própria

2.2 Composição e classificação dos agregados reciclados

Os resíduos da construção civil podem ser classificados em dois grandes grupos principais: agregados reciclados de concreto e agregados reciclados mistos. O ARCO é obtido por meio da britagem seletiva de concreto antigo, representando aproximadamente 40% do total de RCC. Por sua vez, o ARM é obtido de uma combinação de concreto, materiais de alvenaria, como tijolos e telhas, além de componentes menores, incluindo gesso, madeira, plástico e vidro, representando os 60% restantes (MARTÍN-MORALES et al., 2013).

A composição do agregado reciclado pode afetar diretamente o comportamento mecânico do concreto. Componentes indesejáveis, como gesso, asfalto e vidro, têm potencial danoso ao concreto, geralmente resultam de uma seleção e limpeza inadequada dos RCC na origem. A triagem manual do agregado deve ser aprimorada, pois a inspeção visual, que se baseia apenas na aparência externa dos grãos, não é suficientemente precisa (ANGULO et al., 2004; ANGULO e MÜELLER, 2009).

Conforme apontado por Khatib (2005), a reação pozolânica, atribuída ao teor de sílica e alumina presente no material cerâmico e os produtos da hidratação do cimento, podem levar a um aumento na taxa de desenvolvimento da resistência do concreto entre 28 e 90 dias. Entretanto, a porosidade do material cerâmico pode causar efeitos adversos.

Nas últimas décadas, os estudos tiveram como foco a aplicação de agregados reciclados mistos. Agregados que podem apresentar em sua composição além de material cerâmico e cimentício pode conter partículas de argila, gesso, material betuminoso, vidro, matéria orgânica, dentre outros. O ARM pode ser utilizado na formulação de concretos, desde que parâmetros sejam controlados, para garantia de melhor desempenho em uso e durabilidade (MAS *et al.*, 2011).

A categoria do agregado reciclado é definida, por exemplo, pela composição estrutural da construção demolida e pela tecnologia de produção utilizada no processamento dos resíduos. A Figura 4 ilustra como os agregados reciclados podem ser classificados em concreto reciclado, cerâmico reciclado e reciclado misto. Além disso, diversos materiais, como blocos de madeira, fragmentos de papel, plásticos e outros resíduos, podem estar presentes nos agregados reciclados (BAI *et al.*, 2020).

Figura 4 – Principais categorias de agregado graúdo reciclado



Fonte: Bai *et al.*, 2020.

2.3 Critérios de qualidade para uso dos agregados reciclados

As propriedades dos agregados reciclados apresentam significativa heterogeneidade, influenciada por diversos fatores. Entre os principais estão a origem dos agregados (MARINKOVIÇ *et al.*, 2010), o método de cominuição utilizado nas usinas de reciclagem para produção de agregados de RCC (KATZ, 2003; MAS *et al.*, 2011; PADMINI *et al.*, 2009) e a escassez de informações de confiáveis sobre a qualidade dos resíduos da construção civil (OIKONOMOU, 2005).

Os critérios de qualidade exigidos para o uso de agregados reciclados em concreto estrutural devem ser equivalentes aos estabelecidos para agregados naturais. Isso significa que os agregados reciclados devem atender às mesmas especificações

físicas e químicas convencionais (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013). As propriedades dos agregados podem ser categorizadas da seguinte forma:

- física: mecânica e geométrica; e
- química.

2.3.1 Características físicas dos agregados reciclados

Conforme observado no Quadro 1, a densidade do material seco em estufa e a absorção são as propriedades presentes em praticamente todas as normas referentes a agregados reciclados. Já características como densidade aparente, massa específica e perda ao fogo são avaliadas com menor frequência pelas normas internacionais.

Quadro 1 – Características requeridas para o AR nas normas e regulamentos nacionais

Escopo	Normas/Diretrizes	Densidade seca estufa	Densidade superfície seca	Densidade aparente	Massa específica	Absorção	Perda ao fogo
Austrália	CSIRO		○◇	○◇	○◇	○◇	○
Bélgica	PTV-406	○ □				○ □	
Brasil	NBR 15116					○◇	
China	DG/TJ07/008	○				○	
Dinamarca	DS 2426	○	◇				
Europa	EN 12620	○					
Alemanha	DIN 4226-100	○ □ ◇				○ □ ◇	
Hong Kong	WBTC 12	○				○	
Itália	NTC	○					
Japão	JIS A 5021 /5022/5023	○				○	
Coréia	KS F2573				○	○	
Países Baixos	NEN 5905 CUR	○ □				○	
Noruega	NB 26	○	○◇	◇		○	◇
Portugal	LNEC E471			○	◇	○	◇
Espanha	EHE-08					○	
Reino Unido	BS 8500-2 RILEM	○ □				○ □	
○ ARC □ ARA ◇ ARM							

Fonte: Martín-Morales *et al.*, 2013

A densidade e a absorção de água são as características mais presentes nas normas e regulamentos, independentemente do tipo de agregado reciclado. A

porosidade, apesar de não aparecer nas normas nacionais, é uma propriedade importante do AR, que tem sido estudada por vários pesquisadores, e apresenta correlação com a densidade e a absorção (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013)..

2.3.1.1 Densidade

O agregado reciclado apresenta sempre uma densidade inferior à do agregado natural, devido à presença de argamassa aderida ao agregado primário, materiais cerâmicos e outras impurezas como o gesso. Essa menor densidade resulta em uma redução da trabalhabilidade e em um maior consumo de água no estado fresco. No estado endurecido, isso leva a produção de concretos com resistência mecânica e durabilidade reduzidas (KATZ, 2003; SIM e PARK, 2011).

A Tabela 1 apresenta valores típicos de densidade dos agregados reciclados, compilados por Martín-Morales *et al.* (2013) a partir das referências consultadas. A Tabela apresenta valores máximo e mínimo de densidade, a depender do tipo de AR (*all-in-one**, representa agregado graúdo e miúdo).

Tabela 1 – Valores máximos e mínimos de densidade

Densidade	Agregado	Mínimo (kg/m ³)	Máximo (kg/m ³)
Densidade seca em estufa	<i>all-in-one</i> *	2045 (WRAP, 2007)	2620 (Tam & Le, 2007)
	graúdo	1170 (Limbachiya <i>et al.</i> , 2000)	2760 (Ângulo e Müller, 2009)
	miúdo	1913 (Evangelista & Brito)	2500 (Martín-Morales <i>et al.</i> , 2011)
Densidade superfície seca (10 min)	<i>all-in-one</i>	2470 (Gonzalez-Fonteboa & Martínez-Abella, 2005)	2480 (Gonzalez-Fonteboa & Martínez-Abella, 2005)
	graúdo	2070 (Agrela <i>et al.</i> , 2011)	2450 (Fonseca <i>et al.</i> , 2011)
Densidade superfície seca (24 h)	<i>all-in-one</i>	1940 (WRAP, 2007)	2650 (WRAP, 2007)
	graúdo	2060 (Agrela <i>et al.</i> , 2011)	2678 (Zhu <i>et al.</i> , 2011)
	miúdo	1310 (Barbudo <i>et al.</i> , 2012)	2650 (Barbudo <i>et al.</i> , 2012)
Densidade aparente	<i>all-in-one</i>	1427 (Padmini <i>et al.</i> , 2009)	1568 (Padmini <i>et al.</i> , 2009)
	graúdo	1060 (Lovato <i>et al.</i> , 2012)	2730 (Angulo <i>et al.</i> , 2004)
	miúdo	1010 (Debieb & Kenai, 2008)	1530 (Miranda & Selmo, 2006)
	finos	1320 (Miranda & Selmo, 2006)	-

	<i>all-in-one</i>	2380 (Padmini <i>et al.</i> , 2009)	2670 (Tam & Le, 2007)
	gráudo	1860 (Becerra Cabral <i>et al.</i> , 2010)	2890 Bairagi <i>et al.</i> , 2010)
Massa específica	miúdo	1850 (Müller, 2004)	2680 (Miranda & Selmo, 2006)
	finos	2600 (Miranda & Selmo, 2006)	-

Fonte: Martín-Morales *et al.*, 2013

De acordo com diversos estudos (CABRAL *et al.*, 2010; ETXEBERRIA e VAZQUEZ, 2010; KOU *et al.*, 2011a,b; PADMINI *et al.*, 2009; POON *et al.*, 2007; WRAP, 2007), há uma aparente correlação entre a densidade e o tamanho dos grãos, sendo a densidade maior conforme aumenta o tamanho do agregado. Além disso, observa-se que os agregados reciclados de concreto apresentam densidades superiores às dos agregados reciclados mistos (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013).

2.3.1.2 Absorção de água

A absorção de água é a relação entre a água requerida para preencher uma amostra porosa e sua massa seca. Em contato com a água ou pasta de cimento fresca, os agregados reciclados podem absorver mais água que os agregados naturais, uma vez que a pasta de cimento endurecida é altamente porosa, fazendo com que o AR possua porosidade da ordem de 10 a 20 vezes maior que a do AN (THÉRÉNÉ *et al.*, 2020). Uma maior quantidade de agregados absorve uma maior quantidade de água de mistura, promovendo uma redução na relação água/cimento efetiva.

Os agregados reciclados têm uma maior capacidade de absorção de água em comparação aos agregados naturais, principalmente devido aos poros capilares abertos. A taxa de absorção é alta nos primeiros minutos de contato com a água, diminuindo gradualmente até a saturação. Geralmente, após 10 minutos, a absorção é de 85 a 90% da absorção após 24 horas, o que torna as medições rápidas confiáveis mesmo com tempos de medição curtos. Além disso, frações finas absorvem mais água do que frações grossas, devido à maior área de superfície e à presença de partículas ricas em pasta de cimento (MÜLLER; MARTINS, 2022).

Maiores valores de absorção e densidade são obtidos à medida que o tamanho das partículas diminui (BARBUDO *et al.*, 2012; CORINALDESI e MORICONI, 2009;

DEBIEB e KENAI, 2008; MÜELLER, 2004; POON e CHAN, 2007). Dessa forma, valores de absorção aumentam na seguinte ordem: materiais cerâmicos, seguidos pelos agregados de alvenaria e de concreto (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013).

Embora diferentes tipos de agregados apresentem variações, o coeficiente de absorção do agregado total reciclado, medido após 24 horas, variou entre 0,57% e 13,2% (TAM e LE, 2007; WRAP, 2007). Para a fração graúda do agregado reciclado, os valores oscilaram de 1,21% (ANGULO *et al.*, 2004) a 15,62% (CABRAL *et al.*, 2010). Já para a fração miúda, a absorção variou entre 2,0% (MIRANDA e SELMO, 2006) e 30,9% (POON e CHAN, 2007). No caso da fração graúda de agregados reciclados de material cerâmico sanitário e elétrico, a taxa de absorção de água foi inferior a 1% devido à maior compactação desses materiais (MEDINA *et al.*, 2012; SENTHAMARAI *et al.*, 2011).

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021) limita em 7% a absorção de água para a classe agregado reciclado de concreto (ARCO) graúdo, e em 12% a absorção para as classes agregado reciclado cimentício (ARCI) e agregado reciclado misto (ARM), miúdo.

2.3.1.3 Porosidade

Os poros dos agregados apresentam grande variação em suas dimensões, sendo alguns totalmente internos, enquanto outros apresentam aberturas para a superfície das partículas. A água pode penetrar nos poros em quantidade e velocidade de penetração determinadas pelas dimensões, continuidade e volume total de poros. A porosidade dos agregados contribui sobremaneira com a porosidade total do concreto, visto que correspondem a cerca de 75% do volume de concreto (NEVILLE, 2016).

A porosidade é um fator decisivo na resistência a compressão. No caso do concreto com agregados reciclados, a porosidade é formada durante a hidratação, devido ao excesso de água não utilizada. Ela também é introduzida pela pasta de cimento antiga endurecida dos agregados reciclados (MÜLLER; MARTINS, 2022).

A porosidade está diretamente relacionada à densidade e à absorção dos agregados. Valores de porosidade de 59,54% foram encontrados para agregados

reciclados de materiais cerâmicos (DEBIEB e KENAI, 2008). Em contraste, para o material cerâmico sanitário, foram registrados valores significativamente inferiores, da ordem de 0,32% (MEDINA *et al.*, 2012).

Para os agregados de concreto e de alvenaria, as diferenças de porosidade não são significativas: a porosidade do agregado reciclado de concreto (ARCO) é de 8,45% (KOU *et al.*, 2011a), enquanto a porosidade dos agregados reciclados de alvenaria (ARA) varia entre 9,13% e 14,86% (ETXEBERRIA e VAZQUEZ, 2010; GÓMEZ-SOBERÓN, 2002; GONZÁLEZ-FONTEBOA e MARTÍNEZ-ABELLA, 2008; KOU *et al.*, 2011b; POON *et al.*, 2007).

Katz (2003) afirma que a porosidade do AR aumenta significativamente quando a quantidade de pasta de cimento é maior e o tamanho do agregado é menor.

2.3.2 Comportamento mecânico dos agregados reciclados

As propriedades mecânicas dos resíduos que compõem os agregados reciclados impactam diretamente o desempenho mecânico do concreto produzido a partir desses materiais. O desempenho mecânico do agregado reciclado é determinado principalmente em função do coeficiente de abrasão Los Angeles, resistência ao esmagamento e ensaios de durabilidade. Os resultados dos testes realizados na fração graúda são aplicados à fração fina. (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013).

O coeficiente de abrasão Los Angeles está incluso na maioria das normas europeias e coreanas. Em menor grau, ensaios de durabilidade aparecem nas demais normas nacionais.

2.3.2.1 Abrasão Los Angeles

No processo de Los Angeles, o desgaste de materiais é causado por abrasão e impacto. Para realizar o teste, uma amostra é colocada em um cilindro rotativo junto com esferas de aço, que provocam a fragmentação do material. Após o término do processo, a perda de massa da amostra é medida utilizando uma peneira com malha específica, e essa perda é relacionada à massa inicial da amostra, permitindo avaliar sua resistência ao desgaste (MÜLLER; MARTINS, 2022).

Devido à presença de argamassa aderida, o agregado reciclado apresenta valores mais elevados de abrasão no ensaio Los Angeles em comparação ao agregado natural (DOMINGO-CABO *et al.*, 2009), com variações entre 29 e 53 para o AR *all-in-one* (agregado miúdo e graúdo) (PADMINI *et al.*, 2009; WRAP, 2007). Para a fração graúda isolada, os valores variam de 17,4 a 44 (MAS *et al.*, 2011). Devido à baixa resistência à fragmentação, os agregados reciclados cimentícios apresentam baixos coeficientes de abrasão Los Angeles (IHOBE, 2011)

2.3.3 Estabilidade química dos agregados reciclados

Existem produtos químicos potenciais ao desencadeamento de reações danosas ao concreto, promovendo sua deterioração e a corrosão das armaduras, e por isso devem ter seus teores limitados. Com maior frequência, nas diversas normas e recomendações técnicas observa-se a verificação no tocante ao teor de cloretos e sulfatos presentes nos agregados reciclados (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013).

2.3.3.1 Compostos de enxofre

A degradação do concreto devido a reações químicas entre o cimento Portland hidratado e íons sulfato provenientes de fontes externas pode ocorrer de duas formas distintas, dependendo tanto da origem dos íons sulfato na água de contato quanto da composição da pasta de cimento. O ataque por sulfato se manifesta por meio de reações que causam expansão e fissuração, comprometendo a durabilidade do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Partículas de gesso de construção podem conferir concentrações significativas de sulfatos aos agregados reciclados, com potencial deletério associado. Estudo termogravimétrico realizado por IHOBE (2011) detectou gesso, etringita e portlandita, admitindo ser devido à alta solubilidade dos sulfatos presentes nos agregados reciclados, indicando uma estreita correlação entre os teores de gesso granular e sulfato, sob qualquer forma.

Os resíduos de construção e demolição contêm pasta de cimento aderida e gesso, que, após o processo de cominuição, introduzem teores significativos de sulfato nos agregados reciclados. O ataque por sulfatos é um processo de deterioração no qual

os sulfatos se dissolvem em meio aquoso e reagem com aluminatos de cálcio hidratados, resultando na formação de etringita secundária (NEVILLE, 2016).

Conforme constatado em diferentes estudos, agregados reciclados mistos podem apresentar teores de compostos totais que variam entre 0,003% a 6,0%. Valores de sulfatos solúveis em ácido entre 0,00% (WRAP, 2007) e 6,98% (MAS *et al.*, 2011), enquanto os solúveis em água entre 0,00% a 3,93% (BARBUDO *et al.*, 2012). Os maiores teores foram observados em agregados reciclados que estiveram em contato com o gesso, devido à sua alta solubilidade em meio alcalino (IHOBE, 2011).

2.3.3.2 Cloretos

A penetração de íons cloretos, juntamente com a carbonatação, compõem uma das principais causas da despassivação das armaduras de aço no concreto. Em ambientes com umidade, a presença de cloretos no agregado pode acelerar o processo corrosivo dessas armaduras. Diferentemente dos sulfatos, a concentração de cloretos no agregado reciclado não está necessariamente associada ao tipo de agregado, mas sim a fatores como o uso de aditivos químicos específicos e a exposição a ambientes marinhos (SÁNCHEZ de JUAN e ALAEJOS, 2006).

À medida que a permeabilidade aumenta, a resistência à penetração de íons cloreto do concreto produzido com agregados reciclados diminui (VERIAN *et al.*, 2018). Os cloretos encontram-se divididos em cloretos solúveis em água, solúveis em ácido e totais.

A NBR 15116 (ABNT, 2021) limita em 0,2% o teor de cloretos para o concreto simples contendo agregados reciclados; 0,1% o teor de cloretos para concreto armado e 0,01% para concreto protendido, com método de ensaio segundo a norma NBR 9917 (ABNT, 2009). Em sua anterior versão, a NBR 15116 (ABNT, 2004) em contraste aos limites atuais, estabelecia um limite de até 1% para uso de concreto não estrutural.

2.3.3.3 Torrões de argila

O antigo Código Espanhol (EHE-08, 2008) especifica limites para a presença de substâncias deletérias nos materiais. Pesquisas indicam que essas substâncias

alteram as propriedades do concreto, comprometendo sua resistência e durabilidade. Aglomerados de argila, bem como partículas leves e friáveis, são exemplos de materiais prejudiciais encontrados em alguns tipos de agregados.

A norma NBR 15116 (ABNT, 2021) limita em 3% torrões de argila em ARCO e ARM, enquanto o atual Código Espanhol (EHE-08, 2008) e o Padrão Coreano (KS F2573, 2011) os limita no ARCO. Estudos de González-Fonteboa e Martínez-Abella (2005) e Mas *et al.* (2011) obtiveram percentuais de argila no ARA, fração grossa, entre 0,00% a 0,22%.

No estudo de González-Fonteboa e Martínez-Abella (2005), o teor de partículas friáveis encontrado foi de 20,36%. Partículas leves de ARCO, ARCI e ARM variaram de 0,00% a 5,85% no ARM graúdo (ALAEJOS e SÁNCHEZ de JUAN, 2006). Ihobe (2011) obteve baixa correlação entre a matéria orgânica e a qualidade do agregado reciclado na avaliação do agregado.

2.3.3.4 Materiais indesejáveis

Diversas normas nacionais limitam os teores de matéria orgânica em agregados para uso em concreto, seja para ARCO, ARA ou ARM (CSIRO, 1998; ABNT NBR 15116, 2021). A matéria orgânica presente no agregado reciclado pode retardar o enrijecimento do cimento, chegando ao ponto de paralisar completamente o processo.

Dados quantitativos disponíveis na literatura limitam uma avaliação precisa da qualidade da presença de matéria orgânica no agregado reciclado. Barbudo *et al.* (2012) apresentaram da ordem de 0,15% e 0,95%. Martín-Morales *et al.* (2011) de forma alternativa, realizaram uma análise qualitativa em que se utilizou a cor como critério de conformidade do agregado reciclado em relação a uma substância de referência.

2.3.4 Propriedades geométricas dos agregados reciclados

A conformidade com as especificações de tamanho, forma e distribuição de partículas é fundamental para garantir um concreto de alta qualidade. Na maioria das vezes, os limites são especificados para o teor de finos. Em contrapartida, o tamanho máximo do agregado e o valor de esmagamento raramente são

mencionados. É comum diversas normas não incluírem requisitos geométricos para os agregados reciclados (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013).

2.3.4.1 Tamanho do agregado

Martín-Morales *et al.* (2013) observa que o tamanho do agregado deve ser o maior possível para uma dada aplicação, uma vez que, quanto maior o tamanho do grão, maior a resistência do agregado, aumentando conseqüentemente a resistência mecânica do concreto. Para isso, torna-se necessário avaliar o efeito bloqueio produzido pelas armaduras e fôrmas para seleção do tamanho máximo de partículas do agregado.

2.3.4.2 Teor de areia reciclada

As normas e diretrizes limitam o teor de areia reciclada, pois sua presença pode reduzir a resistência à compressão do concreto (PADMINI *et al.*, 2009; SIM e PARK, 2011). A substituição da fração areia natural por areia reciclada melhora invariavelmente a qualidade do concreto reciclado. Corinaldesi e Moriconi (2009) e Evangelista e de Brito (2007) recomendam limitar em 30% o percentual máximo de substituição de areia natural por areia reciclada, de modo a não comprometer as propriedades mecânicas do concreto.

Os pesquisadores que defendem o percentual de substituição em torno de 30% sustentam sua afirmação baseados em Katz (2003), que afirma que a resistência à compressão ideal do concreto está diretamente relacionada ao percentual de substituição do agregado reciclado, no qual, a massa de cimento hidratado e não hidratado presentes podem chegar a 25% da massa da mistura.

Como forma de incrementar a resistência do concreto, Cabral *et al.* (2010) defendem o uso de material cerâmico reciclado devido à sua potencial atividade pozolânica (KHATIB, 2005), onde um alto teor de portlandita é fixado pelos finos de cerâmica nos primeiros dias da reação de hidratação do cimento.

2.3.4.3 Forma e textura superficial

Método utilizado na avaliação da forma do agregado graúdo, o índice de forma indica o quão arredondadas são as partículas. Em função da dificuldade em

descrever a forma de corpos tridimensionais, convém definir algumas de suas características geométricas. O arredondamento avalia a agudeza relativa ou angulosidade das arestas ou dos cantos das partículas (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013).

A forma da partícula depende da natureza do agregado, bem como do tipo de cominuição e da taxa de redução, isto é, a relação entre as dimensões do material carregado no britador e do material britado (NEVILLE, 2016). A forma das partículas do agregado afeta mais as propriedades do concreto no estado fresco do que as no estado endurecido. O emprego de partículas angulosas, alongadas e de textura áspera, requer mais pasta de cimento de modo a obter trabalhabilidades equiparáveis às de concretos com partículas arredondas e lisas (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

A Figura 5 ilustra a forma e a textura superficial de amostras de agregados naturais na imagem à esquerda e de agregados reciclados à direita. Devido ao fato do agregado reciclado misto se constituir de partículas por materiais cimentícios, os próprios agregados naturais, materiais cerâmicos, dentre outros, a superfície apresenta-se mais áspera e rugosa em comparação à do agregado natural.

Figura 5 – Forma e textura superficial de agregados naturais e reciclados



(a) Agregado natural



(b) agregado reciclado misto

Fonte: Elaboração própria, 2022

A norma brasileira que especifica o método para determinação do índice de forma de agregados graúdos com dimensão máxima característica maior que 9,5 mm, pelo método do paquímetro é a NBR 7809 (ABNT, 2019). Ela define como índice de forma do agregado, basicamente, a relação entre o comprimento médio e a

espessura média dos grãos do agregado.

2.3.4.4 Teor de finos

O teor de finos possui maior restrição para o agregado graúdo. Isso não se aplica apenas à sua quantidade, mas também à sua qualidade. Numa perspectiva granulométrica, um teor de finos de boa qualidade (isto é, baixo teor da fração argila) aumenta a trabalhabilidade e a coesão do concreto fresco e melhora a impermeabilidade e a durabilidade no estado endurecido. Além disso, reduz a demanda por água e o consumo de cimento (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2013).

Na maioria das normas encontram-se limites para o teor de finos no AR. Os valores variam de 0,2% a 1,17% (MARTÍN-MORALES *et al.*, 2011) para o AR total; de 0,1% a 1,14% para AR graúdo; e de 0,5% (CORINALDESI; MORICONI, 2009) a 46% (MIRANDA e SELMO, 2006) para os finos do AR. A NBR 15116 (ABNT, 2021) limita em 12% o teor de finos para concretos protegidos de desgaste superficial, e em 10% para concretos submetidos a desgaste superficial, cujo indicador deve ser obtido pelo método prescrito pela NBR NM 46 (ABNT, 2001).

3 PROPRIEDADES DO CONCRETO COM AGREGADOS RECICLADOS

O concreto é um material de construção compósito. As propriedades reproduzíveis estão ligadas a um volume de concreto equivalente. Até mesmo a preparação do concreto para misturas de partículas, por exemplo, 0/32 mm, resulta em diferenciações. Além das partículas mistas, há também partículas de agregado quase isentas de pasta de cimento endurecida, bem como partículas de argamassa pura. As partículas em uma pilha de concreto britado e homogeneizado têm, portanto, diferentes teores de pasta de cimento endurecida (MÜLLER; MARTINS, 2022).

A Figura 6 ilustra a argamassa aderida ao agregado após. Estudos comprovam que a presença da argamassa acarreta a redução da resistência à compressão para desenvolvimento de novos concretos utilizando agregados reciclados. A parcela de argamassa promove redução no módulo de elasticidade (BAI *et al.*, 2020).

Figura 6 – Diagrama esquemático da adesão da fase argamassa à superfície do agregado natural



Fonte: Bai *et al.*, 2021.

Nos últimos anos, estudos têm sido focados na aplicação do agregado reciclado misto no concreto e têm indicado propriedades mecânicas e de durabilidade inferiores em relação aos concretos com agregados reciclados de concreto. Os agregados reciclados mistos contêm partículas cerâmicas, certas quantidades de gesso, asfalto, contaminantes que causam essa baixa no desempenho, no entanto os ARM podem ser aplicados se sua qualidade for devidamente controlada (AGRELA; ALAEJOS; JUAN, 2013).

3.1 Propriedades do concreto no estado fresco usando agregados reciclados

O uso do agregado reciclado tem uma influência importante nas propriedades de concreto fresco, particularmente afetando sua trabalhabilidade. As propriedades de alta absorção desses agregados, além de sua heterogeneidade, dificultam o ajuste e o controle da consistência do concreto. A demanda extra de água deve ser considerada na produção de concreto reciclado, na qual diferentes alternativas podem ser aplicadas, por exemplo (AGRELA *et al.*, 2013):

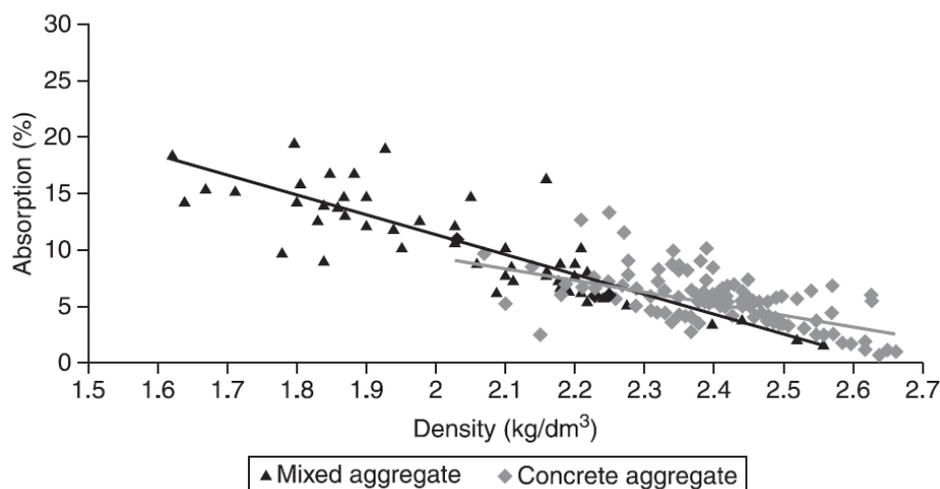
- um incremento direto da água de mistura;
- uso de aditivos químicos (plastificantes ou superplastificantes);
- pré-saturação do agregado reciclado.

3.1.1 Influência da absorção do agregado reciclado na demanda de água do concreto

O AR apresenta valores de absorção significativamente mais elevados em comparação com o AN, cujos resultados geralmente são inferiores a 3%. As propriedades de absorção do AR estão principalmente relacionadas à sua natureza, sendo mais baixas para agregados graúdos de concreto, geralmente abaixo de 12%. No entanto, quando se trata de agregados mistos, a absorção pode atingir até 20%,

especialmente quando há uma grande quantidade de partículas cerâmicas, como mostrado no Gráfico 1 (AGRELA *et al.*, 2013).

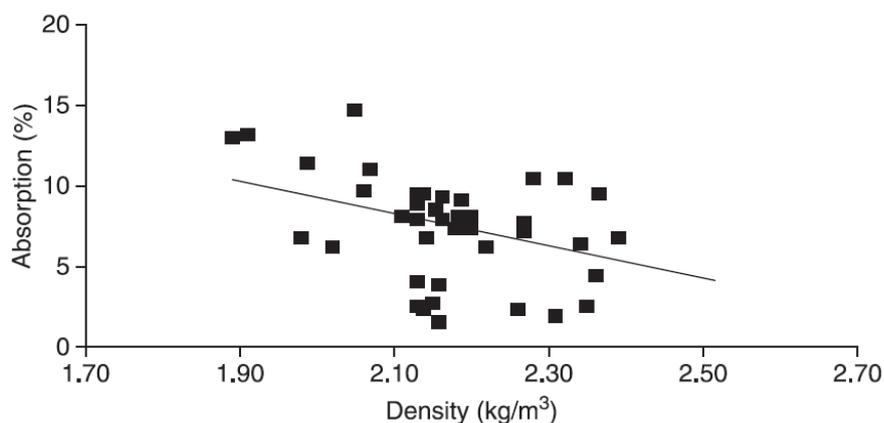
Gráfico 1 – Correlação entre absorção de água e densidade da fração graúda do ARCO e ARM



Fonte: Agrela *et al.*, 2013.

A fração miúda do agregado reciclado de concreto é composta por uma quantidade significativa de partículas de argamassa porosa, resultantes do processo de britagem. Essa característica confere ao ARCO altos valores de absorção, conforme ilustrado no Gráfico 2. A absorção rápida e expressiva do ARCO impacta diretamente a demanda de água do concreto. No entanto, essa influência torna-se insignificante quando se utilizam apenas quantidades limitadas de AR graúdo, variando entre 20% e 30% (AGRELA *et al.*, 2013).

Gráfico 2 – Correlação entre absorção de água e densidade da fração miúda do ARCO



Fonte: Agrela *et al.*, 2013.

3.1.1.1 Compensação de água de mistura

Com a finalidade de compensar as propriedades de absorção do AR, quando ele é usado em condições secas, o teor adicional de água (*a/c*) deve ser considerado na dosagem da mistura. Como a absorção destes materiais ocorre rapidamente, a quantidade necessária é geralmente determinada por meio da regra de absorção aos 10 min.

A Norma Alemã (DIN 4226-100, 2002) estabelece um método específico para determinar a absorção de água em areias recicladas após 10 minutos. Nesse procedimento, a amostra é pesada ao final do intervalo, porém, devido à sua subjetividade, a norma ressalta que o resultado deve ser considerado apenas como um valor indicativo. Em contraste, Khatib (2005) propõe um método mais preciso, utilizando um aferidor de umidade para determinar a absorção das areias recicladas.

Para Agrela *et al.* (2013), a relação *a/c* tem sido calculada considerando o agregado reciclado completamente seco, embora na prática sua umidade será variável. Isso significa correr o risco de adicionar água em excesso se a umidade do AR não for precisamente determinada. Este método tem um problema adicional em relação à variação na capacidade de absorção de água do AR, devido aos materiais reciclados apresentarem uma heterogeneidade intrínseca, e isto significa que o incremento de água não é um valor fixo.

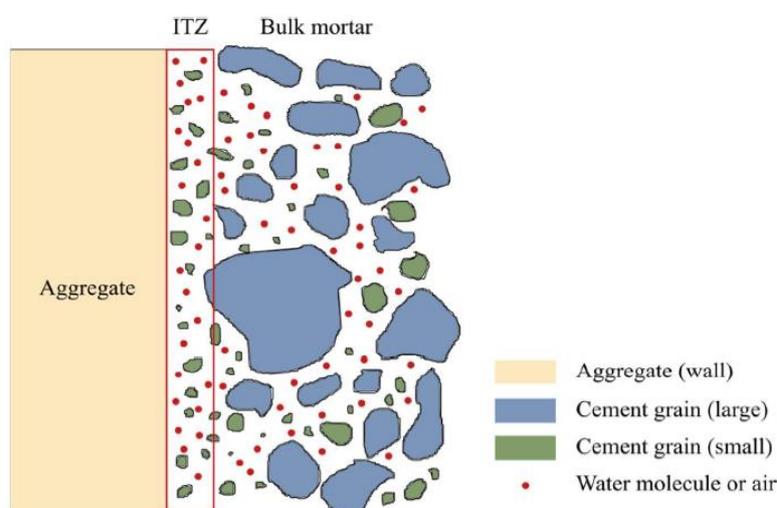
Khatib (2005) descreve um procedimento mais preciso usando um analisador de umidade para determinar a absorção de curto período das areias recicladas. Os resultados da absorção de 10 min são aproximadamente 83% do valor de 24 h para ARCO e ARA.

3.1.2 Efeito Parede

Wang (2021) explica que durante o processo de mistura do concreto, os agregados graúdos serão misturados com o cimento. Como o tamanho das partículas de agregado graúdo (diâmetro da ordem de 10 – 25 mm) é várias ordens de grandeza maior do que o tamanho de grãos de cimento (diâmetro de partículas inferior a 100 microns de diâmetro), os agregados graúdos podem ser considerados como uma “parede” na zona adjacente ao agregado.

Como os grãos de cimento possuem tamanhos e formas diferentes, eles não podem entrar em contato perfeito com a superfície do agregado, Serão gerados vazios adjacentes e preenchidos por pequenas partículas ou moléculas menores tais como, pequenos grãos de cimento, ar e água, conforme ilustrado na Figura 7 (WANG, 2021).

Figura 7 – Ilustração do “efeito parede” e zona de transição interfacial (ZTI) baseado em Scrivener *et al.* (2004)



Fonte: Wang, 2021.

Esse fenômeno é definido como “efeito parede” (SCRIVENER *et al.*, 2004) e a zona adjacente ao agregado, trata-se de uma cobertura esférica, com espessura de dezenas de μm , que encapsula o agregado. Tal cobertura é considerada como a zona de transição na interface (ZTI). Em função da maior quantidade de grãos pequenos e vazios presentes na ZTI, a capacidade de carga da ZTI é sempre menor do que da fase argamassa do concreto.

Essa zona é caracterizada por um gradiente de microestrutura, no qual a porosidade aumenta da pasta de cimento em direção à superfície do agregado. Esse fenômeno ocorre principalmente devido ao ‘efeito de parede’ exercido pelo agregado grão sobre as partículas finas de cimento. Como consequência desse efeito, o teor inicial de cimento diminui, enquanto o teor de água na pasta de cimento aumenta à medida que se aproxima da superfície do agregado (GARCIA-DIAZ; SAOUT; DJERBI, 2019).

Para Garcia-Diaz, Saout e Djerbi (2019) a profundidade da área afetada pelo ‘efeito de parede’ varia na ordem de dezenas de micrômetros e corresponde à profundidade inicial da ZTI. Com o endurecimento do concreto, essa profundidade tende a diminuir devido ao preenchimento da porosidade pelos produtos da hidratação. Paralelamente, ocorre o transporte desses produtos, especialmente da portlandita, das regiões ricas em cimento para as regiões mais pobres. Como resultado desse mecanismo de transporte, forma-se um ‘filme duplo’ rico em portlandita, com espessura de poucos micrômetros, na superfície do agregado.

Como ocorre uma espécie de gradiente na distribuição entre a ZTI e a pasta de cimento da argamassa, não é possível identificar um limite claro entre as duas matrizes. No entanto, a ZTI pode ser estimada pela distribuição de porosidade, identificação de dureza ou módulo. A microscopia eletrônica de varredura de elétrons retroespalhados pode ser usada para identificar a distribuição de porosidade (WANG, 2021).

3.1.3 Trabalhabilidade

A trabalhabilidade do concreto é definida pelo American Concrete Institute (2021) como “a propriedade do concreto ou argamassa no estado fresco que determina a facilidade com que esse material pode ser misturado, lançado, adensado e realizado acabamento em condições homogêneas.

A consistência, avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, reflete o índice de mobilidade ou fluidez do concreto fresco. A estabilidade, por sua vez, está relacionada tanto à capacidade de retenção de água quanto à retenção dos agregados graúdos na massa do concreto fresco, sendo também associada à coesão. Dessa forma, a trabalhabilidade é uma propriedade que engloba a consistência, a facilidade de escoamento, a coesão, além da resistência à exsudação e à segregação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

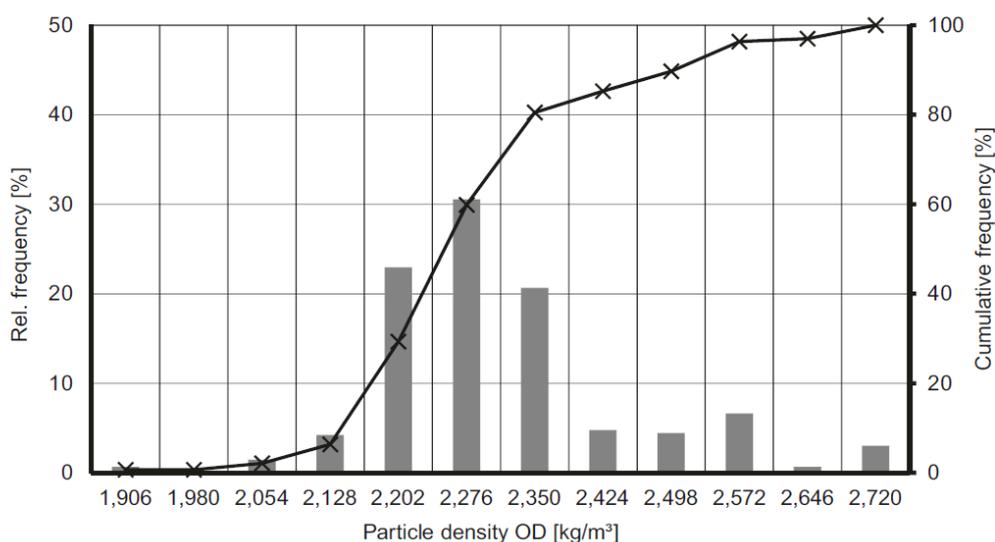
O concreto com agregados reciclados no estado fresco tem apresentado menores valores de trabalhabilidade em relação aos concretos com agregados naturais, determinados pelo ensaio de abatimento de tronco de cone, principalmente devido à maior capacidade de absorção de água e, na maioria dos casos, pela rugosidade da superfície e formas irregulares dos agregados reciclados (KURDA *et al.*, 2017;

VERIAN *et al.*, 2018). Para obter trabalhabilidades similares às dos concretos com agregados naturais, teores adicionais de água são requeridos no processo de mistura.

3.2 Propriedades do concreto reciclado no estado endurecido

Os agregados reciclados são materiais heterogêneos, cujas propriedades variam conforme a natureza e a qualidade dos resíduos utilizados em sua produção. Essa variabilidade pode ser observada na distribuição da densidade das partículas, conforme ilustrado na Gráfico 3. A densidade dessas partículas varia entre 1900 kg/m³ e 2700 kg/m³, onde o limite inferior corresponde aproximadamente à densidade da pasta de cimento endurecida pura, enquanto o limite superior se assemelha à densidade de um agregado natural (MÜLLER; MARTINS, 2022).

Gráfico 3 – Distribuição da frequência relativa e acumulada da densidade de partículas de agregados de concreto reciclado 4/32 mm



Fonte: Müller e Martins (2022).

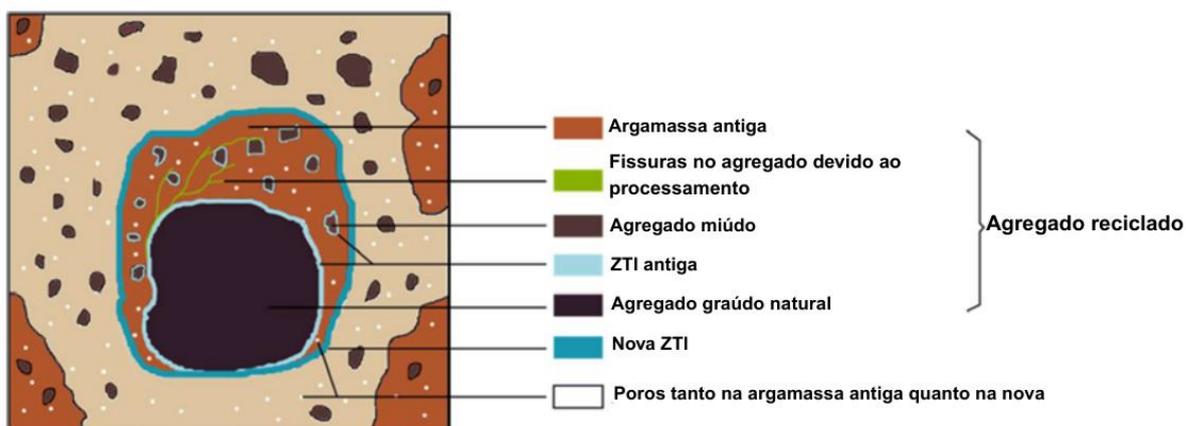
Essa dispersão da qualidade do agregado pode influenciar negativamente a uniformidade das propriedades do concreto, em particular, os coeficientes de variação da resistência à compressão para concretos reciclados são geralmente maiores do que para os concretos convencionais. Se as diferentes partículas não estiverem distribuídas uniformemente no lote, também haverá heterogeneidade de distribuição, que pode ser influenciada pela mistura e homogeneização, ocasionando oscilações no desempenho dos materiais de construção produzidos a partir desses agregados (MÜLLER; MARTINS, 2022).

3.2.1 Resistência mecânica dos concretos com agregados reciclados

A Figura 8, Wang (2021) apresenta o agregado reciclado de concreto proveniente de resíduos da construção civil (RCC) utilizado na produção de concreto com agregado reciclado (CAR). Em sua composição, a maioria dos agregados reciclados de concreto é formada por duas fases: o agregado natural e a camada de argamassa aderida, resultante da argamassa antiga que permanece na superfície do agregado.

Nos concretos com agregados reciclados de concreto, são identificadas duas zonas de transição na interface (ZTI): a ZTI antiga, que se forma entre o agregado graúdo natural e a argamassa antiga (representada pela linha azul clara), e a nova ZTI, localizada entre o agregado reciclado e a nova argamassa (linha azul escura). Em comparação ao concreto com agregado natural (CAN), que possui apenas uma ZTI, o concreto com agregado reciclado geralmente apresenta um maior volume de zonas de transição, o que pode influenciar suas propriedades mecânicas e de durabilidade (WANG, 2021).

Figura 8 – Ilustração do agregado reciclado de concreto empregado no concreto reciclado



Fonte: Wang, 2021.

Como consequência, o CAR apresenta, em geral, maior porosidade em comparação ao CAN, o que resulta na redução de suas propriedades mecânicas, como resistência à compressão, flexão e tração. Além disso, o aumento da porosidade influencia diretamente a permeabilidade do CAR, podendo gerar diferentes gradientes de concentração de substâncias, como água, íons cloreto e CO_2 , em relação ao CAN. Esse efeito tem implicações importantes na proteção contra a corrosão das armaduras e no envelhecimento do concreto (WANG, 2021).

Além disso, o agregado natural envolto pela camada de argamassa antiga apresenta menor resistência à compressão em comparação ao agregado natural puro. Durante o processo de fabricação do agregado reciclado, fissuras adicionais podem se formar facilmente na camada de argamassa antiga. Sob cargas de serviço, essas fissuras pré-existentes podem se propagar, comprometendo a integridade do CAR e levando à sua ruptura (VERIAN, 2013).

O uso do agregado graúdo reciclado no concreto provoca redução na resistência à compressão (ALAEJOS e SÁNCHEZ de JUAN, 2006), especialmente quando o nível de substituição aumenta, sendo mais pronunciada quando o agregado de alvenaria é utilizado. Essa redução é atribuída, principalmente, às seguintes causas:

- qualidade inferior do agregado, refletida em maior porosidade, menor coeficiente de abrasão Los Angeles e, em alguns casos, presença de sulfatos;
- maior demanda por água de mistura, o que impacta a relação água/cimento e consequentemente, as propriedades mecânicas do concreto;
- presença de zonas fracas no concreto, originadas pela argamassa aderida ao agregado reciclado.

Outro aspecto relevante a ser considerado é a qualidade do ARCO utilizado, uma vez que resistências superiores podem ser alcançadas quando os agregados provêm da britagem de concreto de alta qualidade. O Código de Concreto Estrutural Espanhol (EHE-08) sugere que os resíduos de concretos estruturais com resistência à compressão ($f_c \geq 25$ MPa) sejam processados, caso os agregados reciclados sejam destinados ao uso em concretos estruturais (EHE-08, 2008).

Uma das características determinantes no concreto, com impacto nas propriedades mecânicas, na durabilidade, entre outras, é a resistência à compressão. Há um consenso na literatura de que o aumento dos percentuais de substituição por agregado reciclado tende a prejudicar a resistência do concreto (BAI *et al.*, 2020).

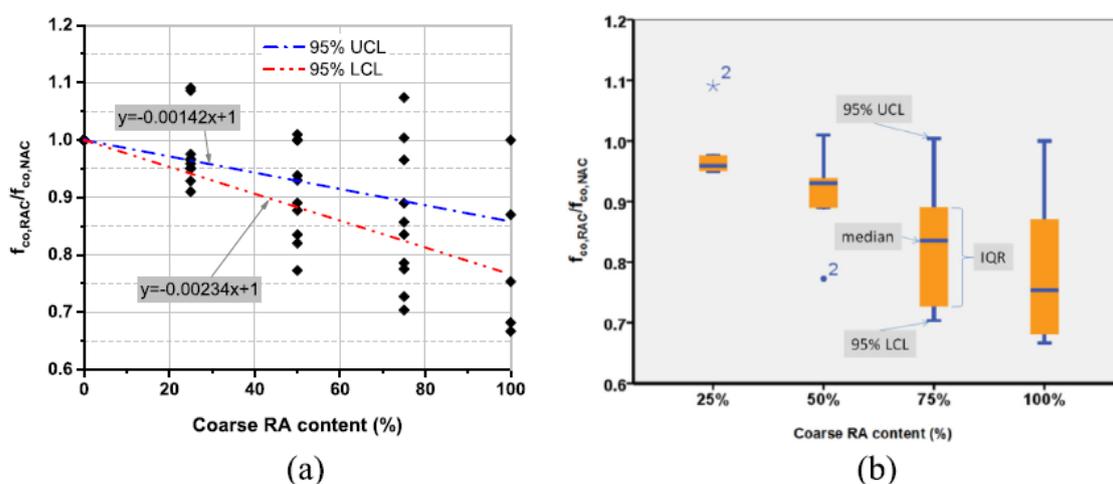
Ao comparar a resistência entre concretos reciclados e convencionais, é importante usar a mesma relação a/c efetiva para ambos. Se o AR for usado em condições secas e sua absorção não for compensada na dosagem, ele absorverá água durante o processo de mistura, reduzindo a relação a/c efetiva e, assim, melhorando a

resistência dos concretos reciclados. Isto explica por que, em alguns estudos experimentais, mesmo maiores resistências são obtidas em concretos reciclados em relação a concretos convencionais (KATZ, 2003).

Na Figura 9 (a) observa-se uma clara tendência de redução da resistência à compressão à medida que a incorporação de agregados reciclados ao concreto aumenta, em comparação com os traços de referência. Os intervalos de confiança, superior (UCL) e inferior (LCL) ao nível de 95% indicam que os concretos contendo 100% de agregados reciclados grãos apresentaram resistências aproximadamente 0,766 vezes menores do que os concretos com agregados naturais.

Em alguns casos, concretos com agregados reciclados apresentaram resultados de resistência superiores ao concreto de referência. Isso pode ser explicado pela melhoria da força de ligação na zona de transição na interface entre a argamassa antiga aderida e a nova pasta de cimento, possivelmente devido a fatores específicos. Os *outliers* na Figura 9 (b), e as extremidades dos *box plots*, indicam que, quanto maiores as taxas de substituição por agregado reciclado, maior é a dispersão dos dados, provavelmente em função da variabilidade nas propriedades dos agregados reciclados (BAI *et al.*, 2020).

Figura 9 – (a) Relação entre taxa de substituição do agregado grão reciclado e resistência à compressão relativa, e (b) análise exploratória via box plot



UCL – intervalo de confiança superior; LCL – intervalo de confiança inferior

Fonte: Bai *et al.*, 2020

Wang (2021) observa uma tendência de redução nos valores de resistência à compressão dos concretos reciclados à medida que a proporção de substituição dos agregados naturais por reciclados aumenta. Quando a substituição atinge 100%, estima-se uma redução de aproximadamente 40% na resistência à compressão média, 40% no módulo elástico, 20% na resistência à flexão e 40% na resistência à tração, em comparação com o concreto de referência.

Barhmaiah *et al.* (2020) avaliaram a variação da resistência à compressão dos concretos aos 3, 7, 14 e 28 dias, mantendo fixos a relação a/c em 0,45 e tamanho máximo do agregado em 25 mm. A influência das porcentagens de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados, variando entre 0% e 100%, com intervalos de 25%, para duas proporções de mistura, caracterizadas pelas classes de resistência como M-20 e M-30.

Foi observada uma tendência linear de redução da resistência à compressão a cada 25% de substituição por AR, com percentuais máximos de redução de 40,81 e 41,20% para 100% de substituição, nas classes M-20 e M-30, respectivamente. Constatou-se que as classes de resistência mais altas apresentaram resultados relativamente mais baixos quando submetidos a altas porcentagens de substituição por AR (BARHMAIAH *et al.*, 2020).

Até 50% de substituição, não foram observados efeitos significativos na resistência à compressão, uma vez que as misturas atingiram a resistência característica esperada. No entanto, acima desse valor, os limites de resistência não são atingidos (BARHMAIAH *et al.*, 2020).

4 MATERIAIS E MÉTODO

4.1 Materiais utilizados na dosagem dos concretos

Foram utilizados materiais produzidos e distribuídos na Região Metropolitana do Recife, comumente empregados nas construções locais. As exceções foram a areia caxitú, do município de Cabedelo – PB e do pó-de-pedra, oriundo de Caruaru – PE. A escolha desses materiais visa representar com maior proximidade o impacto da produção de concreto na região. Os materiais foram caracterizados por meio de ensaios descritos de acordo com as normas técnicas vigentes.

4.1.1 Cimento

O cimento utilizado foi o Cimento Portland CP II F-40 Obras Estruturais, designado cimento Portland composto com material carbonático. Possui massa específica de 3,11 kg/dm³, área superficial Blaine de 4623 cm²/g e resistência à compressão aos 28 dias de 50,40 MPa. Na Tabela 2 estão apresentadas as principais características físicas e químicas deste cimento.

Tabela 2 – Características do cimento CP II F 40 (dados fornecidos pelo fabricante)

Composição Química	Média (%)	Limites da Norma
		(ABNT NBR 16697:2018)
SiO ₂	19,83	N/A
Al ₂ O ₃	4,10	N/A
Fe ₂ O ₃	3,47	N/A
CaO	62,29	N/A
MgO	2,19	-
Na ₂ O	0,16	N/A
K ₂ O	0,73	N/A
SO ₃	3,05	≤ 4,50
Eq. Alcalino	0,64	N/A
Perda ao fogo	3,99	≤12,50
Resíduo insolúvel	1,73	≤ 7,50

Propriedades Físicas	Média	Limites da Norma (ABNT NBR 16697:2018)
Finura Blaine (cm ² /g)	4623	-
Massa específica (kg/dm ³)	3,11	-
Início de pega (min)	163	≥ 60
Resistência à compressão	Média (MPa)	Limites da Norma (ABNT NBR 16697:2018)
1 dia	21,50	N/A
3 dias	35,40	≥ 15
7 dias	41,30	≥ 25
28 dias	50,40	≥ 40

Fonte: Elaboração própria, 2022

4.1.2 Agregados

Foram utilizados sete tipos de agregados, dos quais três são classificados como agregados graúdos: duas granulometrias de brita e um agregado graúdo reciclado. Os quatro restantes são considerados agregados miúdos, incluindo duas granulometrias de areia natural e duas areias de origem residual – o pó-de-pedra e agregado miúdo reciclado. As características desse são detalhadas a seguir.

4.1.2.1 Agregados graúdos

Brita 12,5 mm e 19,0 mm: o agregado graúdo utilizado foi brita de rocha granítica, classificada conforme a NBR 7211 (ABNT, 2009) nas faixas granulométricas de 12,5 mm (0,075 mm a 12,5 mm) e 19 mm (0,075 mm a 19,0 mm). As massas específicas aparentes desses agregados foram de 2,64 kg/dm³ e 2,69 kg/dm³, respectivamente, com absorção média de 0,60%, conforme determinado pela NBR NM 53 (ABNT, 2009). As massas unitárias foram de 1,51 kg/dm³ para a brita 12,5 mm e 1,41 kg/dm³ para a brita 19 mm, conforme Método C da NBR NM 45 (ABNT, 2006).

Agregado Graúdo Reciclado (AGR): apresentou massa específica de 2,21 kg/dm³ e massa unitária no estado solto de 1,36 kg/dm³. A absorção de água do AGR foi determinada para duas faixas granulométricas: de 4,75 mm a 12,5 mm, com valor de 7,42%, e de 12,5 mm a 25 mm, com valor de 4,77%, ambas aferidas após 24 horas

de imersão. Considerando a faixa granulométrica de 4,75 mm a 25 mm, obteve-se uma absorção média de 5,92%, valor que se encontra dentro dos limites especificados pela NBR 15116 (ABNT, 2021) — sendo <7% para agregados reciclados de concreto (ARCO) graúdos e <12% para agregados reciclados cimentícios (ARCI) ou mistos (ARM).

4.1.2.2 Agregados miúdos

Os agregados miúdos utilizados foram caracterizados quanto à massa específica, massa unitária e faixa granulométrica, conforme apresentado na Tabela 3. Os materiais avaliados incluem areia caxitú, areia natural, pó de pedra e agregado miúdo reciclado (AMR). Os valores obtidos demonstram variações típicas entre materiais naturais e reciclados, sendo todos os parâmetros compatíveis com o uso em composições cimentícias, conforme os critérios das normas técnicas vigentes.

Tabela 3 – Caracterização dos agregados miúdos

Material	Massa Específica (kg/dm ³)	Massa Unitária (kg/dm ³)	Faixa Granulométrica (mm)
Areia caxitú	2,62	1,66	0,075 – 2,36
Areia natural	2,60	1,70	0,075 – 2,36
Pó de pedra	2,63	1,65	0,075 – 4,75
Agregado Miúdo Reciclado (AMR)	2,45	1,51	0,075 – 4,75

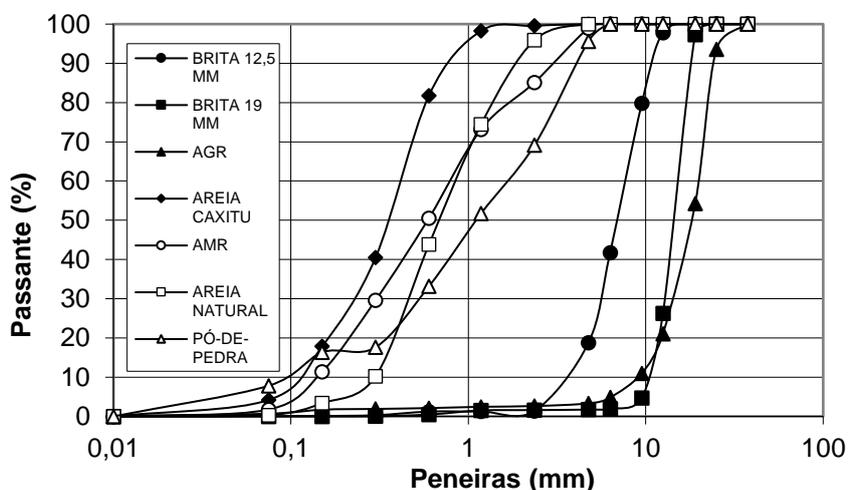
As características dos agregados utilizados nas composições granulométricas para a dosagem dos concretos desta pesquisa — tais como massa específica, massa unitária, módulo de finura e absorção de água — estão apresentadas na Tabela 4, juntamente com as respectivas porcentagens retidas acumuladas, bem como os diâmetros mínimo e máximo de cada material. As curvas granulométricas dos agregados utilizados estão apresentadas no Gráfico 4.

Tabela 4 – Caracterização quanto a composição granulométrica de todos os agregados utilizados

Granulometria (% retida acumulada)	Abertura das peneiras (mm)		Areia Caxitú	Areia Natural I	AMR	Pó-de-Pedra	Brita 12,5	Brita 19	AGR	
		37,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0,00
		25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	4,46
		19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,52	45,73
		12,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	4,66	52,29	78,96
		9,5	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,34	93,31	89,03
		6,3	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	68,38	99,61	95,18
		4,75	0,00	0,00	1,09	4,38	85,36	99,82	99,82	96,69
		2,36	0,44	4,11	14,87	30,87	91,91	99,89	99,89	97,37
		1,18	1,73	25,55	26,83	48,29	95,20	99,90	99,90	97,56
		0,6	18,21	56,21	49,47	66,85	96,96	99,91	99,91	97,89
		0,3	59,53	89,79	70,39	82,39	98,81	99,92	99,92	98,10
		0,15	82,15	96,66	88,63	83,67	99,58	99,94	99,94	98,29
0,075	95,81	99,68	98,25	92,19	99,83	99,96	99,96	99,32		
Fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00		
Diâmetro máximo característico (mm)		1,18	2,36	4,75	4,75	12,5	19	25		
Módulo de Finura		1,62	2,72	1,62	3,16	5,95	6,93	7,20		
Massa específica (Kg/dm ³)		2,62	2,60	2,45	2,63	2,64	2,69	2,21		
Massa unitária no estado solto (Kg/dm ³)		1,66	1,70	1,51	1,65	1,51	1,41	1,36		
Absorção de água (%)		-	-	10	-	0,61	0,59	5,92		

Fonte: Elaboração própria, 2022

Gráfico 4 – Curvas granulométricas dos agregados do estudo piloto



Fonte: Elaboração própria, 2022

4.2 Método de dosagem

Na busca por uma dosagem de concretos baseada em curvas granulométricas, objetiva-se a obtenção de misturas otimizadas da fração inerte, de modo a garantir concretos que atendam aos requisitos normativos e critérios de desempenho. Para isso, a dosagem foi conduzida em duas etapas distintas: Estudo Piloto e Estudo Experimental, seguindo essa ordem de execução.

O princípio para a dosagem dos concretos para ambas as etapas foi o método IPT/EPUSP, no entanto, sem passar pelo procedimento tradicional de determinação do teor de argamassa ideal (α %). Foi considerado o teor de argamassa no valor de 60% para todas as composições, nos traços 1:3, 1:5 e 1:6.

A Tabela 5 apresenta o arranjo dos materiais utilizados na composição dos concretos referentes às etapas Piloto e Experimental.

Tabela 5 – Arranjo experimental para determinação da composição granulométricas ideal do esqueleto granular da fração inerte do concreto

Etapa	Cimento	Brita 19	Brita 12,5	Areia caxitú	Areia Natural	Pó-de-pedra	AGR	AMR
Piloto	■	■	■	■		■		
Experimental	■	■	■	■	■		■	■

Fonte: Elaboração própria, 2022

4.2.1 Estudo piloto

Nessa etapa, a variação concentrou-se nas curvas granulométricas da fração graúda da mistura. O pó de pedra (0,075 mm – 4,75 mm) foi incorporado à composição do esqueleto granular, formando uma combinação ternária com as britas de 12,5 mm e 19,0 mm.

Para escolha da curva granulométrica otimizada, foram realizadas variações entre diferentes razões (P_r) de curvas teóricas, determinadas com base na equação geral do somatório dos termos de uma progressão geométrica (PG), conforme proposta por Furnas (1931), apresentada a Equação 1.

$$S_n = A \frac{(1 - P_r^n)}{(1 - P_r)} \quad (1)$$

Sendo:

S_n – somatório da PG; A – primeiro termo da PG;

P_r – razão da PG; n – número de termos da PG.

Na primeira etapa, foram modeladas quatro curvas granulométricas teóricas, variando-se a razão P_r nos valores de 0,70; 0,80; 0,85 e 0,90. A partir dessas curvas teóricas, foram geradas as respectivas curvas reais, cujas porcentagens passantes para ambas as composições estão apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 – Porcentagens passantes das curvas teóricas

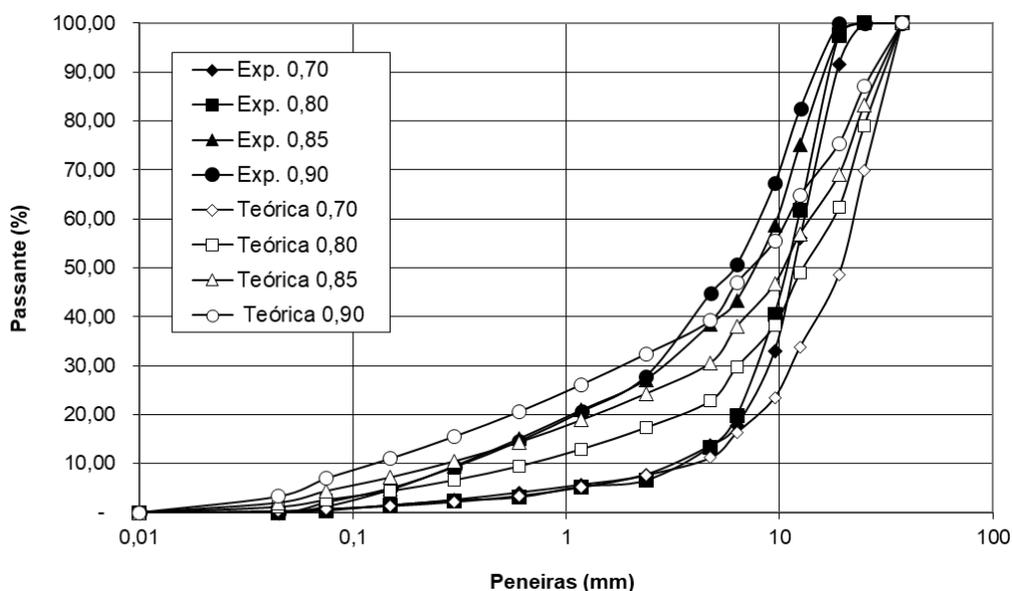
Peneiras (mm)	Pr	Pr	Pr	Pr	Pr	Pr	Pr	Pr
	0,70 (*T)	0,70 (**R)	0,80 (T)	0,80 (R)	0,85 (T)	0,85 (R)	0,90 (T)	0,90 (R)
37,5	100	100	100	100	100	100	100	100
25	69,8	100	79,08	100	83,28	100	87,03	100
19	48,65	91,56	62,34	97,59	69,07	97,55	75,36	100
12,5	33,85	56,14	48,96	61,67	56,99	75,24	64,86	82,49
9,5	23,49	32,93	38,24	40,53	46,73	58,73	55,41	67,26
6,3	16,24	17,70	29,68	19,69	38	43,34	46,9	50,64
4,8	11,16	13,62	22,82	13,37	30,58	38,50	39,25	44,81
2,4	7,61	7,68	17,34	6,50	24,28	27,15	32,35	27,85
1,2	5,12	5,63	12,95	5,27	18,92	20,96	26,15	20,66
0,6	3,38	4,01	9,44	3,05	14,36	15,06	20,57	14,59
0,3	2,16	2,55	6,63	2,41	10,49	9,50	15,55	9,34
0,15	1,31	1,41	4,38	1,46	7,2	4,68	11,03	5,02
0,075	0,71	0,52	2,59	0,37	4,4	1,23	6,69	2,12
0,045	0,29	0	1,15	0	2,02	0	3,3	0
0,01	0	0	0	0	0	0	0	0

*T – Curva teórica; **R – Curva Real

Fonte: Elaboração própria, 2022

As curvas teóricas e reais correspondentes encontram-se sobrepostas no Gráfico 5, permitindo a visualização comparativa do ajuste entre os modelos.

Gráfico 5 – Curvas granulométricas teóricas



Fonte: Elaboração própria, 2022

O coeficiente de uniformidade C_u foi calculado para as curvas reais correspondentes às razões Pr de 0,70, 0,80, 0,85 e 0,90, ou seja, para as composições granulométricas obtidas a partir das curvas teóricas. Esse parâmetro permite avaliar o grau de uniformidade de cada distribuição granulométrica. Os valores de C_u obtidos estão apresentados na Tabela 7.

Tabela 7 – Coeficiente de uniformidade das curvas granulométricas do estudo piloto

Curvas	D_{60}/D_{10}
$Pr = 0,70$	3,90
$Pr = 0,80$	3,65
$Pr = 0,85$	34,75
$Pr = 0,90$	23,82

Fonte: Elaboração própria, 2022

Com base na escolha do esqueleto granular mais adequado na primeira etapa (curva $Pr = 0,85$), foi realizada a dosagem dos concretos na segunda etapa, variando-se as porcentagens de substituição dos agregados naturais por agregados reciclados mistos.

Foram dosados os traços 1:3; 1:5 e 1:6 com teor de argamassa $\alpha = 60\%$. Na fase de preparação da argamassa, utilizaram-se areia caxitú e cimento Portland CP II F-40, foram os materiais utilizados na fase argamassa. O consumo de cimento foi mantido constante em todas as misturas.

O teor de água inicial, correspondente à relação a/c_1 , foi mantido constante em cada traço e em todas as curvas granulométricas. Em todos os traços, adicionou-se inicialmente a quantidade teórica de água referente à a/c_1 . Como o abatimento foi nulo, realizou-se um incremento no teor de água de mistura, resultando na relação a/c_2 , com o objetivo de alcançar uma trabalhabilidade mínima que servisse de referência para a etapa seguinte. Buscou-se manter a equivalência na quantidade de água adicionada entre as diferentes betonadas, visando garantir parâmetros comparáveis de trabalhabilidade e, ao mesmo tempo, favorecer a avaliação dos demais requisitos granulométricos.

Os resultados do abatimento obtidos no estudo piloto, a partir da relação efetiva a/c_2 , são os descritos na Tabela 8. Apesar de valores de abatimento (slump) ainda se manterem nulos, optou-se pela curva $Pr = 0,85$, por apresentar o maior coeficiente de uniformidade entre as curvas analisadas. Essa característica indica que a distribuição granulométrica não é excessivamente contínua nem excessivamente uniforme.

Tabela 8 – Abatimento em função do ajuste do teor de água de mistura

	Traço	a/c_1	a/c_2	Abatimento (mm)
Pr=0,70	1:3	0,35	0,40	0
	1:5	0,45	0,59	45,67
	1:6	0,55	0,70	34,67
Pr=0,80	1:3	0,35	0,47	0
	1:5	0,45	0,62	4
	1:6	0,55	0,65	0
Pr=0,85	1:3	0,35	0,50	153,7
	1:5	0,45	0,60	0
	1:6	0,55	0,65	0
Pr=0,90	1:3	0,35	0,45	0
	1:5	0,45	0,56	24
	1:6	0,55	0,65	28

Fonte: Elaboração própria, 2022

Dessa forma, no Estudo piloto, definiu-se a curva granulométrica da fração graúda mais adequada para ser empregada na etapa seguinte, denominada Estudo experimental, a qual envolve o uso de agregados reciclados.

4.2.2 Estudo experimental

No Estudo Piloto, selecionou-se a curva $Pr = 0,85$ para a dosagem dos traços 1:3, 1:5 e 1:6, mantendo-se inicialmente a relação água/cimento (a/c) constante. Posteriormente, foram realizados ajustes para alcançar uma trabalhabilidade mínima, sendo então registradas as relações a/c finais.

No Estudo Experimental, foram empregados cinco tipos de agregados na composição do esqueleto granular: brita 19,0 mm e brita 12,5 mm, ambas provenientes de rocha granítica; areia quartzosa; além dos agregados reciclados — agregado graúdo reciclado (AGR) e agregado miúdo reciclado (AMR) — utilizados para substituição parcial dos agregados naturais.

A substituição dos agregados nos concretos desta etapa foi realizada tanto em massa quanto em volume, conforme as proporções estabelecidas pela curva granulométrica $Pr = 0,85$. A mistura foi composta por areia Caxitú e cimento, adotando-se um teor de argamassa de 60%, conforme o método IPT/EPUSP.

Nesta etapa foram utilizados os seguintes materiais para o arranjo experimental: areia caxitú, areia natural, agregado miúdo reciclado (AMR), brita 12,5 mm, brita 19 mm e agregado graúdo reciclado (AGR). As frações granulométricas da curva teórica $Pr = 0,85$, que corresponde ao esqueleto granular da fração graúda dos concretos dosados em massa, estão apresentados na Tabela 9.

A composição granulométrica 0,85 foi dividida internamente em três partes:

- Parte 1: agregados compreendidos entre os diâmetros 19 a 25 mm;
- Parte 2: agregados compreendidos entre os diâmetros 4,75 a 12,5 mm;
- Parte 3: agregados compreendidos entre os diâmetros 0,075 a 4,75 mm.

Foram elaborados quatro arranjos granulométricos, compostos por diferentes combinações de agregados, misturados conforme as proporções estabelecidas pela curva granulométrica $Pr = 0,85$, conforme descrito a seguir. O primeiro arranjo,

denominado 100% NAT (100% Natural), corresponde ao traço de referência. Nele, a Parte 1 (31,57%) é composta por brita B1; a Parte 2 (39,28%), por brita B0; e a Parte 3 (29,15%), por areia natural.

O segundo arranjo, denominado cAGR (composição com Agregado Graúdo Reciclado), corresponde ao traço dosado com substituição total da fração graúda por agregado graúdo reciclado (AGR). Nesse arranjo, as Partes 1 e 2, que juntas representam 70,85% da composição, são compostas por AGR, enquanto a Parte 3, correspondente a 29,15%, é composta por areia natural.

O terceiro arranjo, denominado cAMR (composição com Agregado Miúdo Reciclado), corresponde ao traço dosado com substituição da fração miúda por agregado miúdo reciclado (AMR). Nesse arranjo, a Parte 1 (31,57%) é composta por brita B1; a Parte 2 (39,28%), por brita B0; e a Parte 3 (29,15%) é composta por AMR.

O quarto arranjo, denominado 100%REC (100% Reciclado), corresponde ao traço dosado exclusivamente com agregados reciclados, sendo utilizado o AGR nas Partes 1 e 2, que juntas representam 70,85% da composição, e o AMR na Parte 3, correspondente a 29,15%.

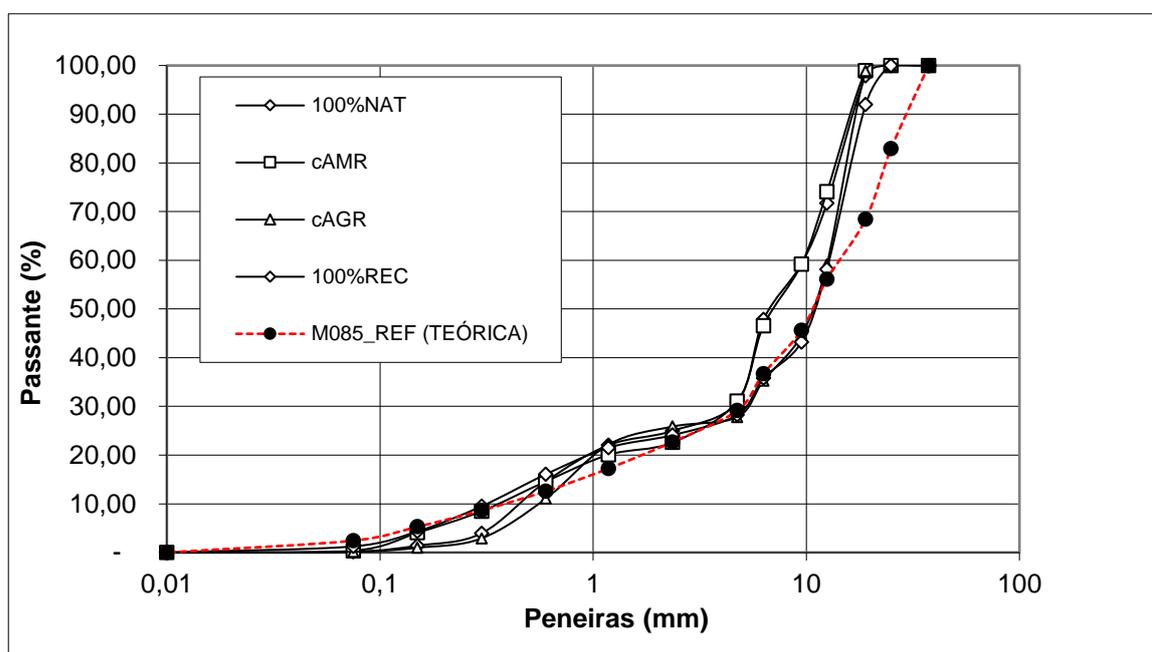
Tabela 9 – Esqueleto granular com base nas porcentagens retidas da composição granulométrica teórica 0,85

Peneiras (mm)	% Retida	100% NAT	cAGR	cAMR	100% REC	(%)
25	17,06	B1	AGR	B1	AGR	31,57
19	14,50					
12,5	12,33	B0		B0		39,28
9,5	10,48					
6,3	8,91					
4,75	7,57					
2,36	6,44	AREIA NAT	AREIA NAT	AMR	AMR	29,15
1,18	5,47					
0,6	4,65					
0,3	3,95					
0,15	3,36					
0,075	5,29					

Fonte: Elaboração própria, 2022

Dessa forma, as variáveis independentes adotadas foram os percentuais de substituição do agregado natural (AN) por agregados reciclados (AR), sendo: 70,85% de AGR na composição cAGR; 29,15% de AMR na cAMR; e 70,85% de AGR combinado com 29,15% de AMR na composição 100% REC. O Gráfico 6 apresenta a curva de distribuição granulométrica teórica $Pr = 0,85$, juntamente com as curvas dos esqueletos granulares das composições 100%NAT, cAMR, cAGR e 100%REC.

Gráfico 6 – Curva granulométrica teórica 0,85 versus curvas de distribuição granulométrica das composições do estudo experimental



Fonte: Elaboração própria, 2022

A partir do Gráfico 6, é possível estimar o coeficiente de uniformidade (C_u) das curvas utilizadas no Estudo experimental discriminados na Tabela 10.

Tabela 10 – Coeficiente de uniformidade das curvas granulométricas do estudo experimental

Curvas	D_{60}/D_{10}
$Pr = 0,85$	34,75
100% NAT	21,10
cAMR	21,10
cAGR	41,66
100% REC	41,66

Fonte: Elaboração própria, 2022

As composições 100%NAT e cAMR apresentaram valores de Cu inferiores ao da curva de referência $Pr = 0,85$, enquanto as composições cAGR e 100% REC apresentaram valores aproximadamente duas vezes maiores, demonstrando maior uniformidade granulométrica e menor divergência em relação à curva de referência.

O consumo de cimento foi mantido constante. Os concretos foram dosados com teor de argamassa 60%. A relação água/cimento adotada no projeto de mistura para os traços 1:3, 1:5 e 1:6 foram, respectivamente, 0,35; 0,45 e 0,55.

O processo de mistura consistiu, inicialmente, na adição do agregado graúdo juntamente com 40% da água de amassamento. Em seguida, foi incorporado o agregado miúdo com mais 20% da água. Por fim, adicionaram-se o cimento e o restante da água, totalizando um tempo aproximado de mistura de 22 minutos.

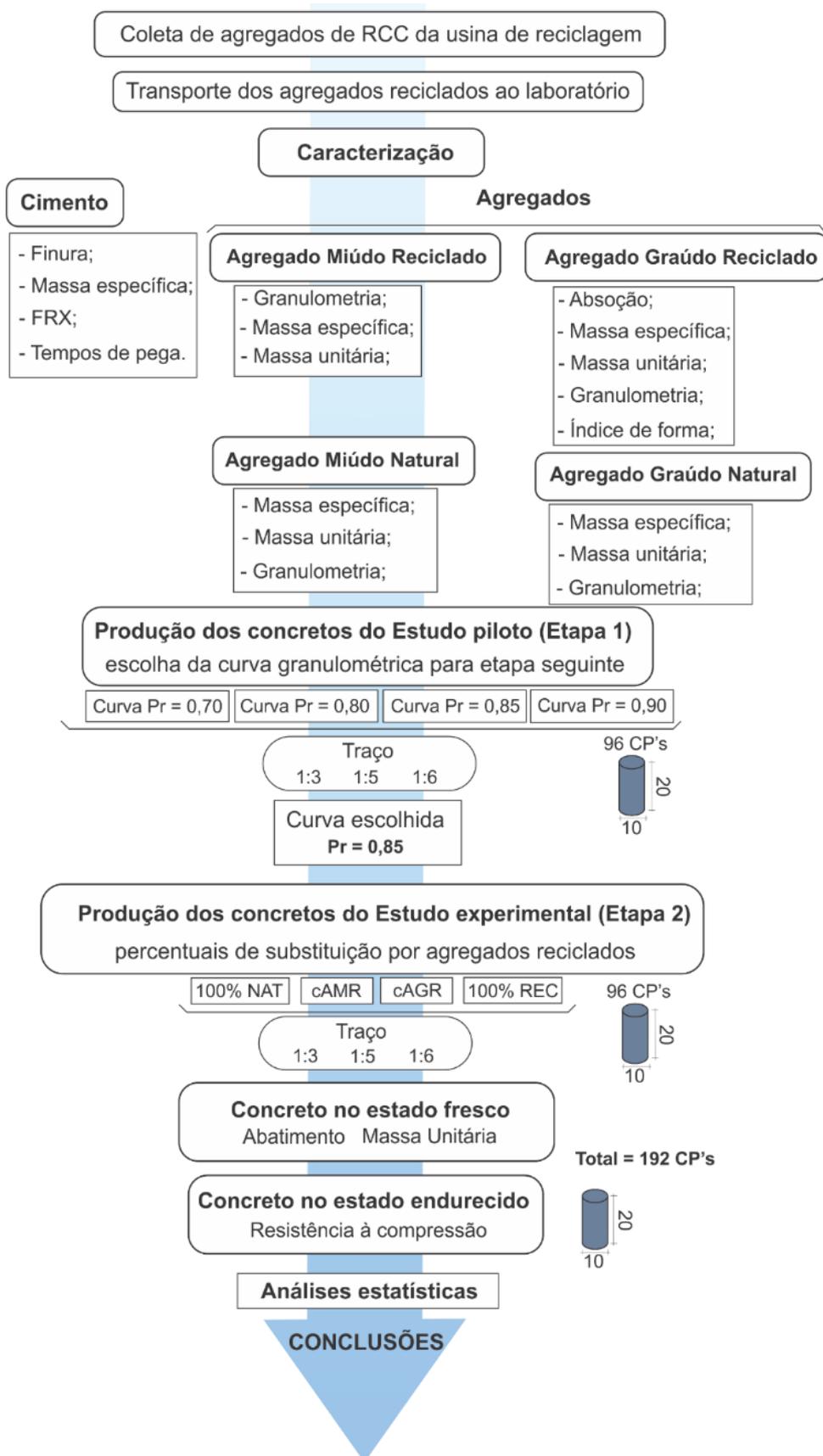
Os concretos foram produzidos em uma betoneira de eixo inclinado, com capacidade de 140 litros. Após o processo de mistura, a consistência do concreto fresco foi avaliada por meio do ensaio de abatimento do tronco de cone, conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 16889 (ABNT, 2020).

Foram moldados quatro corpos de prova (CPs) cilíndricos, com dimensões de 10 cm x 20 cm, para cada traço (1:3, 1:5 e 1:6) de cada composição (100% NAT, cAMR, cAGR e 100% REC), totalizando 48 CPs. Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e conduzidos à cura submersa. A ruptura para verificação da resistência à compressão foi realizada nas idades de 28 dias e 1 ano

As tabelas com o consumo de materiais de todos os concretos produzidos neste estudo estão disponíveis no APÊNDICE B. Nessas tabelas, encontram-se os valores de compensação de água e da relação água/cimento efetiva, calculados conforme a NBR 15116 (ABNT, 2021).

Por fim, foram realizadas análises estatísticas paramétricas e não-paramétricas, de acordo com a natureza dos dados. A Figura 11 apresenta uma ilustração esquemática que detalha e sintetiza os procedimentos metodológicos das etapas mencionadas.

Figura 10 – Fluxograma das atividades desenvolvidas nos estudos piloto e experimental



Fonte: Elaboração própria, 2022

4.3 Análise estatística

4.3.1 Normalidade

Toda variável aleatória segue uma distribuição de frequências dentro de uma população, podendo assumir diferentes formas. A literatura estatística apresenta diversas distribuições teóricas, que são modelos matemáticos desenvolvidos para representar o comportamento de determinados eventos com base na frequência com que ocorrem.

As distribuições de frequências correspondem, na prática, a distribuições de probabilidade, nas quais cada evento está associado a uma determinada probabilidade de ocorrência. A suposição de normalidade — isto é, de que a variável aleatória segue uma distribuição Normal ou Gaussiana — é fundamental para a aplicação de diversos métodos de inferência estatística.

Neste trabalho, considerando-se três ou mais amostras provenientes de populações independentes, a comparação das médias é realizada por meio da Análise de Variância (ANOVA) de classificação simples. Para a aplicação desse método, é necessário pressupor que a variável aleatória apresente distribuição normal em cada uma das populações (ou grupos) analisados.

4.3.2 Homogeneidade

O bom desempenho dos testes paramétricos depende da homogeneidade das variâncias entre os grupos analisados. Esses testes não exigem variâncias idênticas, mas sim que não apresentem discrepâncias significativas que ultrapassem certos limites de tolerância. O teste de homogeneidade é utilizado para verificar se os dados apresentam comportamento similar entre as diferentes classes ou populações definidas pelas categorias da variável classificatória. O teste utilizado para verificar a igualdade das variâncias entre populações nesse trabalho será o teste de homogeneidade de Levene.

4.3.3 Estatística paramétrica

Os testes paramétricos são utilizados para analisar os resultados da variável dependente em relação às variáveis independentes, com o objetivo de aceitar ou

rejeitar a hipótese nula. Essa hipótese sustenta que os resultados observados não se devem aos efeitos propostos pela hipótese experimental, mas sim a variações aleatórias nos dados.

Quando a distribuição de frequências dos erros amostrais é normal, as variâncias são homogêneas e os dados são independentes, é provável que a amostra apresente simetria aceitável, com um único ponto de máximo localizado no intervalo de classe correspondente à média da distribuição. Nesses casos, o histograma de frequências tende a apresentar um contorno semelhante ao formato de sino característico da curva normal.

4.3.3.1 ANOVA e pós-teste de Tukey

Para verificar as relações entre os resultados de resistência à compressão aos 28 dias e após 1 ano, considerando as variações nas curvas granulométricas do estudo piloto e nos traços em massa e volume com diferentes teores de agregados reciclados, foi realizada uma análise estatística utilizando o teste de ANOVA, seguido do pós-teste de Tukey.

O teste de análise de variância (ANOVA) é uma técnica de teste de hipóteses utilizada para avaliar a influência de uma ou mais variáveis sobre os resultados de um experimento. Ele permite comparar três ou mais médias populacionais, com base na análise das variâncias entre e dentro dos grupos amostrais.

O teste de Tukey é aplicado como complemento ao teste de ANOVA nos casos em que a hipótese nula é rejeitada, ou seja, quando há evidências de diferenças significativas entre pelo menos um par de médias de tratamentos, ao nível de significância α adotado. Esse teste de comparações múltiplas permite avaliar todas as possíveis diferenças entre pares de médias, indicando não apenas quais são significativamente diferentes, mas também a magnitude dessas diferenças.

O teste de ANOVA foi aplicado às médias de resistência à compressão nos casos em que se verificaram as condições de normalidade e homogeneidade das variâncias. A análise considerou a variação das curvas granulométricas (0,70; 0,80; 0,85 e 0,90) para os traços 1:3, 1:5 e 1:6, e o inverso — a variação dos traços para cada uma dessas curvas. Em ambos os casos, o teste indicou se há ou não

diferença significativa entre os grupos. Quando identificadas diferenças, aplicou-se o teste de Tukey para determinar, par a par, quais traços ou curvas apresentam diferenças estatisticamente significativas

4.3.4 Estatística não-paramétrica

Quando se supõe que a distribuição dos dados experimentais não seja normal, ou quando não há elementos suficientes para afirmar sua normalidade, recorre-se à estatística não-paramétrica. Essa abordagem envolve técnicas que não dependem de pressupostos sobre a distribuição dos dados, permitindo a análise de dados que não seguem uma distribuição específica.

4.3.4.1 Kruskal-Wallis e pós-teste de Dunn

Nos casos em que as condições de normalidade e homogeneidade dos dados não foram atendidas, utilizou-se o teste de Kruskal-Wallis, uma alternativa à ANOVA. Para a aplicação desse teste, é necessário que os dados contenham pelo menos três grupos, com um mínimo de quatro observações (n) em cada grupo.

O teste de Kruskal-Wallis tem como objetivo comparar três ou mais amostras independentes. Para sua aplicação, é necessário que as variáveis sejam aleatórias e que as observações sejam independentes, tanto dentro de cada amostra quanto entre as diferentes amostras estudadas.

Assim como na ANOVA, em que é utilizado o pós-teste de Tukey, também é necessário realizar um teste de comparação múltipla após o teste de Kruskal-Wallis para identificar quais grupos apresentam diferenças entre si. Para isso, foi utilizado o pós-teste de Dunn. As análises estatísticas exploratórias foram conduzidas com o auxílio do software IBM® SPSS® Statistics 28.0.1.

5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS DADOS

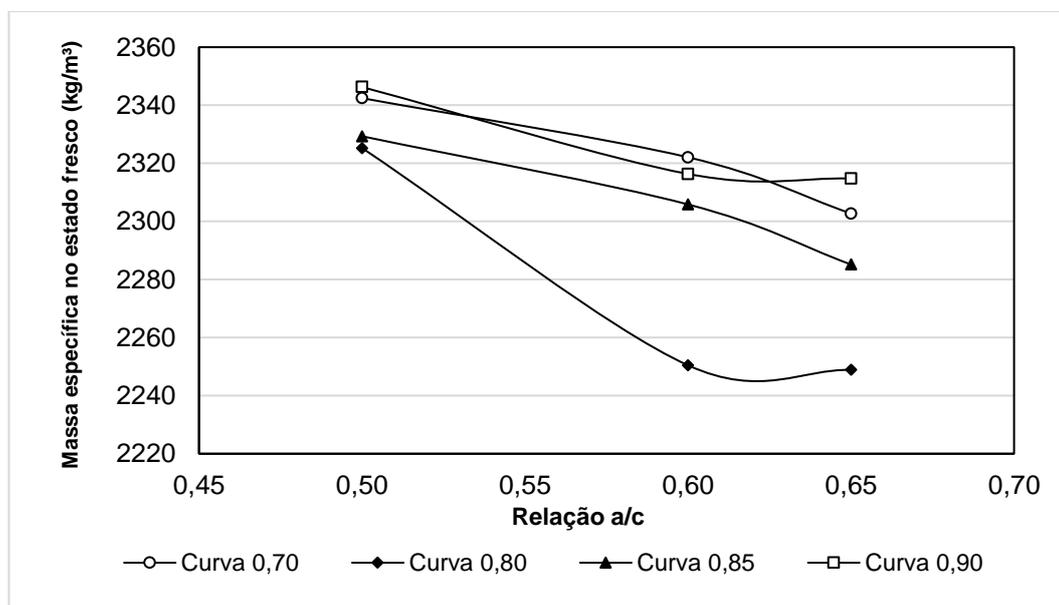
5.1 Estado fresco

5.1.1 Estudo Piloto

5.1.1.1 Relação água/cimento *versus* massa específica no estado fresco do estudo piloto

O Gráfico 7 apresenta a relação entre a massa específica aparente no estado fresco e a relação água/cimento dos concretos dosados com agregados secos totais, nas proporções 1:3, 1:5 e 1:6, correspondentes às relações a/c de 0,50, 0,60 e 0,65, respectivamente. Observa-se uma tendência de redução da massa específica com o aumento da relação água/cimento, sendo essa redução mais acentuada na curva correspondente à relação a/c de 0,80.

Gráfico 7 – Relação a/c *versus* MU no estado fresco do estudo piloto



Fonte: Elaboração própria, 2022

5.1.1.2 Abatimento do tronco de cone do estudo piloto

Embora o ensaio monoponto de abatimento do tronco de cone não forneça uma medida completa da trabalhabilidade do concreto, ele é amplamente utilizado para identificar variações na uniformidade de uma mistura com proporções específicas (NEVILLE, 2016).

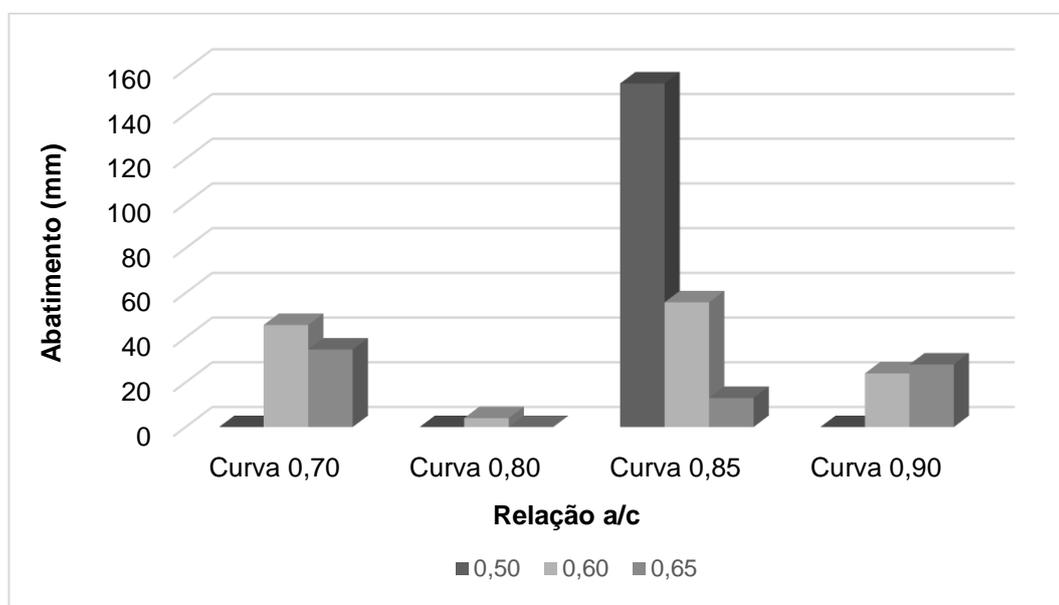
Como apresentado na Tabela 10 e no Gráfico 8, todos os traços com proporção 1:3, exceto o correspondente à Curva 0,85, apresentaram abatimento nulo. Considerando a relação água/cimento no momento da aferição, essas misturas podem ser classificadas como de consistência seca. A Curva 0,80, que registrou os menores valores de massa específica aparente no estado fresco, também resultou em abatimentos nulos ou próximos de zero — como no Traço 1:5, com abatimento de apenas 4,00 mm —, comportamento coerente com o princípio do ensaio, que avalia a influência do peso próprio do concreto sobre sua capacidade de deformação no estado fresco.

Tabela 10 – Valores de abatimento de tronco (mm) de cone para as curvas variando-se relação a/c para os respectivos traços do estudo piloto

Traço	Relação a/c	Curva 0,70	Curva 0,80	Curva 0,85	Curva 0,90
1:3	0,50	0,00	0,00	153,70	0,00
1:5	0,60	45,67	4,00	55,80	24,00
1:6	0,65	31,67	0,00	13,00	28,00

Fonte: Elaboração própria, 2022

Gráfico 8 – Abatimento de tronco de cone para cada tipo de curva empregada no esqueleto granular dos concretos do estudo piloto



Fonte: Elaboração própria, 2022

A Tabela 11 apresenta faixas aproximadas de abatimento associadas a diferentes níveis de trabalhabilidade, adaptadas da proposta original de Bartos (1992). Com base nessa classificação, a Curva 0,70 variou de abatimento zero até

trabalhabilidade média. A Curva 0,80 também apresentou abatimento nulo, o que pode ser atribuído a um possível erro experimental ou na formulação da mistura. A Curva 0,85 exibiu uma variação mais ampla de trabalhabilidade, classificando-se como alta, média e baixa para os traços 1:3, 1:5 e 1:6, respectivamente. Já a Curva 0,90 apresentou trabalhabilidade entre zero baixa, sendo enquadrada na categoria de trabalhabilidade baixa. Com exceção da Curva 0,85, todas as demais curvas analisadas apresentaram valores de abatimento de até próximo de 40 mm.

Tabela 11 – Tipos de trabalhabilidade em função das variações no abatimento

Tipo de trabalhabilidade	Abatimento (mm)
Abatimento zero	0
Muito baixa	5-10
Baixa	10-35
Média	35-75
Alta	75-160
Muito alta	160 ao colapso

Fonte: Elaboração própria, 2022

Um aspecto importante a ser considerado nessa análise são os efeitos das variações na granulometria sobre os resultados de abatimento. Diferentes distribuições granulométricas, especialmente aquelas com maiores teores de partículas finas, podem influenciar significativamente o comportamento do concreto. Assim, o mesmo valor de abatimento pode corresponder a diferentes níveis de trabalhabilidade, uma vez que esse ensaio não possui uma correlação precisa e direta com a trabalhabilidade real da mistura.

A granulometria exerce influência direta sobre as proporções do concreto, especialmente em relação à trabalhabilidade e à relação água/cimento. De modo geral, quanto mais grosseira for a granulometria, menor poderá ser o consumo de cimento necessário na dosagem. No entanto, essa condição é válida apenas dentro de certos limites, já que misturas com consumo muito reduzido de cimento tendem a apresentar baixa coesão, a menos que contenham uma quantidade mínima de materiais finos que contribua para a estabilidade da mistura.

É importante destacar que, na análise do concreto no estado fresco, os dois parâmetros mais relevantes são a quantidade de cimento e a relação água/cimento.

Embora dados como a granulometria e o teor de umidade dos agregados também sejam fundamentais, sua principal contribuição está em permitir um controle mais eficiente do processo. Quando essas informações são fornecidas de forma precisa e confiável, o rigor necessário no controle da resistência do concreto no estado endurecido pode ser consideravelmente reduzido (NEVILLE, 2016).

Partindo do pressuposto de que, no estado fresco, a Curva 0,85 apresentou os melhores índices de trabalhabilidade, pode-se inferir que ela proporciona uma boa distribuição entre as partículas, conforme já indicado pelo seu coeficiente de uniformidade. Esse arranjo granulométrico apresenta menor probabilidade de descontinuidades entre as frações, favorecendo a coesão da mistura. Por essa razão, a Curva 0,85 foi escolhida como referência para as dosagens da segunda etapa do estudo.

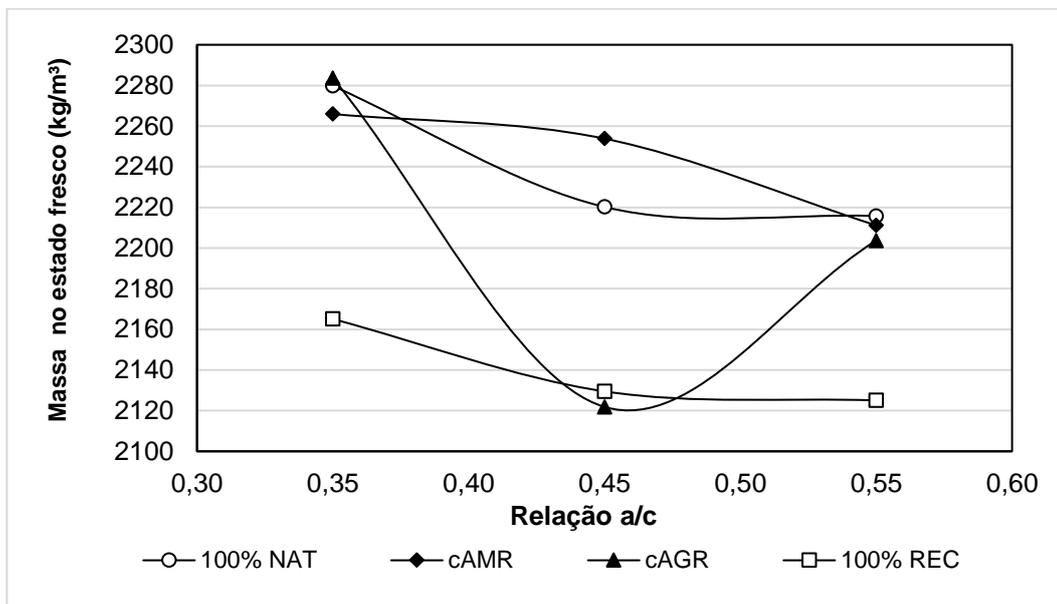
5.1.2 Estudo Experimental em massa

5.1.2.1 Relação *a/c* versus massa específica no estado fresco do estudo experimental em massa

A partir do Gráfico 9, observa-se um comportamento semelhante entre as composições 100%NAT e cAMR, distinguindo-se apenas pela taxa de decréscimo mais acentuada na composição 100%NAT. Ambas compartilham como característica comum o uso de agregados naturais na fração graúda. Já a composição cAGR, embora apresente comportamento alinhado com as anteriores nos extremos da curva, aproxima-se da composição 100%REC no ponto central correspondente ao traço 1:5.

Essa aproximação pode estar relacionada à variabilidade inerente às propriedades dos agregados reciclados, especialmente quando utilizados na fração graúda, influenciando significativamente o desempenho das misturas. Outra hipótese é a ocorrência de um erro experimental pontual, sem possibilidade de repetição do ensaio.

Gráfico 9 – Relação a/c versus MU no estado fresco do estudo experimental em massa



Fonte: Elaboração própria, 2022

Como já era esperado, a substituição do agregado gráúdo natural por agregado gráúdo reciclado causou uma redução na massa específica aparente no estado fresco dos concretos analisados. Em contrapartida, ao substituir o agregado miúdo natural pelo reciclado, observou-se um aumento nessa propriedade.

5.1.2.2 Abatimento do tronco de cone do estudo experimental em massa

De acordo com a Tabela 12, os abatimentos de tronco de cone para as diferentes relações água/cimento variaram entre 23,00 mm e 216,70 mm, com valores médios situando-se entre 50 mm e 100 mm. A composição cAGR foi a que apresentou os menores valores de abatimento, embora tenha alcançado um desempenho satisfatório no traço 1:3, comparado ao mesmo traço das demais composições dosadas em massa.

Tabela 12 – Valores de abatimento de tronco (mm) de cone para as misturas variando-se relação a/c para as respectivas composições do estudo experimental em massa

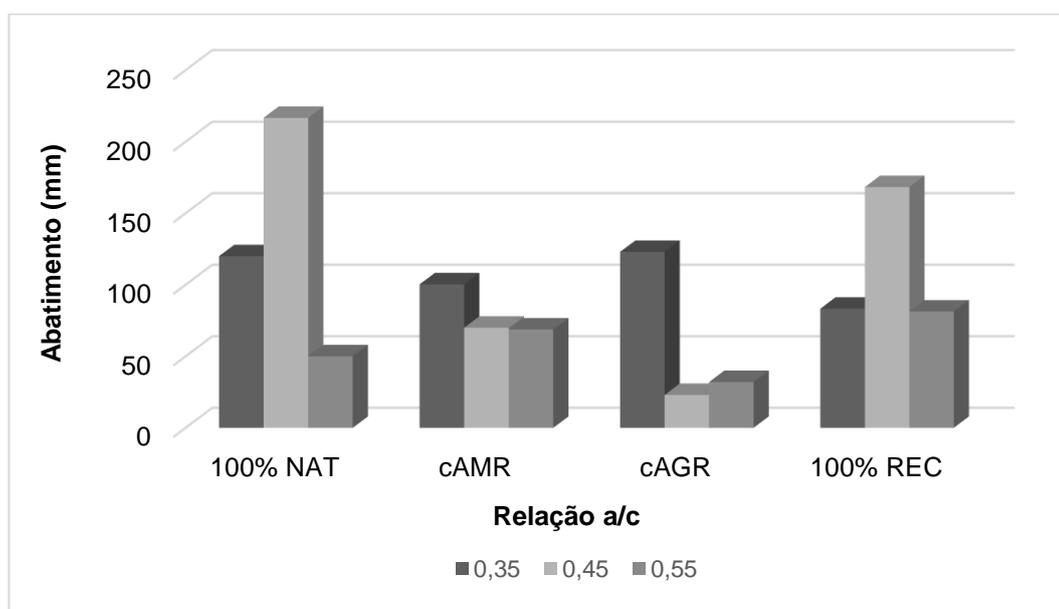
Traço	Relação a/c	100% NAT	cAMR	cAGR	100% REC
1:3	0,35	120,00	100,30	123,00	83,30
1:5	0,45	216,70	70,00	23,00	168,30
1:6	0,55	50,00	68,70	32,00	81,30

Fonte: Elaboração própria, 2022

Os valores de abatimento mais elevados foram observados na composição 100%NAT, enquanto a composição 100%REC apresentou a menor diferença no abatimento em relação à 100%NAT. Os traços 1:5 dessas duas composições apresentaram abatimentos com tendência ao colapso. Em termos de trabalhabilidade, a maioria das composições obteve tipos variando de média a alta.

O Gráfico 10 ilustra os perfis de abatimento das composições dosadas em massa para os três tipos de traço. Observa-se certa regularidade nos valores do traço 1:3 ($a/c = 0,35$) entre as diferentes composições. É possível identificar de forma clara os valores que indicam abatimento deficiente, assim como aqueles que correspondem a uma trabalhabilidade elevada.

Gráfico 10 – Abatimento de tronco de cone para cada composição do estudo experimental em massa



Fonte: Elaboração própria, 2022

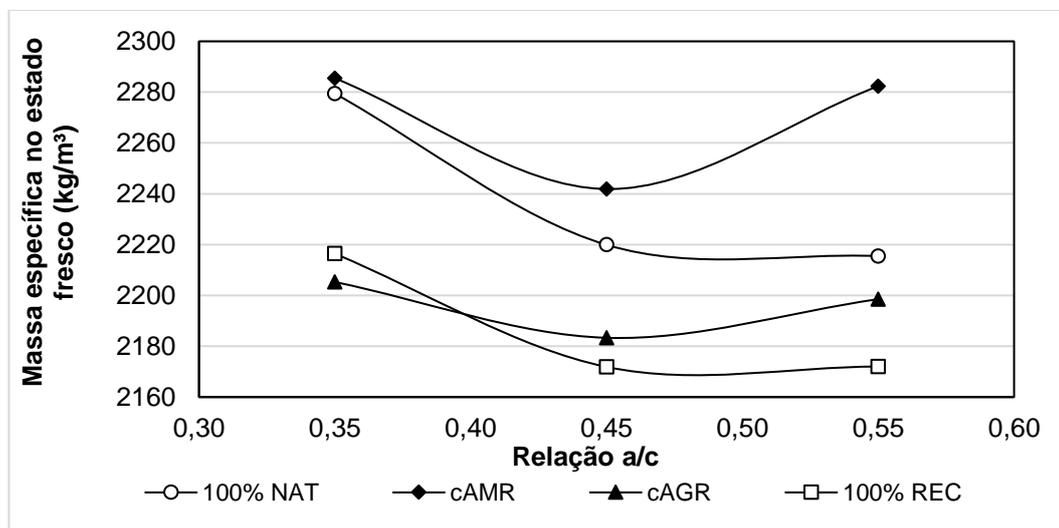
5.1.3 Estudo Experimental em volume

5.1.3.1 Relação a/c versus massa específica no estado fresco do estudo experimental em volume

No Gráfico 11, observa-se que os valores de massa específica aparente no estado fresco da composição cAMR são superiores aos da 100%NAT dosada em volume, com uma diferença mais pronunciada quando comparado às dosagens em massa. O comportamento da curva que relaciona a relação água/cimento com a massa específica no estado fresco da composição cAGR mostrou-se mais semelhante ao

da composição 100%REC, especialmente nos traços extremos, em contraste com os resultados observados nas dosagens em massa.

Gráfico 11 – Relação a/c versus MU no estado fresco do estudo experimental em volume



Fonte: Elaboração própria, 2022

Enquanto a substituição do agregado miúdo natural pelo agregado miúdo reciclado (AMR) resulta em um aumento na massa específica aparente do concreto no estado fresco, a substituição pelo agregado graúdo reciclado (AGR) leva a uma redução dessa propriedade.

5.1.3.2 Abatimento do tronco de cone do estudo experimental em volume

A Tabela 13 apresenta os valores de abatimento de tronco de cone para as composições do estudo experimental em volume, com variação entre 26,00 mm e 145,00 mm, sendo que nenhum dos concretos frescos apresentou tendência ao colapso. A composição cAGR apresentou os menores valores de abatimento, assim como ocorreu no estudo experimental em massa.

Tabela 13 – Valores de abatimento de tronco (mm) de cone para as misturas variando-se relação a/c para as composições do estudo experimental em volume

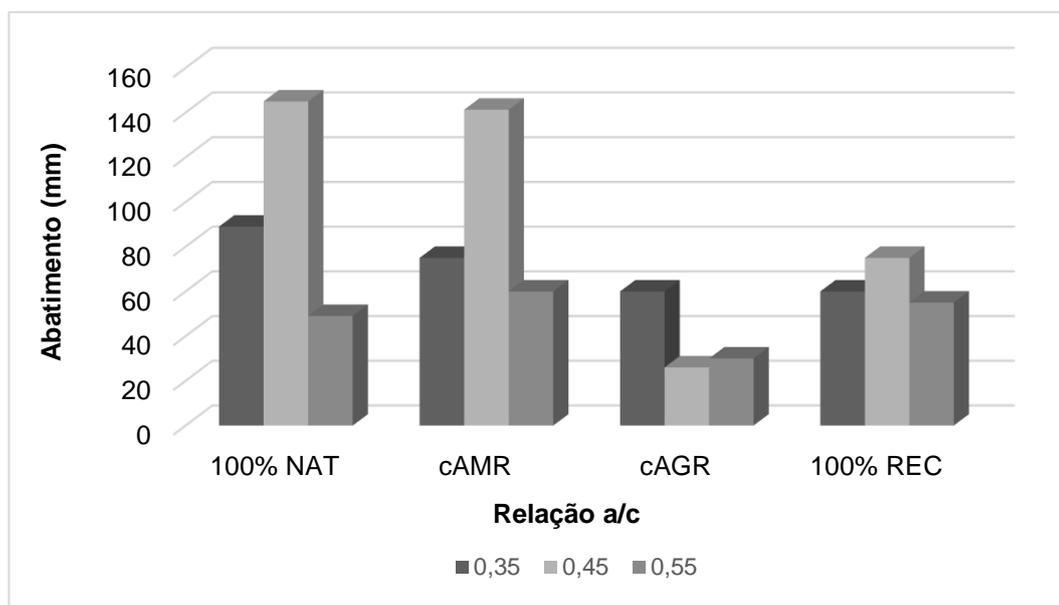
Traço	Relação a/c	100% NAT	cAMR	cAGR	100% REC
1:3	0,35	89,00	75,00	60,00	60,00
1:5	0,45	145,00	141,10	26,00	75,00
1:6	0,55	49,00	60,00	30,00	55,00

Fonte: Elaboração própria, 2022

Novamente, os maiores valores de abatimento foram observados na composição 100%NAT. A composição que apresentou a menor diferença de abatimento em relação à 100%NAT foi a cAMR. O traço 1:5 foi o que obteve os maiores valores de trabalhabilidade entre a maioria das composições. Os tipos de trabalhabilidade variaram entre média e alta, com exceção de dois traços classificados como de baixa trabalhabilidade na composição cAGR.

O Gráfico 12 ilustra, por meio de um gráfico de barras, o abatimento das composições dosadas em volume para os três tipos de traço. Observa-se uma leve redução no abatimento, indo da composição de referência para a composição 100% reciclado (100%NAT > cAMR > cAGR = 100%REC). Destacam-se as melhores trabalhabilidades nos traços 1:5 das composições 100%NAT e cAMR, enquanto os valores deficientes estão presentes na composição cAGR.

Gráfico 12 – Abatimento de tronco de cone para cada composição do estudo experimental em volume



Fonte: Elaboração própria, 2022

Os valores de abatimento da composição 100%REC situaram-se próximos à média, apresentando boa uniformidade. Esses valores foram superiores aos da composição cAGR e inferiores aos das composições 100%NAT e cAMR.

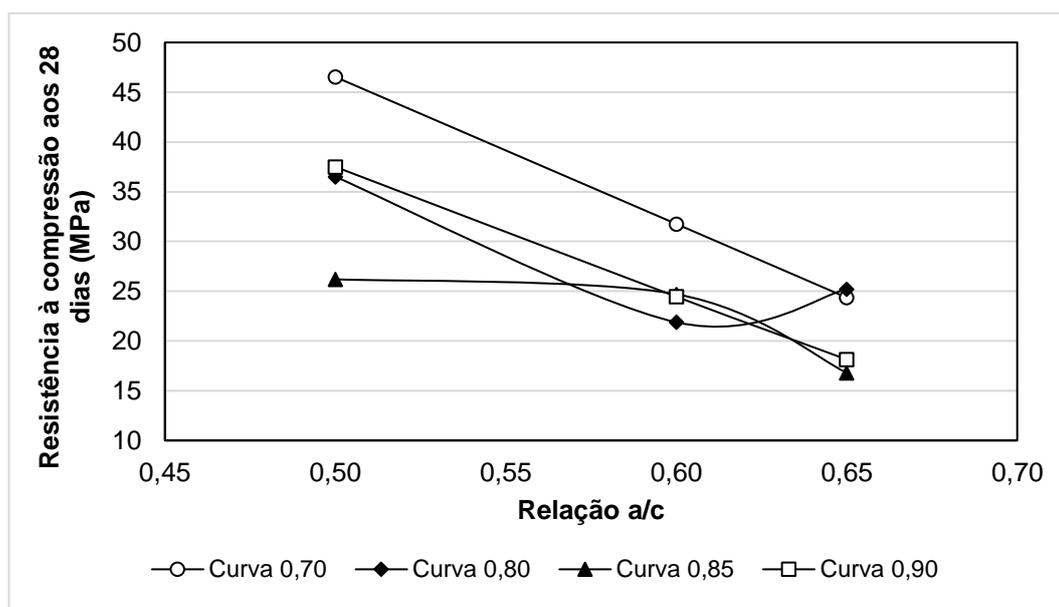
5.2 Estado endurecido

5.2.1 Estudo piloto

5.2.1.1 Relação a/c versus resistência à compressão aos 28 dias do estudo piloto

O Gráfico 13, que relaciona a relação água/cimento (a/c) à resistência à compressão aos 28 dias para os concretos do estudo piloto, segue a relação inversa entre essas grandezas, conforme estabelecido por René Feret em 1896 e Duff Abrams em 1919. No entanto, a curva 0,80 apresenta uma exceção, com resistência no traço pobre (1:6) sendo aproximadamente 2 MPa superior à do traço médio (1:5). Esse resultado pode ser explicado provavelmente pelo adensamento inadequado dos corpos de prova desse traço, gerando um falso positivo.

Gráfico 13 – Relação a/c versus resistência à compressão do estudo piloto aos 28 dias

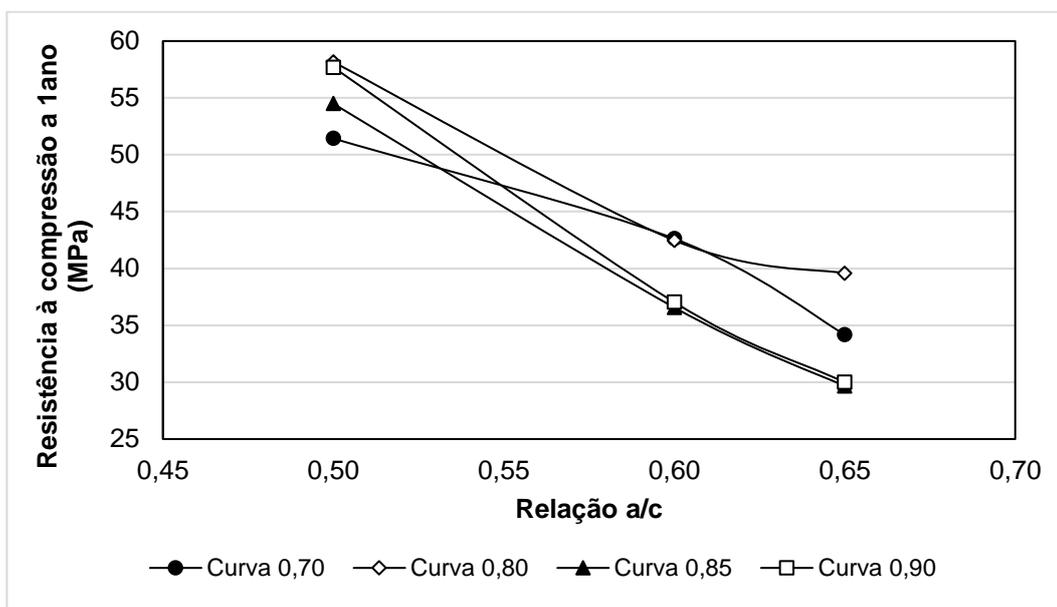


Fonte: Elaboração própria, 2022

5.2.1.2 Relação a/c versus resistência à compressão a 1 ano do estudo piloto

No caso dos concretos curados por 1 ano, conforme ilustrado no Gráfico 14, observa-se uma atenuação do fenômeno registrado aos 28 dias. A resistência da curva 0,80, que anteriormente apresentou um crescimento inesperado com o aumento da relação água/cimento, agora mostra um comportamento mais equilibrado. Além disso, nota-se uma maior aproximação entre as resistências dos traços de cada curva, especialmente nos traços 1:3 ($a/c = 0,50$).

Gráfico 14 - Relação a/c versus resistência à compressão do estudo piloto a 1 ano

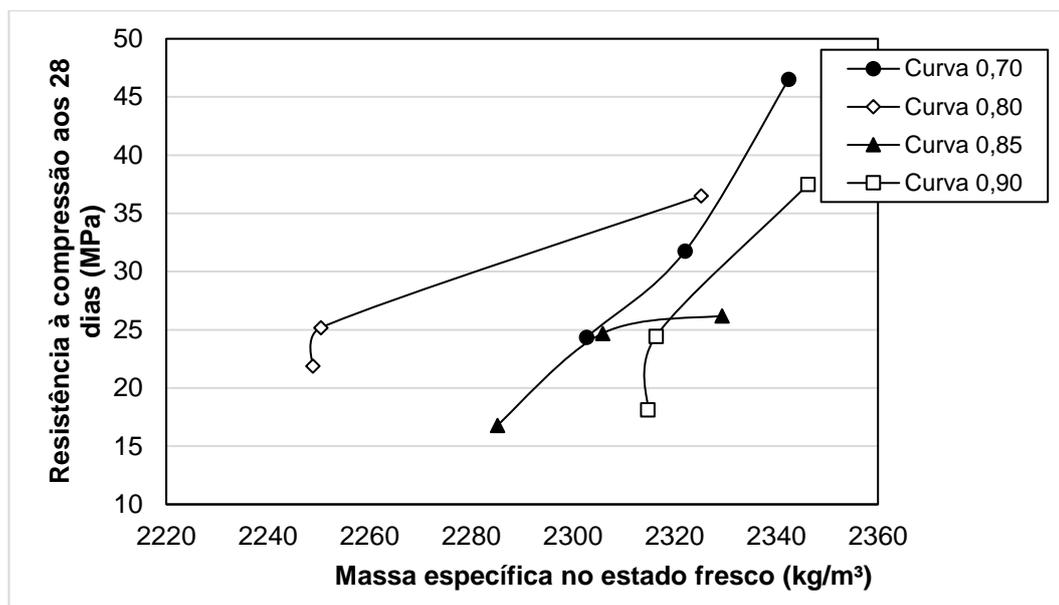


Fonte: Elaboração própria, 2022

5.2.1.3 Massa específica no estado fresco versus resistência à compressão aos 28 dias do estudo piloto

No Gráfico 15, que relaciona a massa unitária no estado fresco à resistência à compressão aos 28 dias, a curva 0,70, embora não apresente os maiores valores de massa unitária, alcança os maiores valores de resistência. A curva 0,85 ocupa uma posição intermediária entre as demais curvas, apresentando uma sutil variação na resistência entre os traços 1:5 e 1:6, com a formação de um patamar.

Gráfico 15 – Massa unitária no estado fresco *versus* resistência à compressão do estudo piloto aos 28 dias

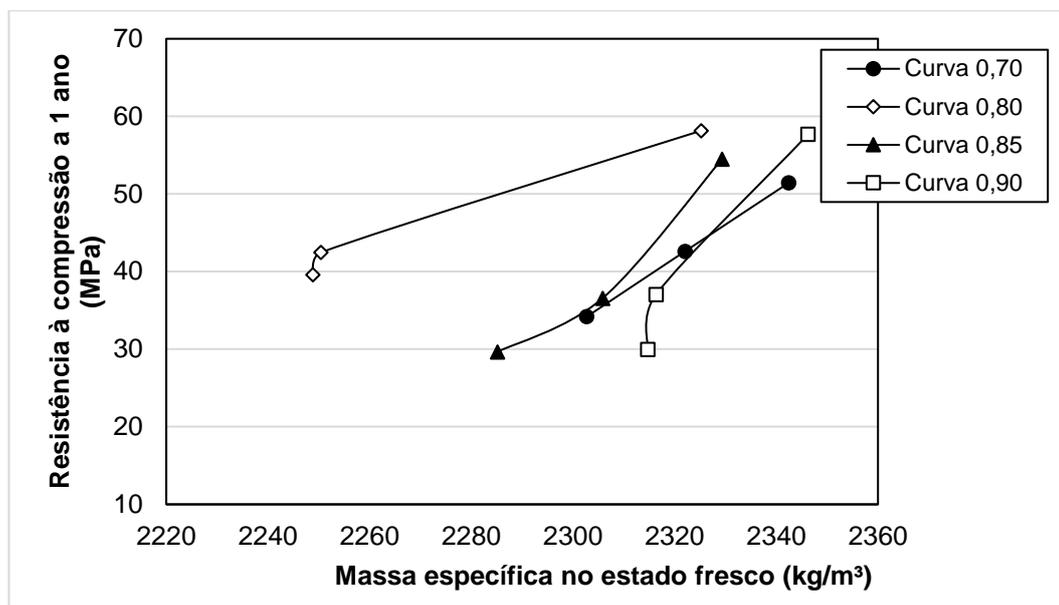


Fonte: Elaboração própria, 2022

5.2.1.4 Massa específica no estado fresco *versus* resistência à compressão a 1 ano do estudo piloto

No Gráfico 16, que relaciona a resistência à compressão com a massa unitária no estado fresco após 1 ano de cura, observa-se que o patamar observado entre as resistências dos traços 1:5 e 1:6 aos 28 dias foi desfeito. Os ganhos de resistência, que anteriormente variavam de 15 MPa a 40 MPa, passaram a valores na faixa de 30 MPa a 60 MPa.

Gráfico 16 – Massa específica no estado fresco versus resistência à compressão do estudo piloto a 1 ano



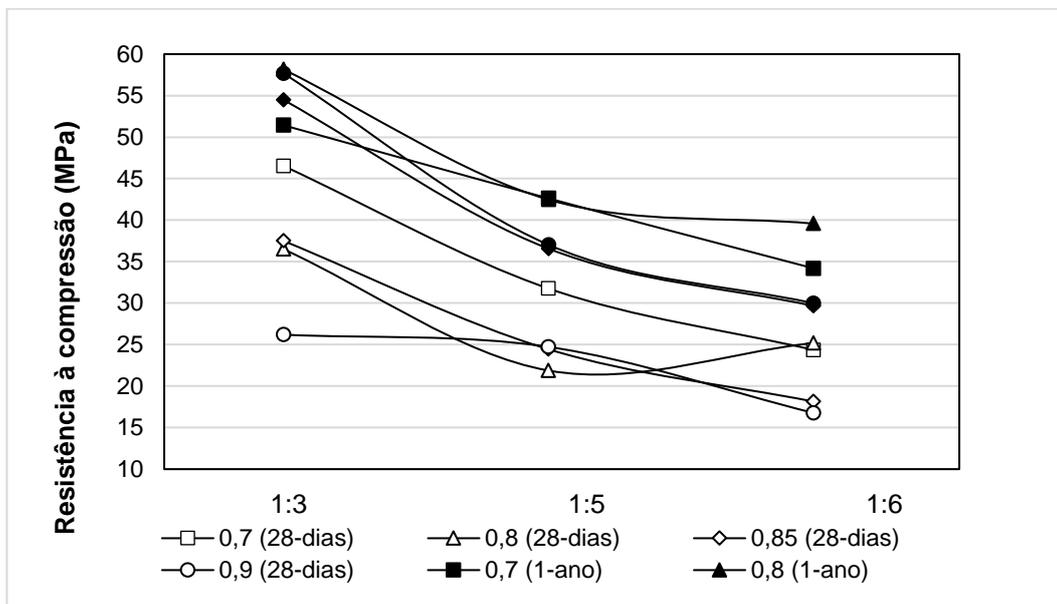
Fonte: Elaboração própria, 2022

5.2.1.5 Traço do estudo piloto em massa versus resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano do estudo piloto

Analisando a resistência à compressão de cada curva em relação à variação do traço, o Gráfico 17, que relaciona os traços das curvas do estudo piloto com a resistência à compressão nas idades de 28 dias e 1 ano, revela a esperada redução na resistência com a diminuição do consumo de cimento.

As curvas 0,70 e 0,85 apresentam uma tendência quase linear, enquanto as demais curvas exibem um comportamento distinto. De maneira geral, essas curvas apresentaram ótimos resultados após 1 ano de cura, com um padrão de comportamento semelhante ao observado aos 28 dias, com destaque para as curvas 0,70 e 0,85.

Gráfico 17 – Relação entre os traços do estudo piloto, 28 dias e 1 ano, e resistência à compressão



Fonte: Elaboração própria, 2022

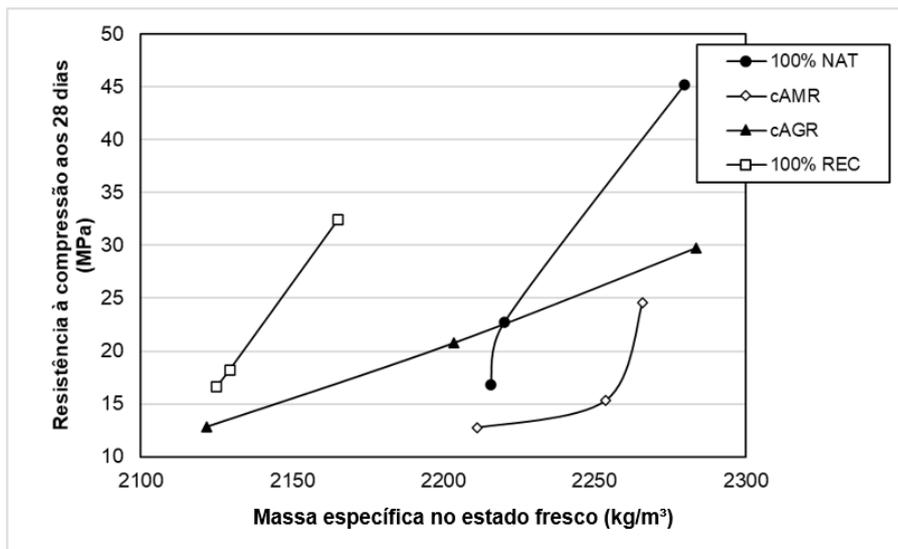
5.2.2 Estudo experimental em massa

5.2.2.1 Massa específica no estado fresco versus resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano do estudo experimental em massa

A análise do Gráfico 18 revela que a composição com 100% de agregados naturais (100% NAT), apesar de não apresentar a maior massa específica aparente, foi a que atingiu os maiores valores de resistência à compressão tanto aos 28 dias quanto após 1 ano de cura. A composição com 100% de agregados reciclados (100% REC), por sua vez, apresentou valores inferiores de massa específica, mas ainda assim demonstrou resistências à compressão satisfatórias em relação às demais formulações. No caso da composição com agregados graúdos reciclados (cAGR), observou-se uma maior variação nos valores de massa específica aparente, com desempenhos mecânicos que se situaram entre os observados para as composições 100% REC e cAMR.

Por fim, embora a composição cAMR tenha apresentado, de modo geral, maiores valores de massa específica aparente, seus resultados de resistência à compressão foram inferiores. De maneira geral, observa-se uma tendência de aumento da resistência à compressão com o aumento da massa específica no estado fresco.

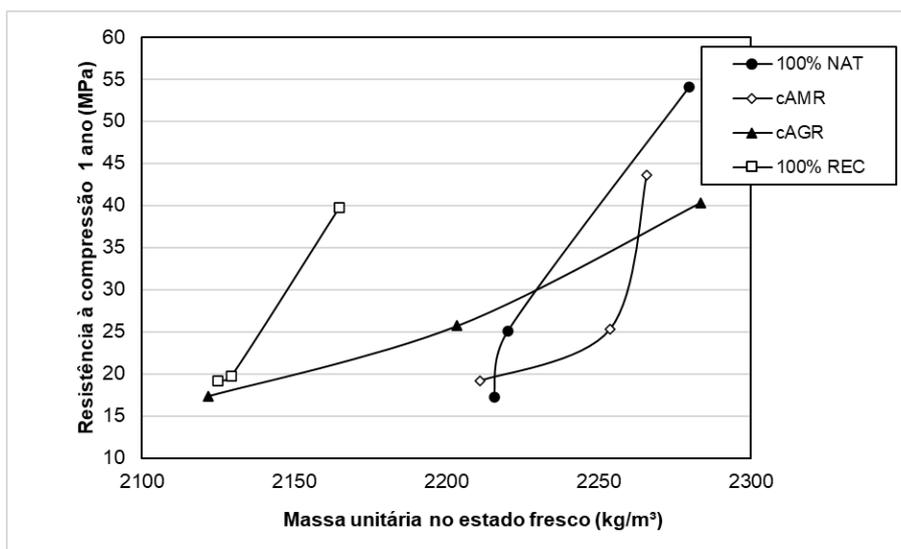
Gráfico 18 – Massa específica no estado fresco *versus* resistência à compressão aos 28 dias do estudo experimental em massa



Fonte: Elaboração própria, 2022

Ao avaliar os resultados a 1 ano de idade, observa-se, por meio do Gráfico 19 a manutenção da tendência a nível geral. No entanto, destaca-se o desempenho da composição cAMR, que apresentou, de modo geral, resultados superiores em comparação às composições cAGR e 100% REC. Quando comparada à composição 100% NAT, também demonstrou desempenho satisfatório.

Gráfico 19 – Massa específica no estado fresco *versus* resistência à compressão a 1 ano do estudo experimental em massa



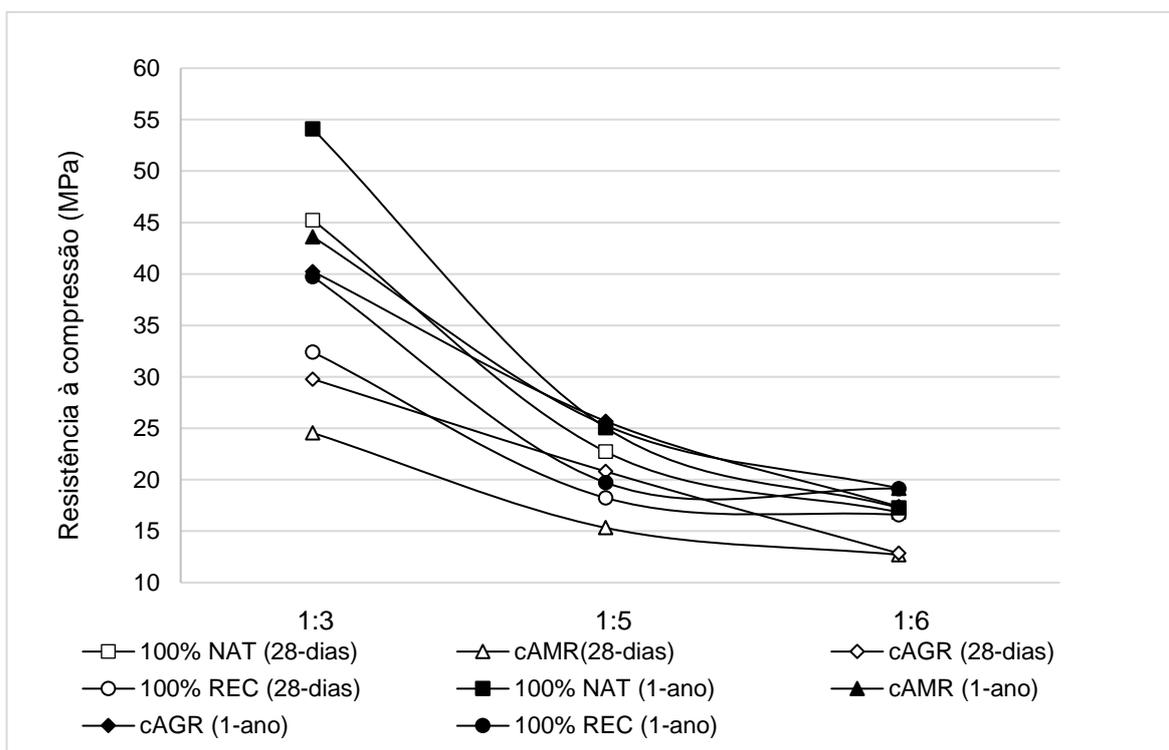
Fonte: Elaboração própria, 2022

5.2.2.2 Traços do estudo experimental em massa versus resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano

À medida que a relação a/c aumenta, observa-se uma redução na resistência à compressão do concreto. Essa tendência de comportamento inversamente proporcional entre as duas variáveis pode ser claramente verificada no Gráfico 20 do estudo experimental em massa.

O comportamento da resistência a compressão a 1 ano de idade apresenta valores equiparáveis ou até superiores aos observados aos 28 dias. Nota-se uma diminuição da taxa de variação da resistência entre as composições, especialmente na relação a/c 0,35, quando comparada à composição de referência. Outro aspecto relevante é o desempenho da composição cAMR, que, a 1 ano de idade, obteve resultados satisfatórios.

Gráfico 20 – Relação entre os traços do estudo experimental em massa, 28 dias e 1 ano, e resistência à compressão



Fonte: Elaboração própria, 2022

De modo geral, observa-se no Gráfico 19 evidência variações na resistência à compressão, aos 28 dias, para o traço 1:3 em ambas as composições. Observa-se que, à medida que o consumo de cimento é reduzido, ocorre uma convergência nos

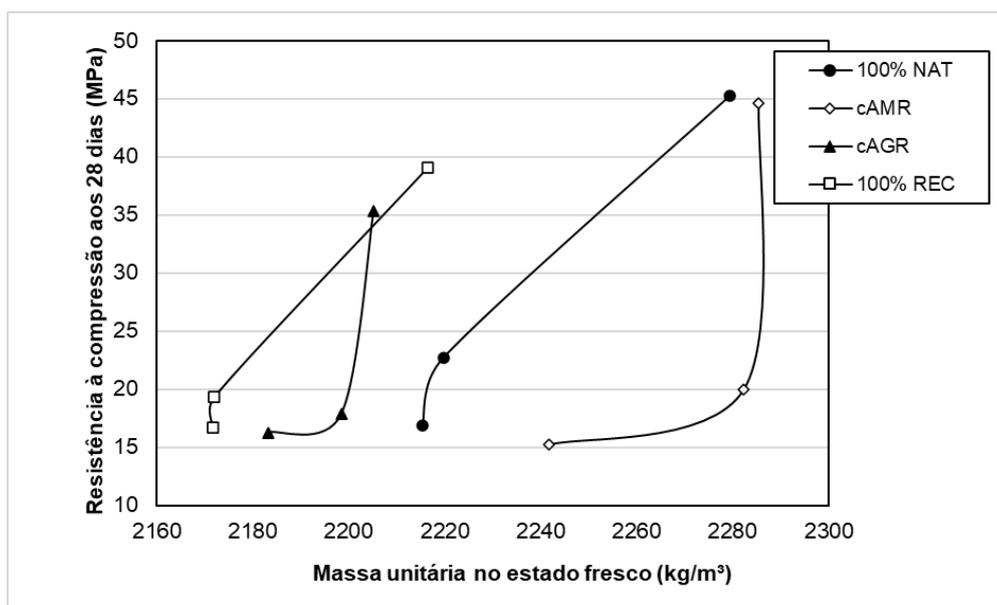
valores de resistência, resultando em menores dispersões. Ao avaliar o comportamento a 1 ano de idade, destaca-se o desempenho da composição cAMR em comparação à composição 100% NAT.

5.2.3 Estudo experimental em volume

5.2.3.1 Massa específica no estado fresco versus resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano do estudo experimental em volume

Ao comparar as massas específicas aparentes entre o estudo em massa e o estudo em volume, observa-se um aumento nos valores de massa específica aparente no estado fresco no estudo experimental em volume, conforme ilustrado no Gráfico 21. Dessa forma, o aumento da resistência à compressão observado no estudo em volume, em relação ao estudo em massa, mostra-se coerente com essa variação.

Gráfico 21 – Massa específica no estado fresco *versus* resistência à compressão aos 28 dias do estudo experimental em volume



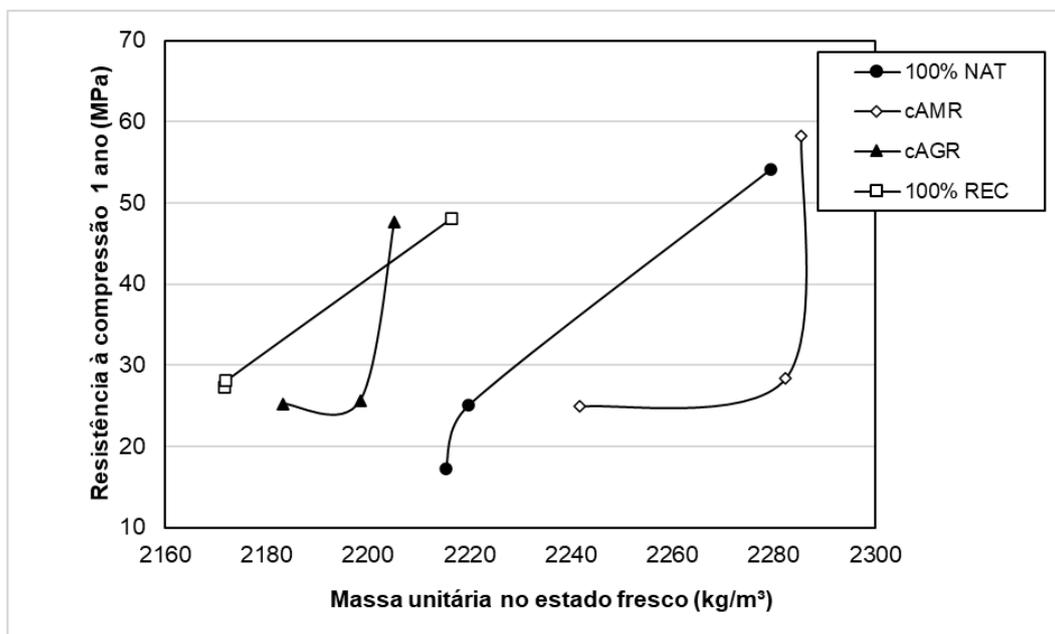
Fonte: Elaboração própria, 2022

A mesma tendência mencionada anteriormente entre resistência à compressão e massa específica aparente é novamente observada. Aos 28 dias, as composições cAGR e 100% REC apresentaram os menores valores de massa específica, enquanto as composições cAMR e 100% NAT obtiveram semelhantes entre si.

Ao se comparar os resultados a 1 ano de idade (Gráfico 22), as composições

cAGR e 100% REC apresentaram, de modo geral, desempenho superior à composição de referência 100% NAT. A composição cAMR, por sua vez, obteve melhores resultados em relação às demais.

Gráfico 22 – Massa específica no estado fresco versus resistência à compressão a 1 ano do estudo experimental em volume



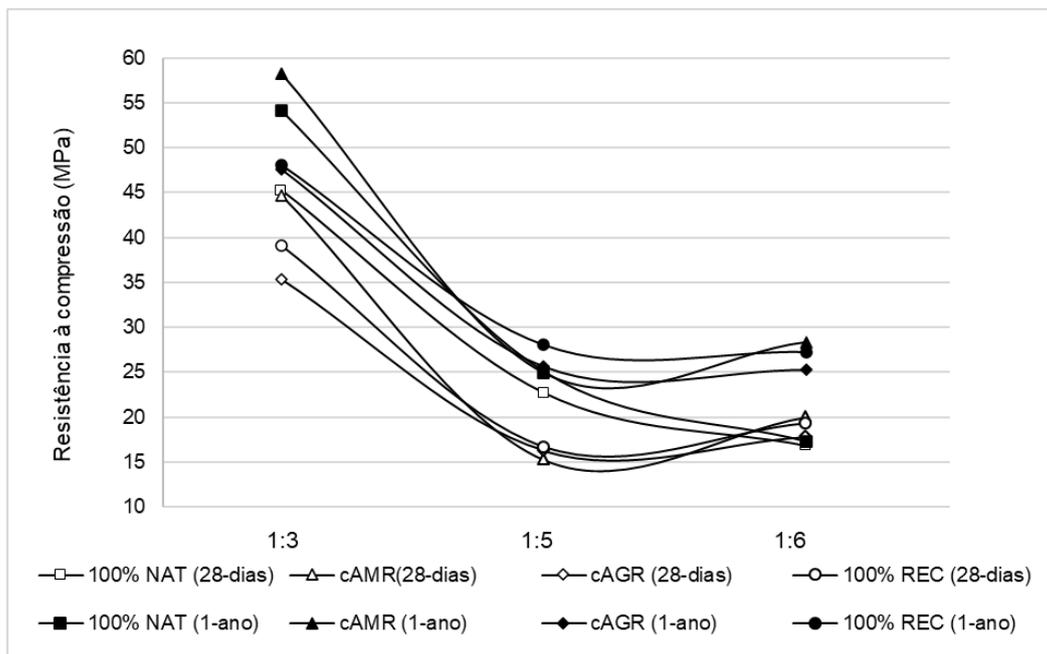
Fonte: Elaboração própria, 2022

5.2.3.2 Traços do estudo experimental em volume versus resistência à compressão aos 28 dias e ao 1 ano

A composição cAMR apresenta valores de resistência próximos aos da composição de referência 100% NAT conforme se observa no Gráfico 23. Esse fato, pode estar relacionado ao consumo de material, que, quando dosado em volume, é reduzido devido à diferença na massa específica dos agregados reciclados. A 1 ano de idade, observou-se aumento no desempenho da composição cAMR, especialmente no traço 1:3, em comparação ao 100% NAT.

As composições com traço em volume demonstraram desempenho satisfatório, indicando viabilidade de aplicação quando considerada a resistência à compressão como critério. Dentre as composições avaliadas, a cAMR apresentou o melhor desempenho mecânico relativo, atingindo, inclusive, valores de resistência superiores aos da composição de referência 100% NAT.

Gráfico 23 – Relação entre os traços do estudo experimental em volume, 28 dias e 1 ano, e resistência à compressão



Fonte: Elaboração própria, 2022

5.3 Análise estatística

Esta seção inclui o procedimento estatístico para analisar a resistência à compressão dos concretos produzidos na primeira e segunda etapa do estudo. Os resultados estão apresentados segundo a ordem sequencial das análises realizadas.

5.3.1 Análises estatísticas do estudo piloto

Quatro corpos de prova cilíndricos, com dimensões de 10 x 20 cm, foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão aos 28 dias e após 1 ano de cura. Os resultados obtidos encontram-se compilados na Tabela 14, organizados por curva e seus respectivos traços. Esses dados foram fundamentais para aplicação das análises estatísticas realizadas neste trabalho.

Tabela 14 – Valores de resistências à compressão (MPa) por cada traço e curva, nas idades de 28 dias e 1 ano

Idade	Traço	0,70	0,80	0,85	0,90
28 dias	1:3	46,96; 45,59;	33,43; 34,97;	38,20; 37,82;	26,98; 24,98;
		48,09; 45,47	38,04; 39,57	38,07; 35,91	25,48; 27,35
	1:5	32,60; 28,23;	21,38; 21,63;	25,46; 24,19;	23,73; 24,36;
		33,72; 32,48	22,13; 22,38	24,19; 23,94	24,36; 26,48
	1:6	24,11; 24,73;	24,13; 24,66;	18,97; 16,68;	17,49; 16,49;
		22,36; 26,23	25,72; 26,25	18,21; 18,72	17,24; 15,86
1 ano	1:3	50,84; 50,09;	54,02; 59,33;	55,58; 56,21;	62,45; 55,58
		52,21; 52,58	63,70; 55,58	45,59; 60,58	56,52; 56,21
	1:5	46,84; 38,72;	42,47; 43,09;	29,98; 36,22;	40,59; 31,29;
		43,72; 41,22	45,59; 38,72	39,47; 40,59	38,16; 38,10
	1:6	34,35; 34,97;	36,22; 37,16;	31,85; 28,73;	33,10; 24,98;
		34,35; 33,10	41,84; 43,09	28,73; 29,35	30,60; 31,23

Fonte: Elaboração própria, 2022

A análise estatística foi realizada a partir dos valores da Tabela 14 utilizando-se a metodologia proposta por Revilla-Cuesta *et al.* (2020). Os aspectos avaliados incluíram:

- Indicadores estatísticos tradicionais (Seção 5.4.1.1);

- Normalidade da resistência dos dados de resistência à compressão (Seção 5.4.1.2);
- Determinação dos intervalos de confiança da resistência da resistência à compressão e análise de sua dispersão (Seção 5.4.1.3);
- Avaliação da homogeneidade da resistência à compressão (Seção 5.4.1.4);
- Análise da correlação entre a curva granulométrica e a resistência à compressão (5.4.1.5);
- Investigação da influência da curva granulométrica sobre a resistência à compressão, em cada idade, por meio dos testes de ANOVA/Kruskal-Wallis (Seção 5.4.1.6);

Ao longo das análises estatísticas, foi adotado um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$), valor amplamente aceito em estudos dessa natureza para a validação de hipóteses.

5.3.1.1 Indicadores estatísticos do estudo piloto

Os indicadores estatísticos correspondentes a cada curva, em ambas as idades, estão apresentados na Tabela 15.

Tabela 15 – Indicadores estatísticos tradicionais da resistência à compressão em MPa das curvas do estudo piloto, em cada idade

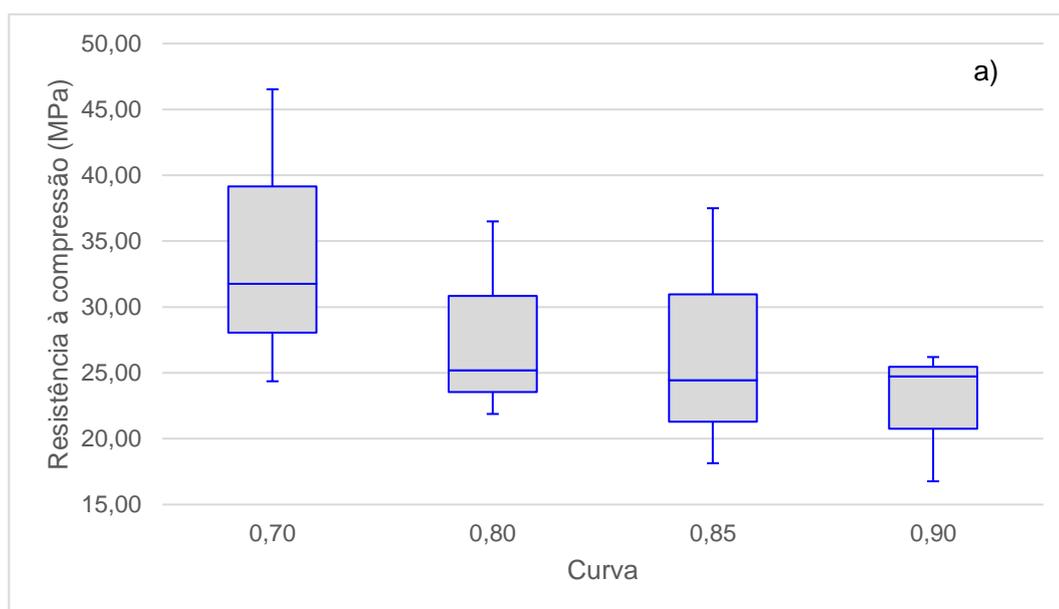
Idade	Curva	Traço	Média	Mediana	Desvio	Mín.	Máx.
28 dias	0,70	1:3	46,53	46,28	1,24	45,46	48,09
		1:5	31,76	32,54	2,42	28,23	33,72
		1:6	24,36	24,42	1,60	22,36	26,23
	0,80	1:3	36,50	36,50	2,80	33,43	39,57
		1:5	21,88	21,88	0,46	21,38	22,38
		1:6	25,19	25,19	0,97	24,13	26,25
	0,85	1:3	37,50	37,94	1,07	35,91	38,20
		1:5	24,44	24,19	0,69	23,94	25,46
		1:6	18,14	18,46	1,03	16,68	18,97
	0,90	1:3	26,20	26,23	1,14	24,98	27,35
		1:5	24,73	24,36	1,20	23,73	26,48
		1:6	16,77	16,86	0,74	15,86	17,49

1 ano	0,70	1:3	51,43	51,52	1,69	50,09	52,58
		1:5	42,62	42,47	3,47	38,72	46,84
		1:6	34,19	34,35	0,79	33,10	34,97
	0,80	1:3	58,16	57,46	4,31	54,02	63,70
		1:5	42,47	42,78	2,83	38,72	45,59
		1:6	39,58	39,50	3,40	36,22	43,09
	0,85	1:3	54,49	55,89	6,33	45,59	60,58
		1:5	36,56	37,85	4,77	29,98	40,59
		1:6	29,66	29,04	1,49	28,73	31,85
	0,90	1:3	57,69	56,36	3,20	55,58	62,45
		1:5	37,03	38,13	4,00	31,29	40,59
		1:6	29,98	30,91	3,50	24,98	33,10

Fonte: Elaboração própria, 2022

Os Gráficos 24 e 25 exibem os *boxplots* referentes aos resultados obtidos aos 28 dias e 1 ano. Observa-se que, tanto os indicadores tradicionais quanto os gráficos *boxplot*, em ambas as idades, não apresentam valores anômalos (*outliers*).

Gráfico 24 – Box plots para todas as curvas granulométricas aos 28 dias

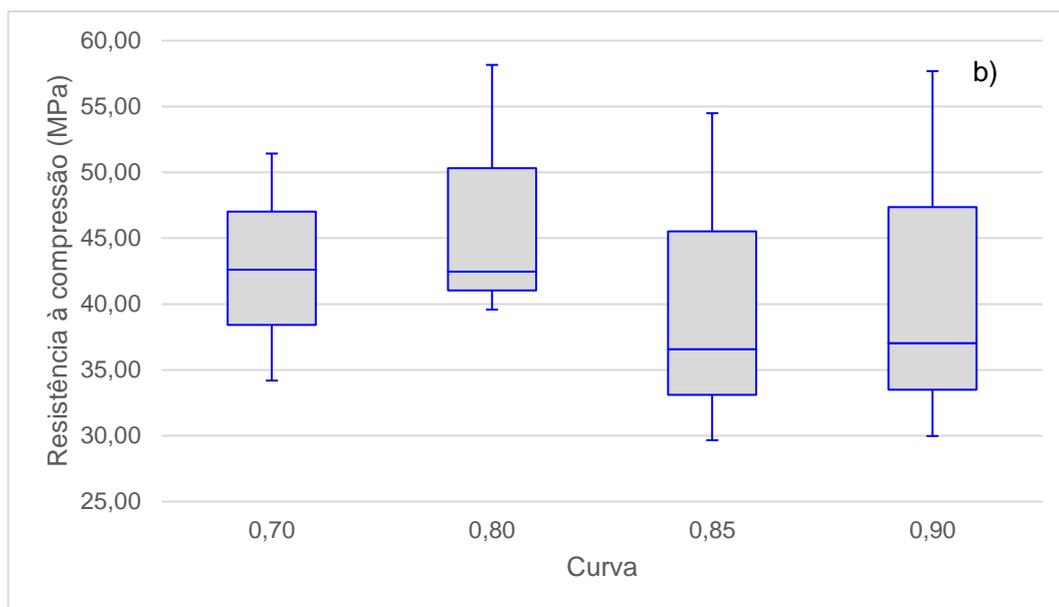


Fonte: Elaboração própria, 2022

A ausência de *outliers* é um fator relevante para a aplicação de procedimentos

estatísticos, uma vez que sua presença pode comprometer a significância dos resultados obtidos. Esses valores discrepantes podem ser identificados visualmente nos boxplot, localizados fora da área delimitada pela caixa e pelos “bigodes” – que representam a extensão dos dados dentro de um intervalo interquartil definido.

Gráfico 25 – Box plots para todas as curvas granulométricas a 1 ano



Fonte: Elaboração própria, 2022

5.3.1.2 Normalidade do estudo piloto

A verificação da normalidade dos dados foi realizada por meio do teste de hipótese de Shapiro-Wilk. Esse teste assume, como hipótese nula, que a amostra segue uma distribuição normal. A hipótese é rejeitada quando o valor de p (apresentado na Tabela 16) é inferior ao nível de significância adotado nesse estudo ($\alpha = 0,05$).

Tabela 16 – p -valor para os testes de normalidade da resistência à compressão do estudo piloto, em cada idade

Idade	Curva	Traço	Estatística	gl	p
28 dias	0,70	1:3	0,890	4	0,385
		1:5	0,822		0,148
		1:6	0,992		0,967
	0,80	1:3	0,950		0,714

		1:5	0,950		0,714
		1:6	0,950		0,714
		1:3	0,757		0,045
	0,85	1:5	0,771		0,060
		1:6	0,870		0,298
		1:3	0,896		0,411
	0,90	1:5	0,824		0,152
		1:6	0,942		0,665
		1:3	0,923		0,555
	0,70	1:5	0,994		0,975
		1:6	0,895		0,406
		1:3	0,948		0,703
	0,80	1:5	0,963		0,797
		1:6	0,875		0,316
1 ano		1:3	0,899	4	0,426
	0,85	1:5	0,901		0,434
		1:6	0,763		0,051
		1:3	0,742		0,033
	0,90	1:5	0,854		0,238
		1:6	0,881		0,343

Fonte: Elaboração própria, 2022

Sabe-se, com base na literatura, que a resistência à compressão do concreto tende a seguir uma distribuição normal, especialmente quando a produção do material é realizada sob condições controladas (NEVILLE, 2016; MEHTA; MONTEIRO, 2014). Os resultados do teste de Shapiro-Wilk indicaram que, para a maioria dos traços analisados, o valor de p foi superior ao nível de significância de 0,05.

Portanto, verifica-se que a resistência à compressão dos concretos avaliados apresentou comportamento compatível com a distribuição normal, tanto aos 28 dias quanto após 1 ano de cura, o que corrobora o uso de métodos estatísticos paramétricos nas análises subsequentes.

No entanto, houve algumas exceções. Aos 28 dias, a curva 0,85 (traço 1:3) apresentou um p -valor ligeiramente inferior a 0,05, ao nível de confiança de 95%.

Esta discrepância pode ser atribuída à concentração de dados próximos aos limites do intervalo de resistência, cerca de 35 MPa e 38MPa. Da mesma forma, a 1 ano de cura, a curva 0,90 (traço 1:3) também apresentou um p -valor inferior a 0,05. Essa inconsistência pode ter sido causada pela concentração dos dados nas proximidades dos limites de resistência, cerca de 56 MPa e 62MPa, conforme apresentado na Tabela 15.

Ambos os p -valores, embora inferiores a 0,05, seriam compatíveis com a distribuição normal a um nível de significância de 0,10. Diante disso, optou-se por adotar esse nível de significância para as curvas 0,85 e 0,90 (traço 1:3) nas análises subsequentes desse estudo.

5.3.1.3 Intervalos de confiança do estudo piloto

Os intervalos de confiança, apresentados na Tabela 17 e no Gráfico 24, indicam os limites dentro dos quais a média aritmética da variável se encontra, considerando um dado nível de confiança. Dessa forma, é possível identificar, por exemplo, eventuais sobreposições entre as resistências obtidas para os concretos com diferentes curvas granulométricas.

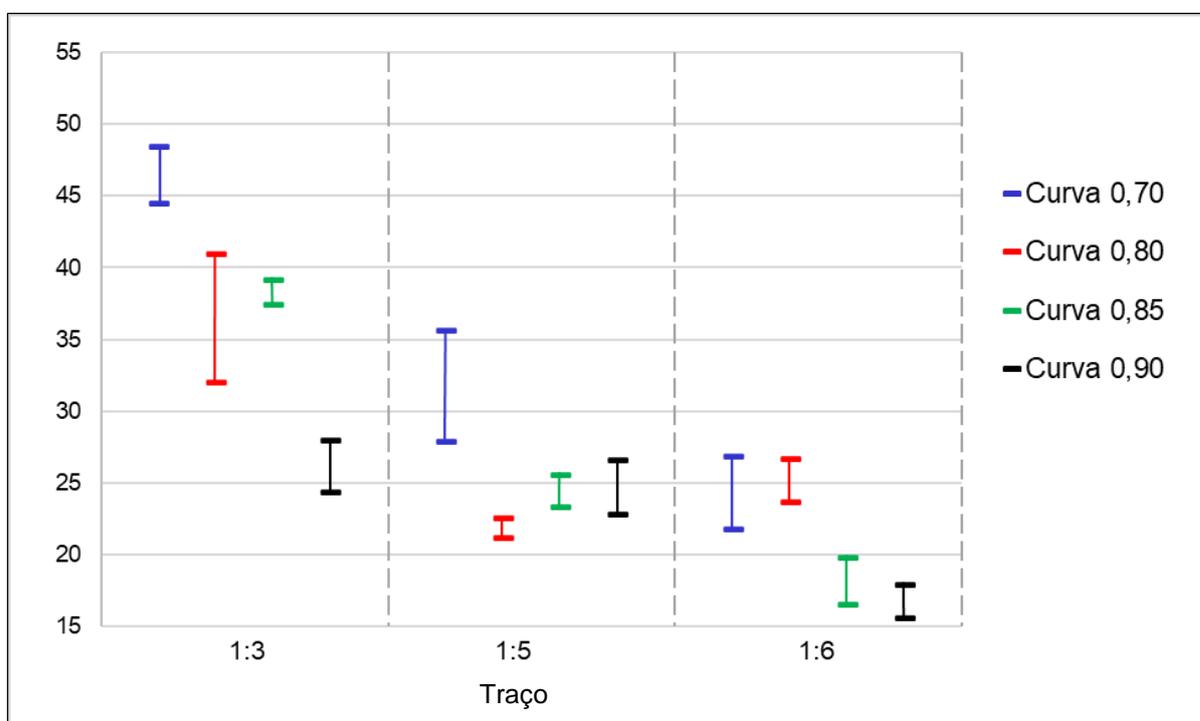
Tabela 17 – Intervalos de confiança de 95% para a média de resistência à compressão em MPa das curvas do estudo piloto, em cada idade

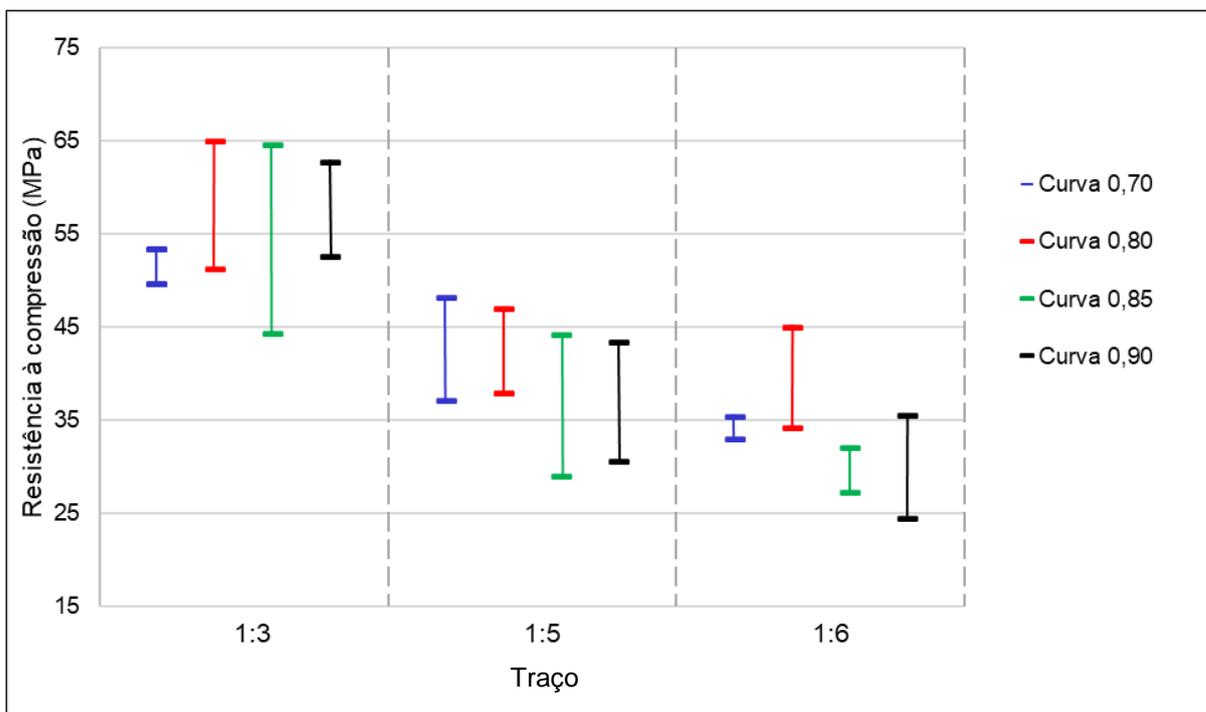
Idade	Curva	Traço	Intervalo de confiança para Média Aritmética (MPa)
28 dias	0,70	1:3	(44,55; 48,50)
		1:5	(27,91; 35,61)
		1:6	(21,81; 26,91)
	0,80	1:3	(32,04; 40,96)
		1:5	(21,15; 22,61)
		1:6	(23,65; 26,73)
	0,85	1:3	(37,45; 39,21)
		1:5	(23,35; 25,54)
		1:6	(16,51; 19,78)
	0,90	1:3	(24,37; 28,02)
		1:5	(22,82; 26,65)

1 ano	0,70	1:6	(15,59; 17,95)
		1:3	(49,57; 53,29)
		1:5	(37,10; 48,15)
	0,80	1:6	(32,94; 35,44)
		1:3	(51,29; 65,02)
		1:5	(37,95; 46,99)
	0,85	1:6	(34,18; 44,98)
		1:3	(44,41; 64,57)
		1:5	(28,98; 44,15)
	0,90	1:6	(27,30; 32,03)
		1:3	(52,60; 62,78)
		1:5	(30,66; 43,40)
		1:6	(24,41; 35,54)

Fonte: Elaboração própria, 2022

Gráfico 26 – Intervalos de confiança para todas as curvas granulométricas do estudo piloto: a) 28 dias; b) 1 ano





Fonte: Elaboração própria, 2022

A análise da média aritmética dos intervalos de confiança revelou diversos aspectos relevantes:

- Em quase todos os traços, os intervalos de confiança para os períodos de 28 dias e 1 apresentaram sobreposição;
- Ao comparar os intervalos de confiança entre as diferentes curvas, observou-se sobreposição entre as curvas 0,80 e 0,85 do traço 1:3; 0,85 e 0,90 do traço 1:5; e entre 0,70 e 0,80, 0,85 e 0,90 do traço 1:6 aos 28 dias.
- Aos 28 dias, os intervalos de confiança para a média da resistência à compressão não revelam uma tendência tão clara quanto a de 1 ano. No entanto, notou-se aumento na dispersão dos resultados de 1 ano. A dispersão diminui à medida que o consumo de cimento é reduzido (do traço rico 1:3 para o traço mais pobre 1:6);
- Para 1 ano, houve sobreposição significativa entre todas as curvas dos traços 1:3 e 1:5, e novamente, entre as curvas 0,70 e 0,80; 0,85 e 0,90 do traço 1:6;

5.3.1.4 Homogeneidade do estudo piloto

O teste de homogeneidade de Levene é utilizado para verificar a igualdade das variâncias entre populações univariadas, sendo especialmente útil quando se deseja validar a premissa da homocedasticidade (igualdade da variância dos erros em um modelo de regressão) em análises estatísticas paramétricas. As hipóteses testadas são:

- Hipótese nula (H_0): as variâncias das populações são iguais;
- Hipótese alternativa (H_1) pelo menos uma das populações possui variância diferente (heterogênea).

Se o valor de p resultante do teste for inferior ao nível de significância adotado (nesse estudo $\alpha = 0,05$), a hipótese nula é rejeitada, indicando que há evidência de variância desigual entre os grupos analisados. A suposição de variâncias constantes, ou seja, a homogeneidade das variâncias, é um requisito fundamental para a aplicação da análise de variância (ANOVA). A Tabela 18 apresenta os resultados do teste de homogeneidade realizados no estudo piloto, considerando as idades de 28 dias e 1 ano.

Tabela 18 – Resultado de homogeneidade do estudo piloto, em cada idade

Idade	Traço	Estatística de Levene	p
28 dias	1:3	5,674	0,012
	1:5	2,756	0,088
	1:6	0,579	0,640
1 ano	1:3	1,740	0,212
	1:5	0,390	0,762
	1:6	3,874	0,038

Fonte: Elaboração própria, 2022

A utilização de análises estatísticas paramétricas, como a ANOVA, para avaliar o efeito sobre a variável resposta – resistência à compressão – é adequada nos casos em que se verificam tanto a homogeneidade das variâncias quanto a normalidade da distribuição dos dados. Com base nos testes realizados, essa abordagem pôde ser aplicada aos traços 1:5 e 1:6 aos 28 dias, e aos traços 1:3 e 1:5 após 1 ano de cura, pois esses grupos atenderam simultaneamente a ambos os pressupostos.

5.3.1.5 Correlação do estudo piloto

O coeficiente de correlação é uma medida estatística que varia entre -1 e 1 e indica o grau de linearidade entre duas variáveis. Quanto mais próximo o valor absoluto estiver de 1, mais forte será a correlação linear entre elas. Um coeficiente positivo indica uma relação direta (ambas as variáveis aumentam ou diminuem conjuntamente), enquanto um coeficiente negativo indica uma relação inversa (uma variável aumenta enquanto a outra diminui). Por outro lado, valores próximos de zero indicam ausência ou fraca correlação. Neste estudo, foi aplicado o teste de correlação de Pearson para os dados que atenderam aos pressupostos paramétricos e o teste de Spearman para os dados que não atenderam à normalidade, caracterizando uma abordagem não paramétrica.

Nesse estudo, as variáveis analisadas foram resistência à compressão e curva granulométrica, consideradas nas idades de 28 dias e 1 ano de cura. Observou-se uma correlação negativa entre o aumento da razão (Pr) da curva granulométrica e a resistência à compressão, ou seja, à medida que a Pr aumenta, os valores de resistência tendem a diminuir. A Tabela 19 apresenta os coeficientes de correlação obtidos entre a curva granulométrica e a resistência à compressão para as diferentes idades analisadas.

Tabela 19 – Matriz de correlação do estudo piloto (curva x resistência à compressão), em cada idade

			Curva	Resistência
ρ de Spearman 28 dias	Curva	Coeficiente de correlação	1	-0,413* 0,004
	Resistência		-0,413* 0,004	1
r de Pearson 1 ano	Curva		1	-0,109 0,462
	Resistência		-0,109 0,462	1

Fonte: Elaboração própria, 2022

O valor absoluto do coeficiente de correlação apresentado na Tabela 19 indica que o efeito da curva granulométrica sobre a resistência à compressão foi de 41,30% aos 28 dias, caracterizando uma correlação fraca. Esse resultado apresentou significância estatística ($p = 0,004 < 0,05$), sugerindo a existência de uma relação linear entre as variáveis nesse estágio de cura. No entanto, a 1 ano, o coeficiente de

correlação foi reduzido para 10,90%, sendo considerado nulo, com um valor de $p = 0,462$, o que demonstra ausência de significância estatística.

Observou-se, portanto, um decréscimo na correlação da ordem de 26,60% ao longo do tempo. Esses resultados sugerem que, com o avanço do tempo de cura do concreto, a resistência à compressão passa a não depender da variação da razão (Pr) da curva granulométrica, não havendo, portanto, uma relação de dependência entre essas variáveis após 1 ano.

5.3.1.6 A influência da curva granulométrica e traço na resistência à compressão do estudo piloto

O efeito de cada fator (curva e traço) pode ser analisado de forma isolada, considerando-se um valor fixo para o outro fator, em vez de simplesmente ignorá-lo. Por exemplo, pode-se avaliar o efeito da curva mantendo o traço fixo em 1:3, ou analisar o impacto do traço quando a curva for fixada em uma razão $Pr = 0,85$.

O procedimento estatístico apropriado para essa análise é a ANOVA de fator único, um teste paramétrico cuja hipótese nula afirma que o fator avaliado (curva ou traço) não exerce efeito significativo sobre a variável resposta (resistência à compressão). Esse teste fornece um valor de p , o qual indica se a hipótese nula deve ser aceita ou rejeitada com base em um nível de significância previamente estabelecido.

Para que a ANOVA possa ser aplicada corretamente, é necessário que os dados provenham de uma população com distribuição normal, que as variâncias sejam homogêneas e que as observações sejam independentes entre si – condição atendida no presente estudo, uma vez que cada valor de resistência à compressão corresponde a um corpo de prova distinto e, portanto, independente. Caso pelo menos uma dessas premissas não seja satisfeita, deve-se recorrer à estatística não paramétrica.

O teste de Kruskal Wallis é uma alternativa não paramétrica à ANOVA de fator único, sendo indicado nos casos em que as premissas exigidas pela ANOVA não sejam atendidas. Seu objetivo é comparar três ou mais amostras independentes, que podem ter tamanhos iguais ou distintos. Para aplicação do teste, é necessário

que as amostras sejam aleatórias e que as observações sejam independentes, tanto dentro de cada amostra quanto entre as amostras analisadas.

Embora a ANOVA e o teste de Kruskal-Wallis indiquem se houve efeito significativo, eles não revelam quais grupos diferem entre si. Para isso, são utilizados, respectivamente os pós-testes de Tukey e de Dunn, que permitem comparações múltiplas entre os grupos, possibilitando identificar quais tratamentos apresentam diferenças estatisticamente significativas.

A Tabela 20 apresenta os resultados de ANOVA ou do teste de Kruskal-Wallis, bem como dos respectivos pós-testes, indicando as diferenças estatisticamente significativas entre os grupos analisados.

Tabela 20 – Resultados dos testes ANOVA e Kruskal-Wallis do estudo piloto, em cada idade

Estudo Piloto – Resultados da ANOVA e Kruskal-Wallis			
Curva (28 d)	ANOVA²/Kruskal Wallis¹	DMS	Tukey²/Dunn¹
1:3	0,005 ¹	SIM	0,70a e 0,90d
1:5	0,0001 ²	SIM	0,70a e 0,80d; 0,70a e 0,85c; 0,70a e 0,90b
1:6	0,0001 ²	SIM	0,70b e 0,85c; 0,70b e 0,90d; 0,80a e 0,85c; 0,80a e 0,90d
Traço (28 d)			
Curva 0,70	0,0001 ²	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c; 1:5b e 1:6c
Curva 0,80	0,007 ¹	SIM	1:3a e 1:5c
Curva 0,85	0,007 ¹	SIM	1:3a e 1:6c
Curva 0,90	0,0001 ²	SIM	1:3a e 1:6c; 1:5b e 1:6c
Curva (1 ano)			
1:3	0,078 ²	NÃO	0,70d; 0,80a; 0,85c; 0,90b
1:5	0,073 ²	NÃO	0,70a; 0,80b; 0,85d; 0,90c
1:6	0,006 ¹	SIM	0,70b e 0,80a; 0,80a e 0,85d; 0,80a e 0,90c
Traço (1 ano)			
Curva 0,70	0,007	SIM	1:3a e 1:6c
Curva 0,80	0,0001	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c;
Curva 0,85	0,0001	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c;
Curva 0,90	0,01	SIM	1:3a e 1:6c

¹Teste de Kruskal–Wallis com nível de significância de 5%. ²ANOVA unidirecional com nível de significância de 5%. DMS – Diferença mínima significativa. Em ordem decrescente de resistência: **a>b>c>d**.

Os resultados obtidos por meio da ANOVA ou do teste de Kruskal-Wallis foram consistentes com as correlações observadas, indicando uma redução na resistência à compressão com o aumento da razão *Pr* da curva granulométrica. Ambos os fatores – curva e traço – influenciaram significativamente a resistência à compressão. Além disso, os grupos heterogêneos identificados pelos pós-testes confirmaram as tendências previamente apontadas pelos intervalos de confiança:

Mantida **constante a relação ligante:agregados** e variando-se as curvas granulométricas aos 28 dias, observaram-se os seguintes resultados quanto à resistência à compressão:

- **Traço 1:3:** houve diferença significativa entre as curvas 0,70 e 0,90.
- **Traço 1:5:** observaram-se diferenças estatisticamente significativas entre as curvas 0,70 e 0,80; 0,70 e 0,85; e 0,70 e 0,90.
- **Traço 1:6:** constataram-se diferenças significativas entre as curvas 0,70 e 0,85; 0,70 e 0,90; 0,80 e 0,85; e 0,80 e 0,90.

Mantida **constante a composição granulométrica** e variando-se a relação ligante:agregados aos 28 dias de idade, os resultados de resistência à compressão indicaram:

- **Curva 0,70:** observaram-se diferenças significativas entre todos os traços analisados;
- **Curva 0,80:** houve diferença estatisticamente significativa entre os traços 1:3 e 1:5;
- **Curva 0,85:** os traços 1:3 e 1:6 apresentaram diferenças significativas entre si;
- **Curva 0,90:** identificaram-se diferenças entre os traços 1:3 e 1:6, bem como entre os traços 1:5 e 1:6.

Mantida **constante a relação ligante:agregados** e variando-se as curvas granulométricas a 1 ano, os resultados de resistência à compressão foram os seguintes:

- **Traços 1:3 e 1:5:** não se observaram diferenças estatisticamente significativas entre as curvas avaliadas para esses traços;

- **Traço 1:6:** verificaram-se diferenças estatísticas entre as curvas 0,70 e 0,80; 0,80 e 0,85; e 0,80 e 0,90.

Mantida **constante a composição granulométrica** e variando-se a relação ligante:agregados a 1 ano, os resultados de resistência à compressão indicaram:

- **Curva 0,70:** houve diferença significativa entre os traços 1:3 e 1:6;
- **Curvas 0,80 e 0,85:** observaram-se diferenças estatísticas entre os traços 1:3 e 1:5, bem como entre 1:3 e 1:6;
- **Curva 0,90:** os traços 1:3 e 1:6 apresentaram diferença estatisticamente significativa entre si.

A análise conjunta dos resultados da Tabela 20 evidencia que tanto a variação da curva granulométrica quanto da relação ligante:agregados influenciaram significativamente a resistência à compressão, com efeitos variados conforme a idade de cura e o teor de ligante utilizado.

Aos 28 dias, observou-se maior sensibilidade da resistência à compressão às variações dos dois fatores estudados. Quando mantida constante a relação ligante:agregados, os traços com menor teor de ligante (especialmente o 1:6) apresentaram maior número de combinações com diferenças estatisticamente significativas entre as curvas granulométricas, indicando que composições mais pobres em ligante são mais suscetíveis à variação da distribuição dos agregados. Em contrapartida, no traço 1:3, apenas a comparação entre as curvas 0,70 e 0,90 resultou em diferença significativa, o que sugere estabilidade em traços mais ricos em ligante.

Do mesmo modo, ao se manter constante a composição granulométrica e variar a relação ligante agregados, observou-se que a curva 0,70 apresentou diferença significativa entre todos os traços, enquanto as demais curvas revelaram diferenças pontuais, principalmente entre os extremos (1:3 e 1:6).

A 1 ano de cura, os dados indicaram uma tendência de redução das diferenças estatísticas, especialmente nos traços com maior teor de ligante. Fixados os traços 1:3 e 1:5, não houve diferença significativa entre as curvas. No entanto o traço 1:6

manteve sua sensibilidade à variação das curvas, apresentando diferenças em diversas comparações.

Mesmo após um ano de cura, a variação da relação ligante:agregados continuou a influenciar a resistência, ainda que de forma menos intensa. As curvas 0,80 e 0,85, por exemplo, mostraram diferenças significativas entre os traços 1:3 e 1:5, bem como entre 1:3 e 1:6, o que indica que, embora a cura prolongada reduza as disparidades, a influência da dosagem do ligante permanece relevante.

Os resultados apontam para uma maior robustez dos traços com maiores teores de ligante, tanto em relação à variação da granulometria quanto ao tempo de cura. Já os traços mais pobres em ligante mostraram-se mais sensíveis às alterações nas curvas granulométricas e demandam maior atenção no controle da composição para garantir o desempenho mecânico desejado, sobretudo em idades iniciais.

A interação entre os fatores curva granulométrica e relação ligante:agregados (traço) pode ser avaliada por meio de uma ANOVA de dois fatores, que permite identificar se o efeito de um fator depende do nível do outro. Quando essa interação se mostra estatisticamente significativa, indica-se que não é possível generalizar os efeitos de forma independente; ou seja, o impacto da curva sobre a resistência à compressão varia conforme o traço, e vice-versa.

Diante disso, justifica-se a abordagem adotada nesta seção, que analisa os resultados separadamente para cada combinação de curva e traço. Além disso, a presença de interação condiciona a modelagem da resistência à compressão em função do coeficiente da curva, como discutido no APÊNDICE C – Previsão da resistência do estudo piloto, onde são exploradas limitações e possibilidades de previsão com base nos dados obtidos.

A escolha da curva 0,85 no estudo piloto foi fundamentada basicamente em critérios de não uniformidade e em aparentes resultados de abatimento mais bem observados durante a dosagem. No entanto, concretos produzidos com essa curva apresentaram valores de resistência inferiores em comparação às curvas com parâmetros de desvio (Pr) de 0,70 e 0,80. Esse comportamento pode estar relacionado a uma maior separação entre partículas, efeito que tende a se acentuar

nos traços com maior proporção de agregados, comprometendo a coesão, e por consequência, o desempenho mecânico.

A proporção de cada fração granulométrica que será utilizada nas misturas do estudo experimental foi distribuída da seguinte forma: **31,57%** dos materiais com diâmetro entre **19 e 25 mm**, **39,28%** entre **4,75 e 12,5 mm**, e **29,15%** entre **0,075 e 4,75 mm**.

5.3.2 Análises Estatísticas do estudo experimental em massa

Para cada mistura, quatro corpos de prova cilíndricos (10 x 20 cm) foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão axial nas idades de 28 dias e 1 ano, conforme apresentado na Tabela 21. Todos os valores obtidos foram essenciais para a aplicação das análises estatísticas desenvolvidas neste trabalho, permitindo avaliar a influência dos diferentes parâmetros sobre o desempenho mecânico do concreto.

Tabela 21 – Valores de resistências à compressão (MPa) por cada composição e traço do estudo experimental em massa, nas idades de 28 dias e 1 ano

Idade	Traço	100% NAT	cAMR	cAGR	100% REC
28 dias	1:3	44,30; 43,19;	23,61; 26,17;	29,32; 30,20;	31,78; 32,02;
		47,31; 46,22	24,86; 23,61	30,20; 29,45	32,80; 33,10
	1:5	21,20; 22,78;	16,99; 14,86;	19,96; 21,84;	18,94; 15,31;
		23,07; 23,87	16,11; 13,36	21,34; 20,09	17,68; 21,04
	1:6	17,66; 17,39;	10,99; 12,99;	12,98; 13,60;	16,03; 16,17;
		15,38; 16,93	13,36; 13,49	13,10; 11,73	16,33; 17,84
1 ano	1:3	54,96; 51,21;	44,59; 44,34;	40,59; 39,59;	39,59; 37,22;
		54,33; 55,96	45,59; 39,97	40,84; 39,97	42,72; 39,47
	1:5	26,23; 25,36;	25,61; 24,98;	26,60; 24,61;	20,61; 18,99;
		25,61; 23,11	24,98; 25,61	27,48; 24,11	18,74; 20,61
	1:6	19,24; 17,99;	18,74; 19,11;	16,99; 18,11;	16,86; 20,61;
		15,86; 15,99	19,36; 19,49	16,36; 18,11	20,36; 18,74

Fonte: Elaboração própria, 2022

A análise estatística foi conduzida com base nos valores de resistência obtidos nas idades de 28 dias e 1 ano. Os principais aspectos avaliados compreenderam:

- Indicadores estatísticos tradicionais, como média, desvio padrão e mediana (Seção 5.4.2.1);
- Verificação da normalidade dos dados de resistência à compressão (Seção 5.4.2.2);
- Determinação dos intervalos de confiança e análise da dispersão dos resultados (Seção 5.4.2.3);
- Avaliação da homogeneidade da resistência à compressão entre os diferentes grupos (Seção 5.4.2.4);
- Investigação da influência da curva granulométrica sobre a resistência à compressão, em cada idade de cura, por meio de testes estatísticos apropriados (ANOVA e Kruskal-Wallis) (Seção 5.4.2.5);

5.3.2.1 Indicadores estatísticos do estudo experimental em massa

Os indicadores estatísticos correspondentes a cada composição, em ambas as idades de cura, estão apresentados na Tabela 22, enquanto o Gráfico 27 exibe os *boxplots* para os resultados de resistência à compressão aos 28 dias e 1 ano. Observa-se que, tanto pelos indicadores tradicionais quanto pela análise visual dos *boxplots*, não há presença de valores anômalos (*outliers*) nos dados, o que reforça a consistência e a homogeneidade das medições realizadas.

Tabela 22 – Indicadores estatísticos tradicionais da resistência à compressão em MPa das composições do estudo experimental em massa, em cada idade

Idade	Curva	Traço	Média	Mediana	Desvio padrão	Mín.	Máx.
28 dias	100% NAT	1:3	45,25	45,26	1,86	43,19	47,31
		1:5	22,73	22,92	1,12	21,20	23,87
		1:6	16,84	17,16	1,02	15,38	17,66
	cAMR	1:3	24,56	24,23	1,22	23,61	26,17
		1:5	15,33	15,48	1,58	13,36	16,99
		1:6	12,71	13,17	1,16	10,99	13,49
	cAGR	1:3	29,7	29,82	0,47	29,32	30,20
		1:5	20,81	20,71	0,93	19,96	21,84
		1:6	12,85	13,04	0,79	11,73	13,60

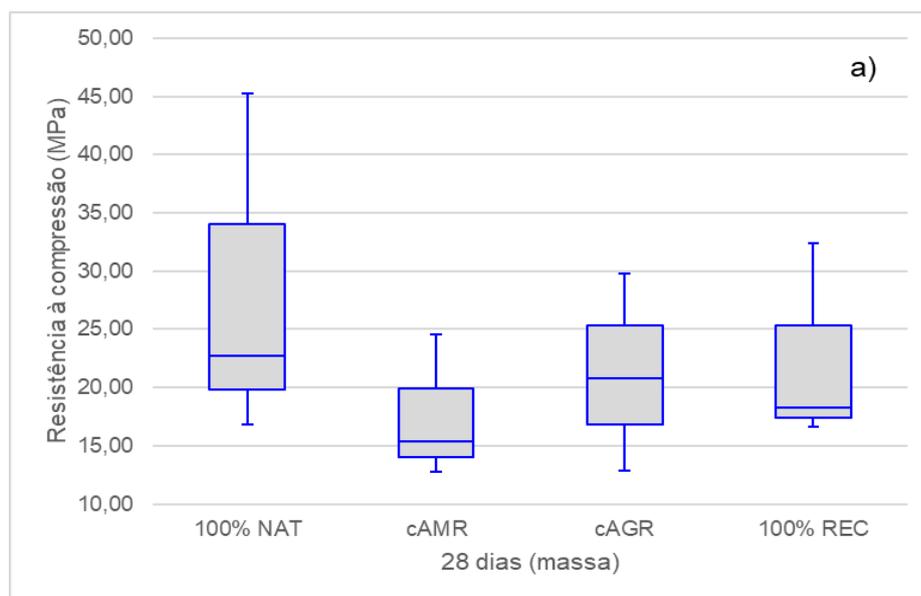
1 ano	100% REC	1:3	32,42	32,41	0,63	31,78	33,10
		1:5	18,24	18,31	2,40	15,31	21,04
		1:6	16,59	16,25	0,84	16,03	17,84
	100% NAT	1:3	54,11	54,65	2,05	51,21	55,96
		1:5	25,07	25,48	1,36	23,10	26,23
		1:6	17,27	16,99	1,63	15,86	19,24
	cAMR	1:3	43,62	44,47	2,49	39,97	45,59
		1:5	25,29	25,29	0,36	24,98	25,61
		1:6	19,17	19,24	0,33	18,74	19,49
	cAGR	1:3	40,25	40,28	0,57	39,59	40,84
		1:5	25,70	25,61	1,60	24,11	27,48
		1:6	17,39	17,55	0,87	16,36	18,11
	100% REC	1:3	39,75	39,53	2,26	37,22	42,72
		1:5	19,73	19,80	1,01	18,74	20,61
		1:6	19,14	19,55	1,73	16,86	20,61

Fonte: Elaboração própria, 2022

No Gráfico 27, observa-se que, aos 28 dias, a composição cAGR é a única que apresenta uma distribuição simétrica, ou seja, os valores de resistência à compressão estão uniformemente distribuídos em torno da mediana. Ainda na mesma idade de cura, destaca-se que a composição cAMR apresenta a menor dispersão dos dados, refletindo em uma maior consistência entre as amostras, enquanto a composição 100% NAT revela a maior dispersão, indicando assim, maior variabilidade nos resultados de resistência.

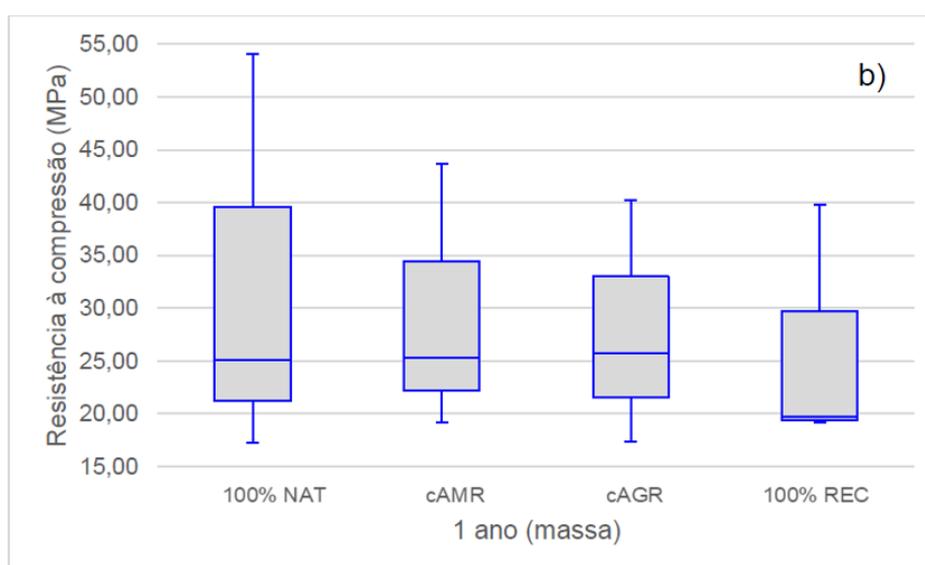
Observa-se que a composição cAMR, de modo geral, apresenta uma linha vertical (cauda) de menor comprimento, o que indica uma menor dispersão na cauda da distribuição e, conseqüentemente, uma menor probabilidade de ocorrência de valores discrepantes.

Nessa condição, a mediana se mostra como o indicador mais adequado de tendência central, uma vez que não é influenciada por valores extremos, ao contrário da média. Dessa forma, em distribuições assimétricas, a mediana oferece uma representação mais fiel do comportamento típico da resistência à compressão observada.

Gráfico 27 – *Box plots* para as composições do estudo experimental em massa a) 28 dias

Fonte: Elaboração própria

Embora, as composições 100% NAT tenha apresentado o maior comprimento de cauda e uma maior dispersão dos dados em 28 dias e 1 ano, conforme pode-se constatar ao comparar com os resultados obtidos no Gráfico 28, a exceção da composição cAGR aos 28 dias, todas as demais composições apresentaram distribuição assimétrica positiva tanto aos 28 dias quanto após 1 ano de cura.

Gráfico 28 – *Box plots* para as composições do estudo experimental em massa b) 1 ano

Fonte: Elaboração própria

5.3.2.2 Normalidade do estudo experimental em massa

A verificação da normalidade dos dados foi realizada por meio do teste de hipóteses de Shapiro-Wilk. A Tabela 23 apresenta os resultados obtidos para a avaliação da normalidade no estudo experimental em massa, considerando um nível de significância de 0,05. Nesse contexto, a hipótese nula estabelece que a amostra segue uma distribuição normal, sendo rejeitada quando o valor de p é inferior a 0,05, conforme os critérios adotados neste estudo.

Tabela 23 – p -valor para os testes de normalidade da resistência à compressão do estudo experimental em massa, para cada idade

Idade	Curva	Traço	Estatística	gl	p
28 dias	100% NAT	1:3	0,961	4	0,786
		1:5	0,944		0,676
		1:6	0,867		0,287
	cAMR	1:3	0,863		0,269
		1:5	0,978		0,893
		1:6	0,779		0,069
	cAGR	1:3	0,791		0,087
		1:5	0,871		0,302
		1:6	0,898		0,423
	100% REC	1:3	0,914		0,504
		1:5	0,999		0,995
		1:6	0,761		0,049
1 ano	100% NAT	1:3	0,900	4	0,432
		1:5	0,860		0,260
		1:6	0,878		0,330
	cAMR	1:3	0,817		0,135
		1:5	0,729		0,024
		1:6	0,946		0,689
	cAGR	1:3	0,946		0,691
		1:5	0,910		0,482
		1:6	0,854		0,240
	100% REC	1:3	0,943		0,671
		1:5	0,786		0,079
		1:6	0,900		0,430

Fonte: Elaboração própria, 2022

Considerando que a resistência à compressão do concreto segue uma distribuição normal, observa-se na Tabela 23 que, para a maioria das composições, o valor de

p obtido no teste de Shapiro-Wilk foi superior a 0,05. Esse resultado indica que, nessas composições, não há evidências suficientes para rejeitar a hipótese nula, o que confirma que a resistência à compressão apresentou comportamento compatível com uma distribuição normal.

Todavia, algumas exceções foram observadas. Aos 28 dias, a composição com 100% de agregado reciclado (traço 1:6) apresentou um valor de p ligeiramente inferior a 0,05, considerando um nível de confiança de 95%. Esse resultado pode ser atribuído à concentração dos dados próximos aos limites do intervalo de variação, situando-se em torno de 16 MPa e 18 MPa. De maneira semelhante, a 1 ano de idade, a composição cAMR (traço 1:5) também apresentou um p -valor inferior a 0,05. Assim como na composição com 100% REC aos 28 dias, os resultados da cAMR mostraram-se concentrados em torno dos limites do intervalo, aproximadamente entre 25 MPa e 26 MPa.

5.3.2.3 Intervalos de confiança do estudo experimental em massa

Os intervalos de confiança apresentados na Tabela 24 referem-se à média aritmética e indicam a faixa de valores dentro da qual a variável se encontra, considerando um determinado nível de confiança. Por meio desses intervalos, torna-se possível identificar, por exemplo, eventuais sobreposições entre as resistências à compressão obtidas nas diferentes composições em massa do concreto.

Tabela 24 – Intervalos de confiança de 95% para a média de resistência à compressão em MPa das composições do estudo experimental em massa, para cada idade

Idade	Curva	Traço	Intervalo de confiança para
			Média Aritmética (MPa)
28 dias	100% NAT	1:3	(42,30; 48,21)
		1:5	(20,95; 24,51)
		1:6	(15,22; 18,46)
	cAMR	1:3	(22,62; 26,51)
		1:5	(12,82; 17,84)
		1:6	(10,85; 14,56)
	cAGR	1:3	(29,04; 30,55)
		1:5	(19,33; 22,28)
		1:6	(11,59; 14,12)
	100%	1:3	(31,43; 33,42)

1 ano	REC	1:5	(14,43; 22,06)
		1:6	(15,25; 17,93)
	100% NAT	1:3	(50,87; 57,37)
		1:5	(22,91; 27,24)
		1:6	(14,67; 19,87)
	cAMR	1:3	(39,65; 47,59)
		1:5	(24,72; 25,87)
		1:6	(18,65; 19,70)
	cAGR	1:3	(39,34; 41,16)
		1:5	(23,15; 28,25)
		1:6	(16,01; 18,77)
	100% REC	1:3	(36,16; 43,34)
		1:5	(18,12; 21,35)
		1:6	(16,39; 21,90)

Fonte: Elaboração própria, 2022

No Gráfico 29 as médias aritméticas dos intervalos de confiança da resistência à compressão nas idades de 28 dias e 1 ano, respectivamente. A partir da análise desse gráfico, podem ser destacados alguns aspectos relevantes:

Aos 28 dias:

- Na maioria dos traços, observou-se sobreposição entre os intervalos de confiança nos períodos de 28 dias e 1 ano, com uma tendência mais acentuada de sobreposição nas composições com traço 1:6 em ambas as idades.
- Comparando os intervalos de confiança das diferentes composições entre si, aos 28 dias, observou-se que existe sobreposição mais pronunciada entre as composições cAGR e 100% REC no traço 1:5, bem como entre cAMR e cAGR no traço 1:6;
- No traço 1:5, aos 28 dias, observa-se sobreposição entre 100% REC, com diferença de intervalo, bem como moderada sobreposição entre cAGR e 100% REC;
- No traço 1:3 aos 28 dias não há sobreposição, uma vez que os intervalos são bastante distintos entre si.

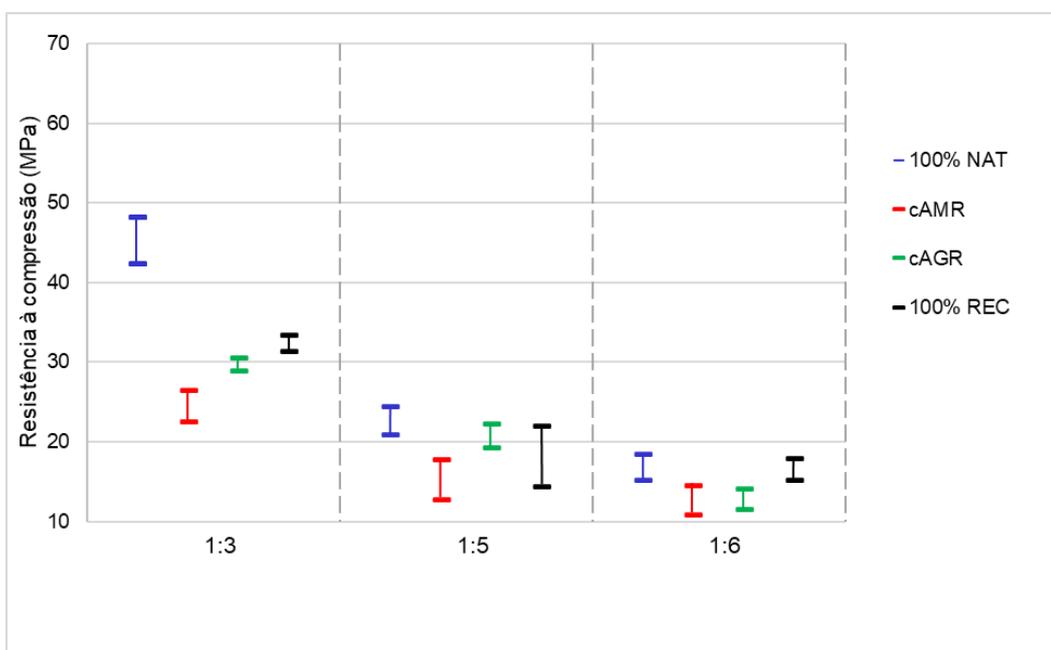
Aos 28 dias, a maior sobreposição ocorre nos traços 1:6, como mencionado anteriormente, entre 100% REC, cAMR e cAGR.

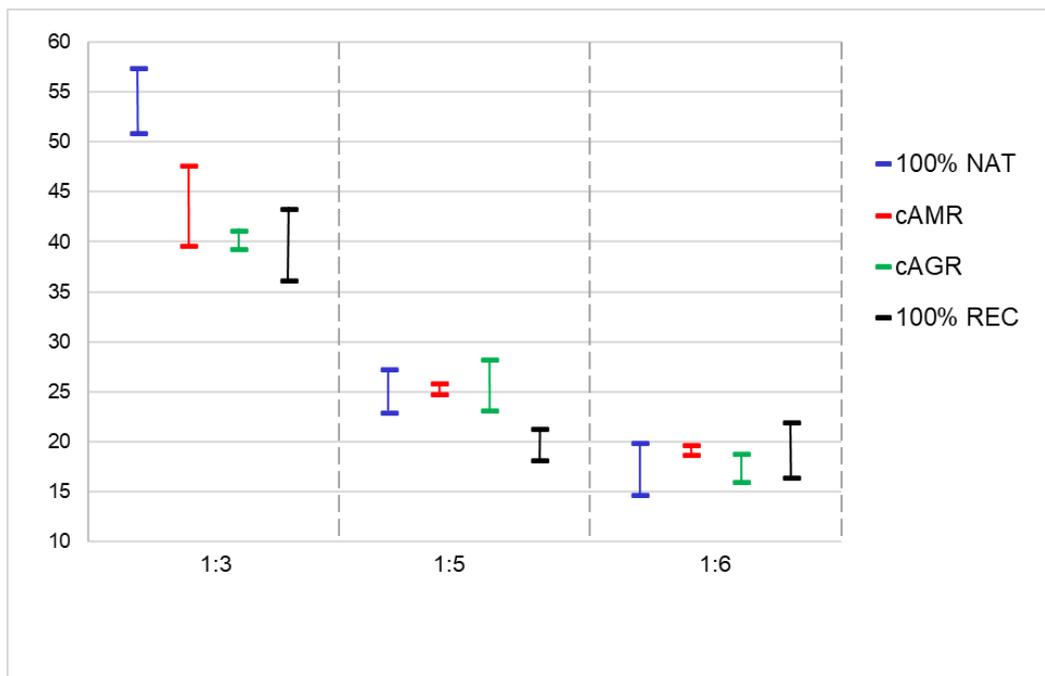
A 1 ano:

- Para a idade de 1 ano, verificou-se sobreposição entre 100% REC e cAGR, bem como entre cAMR e cAGR no traço 1:3;
- Há uma sobreposição entre 100% NAT e cAMR, e entre cAGR e cAMR no traço 1:5;
- Há uma sobreposição entre 100% REC e cAGR, mas com um pequeno intervalo de diferença. cAMR também se sobrepõe ligeiramente com cAGR no traço 1:6.

A 1 ano de idade, as sobreposições entre os intervalos de confiança são mais evidentes nos traços 1:5 e 1:6, especialmente entre as composições 100% NAT, cAMR e cAGR. Destacam-se também as sobreposições entre cAMR e cAGR, conforme descrito nos resultados e ilustrado no Gráfico 29.

Gráfico 29 – Intervalos de confiança para todas as composições do estudo experimental em massa: a) 28 dias; b) 1 ano





Fonte: Elaboração própria, 2022

5.3.2.4 Homogeneidade do estudo experimental em massa

A análise de homogeneidade foi conduzida conforme procedimentos descritos no tópico 5.3.1.4. Os resultados obtidos para o estudo experimental em massa, nas idades de 28 dias e 1 ano, estão apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Resultado de homogeneidade do estudo experimental em massa, para cada idade

Composição	Traço	Estatística de Levene	Sig.
28 dias	1:3	5,562	0,013
	1:5	1,275	0,327
	1:6*	-	-
1 ano	1:3	1,740	0,212
	1:5	0,390	0,762
	1:6	3,874	0,038

* Traço não apresentou normalidade

Fonte: Elaboração própria, 2022

A aplicação de análises estatísticas paramétricas, como a ANOVA, para avaliar o efeito dos tratamentos sobre a variável resposta (resistência à compressão), é viável para os traços 1:5 e 1:6 aos 28 dias, e para os traços 1:3 e 1:5 a 1 ano. Esses grupos atendem aos pressupostos necessários, uma vez que apresentam homogeneidade de variância e distribuição normal dos dados.

5.3.2.5 A influência da composição e traço na resistência à compressão do estudo experimental em massa

O efeito de cada fator – composição e traço – pode ser analisado de forma isolada, mantendo o outro fator fixo em um determinado valor, ao invés de simplesmente desconsiderá-lo, como ocorre em análises de correlações. Por exemplo, é possível avaliar o efeito de uma composição, distinta da referencial, no traço 1:3, ou ainda, analisar o impacto de um determinado traço nas diferentes composições.

A Tabela 26 apresenta, em detalhes, os resultados obtidos por meio das análises de variância (ANOVA) e do teste de Kruskal-Wallis, indicando a presença de homogeneidade entre os grupos analisados.

Tabela 26 – Resultados dos testes ANOVA e Kruskal-Wallis do estudo experimental em massa, para cada idade

Estudo Experimental em massa – Resultados da ANOVA e Kruskal-Wallis			
Composições (28 d)	ANOVA ² /Kruskal Wallis ¹	DMS ³	Tukey ² /Dunn ¹
1:3	0,003 ¹	SIM	100%NATa/cAMRb
1:5	0,0001 ²	SIM	100%NATa/cAMRc; 100%NATa/100%RECb; cAMRb/cAGRa e cAGRb/100%NATa
1:6	0,01 ¹	NÃO	100%NATa; 100%RECb; cAGRc; cAMRd
Traço (28 d)			
100% NAT	0,0001 ²	NÃO	1:3a; 1:5b; 1:6c
cAMR	0,0001 ¹	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c
cAGR	0,007 ¹	NÃO	1:3a; 1:5b; 1:6c
100% REC	0,021 ²	SIM	1:3a e 1:6b
Composições (1 ano)			
1:3	0,0001 ²	SIM	cAMRb/100% NATa; cAGRc e 100%NATa; 100%RECd/100%NATa
1:5	0,035 ¹	NÃO	cAGRc; cAMRa; 100%NATb; 100%RECd
1:6	0,092 ¹	NÃO	cAMRa; 100%RECb; cAGRc; 100%NATd
Traço (1 ano)			
100% NAT	0,0001 ²	NÃO	1:3a; 1:5b; 1:6c
cAMR	0,007 ¹	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c
cAGR	0,007 ¹	SIM	1:3a e 1:6c
100% REC	0,0001 ²	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c

¹Teste de Kruskal–Wallis com nível de significância de 5%. ²ANOVA unidirecional com nível de significância de 5%. ³DMS – Diferença mínima significativa. Em ordem decrescente de resistência: a>b>c>d.

Os resultados obtidos pelos testes ANOVA e Kruskal-Wallis convergiram com as tendências apontadas pelos intervalos de confiança. Verificou-se que os fatores “composição” e “traço” influenciaram significativamente a resistência à compressão do concreto em diferentes situações, conforme descrito a seguir:

Análise com relação ligante:agregados fixada e variação das composições – 28 dias:

- **Traço 1:3:** Houve diferença significativa entre as composições 100%NAT e cAMR, indicando que a substituição parcial por agregado miúdo reciclado impacta de forma relevante a resistência à compressão. Cabe destacar que a composição cAMR substituiu 15,55% do agregado miúdo natural, e sua relação a/c efetiva foi de 0,33, comparada à relação a/c de 0,40 da composição 100% NAT;
- **Traço 1:5:** Apresentaram diferenças estatisticamente significativas as seguintes comparações: 100%NAT e cAMR; 100%NAT e 100%REC; cAMR e cAGR; cAGR e 100%NAT. Comparando-se à composição de referência (100% NAT), observa-se que as substituições por agregado reciclado total (miúdo + graúdo), somente o agregado miúdo e agregado graúdo, impactaram significativamente a resistência, em decrescente de influência;
- **Traço 1:6:** Nenhuma das composições apresentou diferença estatística entre si. No entanto, em ordem decrescente de resistência à compressão, os resultados foram: 100% NAT > 100% REC > cAGR > cAMR.

Análise com composição fixa e variação da relação ligante:agregados – 28 dias:

- **100% NAT:** Nenhuma diferença estatística significativa foi identificada entre os traços, e os resultados seguiram a tendência esperada de resistência: 1:3 > 1:5 > 1:6;
- **cAMR:** Houve diferenças significativas entre os traços 1:3 e 1:5, e 1:3 e 1:6. Os traços 1:5 e 1:6 foram considerados estatisticamente homogêneos. A composição cAMR foi a que apresentou maior sensibilidade estatística à variação de traço aos 28 dias;

- **cAGR:** Assim como em 100% NAT, nenhuma diferença significativa foi observada entre os traços;
- **100% REC:** Observou-se diferença significativa entre os traços 1:3 e 1:6.

Análise com relação ligante:agregados fixada e variação das composições – 1 ano:

- **Traço 1:3:** Foram observadas diferenças significativas entre 100% NAT e as composições cAMR, cAGR e 100% REC. Em comparação à mesma configuração aos 28 dias, as composições com agregados graúdos reciclados passaram a interferir estatisticamente na resistência à compressão. A composição cAMR manteve os valores mais próximos da referência (100% NAT), seguida por cAGR e, por fim, 100% REC.
- **Traço 1:5:** Nenhuma diferença estatística foi detectada entre as composições. Apesar disso, a resistência da composição de referência (100% NAT) foi superada pela cAMR;
- **Traço 1:6:** Assim como no traço 1:5, não houve diferenças estatísticas significativas. Contudo, todas as composições contendo agregados reciclados apresentaram resistências à compressão superior à da composição 100% NAT. As maiores médias de resistência foram observadas em cAMR e 100% REC, seguidas por cAGR e 100% NAT.

Análise com composição fixa e variação da relação ligante:agregados – 1 ano:

- **100% NAT:** Assim como aos 28 dias, não foram identificadas diferenças estatísticas entre os traços;
- **cAMR:** Foram mantidas as diferenças observadas aos 28 dias, com distinções estatísticas entre os traços 1:3 e 1:5; 1:3 e 1:6;
- **cAGR:** Diferentemente do observado aos 28 dias, a análise a 1 ano indicou diferença significativa entre os traços 1:3 e 1:6;
- **100% REC:** Além da diferença entre os traços 1:3 e 1:6 verificada aos 28 dias, na idade de 1 ano também se observou diferença estatística entre os traços 1:3 e 1:5.

A substituição de agregados naturais por reciclados afeta a resistência à compressão, principalmente em idades iniciais e em traços mais ricos. Aos 1 ano, a

maturação do concreto tende a reduzir as diferenças estatísticas, revelando o potencial de uso de agregados reciclados, especialmente quando se prioriza a sustentabilidade sem perda significativa de desempenho. As composições com agregado miúdo reciclado (cAMR) demonstraram ser mais sensíveis às variações de traço, enquanto as com agregado graúdo reciclado (cAGR) apresentaram maior estabilidade.

5.3.3 Análises Estatísticas do estudo experimental em volume

Para cada composição dosada em volume, foram moldados quatro corpos de prova cilíndricos (10 × 20 cm), os quais foram submetidos ao ensaio de resistência à compressão nas idades de 28 dias e 1 ano, conforme apresentado na Tabela 27. Os valores obtidos foram fundamentais para a realização das análises estatísticas desenvolvidas neste trabalho.

Tabela 27 – Valores de resistências à compressão (MPa) para cada composição e traço do estudo experimental em volume, nas idades de 28 dias e 1 ano

Idade	Traço	100% NAT	cAMR	cAGR	100% REC
28 dias	1:3	44,30; 43,19;	44,82; 44,56;	39,99; 36,42;	37,94; 38,45;
		47,31; 46,22	42,86; 43,81	35,66; 35,36	40,87; 39,09
	1:5	21,20; 22,78;	14,39; 14,01;	17,58; 16,30;	14,64; 16,81;
		23,07; 23,87	16,81; 15,79	15,30; 15,92	17,19; 18,08
	1:6	17,66; 17,39;	20,24; 19,86;	17,83; 18,34;	18,59; 19,74;
		15,38; 16,93	19,86; 19,99	18,34; 16,81	19,61; 19,31
1 ano	1:3	54,96; 51,21;	58,46; 58,33;	50,59; 44,34;	49,59; 46,46;
		54,33; 55,96	59,33; 56,96	48,09; 47,46	46,84; 49,59
	1:5	26,23; 25,36;	25,73; 24,23;	26,60; 25,48;	27,85; 29,60;
		25,61; 23,11	24,73; 24,98	25,61; 24,86	27,35; 27,48
	1:6	19,24; 17,99;	28,35; 29,10;	26,48; 25,73;	27,60; 28,48;
		15,86; 15,99	28,85; 27,10	23,11; 25,73	28,10; 24,98

Fonte: Elaboração própria, 2022

A análise estatística foi realizada com os valores acima. Os aspectos sob avaliação foram os mesmos do item 5.3.2.

5.3.3.1 Indicadores estatísticos do estudo experimental em volume

Os indicadores estatísticos tradicionais para cada composição, nas respectivas idades de cura adotadas neste estudo, estão apresentados na Tabela 28. Complementarmente, os *boxplots* correspondentes a esses dados encontram-se no Gráfico 30, permitindo uma visualização mais clara da dispersão e da tendência central dos resultados.

Tabela 28 – Indicadores estatísticos tradicionais da resistência à compressão em Mpa das composições do estudo experimental em volume, em cada idade

Idade	Curva	Traço	Média	Mediana	Desvio	Mín.	Máx.
28 dias	100% NAT	1:3	45,25a	45,26	1,86	43,19	47,31
		1:5	22,73a	22,92	1,12	21,20	23,87
		1:6	16,84	17,16	1,02	15,38	17,66
	cAMR	1:3	44,65b	44,60	0,12	44,56	44,82
		1:5	15,25d	15,09	1,29	14,01	16,81
		1:6	19,99	19,92	0,18	19,86	20,24
	cAGR	1:3	35,36d	35,51	1,01	34,00	36,42
		1:5	16,27c	16,11	0,96	15,30	17,58
		1:6	17,83	18,08	0,72	16,81	18,34
	100% REC	1:3	39,08c	38,77	1,28	37,94	40,87
		1:5	16,68b	17,00	1,46	14,64	18,08
		1:6	19,31	19,46	0,51	18,60	19,74
1 ano	100% NAT	1:3	54,11	54,65	2,05	51,21	55,96
		1:5	25,07	25,48	1,36	23,10	26,23
		1:6	17,27	16,99	1,63	15,86	19,24
	cAMR	1:3	58,27	58,39	0,98	56,95	59,33
		1:5	24,92	24,85	0,62	24,23	25,73
		1:6	28,35	28,60	0,88	27,10	29,10
	cAGR	1:3	47,62	47,77	2,56	44,34	50,58
		1:5	25,63	25,54	0,72	24,85	26,60
		1:6	25,26	25,73	1,48	23,11	26,48
	100% REC	1:3	48,12	48,21	1,70	46,46	48,59
		1:5	28,07	27,67	1,04	27,35	29,60
		1:6	27,29	27,85	1,58	24,98	28,47

Fonte: Elaboração própria, 2022

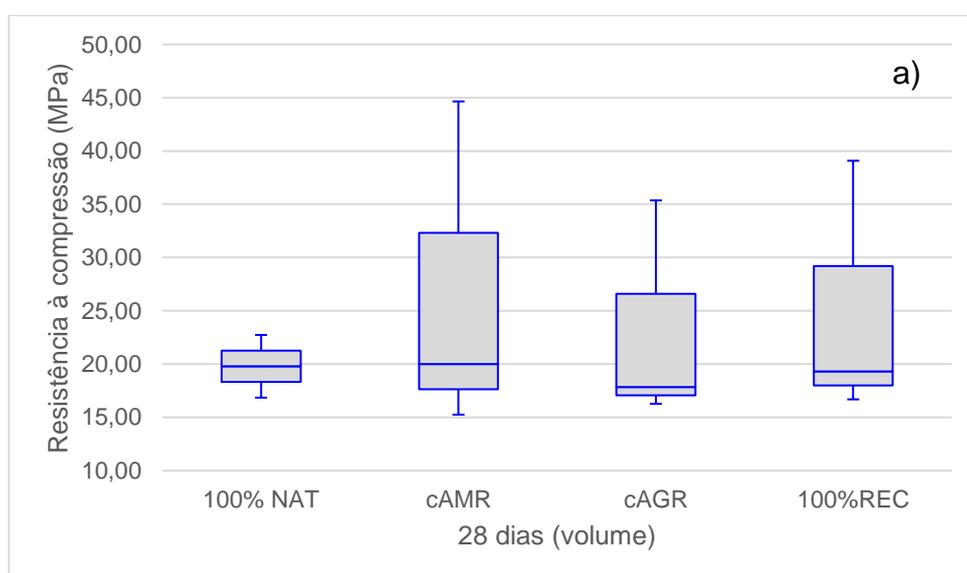
No Gráfico 27, observa-se que, aos 28 dias, a composição 100% NAT é a única que apresenta uma distribuição simétrica, ou seja, os valores de resistência à compressão estão distribuídos de forma equilibrada em torno da mediana. Ainda nesse período, destaca-se que a composição cAMR apresenta a maior dispersão

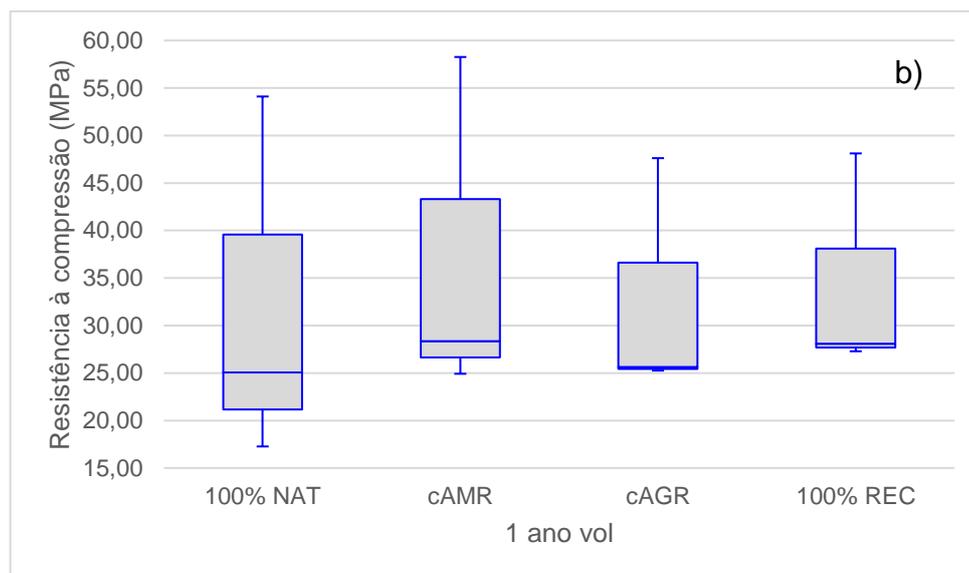
dos dados, enquanto a 100% NAT apresenta a menor, evidenciando maior homogeneidade nos resultados desta última.

Com exceção da composição 100% NAT aos 28 dias, as demais composições apresentaram distribuição assimétrica positiva tanto aos 28 dias quanto aos 1 ano de idade. Nessa condição, a mediana torna-se um indicador mais representativo da tendência central, uma vez que não sofre influência dos valores extremos (*outliers*) presentes nas amostras.

Observa-se que a cauda (linha vertical) da composição 100% NAT, de modo geral, apresenta o menor comprimento, indicando uma distribuição mais concentrada e com menor alongamento nas extremidades. Por outro lado, a composição cAMR exibiu o maior comprimento de cauda, além de apresentar maior dispersão dos dados tanto aos 28 dias quanto após 1 ano de cura. Importante destacar que não foram identificados outliers nas composições avaliadas neste estudo, o que reforça a consistência dos resultados obtidos.

Gráfico 30 – Box plots para as composições do estudo experimental em volume a) 28 dias; b) 1 ano





Fonte: Elaboração própria, 2022

5.3.3.2 Normalidade do estudo experimental em volume

A normalidade dos dados foi verificada por meio de teste realizado de forma análoga ao descrito no item 5.3.1.2. Os resultados referentes à avaliação da normalidade dos dados do estudo experimental com dosagem em volume, ao nível de significância de 0,05, estão apresentados na Tabela 29.

Tabela 29 – p-valor para os testes de normalidade da resistência à compressão do estudo experimental em volume, para cada idade

Idade	Curva	Traço	Estatística	gl	<i>p</i>
28 dias	100% NAT	1:3	0,961	4	0,786
		1:5	0,944		0,676
		1:6	0,867		0,287
	cAMR	1:3	0,827		0,161
		1:5	0,930		0,596
		1:6	0,827		0,161
	cAGR	1:3	0,958		0,765
		1:5	0,956		0,753
		1:6	0,827		0,161
	100% REC	1:3	0,917		0,519
		1:5	0,921		0,542
		1:6	0,889		0,378
1 ano	100% NAT	1:3	0,900	4	0,432
		1:5	0,860		0,260
		1:6	0,878		0,330
	cAMR	1:3	0,945		0,687
		1:5	0,982		0,911
		1:6	0,895		0,405
	cAGR	1:3	0,976		0,880

100% REC	1:5	0,951	0,722
	1:6	0,818	0,139
	1:3	0,780	0,071
	1:5	0,793	0,091
	1:6	0,824	0,153

Fonte: Elaboração própria, 2022

Sabe-se que a resistência à compressão do concreto tende a seguir uma distribuição normal. Neste estudo, observou-se que os valores de p obtidos no teste de Shapiro-Wilk foram superiores a 0,05 para todas as composições e idades analisadas. Dessa forma, conclui-se que a resistência à compressão, para cada curva granulométrica e idade de cura, apresentou comportamento compatível com uma distribuição normal ao nível de significância adotado.

5.3.3.3 Intervalos de confiança do estudo experimental em volume

Os intervalos de confiança apresentados na Tabela 30 referem-se à média da resistência à compressão e indicam os limites dentro dos quais a variável se encontra, para um determinado nível de confiança. Com base nesses intervalos, é possível identificar, por exemplo, possíveis sobreposições entre os valores obtidos para diferentes composições e traços de concreto, permitindo uma análise comparativa mais robusta entre os tratamentos avaliados.

Tabela 30 –Intervalos de confiança de 95% para a média de resistência à compressão em Mpa das composições do estudo experimental em volume, para cada idade

Idade	Curva	Traço	Intervalo de confiança para Média Aritmética (MPa)
28 dias	100% NAT	1:3	(42,30; 48,21)
		1:5	(20,95; 24,51)
		1:6	(15,22; 18,46)
	cAMR	1:3	(44,45; 44,84)
		1:5	(13,20; 17,30)
		1:6	(19,70; 20,27)
	cAGR	1:3	(33,74; 36,97)
		1:5	(14,74; 17,81)
		1:6	(16,68; 18,98)
	100% REC	1:3	(37,05; 41,12)
		1:5	(14,36; 19,00)
		1:6	(18,50; 20,13)
1 ano	100% NAT	1:3	(50,87; 57,37)
		1:5	(22,91; 27,24)

	1:6	(14,67; 19,87)
cAMR	1:3	(56,71; 59,83)
	1:5	(23,92; 25,91)
	1:6	(26,94; 29,77)
cAGR	1:3	(43,53; 51,71)
	1:5	(24,48; 26,79)
	1:6	(22,91; 27,62)
100% REC	1:3	(45,41; 50,83)
	1:5	(26,41; 29,73)
	1:6	(24,78; 29,81)

Fonte: Elaboração própria, 2022

O Gráfico 31 apresenta as médias aritméticas dos intervalos de confiança da resistência à compressão dos concretos avaliados, para as idades de 28 dias e 1 ano, considerando a dosagem em volume. A partir da análise comparativa entre traços e composições, é possível identificar tendências importantes quanto ao comportamento mecânico dos concretos. Os principais pontos observados são:

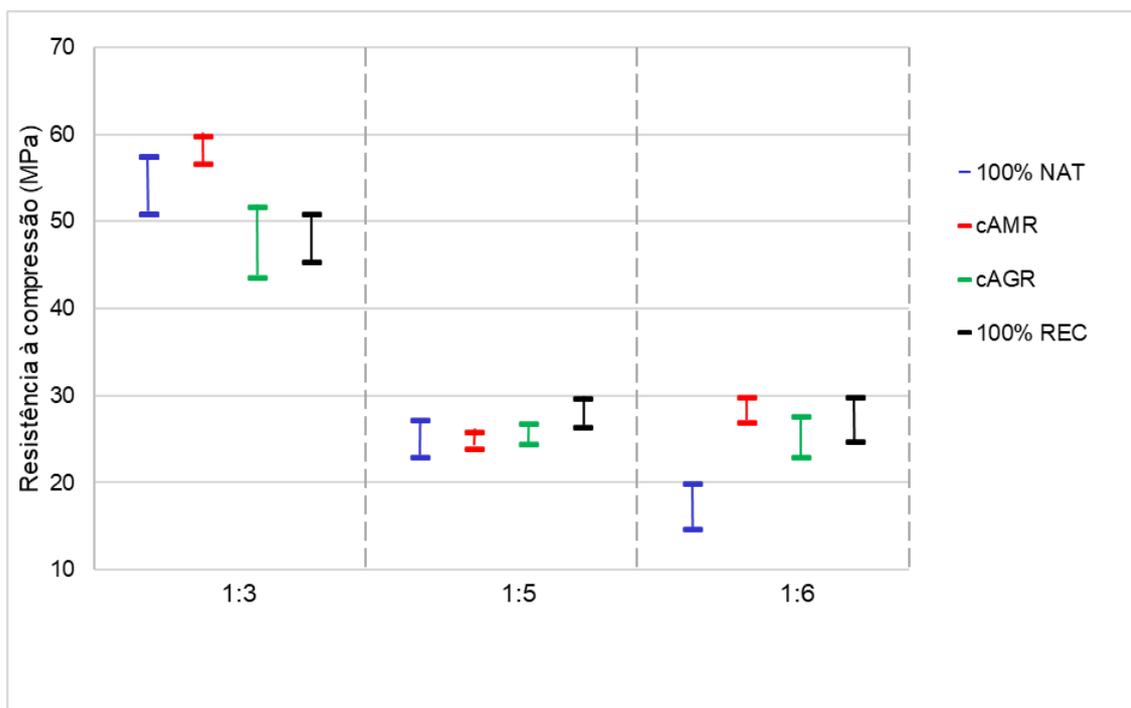
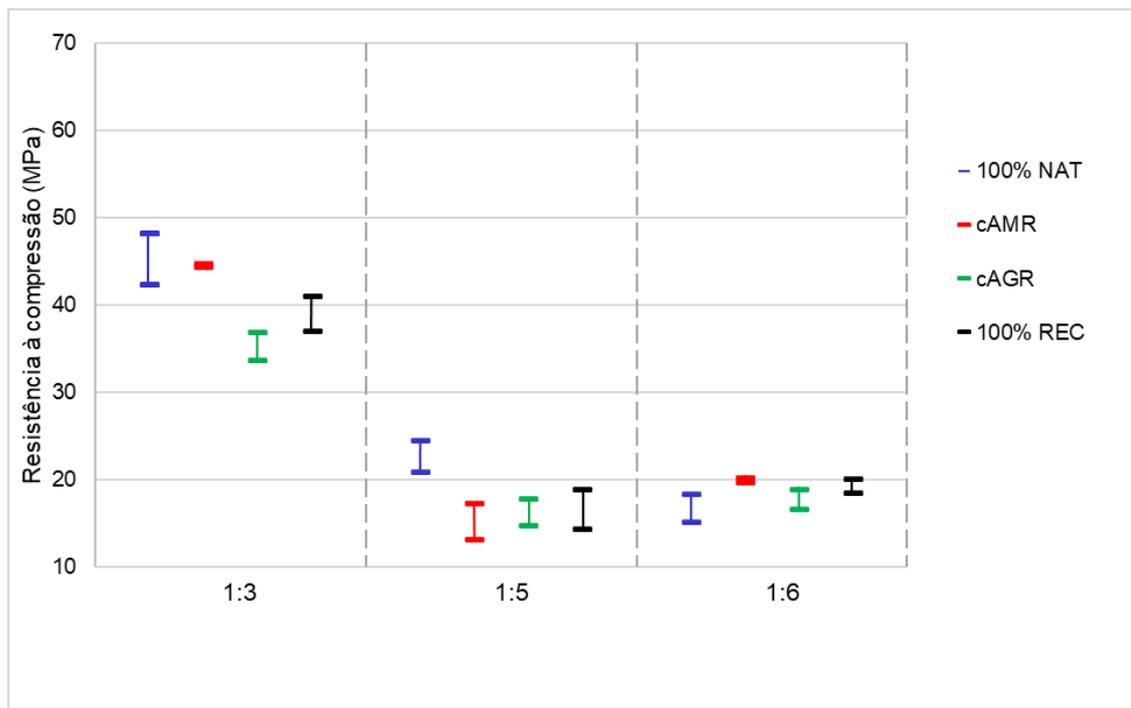
Aos 28 dias

- Houve sobreposição entre as composições 100% REC e cAMR no traço 1:3; no traço 1:5 entre as composições cAMR e cAGR, cAMR e 100% REC e cAGR e 100% REC (parcial); No traço 1:6 ocorreu sobreposição entre as seguintes composições: 100% NAT e cAGR, cAMR e 100% REC, cAGR e 100% REC, e entre cAGR e 100% REC (parcial);

A 1 ano

- Verificou-se, para o traço 1:3, sobreposição entre 100% NAT e cAMR, 100% NAT e cAGR e cAGR e 100% REC; Para o traço 1:5, as sobreposições ocorreram entre: 100% NAT e cAMR, 100% NAT e cAGR cAMR e cAGR e cAGR e 100% REC; Por fim, para o traço 1:6, as composições que apresentaram sobreposição foram: cAMR e cAGR, cAMR e 100% REC e cAGR e 100% REC.

Gráfico 31 – Intervalos de confiança para todas as composições do estudo experimental em volume: a) 28 dias; b) 1 ano



Fonte: Elaboração própria, 2022

5.3.3.4 Homogeneidade do estudo experimental em volume

A Tabela 31 apresenta a análise da homogeneidade dos valores de resistência à compressão obtidos no estudo experimental, considerando as idades de 28 dias e 1 ano.

Tabela 31 – Resultado de homogeneidade do estudo experimental em volume, para cada idade

Composição	Traço	Estatística de Levene	Sig.
28 dias	1:3	3,972	0,035
	1:5	0,328	0,805
	1:6	1,711	0,218
1 ano	1:3	0,763	0,536
	1:5	0,860	0,488
	1:6	0,784	0,526

Fonte: Elaboração própria, 2022

A aplicação de análises estatísticas paramétricas, como a ANOVA, para avaliar o efeito dos tratamentos sobre a variável resposta (resistência à compressão), é adequada para os traços 1:5 e 1:6 aos 28 dias, e para os traços 1:3 e 1:5 a 1 ano, uma vez que esses conjuntos de dados apresentam homogeneidade de variância e distribuição normal.

5.3.3.5 A influência da composição e traço na resistência à compressão do estudo experimental traço em volume

De forma análoga aos resultados obtidos com os traços em massa, a Tabela 32 apresenta detalhadamente os dados do experimento em volume, com os resultados da análise de variância (ANOVA) e de Kruskal-Wallis. Essas análises indicam a ocorrência de homogeneidade entre os grupos avaliados, possibilitando a identificação de diferenças estatisticamente significativas entre os traços – quando mantidas constantes as composições – ou entre as composições – quando os traços são mantidos fixos.

Tabela 32 – Resultados dos testes ANOVA e Kruskal-Wallis do estudo experimental em volume, para cada idade

Estudo Experimental em Volume			
Composições (28 d)	ANOVA ² /Kruskal Wallis ¹	DMS	Tukey ² /Dunn ¹
1:3	0,005 ¹	SIM	cAMRb e 100%NATa; cAMRb e 100%RECb; cAGRd e cAMRb; cAGRd e 100%NATa
1:5	0,0001 ²	SIM	100%NATa e cAMRd; 100%NATa e 100%RECb; 100%NATa e cAGRc;
1:6	0,0001 ²	SIM	100%NATd e cAMRa; 100%RECb e 100%NATd; cAGRc e cAMRa; cAGRc e 100%RECb
Traço (28 d)			
100% NAT	0,0001 ²	NÃO	1:3a; 1:5b; 1:6c
cAMR	0,007 ¹	SIM	1:3a e 1:5c
cAGR	0,007 ²	SIM	1:3a e 1:5c; 1:3a e 1:6b
100% REC	0,0001 ²	NÃO	1:3a; 1:5c; 1:6b
Composições (1 ano)			
1:3	0,0001	SIM	cAMRa e cAGRd; cAMRa e 100%NATb; cAMRa e 100%RECb; cAGRd e 100%NATb; 100%NATb e 100%RECb
1:5	0,002	SIM	100%NATc e 100%RECa; cAMRd e 100%RECa; cAGRb e 100%RECa
1:6	0,0001	SIM	cAMRa e 100%NATd; cAGRc e 100%NATd; 100%RECb e 100%NATd; cAMRa e cAGRc
Traço (1 ano)			
100% NAT	0,0001	NÃO	1:3a; 1:5b; 1:6c
cAMR	0,0001	NÃO	1:3a; 1:5c; 1:6b
cAGR	0,0001	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c
100% REC	0,0001	SIM	1:3a e 1:5b; 1:3a e 1:6c

¹Teste de Kruskal–Wallis com nível de significância de 5%. ²ANOVA unidirecional com nível de significância de 5%. DMS - Diferença mínima significativa. Em ordem decrescente de resistência: a>b>c>d.

Fonte: Elaboração própria, 2022

Os resultados do teste ANOVA/Kruskal-Wallis da Tabela 32 foram consistentes com as tendências observadas nos intervalos de confiança, conforme ilustrado no Gráfico 31. Os tratamentos *composição* e *traço* influenciaram a resistência à compressão conforme descrito a seguir:

Análise com relação ligante:agregados fixada e variação das composições – 28 dias:

- **Traço 1:3:** Houve diferença estatisticamente significativa entre as composições cAMR e 100%NAT, cAMR e 100% REC, cAGR e cAMR, e cAGR e 100% NAT, indicando influência significativa dos tratamentos sobre a resistência à compressão. Em relação à composição de referência (100%

NAT), a cAMR apresentou o melhor desempenho, seguida por 100%REC e cAGR, nessa ordem;

- **Traço 1:5:** As composições 100%NAT e cAMR, 100%NAT e 100%REC, 100% NAT e cAGR apresentaram diferenças estatísticas significativas. Para esses traços, diferentemente da dosagem em massa, as composições cAMR e cAGR mostraram-se estatisticamente homogêneas. Ainda assim, cAMR manteve o melhor desempenho em relação à composição de referência;
- **Traço 1:6:** Foram observadas diferenças significativas entre as composições 100% NAT e cAMR, 100% REC e 100% NAT, cAGR e cAMR e cAGR e 100% REC. Em comparação ao traço 1:6 dosado em massa, os pares 100%NAT e cAMR e cAGR e 100%REC passaram a apresentar diferença significativa. A ordem crescente de resistência foi: cAMR > 100%REC > cAGR > 100%NAT, mesma disposição verificada na dosagem em massa para esse traço.

Análise com composição fixa e variação da relação ligante:agregados – 28 dias:

- **100% NAT:** Nenhum traço apresentou diferença significativa;
- **cAMR:** Os traços 1:3 e 1:5 diferenciaram-se estatisticamente;
- **cAGR:** Os traços 1:3 e 1:5, assim como 1:3 e 1:6, apresentaram diferenças significativas, sendo o traço 1:6 superior ao 1:5;
- **100% REC:** Não foram identificadas diferenças significativas entre os traços.

Análise com relação ligante:agregados fixada e variação das composições – 1 ano:

- **Traço 1:3:** Houve diferença significativa entre as composições cAMR e cAGR, cAMR e 100%NAT, cAMR e 100%REC, cAGR e 100%NAT. Também foi identificada diferença entre 100% NAT e 100% REC, que não havia sido observado aos 28 dias. A composição cAMR apresentou desempenho superior ao da 100% NAT;
- **Traço 1:5 –** Foram observadas diferenças estatísticas entre 100% NAT e 100% REC, cAMR e 100% REC, e cAGR e 100% REC. Neste traço, cAGR e 100% REC superaram a resistência da composição 100%NAT, enquanto cAMR apresentou o menor valor de resistência;

- **Traço 1:6** – As composições que diferiram significativamente foram: cAMR e 100%NAT; cAGR e 100%NAT; 100%REC e 100%NAT; cAMR e cAGR. Diferentemente do traço 1:5, a composição cAMR voltou a apresentar os maiores valores de resistência, comportamento semelhante ao observado na dosagem em massa para o mesmo traço.

Análise com composição fixa e variação da relação ligante:agregados – 28 dias:

- **100%NAT:** Nenhum traço apresentou diferença significativa, comportamento semelhante ao observado aos 28 dias;
- **cAMR:** Os traços não apresentaram diferenças estatísticas significativas;
- **cAGR:** Houve homogeneidade entre os traços 1:5 e 1:6; os demais pares apresentaram diferenças significativas;
- **100%REC:** Assim como na composição cAGR, observaram-se diferenças estatísticas entre os traços 1:3 e 1:5, e entre 1:3 e 1:6. Levando sem conta a heterogeneidade dos agregados reciclados e seus reflexos na aleatoriedade na variável central do estudo, a resistência a compressão, pode-se inferir que.

Considerando a heterogeneidade dos agregados reciclados e seus reflexos na variabilidade da resistência à compressão, variável central deste estudo, é possível inferir que:

- A dosagem mista — com agregados reciclados dosados em volume e os demais componentes em massa — gera um número maior de grupos estatisticamente distintos entre si;
- Observou-se reprodutibilidade na elevação da resistência com a composição, como do caso da composição cAMR, já verificado nas dosagens em massa;
- A composição 100%REC apresentou melhor desempenho aos 1 ano de cura, especialmente quando associada ao traço 1:5.

Comparação da variação relativa da resistência à compressão entre os concretos dosados em massa e volume

No APÊNDICE B, encontram-se as tabelas com os consumos dos traços em massa e dos traços em volume, nas quais estão discriminadas as respectivas relações

água/cimento (a/c) e água cimento efetiva (a/ce). Ao comparar os resultados de resistência à compressão dos concretos dosados em massa com os dos dosados em volume, observa-se uma redução no consumo de materiais reciclados, o que impactou significativamente à resistência mecânica. De modo geral, foi verificado um aumento expressivo nos valores de resistência à compressão dos concretos dosados em volume, superando em alguns casos, a resistência do concreto de referência.

A Tabela 33 apresenta os percentuais de aumento ou redução da resistência entre as composições dosadas em massa e em volume. Observou-se, na maioria dos casos, um ganho significativo entre as composições dosadas em massa e em volume.

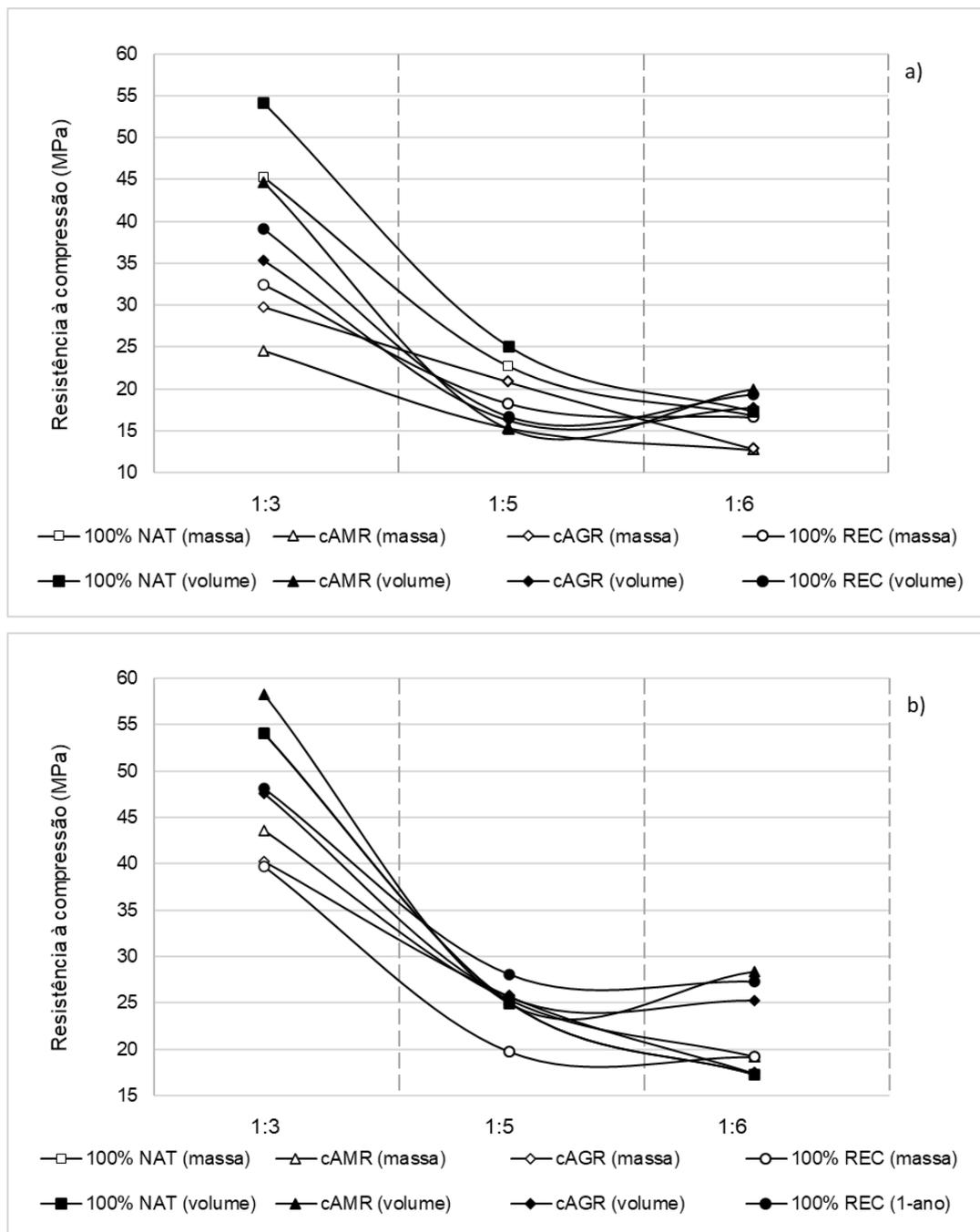
TABELA 33 – Relação entre composição e percentual de resistência à compressão relativa

28 dias				
Resistência (%)	Traço	cAMR	cAGR	100% REC
	1:3	81,80%	18,70%	20,54%
	1:5	-0,52%	-21,82%	-8,55%
	1:6	57,28%	38,75%	16,40%
1 ano				
Resistência (%)	Traço	cAMR	cAGR	100% REC
	1:3	33,59%	18,31%	21,06%
	1:5	-1,46%	-0,27%	42,27%
	1:6	47,89%	45,26%	42,58%

Fonte: Elaboração própria, 2022

Observou-se, na maioria dos casos, um ganho significativo de resistência quando os traços foram dosados em volume, com destaque para a composição cAMR. O Gráfico 32 ilustra esses resultados comparativos aos 28 dias a), e após 1 ano de cura, Gráfico 28 b).

Gráfico 32 – Comparação entre resistências à compressão dos concretos dosados em massa versus volume, aos 28 dias e 1 ano



Fonte: Elaboração própria, 2022

6. CONCLUSÕES

Este capítulo apresenta a consolidação dos resultados obtidos nas diferentes etapas experimentais do trabalho, buscando responder aos objetivos propostos quanto à viabilidade técnica do uso de agregados reciclados (graúdo e miúdo) e à influência da curva granulométrica no desempenho do concreto no estado fresco e endurecido.

Avaliação da Curva Granulométrica (Estudo Piloto)

- Foram avaliadas quatro curvas granulométricas com razões $Pr = 0,70; 0,80; 0,85$ e $0,90$, por meio da modelagem de esqueletos granulares compostos por britas 12,5 mm, 19 mm e pó de pedra;
- A curva $Pr = 0,85$ apresentou o melhor desempenho, no tocante ao coeficiente de uniformidade ($Cu = 34,75$), garantindo melhor compactação, distribuição de partículas e maior trabalhabilidade;
- No ensaio de abatimento, apenas o traço 1:3, a curva 0,85 atingiu consistência classificada como alta, com abatimento de 153,7 mm. As demais curvas apresentaram baixa ou nenhuma fluidez;
- A avaliação da trabalhabilidade do concreto reciclado deve estar mais ligada ao conceito de “moldabilidade” das misturas de concreto no estado fresco, que ao valor de abatimento dos concretos, em virtude das características físicas do agregado reciclado, que promovem certo travamento entre os grãos da mistura, dificultando sua mobilidade;
- Na resistência à compressão aos 28 dias, os melhores resultados foram encontrados nas curvas 0,70 e 0,85. Após 1 ano de cura, a curva 0,85 se destacou, mantendo desempenho compatível com concretos estruturais de classe $\geq C30$.

Avaliação do Uso de Agregados Reciclados (Estudo Experimental)

Propriedades no Estado Fresco

A substituição de agregados naturais por reciclados afetou a massa específica e o abatimento dos concretos:

- As composições com AGR (fração graúda reciclada) apresentaram menor massa específica e os menores valores de abatimento, refletindo menor trabalhabilidade.
- A substituição com AMR (fração miúda reciclada) resultou em trabalhabilidade semelhante ou superior à composição de referência (100% NAT).
- A composição cAMR, especialmente quando dosada em volume, apresentou desempenho equivalente ou superior em trabalhabilidade, mesmo com menores relações água/cimento.

Propriedades no Estado Endurecido

- No estudo da dosagem em massa aos 28 dias, a composição que apresentou melhor desempenho mecânico em relação às demais composições estudadas, foi a 100% REC.
- Todos os concretos apresentaram ganho de resistência após 1 ano de cura, confirmando o potencial de reatividade prolongada dos materiais cimentícios;
- A composição cAMR em volume, no traço 1:3, superou a resistência da composição 100% NAT, sendo o melhor resultado entre os concretos com agregado reciclado.
- A composição 100% REC, ainda que com desempenho inferior, atingiu valores superiores a 20 MPa, permitindo seu uso em aplicações não estruturais.
- Os concretos com dosagem em volume apresentaram resistências superiores aos dosados em massa, devido à melhor relação entre volume real e massa dos agregados reciclados, considerando sua menor densidade.

Análises Estatísticas

As análises estatísticas aplicadas (teste de normalidade de Shapiro-Wilk, homogeneidade de Levene, ANOVA e Kruskal-Wallis com pós-testes de Tukey e Dunn) confirmaram a significância das diferenças entre as curvas granulométricas e composições.

- A análise estatística confirmou a existência de diferenças significativas entre curvas e composições, especialmente nos traços mais ricos (1:3).

- A curva 0,85 apresentou resultados estatisticamente satisfatórios em termos de resistência e trabalhabilidade.
- A composição cAMR, em especial nos traços mais ricos (1:3), destacou-se estatisticamente em relação às demais, com baixa dispersão dos resultados e elevada confiabilidade.

Considerações Finais dos Resultados

A substituição parcial ou total de agregados naturais por reciclados é tecnicamente viável, desde que haja controle rigoroso, dentre outras propriedades importantíssimas, das propriedades físicas dos agregados reciclados no tocante a sua granulometria.

A curva granulométrica $Pr = 0,85$ associada à dosagem racional e ao controle da qualidade dos agregados reciclados, mostrou-se tecnicamente viável, com potencial para substituição parcial dos agregados naturais em concretos de classe até MPa.

O resultados mostraram que uso do AMR (agregado miúdo reciclado) é mais promissor do que o do AGR isoladamente, contribuindo para concretos com maior resistência, coesão e trabalhabilidade.

A dosagem em volume proporciona resultados superiores aos da dosagem em massa, por respeitar melhor a natureza física dos agregados reciclados, principalmente em termos de porosidade e absorção.

Os concretos produzidos com AR, especialmente com AMR, podem atender às exigências normativas e de desempenho para concretos de classes até C30, com possibilidade de uso em elementos estruturais não armados, blocos, pavimentos e artefatos.

A abordagem experimental adotada permitiu compreender a variabilidade dos resultados e reforçou a importância do controle granulométrico e da qualidade dos resíduos na formulação de concretos com agregados reciclados.

A abordagem estatística para a análise da resistência à compressão do concreto contendo agregado reciclado, miúdo e graúdo, teve o intuito de mostrar uma

maneira útil de resolver os problemas associados à natureza dos materiais permitindo chegar a conclusões que possa beneficiar a aplicação em escala real.

No entanto, o uso de Resíduos da Construção Civil (RCC) sem seleção prévia na usina — ou seja, sem tratamento para separação quanto à natureza do resíduo (se concreto, cimentício ou misto) e sem a remoção de contaminantes indesejáveis, como argila e gesso de construção — ainda requer cautela. Isso porque, no presente estudo, não foram analisados os aspectos relacionados à composição química dos agregados reciclados, tampouco investigada a eventual formação de produtos expansivos nos corpos de prova.

Diante disso, recomenda-se que futuros estudos complementares sejam conduzidos, com foco em:

- Avaliação do uso de aditivos que possibilitem a redução da relação água/cimento efetiva, promovendo maior desempenho mecânico e durabilidade;
- Substituição parcial das frações granulométricas de agregados naturais por agregados reciclados totais, considerando as variações de densidade e absorção associadas ao tamanho das partículas;
- Realização de ensaios de durabilidade, tais como resistência à ação de agentes agressivos, incluindo cloretos, ataque por íons sulfato, que representam cenários comuns de degradação em ambientes urbanos, marinhos e industriais.

REFERÊNCIAS

AMBIENTAL, Ciclo. Serviços prestados. 2022. Disponível em: <http://www.cicloambientalrcc.com.br/site/conteudo/?id=3>. Acesso em: 26 nov. 2021.

AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. **Consistency, plastic consistency, and workability**. Disponível em: <https://www.concrete.org/tools/frequentlyaskedquestions.aspx?faqid=647>. Acesso em: 26 nov. 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 45:2009** Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo – Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 7809**: Agregado graúdo – Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro – Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 7211**: Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 8953**: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistência. Rio de Janeiro, 2015.

_____. **NBR 15116**: Agregados reciclados para uso em argamassas e concretos de cimento Portland – Requisitos e métodos de ensaios. Rio de Janeiro, 2021.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

BRASIL. Ministério das Cidades; Ministério do Meio Ambiente. Área de manejo de resíduos da construção e resíduos volumosos: orientação para o seu licenciamento e aplicação da Resolução **CONAMA 307/2002**. Brasília, 2005b.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução **CONAMA nº 307**, de 5 de julho de 2002. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão de resíduos da construção civil, 2021.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG. **DIN 4226-100**: Aggregates for concrete and mortar. Part 100: Recycled Aggregates. Berlin, 2002.

COPRO ASBL. **PTV 406**: Granulats recicles. Granulats de débris de béton, de débris mixtes, de débris de maçonnerie et de débris asphaltiques. Brussels, 2003.

INSTRUCCIÓN DE HORMIGÓN ESTRUCTURAL – **EHE-08**. Ministerio de Fomento. Madrid, 2008.

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil – Relatório de pesquisa**. Brasília, 2012. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/7669>. Acesso em: 26 nov. 2021.

KOREAN INDUSTRIAL STANDARDS. Recycled aggregate for concrete – **KS F2573**. Seoul, 2011.

MINISTÉRE DES INFRASTRUCTURES. Norme technique per le costruzioni – **NTC**. Roma, 2008.

AGRELA, F.; ALAEJOS, P.; JUAN, M. S. de. Properties of concrete with recycled aggregates. **Handbook Of Recycled Concrete and Demolition Waste**, p. 304-329, 2013.

ANGULO S. *et al.* Characterization of Brazilian Construction and Demolition Waste Coarse Recycled Aggregate, Brazil, **RILEM Publications SARL**, 2004.

ANGULO S. C. and MÜELLER A. Determination of construction and demolition recycled aggregates composition, in considering their heterogeneity. **Materials and Structures**, v. 42, p. 739-748, 2009.

BAI, G. *et al.* An evaluation of the recycled aggregate characteristics and the recycled aggregate concrete mechanical properties. **Construction And Building Materials**, v. 240, p. 117978, abr. 2020.

BARBUDO, A. *et al.* Statistical analysis of recycled aggregates derived from different sources for sub-base applications. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p.129-138, 2012.

BARHMAIAH, B. et al. Strength analysis and validation of recycled aggregate concrete. **Materials Today: Proceedings**, India, v. 37, n. 2, p. 2312-2317, 2020.

BARTOS, P. Fresh Concrete. Amsterdam: **Elsevier**, p. 292, 1992.

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; MOLIN, D. C. C. dal; RIBEIRO, J. L. D. Mechanical properties modeling of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 4, p. 421-430, 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Influence of mineral additions on the performance of 100% recycled aggregate concrete. **Construction And Building Materials**, v. 23, n. 8, p. 2869-2876, 2009.

DEBIEB, F.; KENAI, S. The use of coarse and fine crushed bricks as aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 22, n. 5, p.886-893, 2008.

DOMINGO-CABO, A.; LÁZARO, C.; LÓPEZ-GAYARRE, F.; SERRANO-LÓPEZ, M.A.; SERNA, P.; CASTAÑO-TABARES, J.O. Creep and shrinkage of recycled aggregate concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 7, p. 2545-2553, 2009.

ETXEBERRIA, M.; VÁZQUEZ, E. Reacción álcali sílice en el hormigón debido al mortero adherido del árido reciclado. **Materiales de Construcción**, v. 60, n. 297, p. 47-58, 2010.

EVANGELISTA, L.; BRITO, J. de. Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 29, n. 5, p. 397-401, 2007.

FURNAS, C. C. Grading aggregates, I – mathematical relations for beds of broken solids of maximum density. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 23, 2 9; p. 1052 – 1058, 1931.

GARCIA-DIAZ, E.; SAOUT, G. Le; DJERBI, A. Microstructure of recycled concrete. In: LARRARD, François de et al. **Concrete Recycling: research and practice**. London: Taylor & Francis, 2019. p. 146.

GESOGLU, Mehmet. et al. Failure characteristics of self-compacting concretes made with recycled aggregates. **Construction And Building Materials**, v. 98, p. 334-344, 2015.

GÓMEZ-SOBERÓN, José M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 32, n. 8, p. 1301-1311, 2002.

GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F. Hormigones con áridos reciclados: estudio de propiedades de los áridos y de las mezclas. **Materiales de Construcción**, [S.L.], v. 55, n. 279, p. 53-66, 2005.

GRDIC, Z. J. *et al.* Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 24, n. 7, p. 1129-1133, 2010.

IHOBE. Usos de áridos reciclados procedentes de Residuos de Construcción y Demolición. Investigación prenormativa. Ihobe, Sociedad Pública de Gestión Ambiental. Departamento de Medio Ambiente, Planificación Territorial, Agricultura y Pesca, **CEDEX**, Gobierno Vasco, 2011.

IPEA. **Diagnóstico dos Resíduos Sólidos da Construção Civil** – Relatório de Pesquisa. INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA E APLICADA. Brasília. 42 p. 2012.

KATZ, Amnon. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. **Cement And Concrete Research**, v. 33, n. 5, p. 703-711, 2003.

KHATIB, J. M. Properties of concrete incorporating fine recycled aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 4, p.763-769, 2005.

KOU, S-C; POON, C-S; ETXEBERRIA, M. Influence of recycled aggregates on long term mechanical properties and pore size distribution of concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 33, n. 2, p. 286-291, 2011.

KURDA, R. et al. Influence of recycled aggregates and high contents of fly ash on concrete fresh properties. **Cement and Concrete Composites**, v. 84, p. 198-213, 2017.

LARRARD, F. de; COLINA, H. **Concrete Recycling: research and practice**. CRC Press. Taylor & Francis, 2019.

MAH, C. M.; FUJIWARA, T; HO, C. S. Construction and demolition waste generation rates for high-rise buildings in Malaysia. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 12, p. 1224-1230, 2016.

MARTÍN-MORALES, M. *et al.* Quality control of recycled aggregates (RAs) from construction and demolition waste (CDW). **Handbook of Recycled Concrete and Demolition Waste**, p.270-303, 2013.

MAS, B. *et al.* Influence of the amount of mixed recycled aggregates on the properties of concrete for non-structural use. **Construction and Building Materials**, v. 27, n. 1, p. 612-622, 2011.

MEDINA, C.; ROJAS, M. I. S. de; FRÍAS, M. Reuse of sanitary ceramic wastes as coarse aggregate in eco-efficient concretes. **Cement And Concrete Composites**, v. 34, n. 1, p. 48-54, 2012.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **CONCRETO: microestrutura, propriedades e materiais**. 2. ed. São Paulo: Ibracon, 2014.

MIRANDA, L. F.R.; SELMO, S. M. S. CDW recycled aggregate renderings: part I - analysis of the effect of materials finer than 75 μ m on mortar properties. **Construction And Building Materials**, v. 20, n. 9, p. 615-624, 2006.

MULDER, E. *et al.* Closed cycle construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste. **Waste Management Journal**, v. 27, p. 1408-1, 2007.

MÜELLER, A.; WEIMANN, K. **Properties of building materials gained from wet-processed crushed concrete fines**. 2004.

MÜLLER, A.; MARTINS, I. **Recycling of Building Materials**. Springer, [S.L.], v. 1, p. 1-377, 2022.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, p. 888, 2016.

OIKONOMOU, N. D. Recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 2, p.315-318, 2005.

PACHECO-TORGAL, F. Introduction to the recycling of construction and demolition waste (CDW). **Handbook Of Recycled Concrete and Demolition Waste**, p. 1-6, 2013.

PADMINI, A.K. *et al.* Influence of parent concrete on the properties of recycled aggregate concrete. **Construction And Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 829-836, 2009.

POON, C.-S.; CHAN, D. The use of recycled aggregate in concrete in Hong Kong. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 50, n. 3, p. 293-305, 2007.

QUATTRONE, M.; CAZACLIU, B.; ANGULO, S.C.; HAMARD, E.; COTHENET, A. Measuring the water absorption of recycled aggregates, what is the best practice for concrete production? **Construction And Building Materials**, v. 123, p. 690-703, 2016.

REVILLA-CUESTA, V. *et al.* Statistical approach for the design of structural self-compacting concrete with fine recycled concrete aggregate. **Mathematics**, v. 8, n. 12, p. 1–24, 2020.

SÁNCHEZ de J. M.; ALAEJOS, G. M. P. Estudio sobre las propiedades del áridos reciclado. Utilización en hormigón estructural. **CEDEX**, Ministerio de Fomento, Madrid, Ministerio de Medio Ambiente, 2006.

SENTHAMARAI, Rm.; MANOHARAN, P. Devadas; GOBINATH, D. Concrete made from ceramic industry waste: durability properties. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 5, p. 2413-2419, 2011.

SIM, J.; PARK, C. Compressive strength and resistance to chloride ion penetration and carbonation of recycled aggregate concrete with varying amount of fly ash and fine recycled aggregate. **Waste Management**, [S.L.], v. 31, n. 11, p. 2352-2360, 2011.

THÉRÉNÉ, Florian et al. Water absorption of recycled aggregates: measurements, influence of temperature and practical consequences. **Cement and Concrete Research**, v. 137, p. 106196, 2020.

VERIAN, K. P. **Using Recycled Concrete as Aggregate in Concrete Pavements to Reduce Materials Cost**. 192 f. Dissertação (Mestrado) - Purdue University, Indiana, 2013.

VERIAN, Kho Pin. et al. Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 133, p. 30-49, jun. 2018.

WANG, Bo. et al. "A Comprehensive Review on Recycled Aggregate and Recycled Aggregate Concrete". **Resources, Conservation and Recycling**, vol. 171, 2021.

WRAP. **Engineering properties of concrete containing recycled aggregates**, ISBN1-84405-350-4, 2007.

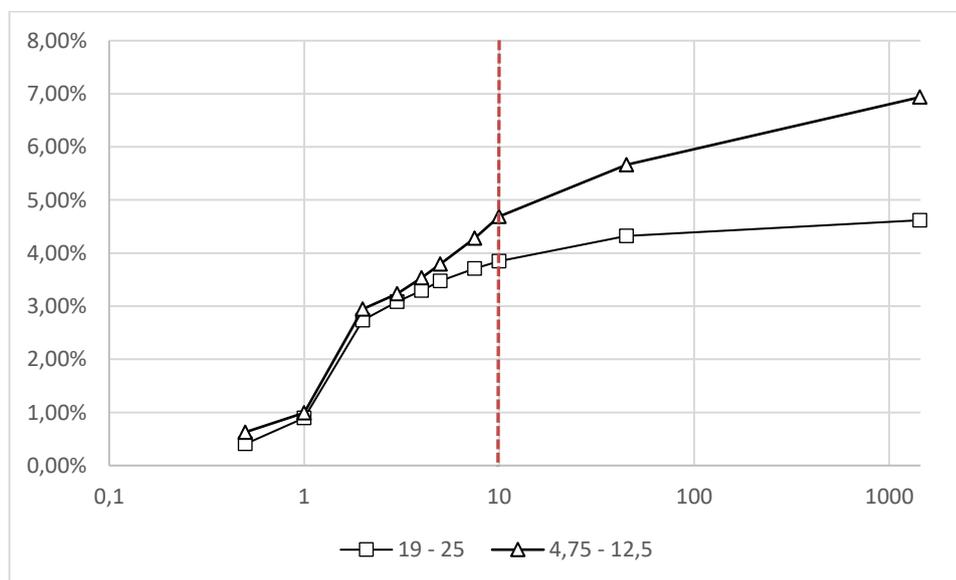
APÊNDICE A – TAXA DE ABSORÇÃO DO AGREGADO RECICLADO MISTO GRAÚDO

Tabela 34 - Taxas de absorção de faixas granulométricas adotadas intencionalmente no estudo

Tempo	Fração granulométrica 19 mm – 25mm		Fração granulométrica 4,75mm – 12,5mm	
	Aferição	absorção (%)	Aferição	absorção (%)
0 s	1146,99	0	1131,5	0
30 s	1151,65	0,41%	1138,61	0,63%
1 min	1157,29	0,90%	1142,76	1,00%
2 min	1178,4	2,74%	1164,87	2,95%
3 min	1182,37	3,08%	1168,12	3,24%
4 min	1184,76	3,29%	1171,5	3,54%
5 min	1186,82	3,47%	1174,4	3,79%
7,5 min	1189,55	3,71%	1179,93	4,28%
10 min	1191,15	3,85%	1184,59	4,69%
45 min	1196,58	4,32%	1195,59	5,66%
24h	1199,97	4,62%	1209,98	6,94%

Fonte: Elaboração própria, 2022

Gráfico 33 - Taxas de absorção das faixas granulométricas 19/25 e 4,75/12,5



Fonte: Elaboração própria, 2022

APÊNDICE B – PROPORÇÕES DE MISTURA DOS CONCRETOS PRODUZIDOS

Tabela 35 – Proporções de mistura (kg/m³) dos concretos produzidos no estudo piloto

Consumo de material (Kg)	Curva 0,70			Curva 0,80			Curva 0,85			Curva 0,90		
	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6
Cimento	533,14	352,91	300,52	518,57	352,41	307,95	512,03	355,92	308,84	522,98	359,29	307,33
Areia Caxitu	746,40	917,57	961,68	726,00	916,26	985,45	716,84	925,40	988,30	732,17	934,16	983,47
Pó de pedra	95,20	94,52	93,91	189,34	193,01	196,77	250,52	261,22	264,44	328,43	338,45	337,76
Brita 12,5	222,98	221,40	219,96	219,13	223,37	227,73	209,89	218,85	221,55	218,73	225,41	224,94
Brita 19	564,28	560,28	556,63	423,49	431,69	440,10	352,36	367,40	371,93	294,04	303,01	302,39
Água	213,26	208,22	210,37	243,73	218,49	200,17	256,01	213,55	200,75	235,34	201,20	199,77

Fonte: Elaboração própria, 2022

Tabela 36 – Proporções de mistura (kg/m³) dos concretos produzidos no estudo experimental em massa

Consumo de material (Kg)	100% NAT			cAGR			cAMR			100% RCC		
	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6
Cimento	537,31	349,44	302,84	507,62	330,57	292,18	520,26	347,44	302,91	504,80	328,78	284,75
Areia Caxitu	752,24	908,54	969,09	710,66	859,49	934,96	728,37	903,34	969,32	706,72	854,83	911,21
areia NAT	250,60	244,47	247,18	236,75	231,27	238,47						
Brita 12,5	337,69	329,42	333,08				326,98	327,54	333,16			
Brita 19	271,41	264,76	267,70				262,80	263,25	267,76			
AGR				575,43	562,10	579,62				572,24	559,06	564,89
AMR							242,65	243,07	247,24	235,44	230,02	232,42
Água	214,92	223,64	211,99	203,05	211,57	184,07	234,12	222,36	205,98	201,92	210,42	199,33

Tabela 37 – Cálculo da compensação de água necessária – dosagem em massa

Água (mL)		1:3	1:5	1:6
cAMR	Massa úmida AMR	266,92	267,37	271,96
cAGR	Massa úmida AGR	609,50	595,38	613,93
100%RCC	Massa úmida AGR	606,12	592,16	598,33
	Massa úmida AMR	258,98	253,02	255,66
cAGR	Massa de água	34,07	33,28	34,31
100%RCC	Massa de água	57,42	56,10	56,68
cAMR	Massa de água	24,27	24,31	24,72

Tabela 38 – Cálculo da relação água/cimento efetiva – dosagem em massa

Água (mL)		1:3	1:5	1:6
cAGR	car	34,07	33,28	34,31
	cae	168,98	178,29	149,76
	a/ce	0,33	0,54	0,51
100% RCC	car	57,42	56,10	56,68
	cae	144,50	154,32	142,64
	a/ce	0,29	0,47	0,50
cAMR	car	24,27	24,31	24,72
	cae	209,85	198,05	181,26
	a/ce	0,40	0,57	0,60

Fonte: Elaboração própria, 2022

Tabela 39 – Proporções de mistura (kg/m³) dos concretos produzidos no estudo experimental em volume

Consumo de material (Kg)	100% RCC			cAGR			cAMR		
	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6	Traço 1:3	Traço 1:5	Traço 1:6
Cimento	342,38	227,99	199,25	365,58	243,42	210,77	490,20	341,87	281,88
Areia Caxitú	479,33	592,77	637,59	511,81	632,89	674,47	686,28	888,87	902,02
areia NAT				170,51	170,30	172,03			
Brita 12,5							308,08	322,29	310,02
Brita 19							247,61	259,03	249,17
AGR	388,12	387,67	395,27	414,42	413,91	418,13			
AMR	159,69	159,50	162,62				228,63	239,17	230,07
Água	154,07	148,19	129,51	164,51	158,22	147,54	200,98	153,84	183,22

Tabela 40 – Cálculo da quantidade de compensação de água necessária – dosagem em volume

Água (mL)		1:3	1:5	1:6
cAMR	Massa úmida AMR	251,49	263,09	253,08
cAGR	Massa úmida AGR	438,96	438,42	442,88
100%RCC	Massa úmida AGR	411,10	410,62	418,66
	Massa úmida AMR	175,65	175,45	178,89
cAGR	Massa de água	24,53	24,50	24,75
100%RCC	Massa de água	38,95	38,90	39,66
cAMR	Massa de água	22,86	23,92	23,01

Água (mL)		1:3	1:5	1:6
cAGR	car	24,53	24,50	24,75
	cae	139,98	133,72	122,79
	a/ce	0,38	0,55	0,58
100% RCC	car	38,95	38,90	39,66
	cae	115,12	109,29	89,85
	a/ce	0,34	0,48	0,45
cAMR	car	22,86	23,92	23,01
	cae	178,12	129,93	160,22
	a/ce	0,36	0,38	0,57

Fonte: Elaboração própria, 2022

Tabela 42 – Resumo das porcentagens dos agregados reciclados nas composições dosadas em massa e volume

		1:3		1:5		1:6	
		massa	volume	massa	volume	massa	volume
cAMR	AMR	15,55%	15,55%	13,99%	13,99%	13,60%	13,60%
cAGR	AGR	37,79%	37,79%	34,01%	34,01%	33,06%	33,06%
100% REC	AMR	15,55%	15,55%	13,99%	13,99%	13,60%	13,60%
	AGR	37,79%	37,79%	34,01%	34,01%	33,06%	33,06%

Fonte: Elaboração própria, 2022

APÊNDICE C - PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DO ESTUDO PILOTO

Modelos simples de regressão foram elaborados para investigar a relação e função da resistência à compressão e da variável dependente: razão da curva ($0,70 \leq Pr \leq 0,90$). A Tabela 43 apresenta o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais, com o maior coeficiente R^2 . As variáveis consideradas foram a resistência à compressão f_c e a razão da curva granulométrica (Pr), avaliadas nas idades de 28 dias e 1 ano. Os modelos com melhor desempenho de ajuste estão ilustrados no Gráfico 34.

Tabela 43 – Modelos de regressão cúbicas para resistência a compressão e razão Pr das curvas granulométricas aos 28 dias e 1 ano

Variável dependente	Condição	Equação do modelo ($0,70 \leq Pr \leq 0,90$)	Coeficiente R^2
Curva (28 dias)	1:3	$f_c = -16307Pr^3 + 39122Pr^2 - 31225Pr + 8327,3$	0,9589
	1:5	$f_c = -7279,8Pr^3 + 18108Pr^2 - 14958Pr + 4126,4$	0,8999
	1:6	$f_c = 10645Pr^3 - 26010Pr^2 + 21033Pr - 5605,4$	0,9347
Curva (1 ano)	1:3	$f_c = 11559Pr^3 - 28101Pr^2 + 22685Pr - 6022,9$	0,3582
	1:5	$f_c = 10253Pr^3 - 24870Pr^2 + 19977Pr - 5271,4$	0,4287
	1:6	$f_c = 18632Pr^3 - 45465Pr^2 + 36764Pr - 9813,5$	0,7638

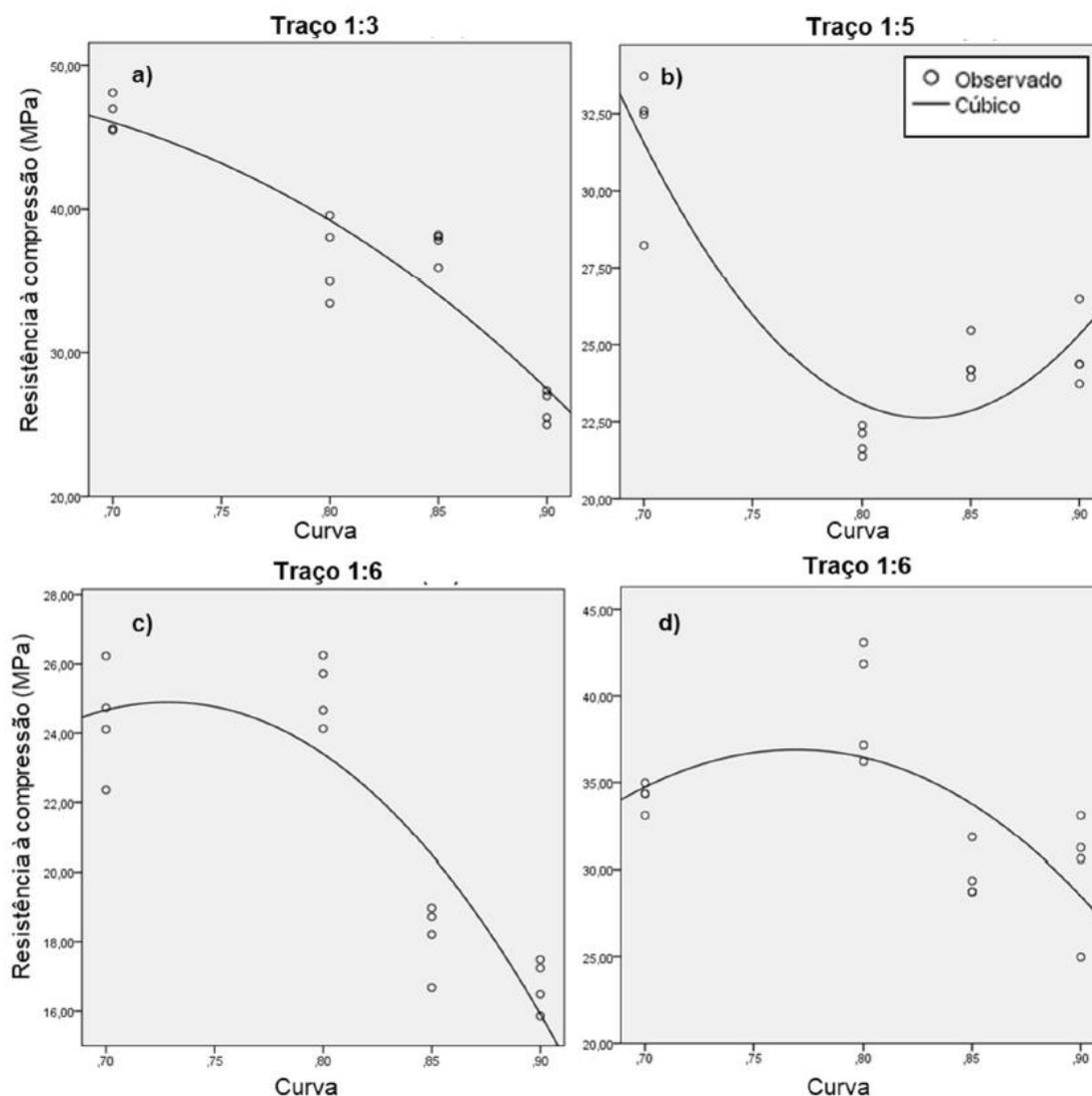
Fonte: Elaboração própria, 2022

Observa-se que a regressão proporciona um ajuste otimizado para a resistência à compressão, com coeficientes de determinação (R^2) da ordem de 96%. No entanto, alguns aspectos merecem ser destacados:

- O ajuste baseado na razão Pr da curva granulométrica apresentou pior desempenho com o avanço da idade do concreto: quanto maior o tempo de cura, menor foi a confiabilidade na estimativa da resistência à compressão;
- O ajuste da resistência à compressão em função da idade mostrou-se robusto: o modelo mais adequado permaneceu o mesmo, independentemente da variação da Pr , havendo apenas alterações nos coeficientes A, B, C e D. Para as misturas analisadas, o modelo mais representativo seguiu a forma da Equação (2):

$$f_c = A \cdot Pr^3 + B \cdot Pr^2 + C \cdot Pr + D \quad (2)$$

Gráfico 34 – Curvas de ajuste do modelo de regressão para os traços a) 1:3 (28 dias); b) 1:5 (28 dias); c) 1:6 (28 dias) e d) 1:6 (1 ano)



Fonte: Elaboração própria, 2022

Portanto, conclui-se que, para a previsão da resistência à compressão do concreto por meio de modelos univariados, a variável idade é a mais adequada, considerando-se cada percentual específico de substituição por ARC fino. Essa abordagem demonstrou maior estabilidade nos ajustes e melhor precisão nos resultados.

A partir dos modelos de regressão, substituiu-se o valor de P_r correspondente a 0,85 – curva adotada nos traços do estudo experimental – com o objetivo de verificar o erro em relação às resistências médias obtidas no estudo piloto. Os resultados da

resistência à compressão (f_c) média, tanto estimada quanto experimental, bem como os erros padrão e percentuais, estão apresentados na Tabela 44.

Tabela 44 – Erro padrão e percentual das resistências médias obtidos no estudo piloto em relação às resistências obtidas no estudo experimental

Idade	Condição	f_c gerado pela equação do modelo para $Pr = 0,85$ (MPa)	f_c média experimental (MPa)	Erro padrão (MPa)	Erro percentual (%)
28 dias	1:3	37,16	37,50	0,535	0,91
	1:5	24,42	24,44	0,345	0,07
	1:6	17,79	18,14	0,515	1,95
1 ano	1:3	55,05	54,49	3,165	1,02
	1:5	37,10	36,56	2,385	1,47
	1:6	29,81	29,66	0,745	0,52

Fonte: Elaboração própria, 2022

Determinação da resistência característica do concreto

A resistência característica do concreto é o valor de resistência à compressão para o qual existe uma probabilidade de apenas 5% de que a resistência real seja inferior, considerando-se a idade de 28 dias. Esse valor é fundamental para o dimensionamento estrutural e é determinado por meio do ajuste dos resultados experimentais a uma distribuição normal de probabilidade, sendo então identificado o valor correspondente ao percentil de 5%.

Imaginando-se como conhecidos os valores da resistência média f_{cm} e do desvio-padrão σ dos concretos em estudo, a sua resistência de referência é o valor característico f_{ck} da resistência à compressão, definido pela Equação 3

$$f_{ck} = f_{cm} - 1,645\sigma \quad (3)$$

Esse valor corresponde ao quantil de 5% da distribuição de resistências, isto é, ao valor que tem apenas 5% de probabilidade de ser ultrapassado no sentido desfavorável das menores resistências (FUSCO, 2012).

A Tabela 45 apresenta os valores da resistência característica, obtidos a partir do ajuste à distribuição normal, para cada uma das misturas avaliadas. Adicionalmente, são apresentados os valores normalizados conforme a ABNT NBR 8953:2015,

obtidos por meio da aproximação dos resultados à série padrão de classes de resistência (20, 25, 30, 35, 40, 45, 50, 55, 60, 70, 80, 90 e 100 MPa).

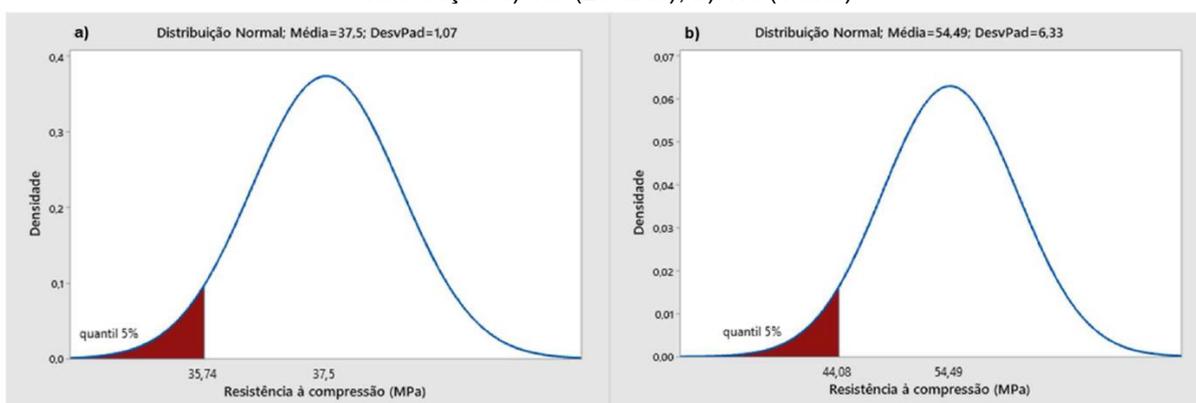
Tabela 45 – Valores de resistência característica obtidos para as a partir do ajuste à distribuição normal das misturas avaliadas

Idade	Condição	f_{c28} para $Pr = 0,85$ (MPa)	Desvio padrão (MPa)	fck (MPa)	fck (MPa) normalizado (NBR 8953/2015)
28 dias	1:3	37,50	1,07	35,74	35
	1:5	24,44	0,69	23,30	20
	1:6	18,14	1,03	16,45	15
1 ano	1:3	54,49	6,33	44,08	40
	1:5	36,56	4,77	28,71	25
	1:6	29,66	1,49	27,21	25

Fonte: Elaboração própria, 2022

Conforme ilustrado no Gráfico 35, o valor da resistência característica para o traço 1:3 com a curva 0,85, nas idades de 28 dias e 1 ano, situa-se na cauda inferior da distribuição de probabilidades, correspondente ao percentil de 5%. Esse valor é de interesse fundamental para a segurança estrutural, pois representa o limite inferior esperado de desempenho do concreto.

Gráfico 35 – Distribuição de probabilidades de ocorrência da resistência a compressão da curva 0,85 nos traços a) 1:3 (28 dias); b) 1:3 (1 ano)



Fonte: Elaboração própria, 2022