

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS - UFAL
CENTRO DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO TRATADO PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO**

Oswaldo Ferreira da Silva

Maceió/AL

2020

OSVALDO FERREIRA DA SILVA

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE AGREGADO GRAUDO
RECICLADO TRATADO PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais da Universidade Federal de Alagoas, como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Materiais.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Paulo César Correia
Gomes

Maceió/AL
2020

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Central

Bibliotecária: Taciana Sousa dos Santos – CRB-4 – 2062

S586e Silva, Osvaldo Ferreira da.

Estudo experimental e numérico de agregado graúdo reciclado tratado para aplicação em concreto / Osvaldo Ferreira da Silva. - 2020.

233 f. : il. ; figs. ; tabs. color..

Orientador: Paulo César Correia Gomes.

Tese (Doutorado em Ciência dos Materiais) – Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais. Maceió, 2020.

Bibliografia: f. 196 -205.

Anexos: f. 206 -233.

1. Resíduos da construção civil. 2. Reciclagem. 3. Agregados graúdos – Tratamento. 4. Métodos numéricos. I. Título.

CDU: 69.059.64

OSVALDO FERREIRA DA SILVA

**ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE AGREGADO GRAÚDO
RECICLADO TRATADO PARA APLICAÇÃO EM CONCRETO**

Esta tese foi julgada em 03.07.2020 para a obtenção do título de Doutor em materiais, Área de Materiais não convencionais e aprovada em sua forma final pelo orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade Federal de Alagoas.

Maceió, Al 03 de julho de 2020

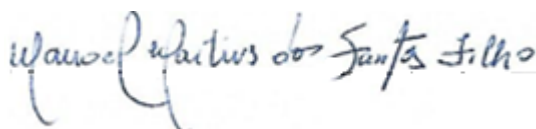
BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes / UFAL (Orientador)



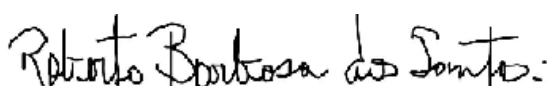
Prof. Dr. Eduardo Cabral (Membro Externo / UFC)



Prof. Dr. Manoel Martins dos Santos Filho (Membro Externo / IFAL)



Prof.^a. Dr.^a. Karoline Alves de Melo Moraes / UFAL



Prof. Dr. Roberto Barbosa dos Santos /UFAL

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Manoel e Josefa Ferreira da Silva (in memoriam) e ao meu irmão/Pai Nivaldo Ferreira da Silva, a minha esposa Gilvânia, meus filhos Gregório, Rodrigo, Gabriela, e a minha neta Luiza, fontes de inspiração e motivação. Aos meus irmãos: Iraci, Severino, Zezé (in memoriam), Amaro, Margarida, José (in memoriam), Neuza, Carlos e Petrucio.

AGRADECIMENTOS

Ao longo de uma caminhada são tantas as contribuições que recebemos que não é possível enumerar sem esquecer alguns nomes.

Agradeço a Deus, de acordo com a minha crença, que sempre me dá forças para vencer todos os obstáculos, mesmo aqueles que parecem intransponíveis;

Agradeço a minha esposa Gilvânia sempre disposta a colaborar, aos meus filhos: Gregório, Rodrigo e Gabriela que suportaram minha angústia, mau humor e ausência nesse longo período;

Ao meu orientador Professor Paulo Cesar Correia Gomes, pela dedicação, pelo socorro no momento que eu estava sem rumo, pela revisão do texto, pelas palavras amigas e incentivadoras e críticas ao trabalho, sem as quais não seria possível sua elaboração;

Foram tantos os professores que compartilharam ideias, que não seria possível nomear. Entretanto, lembro-me das conversas com os professores Eduardo Fonseca, Severino Marques, Eduardo Nobre, Edvaldo, Flávio, Karol, Sílvia, Wayne, Osimar, Aline, Roberto...

Agradeço a todos os professores e colegas do doutorado pelo companheirismo e amizade. Agradeço aos colegas Alexandre Machado, Alexandre Lima, Cássia, Karlisson, Everton, Roberto, Gustavo, Virgínia, Cledson, Natália.... Agradeço aos funcionários do LEMA/UFAL, em especial a Girlei, Valdemir, Cícero, Jonas, Flabeu, Sidclay, pelo apoio indispensável. Aos colegas professores do IFAL - Satuba, em especial os das piadas e das discussões políticas da sala dos professores, nesse momento sombrio com o lamentável negacionismo da ciência: Adalberon, Adalberto, Adeilton, Adriano, Álvaro, Ana Paula, Anne, Aparecida, Aristides, Aurineide, Auxiliadora, Barros, Cícero, Claudivan, Daniel, Elisana, Elias, Emanuel, Flávia, Gabriel, Geraldo, Gilberto, Harlisson, Haroldo, Hugão, Hugo, Isnaldo, Joana, Josiane, Joventino, Lucas, Madalena, Marcelo, Morgana, Nelson, Norma, Pedro, Peterson, Ramildo, Ricardo, Roberval, Ruben, Rui, Solon, Tâmara, Tassyano, Valdemir, Valeska, Wilson. Peço desculpas se esqueci alguém. Aos colegas de mestrado, Andresson, Carivaldo, Hélio, Luciano e Pedro, que sempre me incentivaram. Não posso deixar de lembrar dos amigos de adolescência/juventude, Carlos Argolo e Arnóbio Cavalcante que me serviram de inspiração naqueles tempos longínquos. Finalmente, agradeço a todos que cruzaram o meu caminho e que de alguma forma contribuíram para esse trabalho.

“Se hoje consigo enxergar tão longe foi porque me apoiei em ombros de gigantes”.

Sir. Isaac Newton

EPÍGRAFE

“Que os nossos esforços desafiem as impossibilidades. Lembremos de que os grandes feitos do homem foram conquistados do que parecia impossível”.

(Charles Chaplin)

“Strength does not come from physical capacity. It comes from an indomitable will.”

(Mahatma Gandhi)

RESUMO

SILVA, O. F. da. Estudo experimental e numérico de agregado graúdo reciclado tratado para aplicação em concreto. 2020. Tese (Doutorado em Materiais) Programa de Pós-Graduação em Materiais, UFAL, Maceió.

A grande produção de resíduos de construção civil (RCC) tem induzido vários países a definirem políticas de gestão e investirem na reciclagem desse material, na indústria da construção civil. Parte do RCC é de resíduo de concreto (RC), e os agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) são considerados os de melhor qualidade para fabricação de concretos. As pesquisas comprovam que a porosidade do AGRC é superior a porosidade dos agregados graúdos naturais (AGN), e esta pode ser a responsável pela perda de qualidade dos concretos com AGRC. Os tratamentos propostos para redução da porosidade dos AGRC têm sido aplicados no produto final do AGRC, sendo pouco provada sua eficiência nas propriedades dos concretos. Outro aspecto importante na atualidade é a introdução de métodos numéricos, que podem auxiliar na avaliação de resultados de ensaios e em procedimentos de elaboração computacional de composições de concretos. Neste contexto, esse estudo propõe um método de tratamento de AGRC para reduzir sua porosidade, contribuindo na qualidade das propriedades deste agregado. A análise numérica dos métodos de ensaios aplicados e de resultados obtidos foram introduzidos para auxiliar em futuras implementações em programas computacionais. O AGRC foi obtido do beneficiamento de corpo de provas de concreto e caracterizado. O método de tratamento do AGRC foi realizado por desgaste em moinho de bolas, equipamento de ensaios de abrasão “Los Angeles”. Foi definida uma proposta de análise numérica do método de tratamento, e realizada a caracterização dos AGRC e AGRC tratados (AGRCT). As características destes agregados foram determinadas. Para a cinética de absorção, foi proposto um modelo numérico baseado nas curvas dos ensaios de absorção. Ainda no aspecto de absorção desses agregados foi realizado um estudo sobre a influência da absorção das diferentes fases de formação desses agregados. Para a aplicação e análise dos comportamentos dos AGRC e AGRCT foram produzidos concretos autoadensáveis (CAA) e convencionais (CC). As composições dos CAA foram baseadas em formulações de estudos prévios. Métodos numéricos para a determinação da dosagem do superplasticante pelo ponto de saturação; e para a composição dos agregados, forma propostos. Os comportamentos dos concretos foram avaliados levando em consideração o uso ou não da água de absorção dos AGRC e AGRCT, sendo consideradas as águas efetivas dos concretos. As propriedades nos estados fresco e endurecido foram avaliadas em função dos tipos de AGRC com ou sem tratamento, como também foram realizadas análises estatísticas das porosidades dos AGRC e AGRCT, e das resistências à compressão dos concretos. Os resultados das características dos AGRCT indicaram que houve melhora das propriedades físicas do AGRC com o método de tratamento proposto, sendo observado redução da porosidade dos AGRCT em relação ao AGRC. As análises numéricas do método de tratamento apresentaram correlação com os fenômenos observados nas amostras de AGRCT obtidas. As análises dos resultados dos concretos mostraram que em geral os concretos com AGRCT apresentaram melhores desempenho que os concretos com AGRC e com agregados naturais (AGN). Numa análise global o CAA sem a água de absorção apresentou melhores propriedades no estado endurecido em relação ao CAA com 80% da água de absorção. A razão entre o custo da energia gasta nos concretos em relação as suas resistências, indicaram que o método de tratamento foi eficiente.

Palavras chaves: Agregado reciclado. Tratamento. Concreto com agregados reciclados.

ABSTRACT

SILVA, O. F. da. Experimental and numerical study of treated recycled coarse aggregate for concrete application. 2020. Thesis (PhD in Materials) Postgraduate Program in Materials, UFAL, Maceió.

The large production of construction waste (CW) has led several countries to define management policies and invest in recycling this material, in the construction industry. Part of the CW consists of concrete waste, and coarse recycled concrete aggregates (CRCA) are considered to be of the best quality for concrete manufacturing. Research shows that the porosity of CRCA is higher than the porosity of natural coarse aggregates (NCA), and this may be responsible for the loss of quality of concretes with CRCA. The treatments proposed to reduce the porosity of CRCA have been applied to the final product of CRCA, with little proven efficiency in the properties of concretes. Another important aspect nowadays is the introduction of numerical methods, which can assist in the evaluation of test results and computational elaboration procedures for concrete compositions. In this context, this study proposes a method of treating AGRC, and numerical analysis that contributed to improving the quality of AGRC properties, and the introduction of numerical analysis of the tests for implementation in computer programs. The CRCA was obtained from the processing of concrete specimens and characterized. The AGRC treatment method, to reduce its porosity, was carried out by wear in a ball mill, "Los Angeles" abrasion testing equipment. A proposal for a numerical analysis of the treatment method was defined, and the characterization of CRCA and CRCA treated (CRCA T) was carried out. For the absorption kinetics of AGRC and AGRCT, a numerical model was proposed based on the curves of the absorption tests. Still on the absorption aspect of these aggregates, a study was carried out on the influence of the absorption of the different phases of formation of these aggregates. For the application and analysis of the behaviors of the CRCA and CRCAT, conventional (CC) and special (SCC) concretes were produced. In obtaining the compositions of the SCC 's, dosage methods used in previous studies were used. Numerical methods were used to determine the dosage of the superplasticizer by the saturation point; and for the composition of aggregates. The concrete behaviors were evaluated taking into account the use or not of 80% of the water of absorption of the CRCA and CRCA T, being considered the effective waters of the concrete. The properties in the fresh and hardened states were evaluated according to the types of CRCA used, as well as statistical analyzes of the porosities of the CRCA and CRCA T, and of the compressive strengths of the concretes. The numerical models correlated with the analyzed phenomena and the results obtained from the CRCAT characteristics indicated that it is possible to improve the physical properties of the CRCA with the proposed method, which was observed by the reduction of the CRCAT porosity in relation to the CRCA. The analysis of the results showed that, in general, concretes with CRCA T performed better than concretes with CRCA and with only natural aggregates (NCA). In a global analysis, SCC without absorption water showed better properties in the hardened state compared to SCC with the use of 80% of absorption water. The ratio between the cost of energy spent on concrete in relation to its resistance, indicated the most efficient treatment.

Key words: Recycled aggregate. Treatment. Concrete with recycled aggregates

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGRC	Agregado graúdo reciclado de concreto sem tratamento
AGRC2	AGRC com tratamento de abrasão de 2 minutos
AGRC4	AGRC com tratamento de abrasão de 4 minutos
AGRC6	AGRC com tratamento de abrasão de 6 minutos
AGRC8	AGRC com tratamento de abrasão de 8 minutos
AGRCT	Agregado graúdo reciclado de concreto tratado
AMRC	Agregado miúdo reciclado de concreto
ARC	Agregado reciclado de concreto
$A_{(Arg.)}$	Absorção da fração argamassa
$A_{(AN.)}$	Absorção da fração do agregado natural
$A_{(ZTI)}$	Absorção da zona de transição interfacial
b_{ics}	Índice de consumo de ligantes ($kg \cdot m^{-3} \cdot MPa^{-1}$)
CAA	Concreto autoadensável
CC0	Concreto convencional com AGRC sem tratamento e miúdo natural
CC2	Concreto convencional com AGRC2 e miúdo natural
CC2	Concreto convencional com AGRC4 e miúdo natural
CC6	Concreto convencional com AGRC6 e miúdo natural
CC8	Concreto convencional com AGRC8 e miúdo natural
CCR	Concreto convencional com agregados naturais - referência
CAD	Concreto de alto desempenho
CEBDS	Conselho Empresarial Brasileiro para o Desenvolvimento Sustentável
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
CR	Concreto reciclado
C_v	Coefficiente de variação
d_r	Densidade real do agregado
d_a	Densidade aparente do agregado
d_{sss}	Densidade saturada com superfície seca do agregado
D_p	Desvio padrão
E	Empuxo

E_c	Módulo de elasticidade secante
EDX	Energy-dispersive X-ray spectroscopy
EFNARC	European Federation of National Trade Associations
E_{eco}	Parâmetro de ecoeficiência do concreto (US\$.m ⁻³ . MPa ⁻¹)
E_k	Energia cinética resultante
Esf_K	Esfericidade - Krumbein
F_i	Força de impacto
$f_{(Arg)}$	Fração volumétrica de argamassa
$f_{(AN)}$	Fração volumétrica de agregado natural
$f_{(ZTI)}$	Fração zona de transição interfacial
f_c	Resistência à compressão do concreto
f_{cm}	Resistência à compressão média do concreto
f_{ck}	Resistência à compressão característica do concreto
I_v (%)	Percentual do Índice de vazios
LA	Los Angeles
M_{AM}	Massa de agregado miúdo passante na peneira de 4,75 mm
M_{AG}	Massa de AGRC
$M_{Unit.}$	Massa unitária
$M_{(Unit.) Máx.}$	Massa unitária máxima
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MMQ	Método dos mínimos quadrados
MB	Moinho de bolas
P	Peso
P_R	Pressão
$Pr_{(t)}$	Percentual de AGRCT em função do tempo de tratamento
$P_{ot.}$	Potência de impacto
P_{sp}	Ponto de saturação do superplastificante
RBMG	Resíduo do beneficiamento do mármore e granito
RC	Resíduo de concreto
RCC	Resíduo de construção civil
sp (%)	Percentual de superplastificante
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
V	Volume

$V_{(\text{Vacum.})}$	Volume acumulado
$V_{(\text{des.})}$	Volume deslocado
ZTI	Zona de transição interfacial
ρ_{ap}	Massa unitária média do agregado, em kg/m^3
ρ_w	Massa específica da água em kg/m^3
m_{ar}	Massa do recipiente mais o agregado, em quilogramas
m_r	Massa do recipiente vazio, em quilogramas
ρ_a	Massa específica aparente do concreto
ρ_{sss}	Massa específica saturado com superfície seca do concreto
ρ_r	Massa específica real do concreto

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1- Correlação entre os aspectos fundamentais para a obtenção da sustentabilidade..	26
Figura 1.2- Ações ecoeficientes de utilização do concreto - 3R	27
Figura 1.3 - Crescimento do número de publicações sobre AR	28
Figura 1.4 - Bibliometria - Artigos publicados (1990 – 2020).....	31
Figura 1.5 - Organização do desenvolvimento da tese.....	32
Figura 2.1 - Geração de RCC no Brasil.....	35
Figura 2.2 - Consumo de agregados naturais no mundo	36
Figura 2.3 - Geração e reciclagem de RCC	37
Figura 2.4 - Geração estimada do RC coletado no Brasil	39
Figura 2.5 - Relação entre a densidade aparente e a absorção de água de agregados de RCC	44
Figura 2.6 - Representação típica de uma curva de porosimetria ao mercúrio	46
Figura 2.7 - Relação entre o tamanho do ARC e a absorção de água	48
Figura 2.8 - Balança hidrostática para os ensaios de absorção, densidades e cinética de absorção de água.....	50
Figura 2.9 - Comparação e avaliação visual da forma da partícula.....	54
Figura 2.10 - Dimensões consideradas da partícula de agregado (ABNT NBR 5564, 2011)..	55
Figura 2.11 - Medidas para determinação da morfologia dos agregados graúdos	56
Figura 2.12 - Camsizer-L – equipamento de ensaios do AGRC	56
Figura 2.13 - Comparação e avaliação visual da forma da partícula.....	57
Figura 2.14 - Parâmetros de forma dos agregados - CAMSIZER – L	57
Figura 2.15 - Características do AGRC: a) originado; b) reuso	63
Figura 3.1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa	71
Figura 3.2 – Dados de relatórios das resistências a compressão dos cp que originaram o resíduo de RC	72
Figura 3.3 – Fotos do RC, do britador de mandíbulas e o de martelos.	73
Figura 3.4 - Processo de cominuição do RC no britador de mandíbulas.....	73
Figura 3.5 - Comparação entre os britadores na geração do ARC	74
Figura 3.6 - Composição granulométrica do AGRC	76
Figura 3.7 - Granulometria do AGRC, AGN e os limites da NBR NM 248:2003.....	76
Figura 3.8 - Medidas usando o modelo de Krumbein (1941).....	77
Figura 3.9 – Apresentação do AGRC 12,5 mm usado para a análise do percentual de argamassa presa	79

Figura 3.10 - Detalhe do método usado na caracterização visual do AGRC	79
Figura 3.11 - AGRC no tratamento com HCl.....	81
Figura 3.12 - Pressão e volume de mercúrio introduzido em função do diâmetro dos poros .	85
Figura 3.13 - Volume de mercúrio acumulado em função do diâmetro dos poros	85
Figura 3.14 - Percentual de absorção de água dos ensaios das amostras	87
Figura 3.15 - Percentual de absorção total	87
Figura 3.16 - Equipamento de ensaio de abrasão LA.....	88
Figura 3.17 - Esforços submetidas as partículas no M. B	89
Figura 3.18 – Detalhe da parte de argamassa do AGRC usado.....	91
Figura 3.19 - Processo de tratamento de desgaste por abrasão no MB	91
Figura 3.20 - Curva representativa do fenômeno de desgaste	93
Figura 3.21 - Correlação entre os resultados calculados e o experimental.....	95
Figura 3.22 - Custos de energia total do AGRC e AGRCT	97
Figura 4. 1- Curvas granulométricas obtidas de acordo com a NBR NM248 (ABNT, 2003)	
99	
Figura 4. 2 - Detalhes das amostras do AGRC e AGRCT após os tratamentos com HCl	102
Figura 4. 3- Percentual de argamassa em função dos tratamentos	103
Figura 4. 4 - Percentual de argamassa em função do tratamento	104
Figura 4. 5 - Comportamento da densidade aparente da absorção de água.....	107
Figura 4. 6- Análise de Pearson das absorções de água	108
Figura 4. 7 - Análise das absorções de água das ZTI dos AGRCT	112
Figura 4. 8 - Curvas de cinética de absorção dos AGRC e AGRCT nos ensaios da balança hidrostática	114
Figura 4. 9- Curvas de absorção total de água dos AGRC e AGRCT.....	115
Figura 4. 10 - Curvas de absorção de água no ensaio da balança hidrostática	117
Figura 4. 11 - Curvas de absorção de água definidas pelo modelo proposto	118
Figura 4. 12 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos - AGRC.....	121
Figura 4. 13 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos – AGRC2.....	121
Figura 4. 14 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos – AGRC4.....	122

Figura 4. 15 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos – AGRC6.....	122
Figura 4. 16 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos - AGRC8).....	123
Figura 4. 17 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos - AGN 12,5 mm.....	123
Figura 4. 18- Curvas de absorção de água considerando o percentual total.....	124
Figura 5. 1- Curva granulométrica do RBMG.....	127
Figura 5. 2 - Elementos químicos presentes nos materiais CPII – Z e RBMG.....	128
Figura 5. 3 - Resultado do ensaio de DRX.....	129
Figura 5. 4 - Curva granulométrica da brita 12,5 mm.....	130
Figura 5. 5 - Curva de distribuição granulométrica do AMN.....	131
Figura 5. 6 - Gráfico representativo dos ensaios de pastas.....	133
Figura 5. 7 - Gráfico de determinação do ponto de saturação do superplastificante.....	134
Figura 5. 8 - Ensaio de Composição “Esqueleto granular” de AGN e AMN.....	138
Figura 5. 9- Curvas das massas unitárias e índice de vazios.....	139
Figura 5. 10 - Etapas da produção e ensaios do CAA sem água de absorção.....	146
Figura 5. 11- Slump flow dos CAA.....	147
Figura 5. 12 - Análise dos ensaios monoponto.....	148
Figura 5. 13 - Resultados dos ensaios à compressão dos CAAs/a.....	150
Figura 5. 14 - Relação entre as resistências à compressão dos CAA s/a e os tempos de tratamento dos AGRC.....	152
Figura 5. 15- Resistências à compressão em relação a absorção da ZTI dos AGRC no CAAs/a.....	153
Figura 5. 16 - Análise das resistências à compressão, percentuais de argamassa e densidades dos CAAs/a.....	154
Figura 5. 17 - Análise comparativa entre as resistências à compressão e os fatores a/c efetivos.....	155
Figura 5. 18 - Relação entre a esfericidade e as resistências à compressão.....	156
Figura 5. 19 - Relação entre as resistências à compressão o D _{máx} e o M. F.....	157
Figura 5. 20 - Comparação dos resultados dos módulos de elasticidade dos CAAs/a.....	158
Figura 5. 21 - Módulos de elasticidade experimental e os estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014).....	159

Figura 5. 22 - Resultado dos ensaios de resistência à tração dos CAAs/a	160
Figura 5. 23 - Resultados da resistência à compressão e dos índices de vazios dos CAAs/a	161
Figura 5. 24 - Ensaio de espalhamento e Caixa - L dos CAAc/a CA6c/a	164
Figura 5. 25 - Comparação entre o slump dos CAAc/a.....	165
Figura 5. 26 - Comparação entre os resultados dos ensaios à compressão dos CAAc/a.....	166
Figura 5. 27 - Análise de correlação de Pearson do CAAc/a	168
Figura 5. 28 - Comparação entre as resistências à compressão dos CAA's.....	169
Figura 5. 29 - Forma de ruptura do CA0 com absorção (CAAc/a)	170
Figura 5. 30 - Comparação entre os módulos de elasticidade dos CAA s/a e CAAc/a.....	171
Figura 5. 31 - Comparação entre as resistências à tração dos CAAc/a	172
Figura 5. 32 - Comparação entre as resistências à tração dos CAA com e sem absorção.....	173
Figura 5. 33 - Comparação entre as absorções de água dos CAA.....	174
Figura 5. 34 - Valores observados no ensaio de tronco de cone	177
Figura 5. 35 - Análise de correlação dos tratamentos e a resistência à compressão	180
Figura 5. 36 - Comparação das resistências à compressão dos CC e a absorção das ZTI.....	181
Figura 5. 37 - Resistência à compressão média para $a/c = 0,45$	182
Figura 5. 38 - Comparação entre módulos de elasticidade.....	183
Figura 5. 39 - Comparação entre as resistências à tração por compressão diametral.....	184
Figura 5. 40 - Relação entre a f_{cm} , absorção de água e índice de vazios dos CC	185
Figura 5. 41 - Parâmetros de ecoeficiência dos CAA.....	190
Figura 5. 42 - Parâmetros de ecoeficiência dos concretos convencionais.....	190

LISTA DE QUADROS

Quadro 2.1: Percentual de argamassa presa no ARC	41
Quadro 2.2: Propriedades físicas de agregados reciclados de concreto	45
Quadro 2.3. Resultados de massas específicas aparente e absorção de água dos agregados graúdos de RCC reciclados separados densitariamente pelo “ <i>Sink and Float</i> ”.	47
Quadro 2.4: Classificação da forma dos agregados graúdos	55
Quadro 2.5: Índice de abrasão LA de agregados de diversos tipos de rochas.....	59
Quadro 2.6: Propriedades de ARC – Britador de mandíbula	60
Quadro 2.7: Pesquisas de concretos com ARC com substituição parcial ou total do AGN.....	61
Quadro 2.8: Tratamentos do AGRC e efeito no concreto	66
Quadro 2.9: Pesquisas com tratamento de agregados no moinho de bolas (MB)	67
Quadro 3. 1: Produção de AR do britador de mandíbula	74
Quadro 3. 2: Métodos de ensaios e normas usadas para a caracterização dos agregados	75
Quadro 5. 1: Propriedades físicas dos materiais usados	129
Quadro 5. 2: Métodos de ensaios e normas usadas na caracterização dos concretos.....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1.1: Palavras chaves pesquisadas.....	31
Tabela 3. 1: Percentuais obtidos de ARC – mandíbula com abertura de 20,0 mm	75
Tabela 3. 2: Características da granulometria do AGRC (12,5 mm) produzido no britador de mandíbulas.....	77
Tabela 3. 3: Características de forma do AGRC	78
Tabela 3. 4: Planilha usada na caracterização visual do AGRC.....	80
Tabela 3. 5: Composição do AGRC (12,5 mm) – Método visual	81
Tabela 3. 6: Resultados de ataque ácido com HCl em amostras AGRC	82
Tabela 3.7: Resultados dos percentuais de perdas nos ensaios de abrasão LA.....	83
Tabela 3. 8: Resultado da densidade e absorção de água do AGRC.	83
Tabela 3. 9: Resultados dos parâmetros físicos do AGRC no ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio	84
Tabela 3. 10: Resultados de densidades determinadas por diferentes métodos	86
Tabela 3. 11: Resultados dos parâmetros físicos do MB.....	92
Tabela 3. 12: Custo de energia para obtenção ARC e AGRC – 1,0 KWh (R\$ 0,87).....	96
Tabela 4. 1: Resumo dos parâmetros granulométricos dos AGRC e AGRT	100
Tabela 4. 2: Parâmetro de forma do AGRC (12,5 mm) submetido ao tratamento.....	100
Tabela 4. 3: Percentuais de argamassa dos AGRC e AGRCT	101
Tabela 4. 4: Densidades do AGRCT (NBR NM 53:2003).....	105
Tabela 4. 5: Absorção de água e massas específicas do AGRCT (NBR NM 53:2003).....	107
Tabela 4. 6: Resumo da análise estatística das absorções de água	109
Tabela 4. 7: Resumo dos parâmetros de caracterização do AGRC e do AGRCT.....	110
Tabela 4. 8: Comparação usando a Equação (4.2) e o resultado experimental	111
Tabela 4. 9: Massas submersas e absorção dos AGRC e AGRCT	113
Tabela 4. 10: Absorção acumulada e total dos AGRCT.....	114
Tabela 4. 11: Parâmetros das equações dos agregados	119
Tabela 4. 12: Parâmetros encontrados para os AGRC, AGRCT e AGN	119
Tabela 5. 1: Resumo dos concretos produzidos com AGRC e AGRCT e AGN	126
Tabela 5. 2: Elementos químicos (MEV) - (%) peso	128
Tabela 5. 3: Parâmetros granulométricos do AMN.....	131
Tabela 5. 4: Parâmetros e quantidade de materiais para as pastas a/c=0,50	132
Tabela 5. 5: Resultados dos ensaios no cone de Marsh – pastas a/c=0,50.....	133

Tabela 5. 6: Parâmetros da composição AGN x AMN	138
Tabela 5. 7: Equações das massas unitárias	140
Tabela 5. 8: Equações dos percentuais de vazios - I_v (%)	141
Tabela 5. 9: Valores dos percentuais de AMN para o I_v (%) mínimo e a $M_{unit.}$ máxima	141
Tabela 5. 10: Parâmetros do Índices de vazios (%) e a substituição de AMN (%).....	142
Tabela 5. 11: Propriedades físicas dos agregados	144
Tabela 5. 12: Composições do CAAs/a com 40% de volume de pasta.....	145
Tabela 5. 13: Relações paramétricas dos concretos	145
Tabela 5. 14: Resultados dos ensaios monoponto dos CAA.....	147
Tabela 5. 15: Parâmetros adotados pela EFNARC e NBR 15823 (ABNT, 2017).....	147
Tabela 5. 16: Análise de normalidade, ANOVA e teste Tukey dos dados de resistência à compressão	151
Tabela 5. 17: Composição dos concretos com 40% de pasta e com 80% da água de absorção (CAAc/a)	164
Tabela 5. 18: Resultados dos parâmetros de autoadensabilidade do CAAc/a.....	165
Tabela 5. 19: Resultado dos testes estatísticos	167
Tabela 5. 20: Resultados dos módulos de elasticidade - 28 dias do CAAc/a.....	170
Tabela 5. 21: Resultados dos ensaios à tração por compressão diametral– 28 dias.....	172
Tabela 5. 22: Composição dos concretos produzidos (Traços em volumes e massas)	176
Tabela 5. 23: Slump dos concretos convencionais	177
Tabela 5. 24: Resistência à compressão dos concretos convencionais.....	178
Tabela 5. 25: Resultado da análise estatística – Resistência à compressão.....	179
Tabela 5. 26: Resultados de absorção de água e índice de vazios.....	184
Tabela 5. 27: Custos de energia dos concretos (US\$/m ³ . MPa).....	189
Tabela A 1: Resultados da granulometria do ARC - britadores de Mandíbula e Martelos	206
Tabela A 2: Resultados dos ensaios de granulometria do AGRC	206
Tabela A 3: Ensaio de granulometria do AGN 12,5 mm.....	206
Tabela A 4: Ensaio de granulometria do AMN	207
Tabela A 5: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água das amostras de AGRC	207
Tabela A 6: Resultados dos percentuais de absorção das amostras 1, 2 e 3.....	208
Tabela A 7: Percentuais de geração do AGRCT com o tratamento proposto	208
Tabela A 8: Comparação da geração do AGRCT experimental e estimado	209

Tabela A 9: Custo de energia elétrica (0,87 R\$/kwh) – (1US\$=R\$4,09).....	209
Tabela B 1: Ensaios de granulometria dos AGRCT - Resultados médios	210
Tabela B 2: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática	211
Tabela B 3: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática - AGRC	213
Tabela B 4: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC2	214
Tabela B 5: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC4	215
Tabela B 6: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC6	216
Tabela B 7: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC8	217
Tabela B 8: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGN 12,5 mm.....	218
Tabela C 1 Resultados das composições com AGN, AGRCe AGRCT	219
Tabela C 2: Resistências à compressão (f_c) aos 28 dias (MPa).....	220
Tabela C 3: Comparação entre os resultados dos fatores a/c efetivos dos CAA e a resistência à compressão	220
Tabela C 4: Resultados dos módulos de elasticidade E_{ci} - 28 dias (GPa) – CAAs/a	220
Tabela C 5: Resultados dos ensaios à tração (f_{ct}) dos CAAs/a aos 28 dias (MPa).....	221
Tabela C 6: Resultados dos ensaios de absorção de água CAAs/a	221
Tabela C 7: Resistência à compressão dos CAA c/ 80% da água de absorção	221
Tabela C 8: Resultado do fator a/c efetivo do CAA c/a e do CAAs/a	221
Tabela C 9: Resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios dos CAAs/a	222
Tabela C 10: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos CC	222
Tabela C 11: Módulo de elasticidade dos concretos convencionais (GPa).....	222
Tabela C 12: Resultados dos ensaios de tração dos concretos convencionais	222

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (2. 1) $d_a = \left(\frac{M_s}{M_{SSS} - M_{sub}} \right)$	42
Equação (2. 2) $d_a = \left(\frac{M_s}{M_{SSS} - M_{sub}} \right)$	42
Equação (2. 3) $d_a = \left(\frac{M_s}{M_{SSS} - M_{sub}} \right)$	43
Equação (2. 4) $P_c = \frac{2 \cdot \rho \cdot \cos \theta}{r}$	46
Equação (2. 5) $P(\%) = \left[1 - \left(\frac{d_a}{d_r} \right) \right] \cdot 100$	46
Equação (2. 6) $A(\%) = \left(\frac{M_{SSS} - M_s}{M_s} \right) \cdot 100$	48
Equação (2. 7) $F = P - E$	50
Equação (2. 8) $E = V_{deslocado} \cdot g \cdot \rho_{\acute{a}gua}$	50
Equação (2. 9) $W = A + S \cdot t^{\left(\frac{1}{2}\right)} - C \cdot t$	52
Equação (2. 10) $W = W_1 \cdot t^n$	53
Equação (2. 11) $Abs_{,(t)} = Abs_{;(24)} \cdot \left[1 - e^{-k \left(\frac{t}{Q}\right)^p} \right]$	53
Equação (2. 12) $IF = \frac{l}{l} = \frac{a}{c}$	55
Equação (2. 13) $Esf_K = \sqrt[3]{\frac{L.I.S}{L^3}}$	56
Equação (2. 14) $\frac{b}{l} = \frac{X_{mín}}{X_{máx}}$	57
Equação (2. 15) $Esf. = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P}$	57
Equação (2. 16) $Perdas (\%) = \frac{M_1}{M_2} \cdot 100$	59
Equação (3. 1) $(\%) = \frac{(\Sigma)}{200} \cdot 100$	80
Equação (3. 2) $AEA = \frac{100}{M}$	80
Equação (3. 3) $(\%)Argamassa = (\%) \Sigma(2) + \frac{(\Sigma 3) \cdot 100}{(AEA) \cdot 200}$	80
Equação (3. 4) $(\%)Rocha = 100 - (\%)Argamassa$	81
Equação (3. 5) $(\%)Argamassa = 100 - (\%)AGN$	82
Equação (3. 6) $(\%)AGN = \left(\frac{M_t - M_{arg.}}{M_t} \right) \cdot 100$	82
Equação (3. 7) $A(\%) = \left(\frac{M_{(sub)(t)} - M_{(sub)(t-1)}}{M_s} \right) \cdot 100$	86
Equação (3. 8) $F_i = \left(\frac{5 \cdot m}{8} \right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{2 \cdot r}{9 \cdot \pi^2 k^2} \right)^{\frac{1}{5}} v^{\frac{6}{5}}$	89

Equação (3. 9) $k = \frac{(1-v^2)}{(\pi.E)}$	90
Equação (3. 10) $P_{ot} = \frac{1}{T} \int_0^T d E_k = f \cdot E_k$	90
Equação (3. 11) $\frac{dM_{(AGRCT)}(t)}{dt} = A \cdot c \cdot e^{(c.t)}$	94
Equação (3. 12) $M_{(AGRCT)}(t) = A \cdot e^{(c.t)}$	94
Equação (3. 13) $E_i = (P_i \cdot \eta^{-1}) \cdot C^{-1}$	96
Equação (3. 14) $y_c = y_0 + A \cdot e^{(k.t)}$	97
Equação (4. 1) $P_{Arg.(t)} = y_0 + A \cdot e^{(-R.t)}$	104
Equação (4. 2) $Abs(\%) = f_{(AN)} \cdot Abs_{.(AN)} + f_{(Arg)} \cdot Abs_{.(Arg)} + f_{(ZTI)} \cdot Abs_{.(ZTI)}$	111
Equação (4. 3) $A_{(t)} = A \cdot \left[1 - \frac{1}{(1+\frac{t}{x_0})^p} \right]$	117
Equação (5. 1) $y = 13,999 \cdot e^{\left(\frac{-x}{0,073}\right)} + 1,142$	134
Equação (5. 2) $\frac{dy}{dx} = -189,883 \cdot e^{-13,565 \cdot x} = -0,57 \rightarrow x = 0,43\%$	134
Equação (5. 3) $f(x) = ax^2 + bx + c$	136
Equação (5. 4) $\frac{dy}{dx} = 2 \cdot a \cdot x + c = 0$	136
Equação (5. 5) $g(x) = ew^2 + gx + h$	136
Equação (5. 6) $\frac{dg}{dw} = 2 \cdot e \cdot x + g = 0$	136
Equação (5. 7) $M_{unit.(m)} = \frac{M_m}{V}$	137
Equação (5. 8) $I_{Vazios}(\%) = \frac{(MEA - M_{Unit.})}{MEA}$	137
Equação (5. 9) $MEA = f_{AM} \cdot MEA_{(AM)} + f_{AG} \cdot MEA_{(AG)}$	137
Equação (5. 11) $bi_{CS} = \frac{B}{CS}$	187
Equação (5. 12) $E_{eco} = \frac{(A+B+C)}{f_{cm}}$	188

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	ix
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	x
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE QUADROS	xvii
LISTA DE TABELAS	xviii
LISTA DE EQUAÇÕES	xxi
1 INTRODUÇÃO	26
1.1 Justificativa.....	29
1.2 Objetivos	30
1.3 Metodologia da pesquisa	30
1.4 Tese	33
1.5 Hipótese.....	33
1.6 Organização do trabalho.....	33
2 AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO	35
2.1 Introdução	35
2.2 Propriedades dos agregados graúdos reciclados de concretos	42
2.2.1 Densidade	42
2.2.2 Porosidade e absorção de água	45
2.2.2.1 Cinética de absorção de água	49
2.2.3 Morfologia de agregados graúdos para concreto.....	53
2.2.4 Resistência à abrasão.....	58
2.3 Concretos com agregados reciclados de concreto	61
2.4 Tratamentos de agregados graúdos reciclados de concretos	62
2.5 Considerações finais	68
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	69
3.1 Programa experimental desenvolvido na pesquisa	69
3.1.1 Geração do agregado reciclado de concreto	72
3.2 Caracterização do agregado graúdo reciclado de concreto	75
3.2.1 Granulometria.....	76
3.2.2 Morfologia.....	77
3.2.3 Percentual de argamassa.....	78
3.2.4 Resistência à abrasão “Los Angeles”	83
3.2.5 Densidade e absorção de água.....	83

3.2.6 Porosimetria por injeção de mercúrio.....	84
3.2.7 Cinética de absorção de água	86
3.3 Método de tratamento.....	88
3.3.1 Tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto.....	90
3.3.2 Análise numérica do método de tratamento	93
3.3.3 Estudo do consumo de energia da produção e tratamento.....	95
3.4 Considerações finais.....	97
4 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO	
TRATADO	99
4.1 Granulometria.....	99
4.2 Morfologia.....	100
4.3 Percentual de argamassa	101
4.4 Densidade e Absorções de água.....	105
4.4.1 Análise estatística das absorções de água.....	108
4.4.2 Análise matemática das absorções de água	110
4.4.3 Cinética de absorção de água	112
4.4.3.1 Proposta e análise de modelos matemáticos de cinética de absorção.....	116
4.5 Considerações finais.....	125
5 CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO	
TRATADOS E NÃO TRATADOS	126
5.1 Introdução.....	126
5.2 Materiais usados na obtenção dos concretos	127
5.3 Métodos usados na obtenção dos concretos	132
5.3.1 Estudo e composição das pastas	132
5.3.1.1 Determinação do ponto de saturação do superplastificante – Método analítico proposto.....	133
5.3.2 Estudo da composição dos agregados – Método proposto	135
5.3.2.1 Composição de agregados – Aplicação do método	137
5.3.3 Procedimento de obtenção e caracterização dos CAA	142
5.4 CAA com 40% de pasta sem água de absorção dos AGRC e AGRCT	144
5.4.1 Propriedades no estado fresco do CAAs/a	146
5.4.2 Propriedades no estado endurecido do CAAs/a	149
5.4.2.1 Análise estatística dos resultados das resistências à compressão do CAAs/a	150
5.4.2.2 Módulo de elasticidade do CAAs/a.....	157
5.4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral do CAAs/a	159
5.4.2.4 Absorção de água e índice de vazios do CAAs/a	160
5.4.3 Considerações finais.....	162
5.5 CAA 40% de pasta com 80% da água de absorção do AGRC e AGRCT	163

5.5.1 Propriedades no estado fresco do CAAC/a	164
5.5.2 Propriedades no estado endurecido do CAAC/a	166
5.5.2.1 Análise estatística da resistência à compressão do CAAC/a.....	166
5.5.2.2 Resultados dos módulos de elasticidade.....	170
5.5.2.3 Resistência à tração por compressão diametral do CAAC/a	171
5.5.2.4 Absorção de água e porosidade	173
5.5.3 Considerações finais.....	174
5.6 Obtenção de concreto convencional.....	176
5.6.1 Propriedades no estado fresco	176
5.6.2 Propriedades no estado endurecido dos concretos convencionais.....	178
5.6.2.1 Análise estatística das resistências à compressão dos concretos	178
5.6.2.2 Módulo de elasticidade dos concretos convencionais	182
5.6.2.3 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos convencionais ...	183
5.6.2.4 Absorção de água e porosidade dos CC	184
5.6.3 Considerações finais.....	186
5.7 Análise de ecoeficiência dos concretos.....	187
5.7.1 Determinação do custo de obtenção dos concretos	188
5.7.1.1 Concreto autoadensável sem e com o uso da água de absorção.....	189
5.7.1.2 Concretos convencionais.....	190
5.7.2 Considerações finais.....	191
6 CONCLUSÕES.....	192
6.1 Sugestões para trabalhos futuros.....	195
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA	196
ANEXO A – TABELAS DOS ENSAIOS DO CAPÍTULO 3	206
ANEXO B – TABELAS DOS ENSAIOS DO CAPÍTULO 4	210
ANEXO C – TABELAS DOS ENSAIOS DO CAPÍTULO 5	219
ANEXO D – ARTIGO PUBLICADO EM PERÓDICO	223

1 INTRODUÇÃO

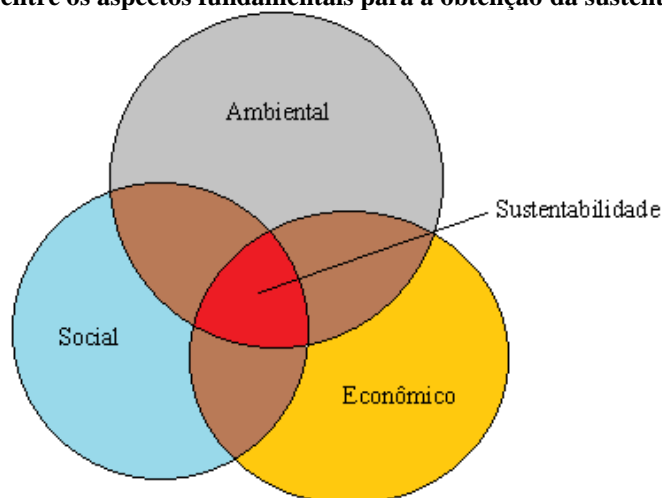
O concreto é um material compósito produzido com cimento portland (CP), agregados graúdo e miúdo e água. Essa mistura se constitui no material construtivo mais consumido no mundo, consumo estimado em 23 bilhões de toneladas/ano, com uma produção de agregados naturais estimada em 40 bilhões de toneladas em 2018 (PAWLUCZUK *et al.*, 2019).

O consumo de concreto tem sido crescente principalmente devido à demanda provocada pela China e pelos países em desenvolvimento. Assim, o uso do CP faz a indústria da construção civil responsável pela maior contribuição na emissão de CO₂ (TORRALBA; JALALI, 2008). Este fato tem estimulado o meio científico a encontrar alternativas para tornar o concreto um material com menor impacto ambiental, com perspectiva de um material ecoeficiente.

O conceito de ecoeficiência centra-se em três objetivos: redução do consumo de recursos naturais, redução do impacto na natureza, que inclui a minimização das emissões gasosas (CO₂) e melhoria do valor do produto ou serviço, sendo caracterizado pela melhor qualidade e/ou maior durabilidade (SALGADO, 2004).

O *World Building Council for Sustainable Development* (WBCSD, 2009) por sua vez definiu que a ecoeficiência de uma produção é alcançada quando se consegue diminuir o impacto ambiental com menor uso de recursos naturais, porém, de uma forma economicamente viável, de modo a permitir que o produto continue tendo preços competitivos. Schokker (2012) identificou que a sustentabilidade é a interseção de três ações básicas: O ambiental, econômico e o social, como representado na Figura 1.1.

Figura 1.1- Correlação entre os aspectos fundamentais para a obtenção da sustentabilidade



Fonte: Adaptado de Shokker (2012)

Dessa forma, se observa que a sustentabilidade é um estágio ideal de produção alcançado a partir de ações ecoeficientes.

Vários aspectos já foram estudados com vistas a reduzir o impacto ambiental produzido pelo concreto. Esses estudos estão relacionados às ações ecoeficientes, tais como: redução do consumo de energia e uso de fontes de energias renováveis na obtenção do clínquer do CP, uso de resíduo com propriedades aglutinantes proporcionando redução no consumo de CP (HASANBEIGI *et al.*, 2012; DAMINELI *et al.*, 2013; TORGAL; JALALI, 2017).

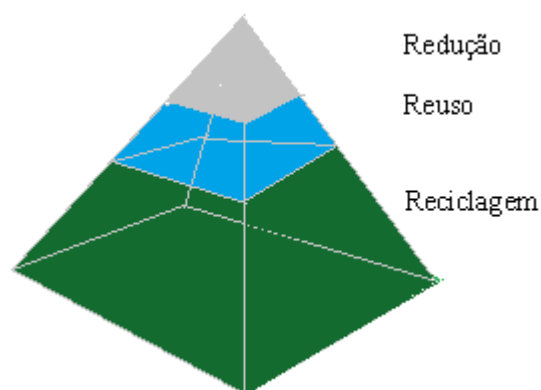
Outro aspecto importante que tem sido pesquisado é o uso de agregados reciclados de resíduo de construção civil (RCC) (NBR 15112:ABNT, 2004). O uso do RCC transformado em agregados graúdos e miúdos, reduz o consumo de recursos naturais e preserva o meio ambiente.

O consumo médio anual de agregados naturais no Brasil, para suprir a demanda na produção de concretos e argamassas, foi estimado em 220 milhões de toneladas, com tendência de crescimento (ABRELPE, 2017). É consenso entre os pesquisadores que essa demanda levará a um aumento de custo dos recursos naturais, além provocar danos ao meio ambiente (TSENG, 2010).

Pesquisas têm demonstrado que é possível a obtenção de concretos e argamassas com o uso de agregados reciclados de RCC, principalmente o agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) (NIXON, 1976; HANSEN, 1986; LEITE, 2001; CABRAL, 2007; TENÓRIO, 2007; ANGULO; FIGUEREDO, 2013; TAM *et al.*, 2018).

Em relação ao concreto, Shokker (2012) define três ações importantes para reduzir o impacto ambiental: redução do consumo de recursos naturais, o reuso de estruturas, principalmente as de concreto pré-moldado e a reciclagem, sendo este último o aspecto com maior número de pesquisas e utilização, como mostra a Figura 1.2.

Figura 1.2- Ações ecoeficientes de utilização do concreto - 3R



Fonte: Adaptado de Shokker (2012)

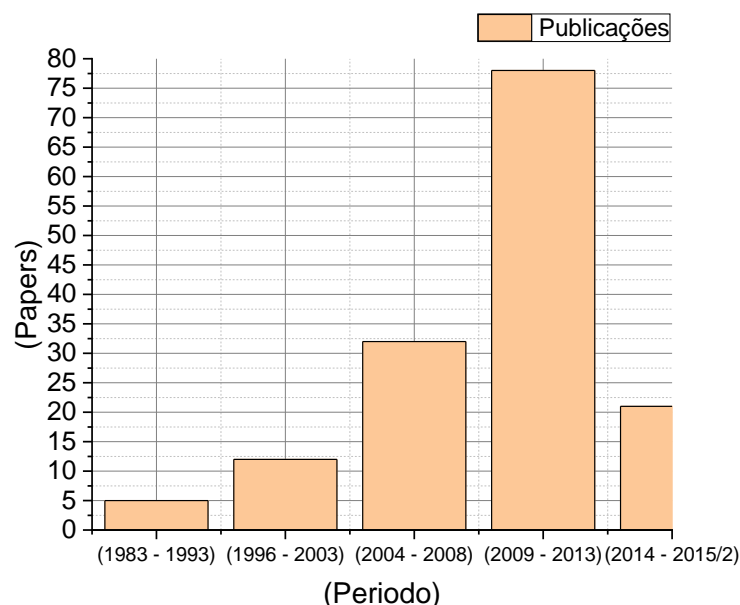
Os resíduos de concreto (RC) são obtidos de um modo geral a partir da seleção de RCC. Entretanto, o RC pode ser obtido diretamente da demolição de estruturas de concreto, com a britagem desse RC.

A reciclagem do RCC em larga escala, como agregados para uso em construções, teve início após a segunda guerra mundial (NIXON, 1976). No entanto apenas nas três últimas décadas é que houve um maior interesse dos pesquisadores na determinação das propriedades físicas desses agregados. As pesquisas reduzem as incertezas relacionadas à definição das propriedades físicas dos agregados reciclados e dos concretos obtidos, propiciando seu uso adequado e seguro.

A determinação das propriedades físicas desses materiais permite identificar suas possibilidades de uso, como também, permite pesquisar formas de tratamento para melhorar essas propriedades físicas, tentando aproximar suas propriedades com a dos agregados naturais (ULSEN, 2011; ANGULO *et al.*, 2013).

González-Taboada *et al.* (2016), ao analisarem um banco de dados de publicações nas três últimas décadas, concluíram que as pesquisas com agregados reciclados (AR) obtidos de RCC aplicado em concreto, cresceram de forma acentuada como mostra a Figura 1.3.

Figura 1.3 - Crescimento do número de publicações sobre AR



Fonte: Adaptado de Gonzales – Tabuada *et al.*, (2016)

As pesquisas mostram que os agregados reciclados têm sido eficientes como substitutos dos agregados naturais. Essa substituição pode ser parcial ou total, de acordo com a finalidade de uso dos concretos.

A análise da literatura permite inferir que é fundamental a investigação das propriedades físicas dos agregados produzidos a partir de RCC, principalmente no que diz respeito à sua porosidade, pois esta propriedade tem impacto negativo na qualidade dos agregados usados na obtenção de concretos. Dentre os agregados reciclados, o agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) é considerado o mais apropriado como substituto do agregado graúdo natural, para uso em concretos, inclusive com objetivo estrutural nos países com deficiência de agregados naturais.

O agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC) oferece maiores dificuldades de uso, tendo em vista sua maior porosidade, grande quantidade de materiais pulverulentos e maiores irregularidades e aspereza de sua superfície (TSENG, 2010; ULSEN, 2011; ANGULO *et al.*, 2013).

Estudos com o objetivo de reduzir a porosidade do AR, principalmente a do AGRC, por processos de tratamento, são comuns na literatura. Tratamentos químicos como carbonatação (TAM *et al.*, 2007, SHIA *et al.*, 2015, TENÓRIO, 2016), lavagem com ácidos (ZHU *et al.*, 2010) e imersão em silano (TSUJINO *et al.*, 2007, TAM *et al.*, 2007) já foram aplicados. Assim como tratamentos físicos como esmagamento do RC submetido ao calor (SHIMA *et al.*, 2005; NAWA, 2010), e abrasão com uso de rotor de eixo central e lavagem em agregados miúdos de RCC (ULSEN, 2011). Estes tratamentos geralmente são de difícil execução e controle, e de um modo geral usam produtos químicos que contribuem negativamente com o meio ambiente. Além destes, foram realizados tratamentos com a imersão de AR em pastas cimentícias ricas com adições de sílica e alto consumo de cimento (KATZ, 2004).

Estes agregados reciclados de concreto tratados (AGRCT), em geral, tem apresentado melhoras de suas características, reduzindo consideravelmente sua porosidade e absorção de água, e elevando sua densidade (TAM *et al.*, 2007, SHIA *et al.*, 2015), mas quando usados em concreto, tem ainda apresentado resistências inferiores aos concretos com AGN (TENÓRIO, 2016, ZHU *et al.*, 2010).

1.1 Justificativa

Este estudo foi desenvolvido tendo em vista as melhoras das características físicas dos AGRC obtidos por métodos de tratamento, que podem proporcionar, pela redução da porosidade, AGRCT de qualidade semelhante as dos AGN. Os quais garantem seu uso para fabricação de concretos com propriedades estruturais. Neste sentido, o estudo agrega valores ao AGRC e contribui para a redução do uso de AGN, diminuindo o impacto ambiental

provocado pela exploração destes agregados em recursos naturais. Visando a ecoeficiência dos concretos e contribuindo para a sustentabilidade da construção civil.

No sentido de direcionar a elaboração desta tese, foram definidos os objetivos geral e específico apresentados a seguir.

1.2 Objetivos

Objetivo geral

Propor e validar um método de tratamento de AGRC para obtenção de AGRCT com melhores propriedades físicas, garantindo o uso deste na fabricação de concretos com propriedades para fins estruturais.

Objetivos específicos

A fim de atingir o objetivo geral foram definidos os seguintes objetivos específicos:

- a) Identificar quantitativamente o procedimento mais eficiente do processo de cominuição para a obtenção do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC), com as características previamente definidas, para aplicação nos concretos;
- b) Propor uma análise numérica de cinética de absorção de água de AGRC e AGRCT, com o uso do método dos mínimos quadrados (MMQ), e avaliar um modelo existente para agregados naturais;
- c) Desenvolver modelos numéricos para aplicação no método de determinação do ponto de saturação do superplastificante e da composição de agregados, para aplicação em concretos autoadensáveis;

1.3 Metodologia da pesquisa

Este trabalho foi desenvolvido em quatro fases. Na primeira fase foi realizada uma análise do referencial bibliográfico para a construção dessa tese, tendo em vista as áreas de estudo e os aspectos envolvidos. Para isto foi realizado um estudo bibliométrico para a racionalização dessa etapa do trabalho. O objetivo da bibliometria foi identificar lacunas existentes nos estudos de

tratamentos de AGRC, visando a apresentação de um estudo que se constituísse como inédito, e dessa forma considerado uma contribuição à ciência.

Neste sentido, o ineditismo desse trabalho foi verificado de acordo com as publicações de artigos nessa linha de estudo, sendo consideradas três plataformas de pesquisa: *Web of Science*, *Google Scholar* e *Science Direct*. O critério que foi adotado partiu do suposto que na plataforma onde não foram localizadas publicações relativas as palavras-chaves e suas combinações, existe forte indicativo do ineditismo. As palavras chaves que estão relacionadas com esse estudo e foram usadas nas pesquisas estão apresentadas na Tabela 1.1.

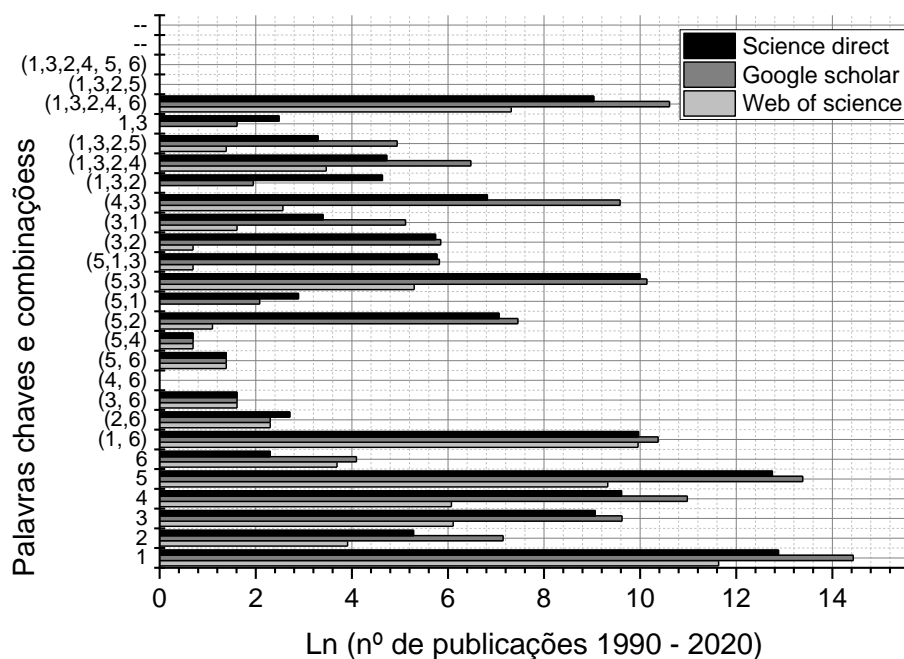
Tabela 1.1: Palavras chaves pesquisadas

Ordem	Palavras chaves
1	Recycled Aggregate
2	Recycled aggregate concrete
3	Marsh cone
4	Superplasticizers
5	Saturation Point
6	Ball Mill Treatment

Fonte: Autor (2020)

Os resultados obtidos na bibliometria realizada no período de 1990 a 2020 estão resumidos na Figura 1.4.

Figura 1.4 - Bibliometria - Artigos publicados (1990 – 2020)



Fonte: Autor (2020)

Vale salientar que para uma melhor representação gráfica, no eixo – x, foi usado o logaritmo natural do número de publicações encontradas na busca.

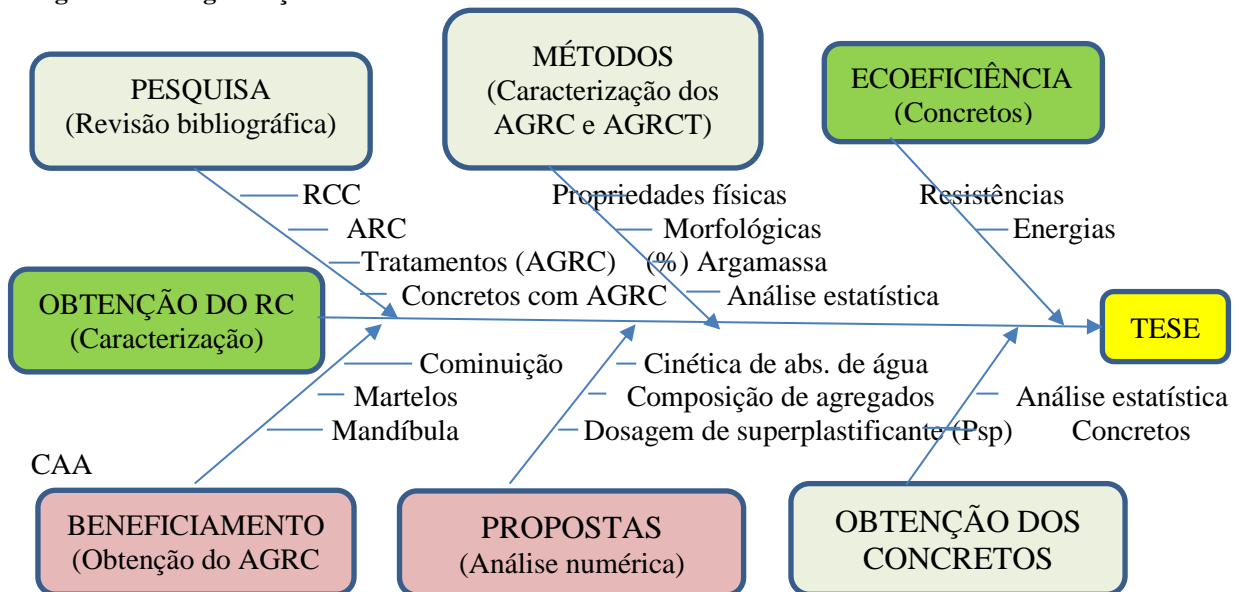
Como se pode observar no resultado da bibliometria, na Figura 1.4, algumas palavras chaves isoladas tem grande número de publicações, entretanto, em algumas combinações que foram pesquisadas não existe publicação, o que indica que este trabalho tem aspectos que o caracterizam como uma contribuição, tendo em vista o seu ineditismo.

Este trabalho consiste de um estudo de caráter experimental-numérico, onde os resultados dos ensaios foram analisados e identificados por meio de equações diferenciais ajustadas aos fenômenos de acordo com método dos mínimos quadrados (MMQ).

As influências dos tratamentos do AGRC, foram caracterizadas em função da variável independente, o tempo de tratamento. Essas influências foram verificadas em concretos autoadensáveis e concretos convencionais, analisadas por meio de ferramentas estatísticas na propriedade de resistência à compressão, além de análises gráficas comparativas das propriedades nos estados fresco e endurecido. Os detalhes metodológicos da pesquisa foram abordados no Capítulos 3.

A fim de facilitar a visualização e compreensão dos estudos desenvolvidos no presente trabalho, foi elaborado o gráfico apresentado na Figura 1.5, que resume as atividades desenvolvidas na sua elaboração.

Figura 1.5 - Organização do desenvolvimento da tese



Fonte: Autor (2020)

1.4 Tese

É possível obter AGRC de melhor qualidade, competitivo com o AGN, por meio de métodos de tratamento, este sem o uso de produtos químicos, e conseqüentemente obter concretos com AGRC tratados de características estrutural semelhante ou melhor que as dos concretos com AGN.

1.5 Hipótese

➤ A redução da quantidade de argamassa presa no AGRCT produz agregados com menor porosidade e maior densidade, proporcionando agregados reciclados de melhor qualidade para obtenção de concretos com propriedades semelhantes ou superiores aos dos concretos com agregados naturais (AGN).

1.6 Organização do trabalho

Visando uma melhor compreensão do desenvolvimento desse estudo, este trabalho foi organizado da seguinte forma:

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo foi apresentada uma abordagem inicial da importância do aproveitamento do RCC na obtenção de agregados reciclados (AR), principalmente do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC). Foi realizada uma introdução dos métodos de tratamentos para melhorar as propriedades físicas do AGRC. Desta forma, foram identificadas lacunas onde este trabalho pode ser inserido como contribuição a tratamentos para a redução da porosidade de AGRC e de métodos numéricos para a análise e definição de quantidades de materiais para a aplicação em concretos especiais.

2 AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

Para atender aos objetivos deste trabalho, neste capítulo foi realizada uma análise de pesquisas que utilizaram o resíduo de construção e demolição (RCC), transformados em AGRC, suas formas de obtenção e caracterização para uso em concretos. Além disso, foi realizado um estudo das aplicações do AGRC com diversos percentuais de substituição. Foram

avaliadas as propriedades físicas do AGRC com diversos tratamentos para redução da sua porosidade e suas influências em concretos.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo foi desenvolvida a organização do trabalho experimental com o fluxograma representando todas as suas fases, e com a apresentação dos materiais e métodos usados no estudo. Foi apresentada a forma de obtenção do AGRC e sua caracterização. Além disso, foi desenvolvido e aplicado o método de tratamento proposto, com a sua definição numérica, e a quantificação do custo de obtenção dos tratamentos do AGRC.

4 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO TRATADO

Foram realizadas nesse capítulo as caracterizações e as análises das propriedades físicas e morfológicas dos agregados graúdos reciclados de concreto tratados (AGRCT). Além disso, foi desenvolvida uma análise numérica do estudo de cinética de absorção de água dos agregados e uma análise matemática e estatística dessas absorções.

5 CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETOS TRATADOS E NÃO TRATADOS

Neste capítulo foi apresentada uma revisão bibliográfica sobre concretos autoadensáveis com AGRC, e desenvolvidos os métodos propostos para determinação do ponto de saturação do superplastificante em pastas cimentícias, usando o cone de Marsh, além do método para a determinação das composições de agregados, baseado nos ensaios do “esqueleto granular”. Foram apresentados e analisados os resultados de caracterização dos concretos com AGRC e AGRCT, nos estados fresco e endurecido, e finaliza com a análise de ecoeficiência dos concretos obtidos.

6 CONCLUSÕES

Além das conclusões finais do trabalho em relação ao comportamento dos concretos com AGRC e AGRCT, neste capítulo os aspectos não contemplados nesse estudo foram colocados como sugestões para trabalhos futuros.

2 AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO

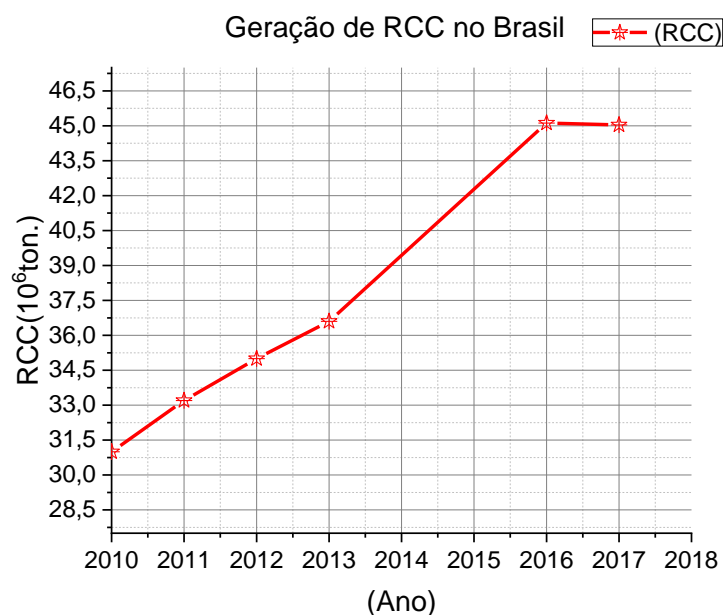
2.1 Introdução

As questões ambientais têm ocupado cada vez mais espaço nas legislações dos países, devido à geração crescente de resíduos sólidos urbanos (RSU), oriundos principalmente da indústria da construção civil. Os percentuais de resíduo de construção civil (RCC) que compõe o RSU são bastante variados. Nas cidades brasileiras foram observados percentuais entre 41% e 70% de RCC no RSU (CABRAL *et al.*, 2015). A geração média de RSU no Brasil em 2017 foi de 78,40 milhões de toneladas, sendo o RCC responsável por 60% desse RSU (ABRELPE, 2017).

O Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), com o uso da resolução nº 469 (2015), classifica os RCC, como I – classe A, considerando os resíduos reutilizáveis ou recicláveis, sendo compostos por diversos materiais de origem mineral. Pesquisas têm demonstrado que o RCC pode ser considerado uma matéria prima de uso na construção civil, sendo transformado em agregados para ser usados como componentes de concretos e argamassas (ANGULO, 2005; ULSEN, 2011; TENÓRIO *et al.*, 2012, TSENG, 2010; CABRAL *et al.*, 2015; TENÓRIO, 2016; TAM *et al.*, 2018).

No Brasil a geração de RCC cresceu cerca de 66% até 2017, tendo em vista o crescimento da construção civil nesse período, como mostra a Figura 2.1.

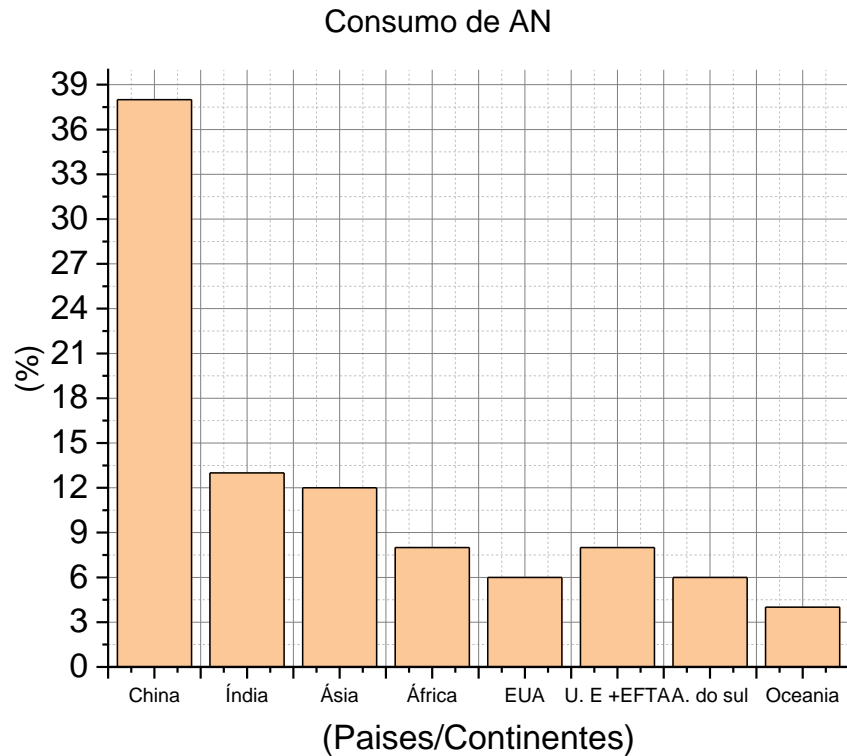
Figura 2.1 - Geração de RCC no Brasil



Fonte: Adaptado da Abrelpe (2017)

As pesquisas mostram que o consumo de agregados naturais (AN) para a produção de concretos e argamassas tem sido crescente. Existe crescimento, mesmo em momentos de crise devido à demanda por moradias e infraestrutura, principalmente nos países mais pobres e populosos, como mostra a Figura 2.2.

Figura 2.2 - Consumo de agregados naturais no mundo



Fonte: Compilados de Pawluczuk *et al.* (2019)

Pawluczuk *et al.* (2019) observam que a demanda por agregados na China tem crescido de forma mais acentuada que em outros países, chegando a 38% do consumo mundial, decorrente da demanda da construção civil. Tam *et al.* (2018) verificaram que a China e a Índia são os principais consumidores de agregados para construção e, portanto, têm alto potencial para reciclagem e reutilização de RCC.

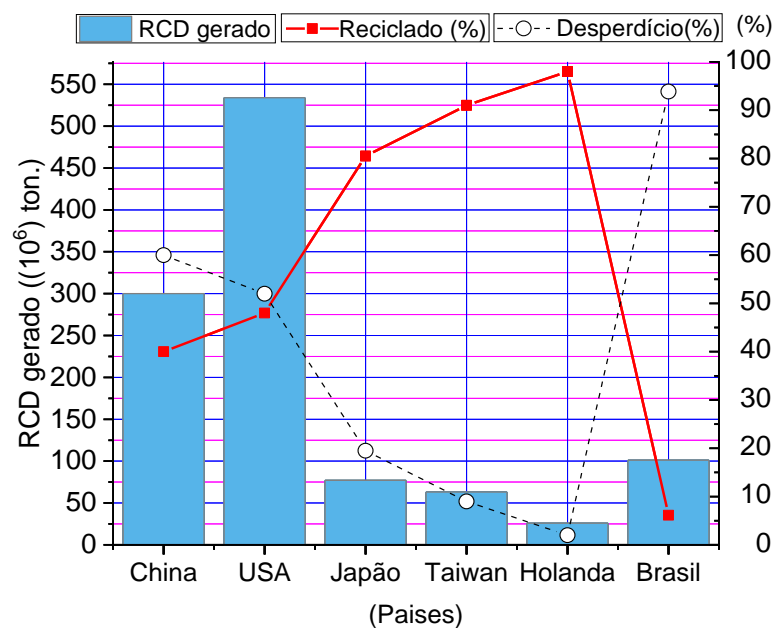
Pesquisas indicam que a taxa de reciclagem de RCC, transformados em agregados para concretos e argamassas são indicativos do nível de desenvolvimento de um País. Em vista disso, Tam *et al.* (2018) mostraram que alguns países atingiram marcas de reciclagem do RCC superiores a 90%, como Taiwan (92%) e Holanda (98%).

Angulo (2005), Tenório (2007), Ulsen (2011) observaram que no Brasil não existe dados precisos da taxa de reciclagem de RCC, e é pequena a produção das usinas de reciclagem

da fração mineral desse resíduo. Em sua maioria pertencem ao setor público e com produção voltada para o consumo interno das prefeituras. Isto implica em índices de reciclagem bem menores que os dos países desenvolvidos.

Dados recentes mostram que o Brasil detém uma das menores taxas de reciclagem de RCC, calculada em 6,14%, como mostra a Figura 2.3.

Figura 2.3 - Geração e reciclagem de RCC



Fonte: Compilado de Tam *et al.* (2018)

Apesar do potencial de reciclagem do RCC, há uma grande variação no nível de reciclagem desse material nos diversos países. Isto evidencia um sério problema, tendo em vista que é grande a diferença entre a demanda por agregados e os percentuais de reciclagem do RCC. Esta situação indica uma provável escassez de agregados naturais.

Os agregados reciclados, obtidos a partir de RCC, além de apresentarem custo de produção inferior ao dos agregados naturais, ainda promovem um ganho ambiental (BRASILEIRO; MATOS, 2015). Dessa forma o não aproveitamento desse material é considerado um desperdício.

As pesquisas mostram que na reciclagem do RCC, a situação da fração areia desse resíduo é crítica, pois apesar de representar de 40 a 60% em massa do resíduo, é descartada como resíduo da própria reciclagem ou utilizada em aplicações de baixo valor agregado (ANGULO, 2005). Ulsen (2011) comprovou que é possível a obtenção de agregados miúdos de qualidade superior ou equivalente ao natural, a partir do tratamento de RCC, porém o custo

do processo ainda é elevado. Constata-se, portanto, que é possível a reciclagem dos RCC transformando-o em matérias primas para as diversas aplicações na engenharia civil, como sub-bases de pavimentação, concretos e argamassas.

Entretanto, conforme observado por Angulo (2005), Ulsen (2011), apesar da comprovada viabilidade técnica, a reciclagem dos RCC enfrenta dificuldades, tais como:

- a) Controlar a variabilidade na composição dos resíduos;
- b) Dificuldade na separação dos contaminantes orgânicos presentes;
- c) Carência de informações sobre as características tecnológicas dos resíduos;
- d) Falta de políticas públicas mais contundentes;
- e) Insuficiência de tecnologias e usinas de processamento hábeis para produzir um agregado reciclado de baixa porosidade.

Além desses fatores, é importante observar que o uso dos agregados obtidos a partir do processamento do RCC só poderá ser atrativo se seus custos forem no mínimo equivalentes aos dos agregados naturais, com qualidades equivalentes.

As análises das pesquisas realizadas por Leite (2001), Poon; Kou (2007), Angulo (2005), Ulsen (2011), mostram que no Brasil e em outros países os processos de reciclagem, envolvem basicamente britagem (mandíbulas ou impacto) e peneiramento a seco. A remoção dos componentes de aço é feita por um extrator de metais ou manualmente, assim como a separação dos materiais orgânicos. Ulsen (2011) observou que as usinas europeias de reciclagem e as brasileiras modernas, empregam um ou dois estágios de britagem (mandíbulas, impacto ou giratório).

Para a adequação da granulometria dos agregados empregam-se operações unitárias de beneficiamento mineral, bem como para a separação dos materiais orgânicos e remoção das fases de maior porosidade. Tseng (2010), Ulsen (2011) verificaram que as operações principais de separação do RCC são:

- Remoção de fases metálicas por extrator de sucatas;
- Lavagem intensiva do agregado graúdo em equipamento rotativo (*drum washer*, usina alemã *BBW Recycling Mittelelbe*);
- Concentração densitária em *jig* *Baum* (usina VAR na Holanda);
- Remoção de contaminantes orgânicos por meio de classificação pneumática (usina VAR na Holanda) ou por seleção manual em transportadores de correia em cabine pressurizada (usina alemã *Graf Baustoffe*).

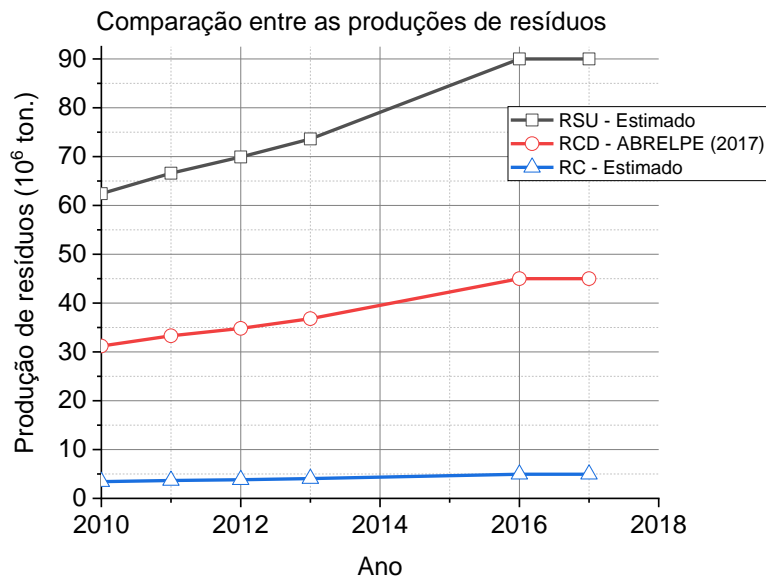
A seleção do resíduo de concreto (RC), do resíduo de alvenaria e do resíduo misto, mediante demolição seletiva na Europa é um exemplo de triagem com o objetivo de melhorar

a qualidade dos agregados oriundos dos RCC. Desta forma, os diversos tipos de fração mineral têm uso como agregados reciclados, de acordo com a resistência dos concretos que serão produzidos (HENDRIKS; JANSSEN, 2001).

Estudos têm demonstrado que entre os RCC o resíduo de concreto (RC) pode ser considerado uma matéria prima nobre, com potencial de uso em concretos com propriedades de concretos estruturais (CAVALCANTI, 2006; TSENG, 2010; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016; TAM *et al.*, 2018). Os percentuais de RC presentes no RCC são muito variáveis, sendo encontrado valores entre 6% a valores próximos de 16% (LIMA; CABRAL, 2013).

Pesquisas indicam que os percentuais de RCC no RSU ficam entre 40% e 60%. Os percentuais de RC presentes no RCC, por sua vez, tem variações ainda maiores. Cabral *et al.* (2012) encontrou percentuais entre 4,38 % e 18,65% de RC no RCC para algumas cidades brasileiras. Baseado nisso foram estimados os percentuais de RC nos RCC entre os anos de 2010 a 2017, cujo resultado está apresentado na Figura 2.4.

Figura 2.4 - Geração estimada do RC coletado no Brasil



Fonte: Adaptado ABRELPE (2017)

Esses resultados foram estimados considerando o percentual médio de RCC no RSU de 50%, e do RC no RCC de 11%, considerando as médias encontradas na literatura. Esses dados indicam que existe uma quantidade estimada de RC no RCC para a reciclagem, próxima de cinco milhões de tonelada.

A disponibilidade de RC para uso como agregados reciclados (AR) tende a aumentar, principalmente devido à demolição de estruturas de concreto com mais de cinquenta anos de

uso, que poderão ser substituídas por construções mais adequadas (SMITH, 2009; TSENG, 2010; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016).

A geração de RC são bastante diversificadas. A estimativa apresentada por Smith (2009) é de que 11 milhões de toneladas de RC sejam gerados por ano no Reino Unido. No Japão, a quantidade total de RC disponível para a reciclagem é cerca de 10 a 12 milhões de toneladas, e nos Estados Unidos 60 milhões de toneladas.

A NBR 15116 (ABNT, 2004) classifica como agregados reciclados de concreto (ARC), os agregados que tem um percentual de fragmentos de concreto de CP e rochas superior a 90%. As normas internacionais seguem a mesma recomendação. Entretanto, alguns países como Reino Unido, Holanda, Noruega e Dinamarca, são mais exigentes e recomendam o percentual acima de 95%.

Tseng (2010); Ulsen (2011) observaram que o ARC pode ser obtido da reciclagem de pavimentos e de estruturas obsoletas de concreto, ou da separação do RCC. Os autores ressaltam que o aproveitamento do RC na produção de ARC em escala industrial é feito em plantas móveis ou fixas de forma semelhante à existente nas pedreiras. Sendo o RC aproveitado como agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) e agregado miúdo reciclado de concreto (AMRC).

Nixon (1976), pioneiro no estudo de agregados reciclados, observou que o AMRC se mostrou ineficiente e causador de dificuldades na produção de concretos. Verificou que o uso do AMRC reduz a trabalhabilidade do concreto no estado fresco. No estado endurecido reduz a resistência à compressão e o módulo de elasticidade, além de aumentar a retração e a fluência.

Neville (1997), Metha e Monteiro (2008), notaram também que a influência negativa do AMRC no concreto é especialmente devido aos agregados finos, porque tem uma absorção de água mais elevada. Isto devido à porosidade da argamassa de cimento, que tende a se concentrar na fração fina. Outro fator negativo é a angulosidade do AMRC. Entretanto, mesmo apresentando dificuldades, estudos usando o AMRC apresentaram resultados satisfatórios em concretos e argamassas (HEINECK, 2012; CABRAL, *et al.*, 2012), e em agregados reciclados de blocos para concreto leve (GOMES *et al.*, 2015).

Estudos apresentados na literatura indicam que as características físicas, de forma, e a composição dos ARC dependem do equipamento de britagem do RC, da resistência e da idade do concreto que deu origem ao RC (NIXON, 1976; HANSEN, 1992, TSENG, 2010).

Diferentemente dos agregados graúdos naturais, que são de material homogêneo constituídos de rochas, os AGRC são formados por três tipos de materiais: agregado natural (rochas), argamassa, o conjunto desses dois materiais em proporções diversas e uma fase

microscópica, a interface entre o agregado natural e a argamassa que é a zona de transição interfacial (ZTI) (METHA E MONTEIRO, 2008) .

Pesquisas de ARC realizadas por Hansen (1992), Tseng (2010), González-Taboada *et al.* (2016) indicaram que os agregados com tamanhos entre 8 mm e 12 mm tem menor quantidade de argamassa presa aos agregados naturais. Entretanto, observa-se que existem outros fatores que interferem nessa característica.

Segundo Hansen; Narud (1983); Juan e Gutiérrez (2009), ARC de tamanhos entre 4 e 8 mm tem percentual de argamassa entre 33 e 60%. O Quadro 2.1 resume os resultados de alguns estudos.

Quadro 2.1: Percentual de argamassa presa no ARC

ARC diâmetro (mm)	(%) de argamassa	Pesquisador
4 – 8	33% a 55%	Juan; Gutiérrez (2009)
16	23% - 44%	Juan; Gutiérrez (2009)
4 – 8	60%	Hansen; Narud (1983)
16 – 32	30%	Hansen; Narud (1983)

Fonte: Tseng (2010)

Ravindrarajah; Tam (2015) observaram que, em geral, os AGRC contêm uma média de 50% de argamassa fixa na superfície. Foi verificado que a literatura apresenta resultados diversos para o percentual de argamassa presa aos agregados graúdos naturais (AGN) no AGRC, sendo encontrado valores entre 23% e 60%, dependendo do diâmetro do AGRC e da resistência do concreto de origem. As propriedades físicas, granulométricas e morfológicas do AGRC são funções dos percentuais de argamassa presa ao AGN, e a resistência do concreto que deu origem a esse AGRC (HANSEN, 1992; TSENG, 2010; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016; TAM *et al.*, 2018).

É consenso entre os pesquisadores que o percentual de argamassa presa ao agregado natural é função do processo de britagem e do tamanho dos agregados gerados (HANSEN, 1992; TSENG, 2010). Estudos realizados por Hansen (1992), Tseng (2010) constataram que a utilização do britador de mandíbula fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para a produção de concreto. Esses pesquisadores verificaram ainda que o britador de cones é adequado para ser utilizado como um britador secundário.

O britador de impacto, por outro lado, fornece uma melhor distribuição granulométrica do agregado reciclado para ser empregado em sub-bases e bases de rodovias. Estes são menos suscetíveis a danos, devido aos materiais que não podem ser britados, como barras de aço presentes nas estruturas de concreto armado. Entretanto, Hansen (1992) observou que seu custo

de manutenção é maior e os AGRC são de qualidade inferior se comparados com os agregados produzidos pelo britador de mandíbula.

Pesquisas têm demonstrado que a argamassa presa ao agregado natural é responsável pela influência negativa nas propriedades do ARC. Hansen (1986); Tesng (2010); Ulsen (2011), observaram que agregados menores possuem percentuais de argamassa presa ao agregado natural maior. Observaram também que os agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC) apresentam percentuais de argamassa presa diversificados. Por essa razão, as propriedades físicas do AGRC, além de ser muito variáveis, são mais difíceis de determinar quando comparado aos agregados naturais.

Estudos mostram que existe correlação entre as propriedades físicas dos AGRC e os percentuais de argamassa presa aos AGN (HANSEN, 1986; TESNG, 2010; ULSEN, 2011; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016; TAM *et al.*, 2018). Desta forma é importante fazer uma análise aprofundada das propriedades físicas dos AGRC.

2.2 Propriedades dos agregados graúdos reciclados de concretos

Dentre as principais propriedades dos agregados reciclados que influenciam no comportamento das argamassas e concretos estão a densidade, absorção de água, morfologia e a resistência à abrasão (TSENG, 2010; TENÓRIO *et al.*, 2012; CABRAL *et al.*, 2012; ANGULO; FIGUEREDO, 2013; BELIN *et al.*, 2013; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016; TAM *et al.*, 2018).

2.2.1 Densidade

A NBR NM 53 (ABNT, 2003) determina três formas de densidades ou massas específicas. Densidade aparente (d_a), densidade na condição saturada com superfície seca (d_{SSS}) e a densidade real (d_r) para os agregados graúdos, calculados de acordo com as Equações (2.1, 2.2, 2.3), respectivamente.

$$d_a = \left(\frac{M_s}{M_{SSS} - M_{Sub}} \right) \quad (2.1)$$

$$d_{SSS} = \left(\frac{M_{SSS}}{M_{SSS} - M_{Sub}} \right) \quad (2.2)$$

$$d_r = \left(\frac{M_s}{M_s - M_{sub}} \right) \quad (2.3)$$

Nessas equações M_{sss} é a massa do agregado saturado com a superfície seca do agregado, M_s é a massa seca, sendo usada uma massa de 2000,00 g, conforme a NBR NM53 (ABNT, 2003).

M_{sub} é o valor obtido para a massa submersa do agregado que corresponde a indicação da balança hidrostática após 24 horas. Para o agregado miúdo, a NBRNM 52 (ABNT, 2003) orienta a forma de determinação das densidades usando o mesmo conceito, porém de forma distinta.

A relação entre as densidades, a absorção de água dos agregados reciclados e a porosidade foram bastante pesquisadas (LEITE, 2001; ANGULO, 2005; CABRAL, 2007; TSENG, 2010; ULSEN, 2011). Os resultados obtidos para as absorções de água dos AGR foram bastante superiores à dos AGN, e as densidades desses AGR inferiores à dos AGN, evidenciando uma maior porosidade dos agregados reciclados.

Por sua vez, os valores das absorções de água dos agregados miúdos reciclados foram superiores aos dos AGR. Vale salientar que a maior porosidade dos agregados, e consequentemente menor densidade, pode atuar positivamente, reduzindo o peso das estruturas de concretos, e desta forma aliviar o carregamento das estruturas, resultando uma economia considerável no produto final (CABRAL; 2007)

Metha e Monteiro (2008) verificaram que a porosidade aberta, caracterizada pela absorção de água e as densidades dos agregados reciclados, são propriedades que estão relacionadas e dão indícios das características mecânicas dos agregados.

No caso do AGRC isso se deve à argamassa, material mais poroso, preso à superfície do agregado natural (HANSEN; NARUD, 1983; LEITE, 2001; ANGULO, 2005; ULSEN, 2011; ANGULO; FIGUEREDO, 2013; BELIN *et al.*, 2013).

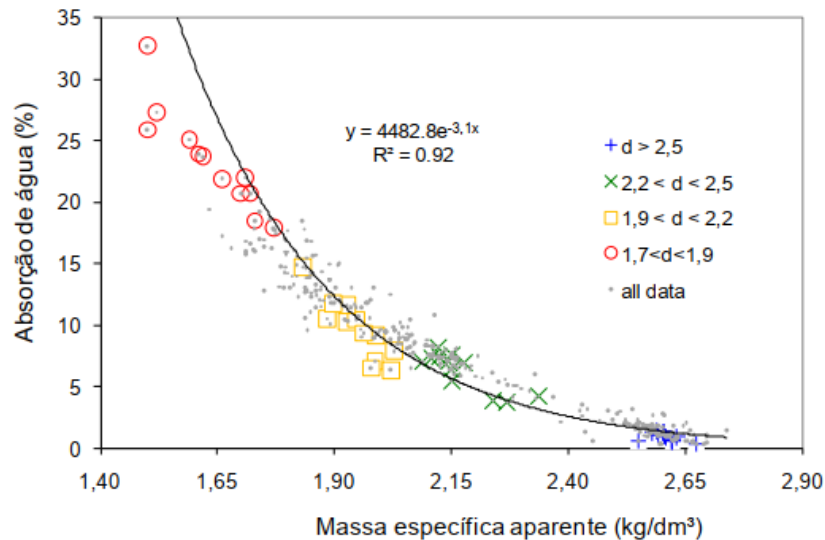
Estudos comprovam que as densidades dos agregados reciclados estão diretamente relacionadas com a resistência dos concretos, e que quanto maior a densidade dos AGR e AMR maiores foram as resistências à compressão dos concretos obtidos (TENÓRIO *et al.*, 2012; ANGULO; FIGUEREDO, 2013).

Estes trabalhos separaram os agregados por faixas de densidade variando entre 1,96 g/cm³ e 2,56 g/cm³.

Os resultados mostraram que concretos com agregados mais densos apresentaram maiores resistências à compressão e menor porosidade.

Ângulo e Figueredo (2013) também demonstraram que a densidade aparente e a absorção de água são grandezas inversamente proporcionais, conforme apresentado na Figura 2.5.

Figura 2.5 - Relação entre a densidade aparente e a absorção de água de agregados de RCC



Fonte: Angulo; Figueredo (2013)

Pode-se observar na Figura 2.5 que os agregados reciclados que apresentam densidades aparentem inferior a $1,90 \text{ kg/dm}^3$, apresentam absorção de água próximo de $15,0 \%$. Enquanto que, os agregados reciclados com densidade acima de $2,40 \text{ kg/dm}^3$ apresentaram absorção abaixo de $6,0 \%$.

A análise dos dados apresentados nessa Figura 2.5 indica um comportamento com tendência de uma curva exponencial descendente, caracterizando grandezas inversamente proporcionais.

Esse comportamento foi evidenciado por vários pesquisadores (LEITE, 2001; TENÓRIO, 2007; TSENG, 2010; ULSSEN, 2011; ANGULO; FIGUEREDO, 2013), constataram que de um modo geral, maior absorção implica em maior porosidade e menor densidade.

Nixon (1976) relacionou as propriedades físicas dos AGRC com as idades e resistências de RC. Foi observado que não existe uma correspondência definida entre as resistências e idades dos concretos e as propriedades de absorção de água e densidades dos AGRC. Porém,

se observa que os AMRC apresentam absorções maiores e densidades menores que os AGRC para um mesmo RC. O resumo dos dados desse estudo está apresentado no Quadro 2.2.

Quadro 2.2: Propriedades físicas de agregados reciclados de concreto

Concreto original		Absorção (%)		Densidade - SSS (g/cm ³)	
Descrição	f _c (MPa)	AGRC	AMRC	AGRC	AMRC
8 anos	41	4,5	7,9	2,42	2,33
9,5 meses	55	3,9	Nd*	2,52	Nd*
2,5 anos	13	2,3	7,9	2,59	2,36
8 meses	23	4,4	7,5	2,36	2,27

Fonte: Nixon (1976)

*Nd – Não definido

Como já observado por vários pesquisadores a absorção de água, a massa específica aparente e massa específica real, estão relacionadas à estrutura porosa permeável do corpo, e desta forma são medidas indiretas da porosidade dos agregados. Visando uma melhor compreensão dessas propriedades, foi realizado um estudo da porosidade e da absorção de água de agregados reciclados.

2.2.2 Porosidade e absorção de água

Os poros dos materiais podem ter dimensões nanométricas. Por essa razão, os ensaios para a determinação dessa porosidade, de um modo geral, usam equipamentos sofisticados como a picnometria de gás e pó ou injeção de mercúrio (WASHBURN, 1921; TSAKIROGLOU; PAYTAKES, 2000; ANGULO *et al.*, 2012).

A porosimetria por injeção de mercúrio tem sido extensivamente utilizada como uma técnica experimental, sendo considerado o método mais importante de análise da estrutura de poros (TSAKIROGLOU; PAYTAKES, 2000; HEMES *et al.*, 2013; KLAVER *et al.*, 2015; FRANUS *et al.*, 2018).

A técnica se baseia no comportamento do mercúrio, que só penetra nos poros, quando se aplica uma pressão sobre ele. Esta técnica é bastante antiga (WASHBURN, 1921), e se baseia na lei capilar que regula a penetração de fluidos em pequenos poros.

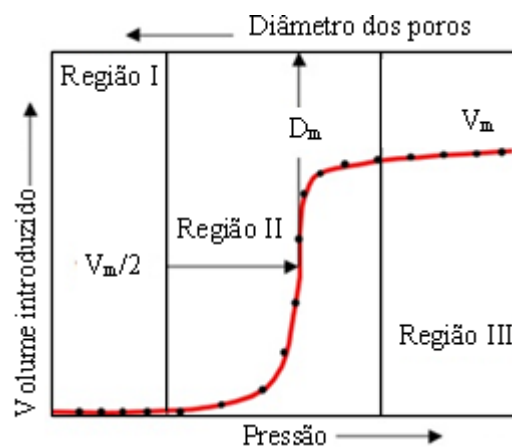
Sendo os poros cilíndricos, os tamanhos das aberturas dos poros são calculados a partir da Equação (2.4), conhecida como equação de Washburn (WASHBURN, 1921).

$$P_c = \frac{2 \cdot \rho \cdot \cos\theta}{r} \quad (2.4)$$

Nesta Equação (2.4), r = raio de abertura dos poros, P_c = pressão capilar, ρ = tensão superficial do mercúrio e θ = ângulo de contato do mercúrio com a superfície e o ar. Considera-se a tensão superficial do mercúrio igual a 485 dines / cm. O ângulo de contato do mercúrio com o ar sobre o material varia, sendo geralmente aceito para a análise dos ensaios o valor de 130 °.

O procedimento de ensaio consiste em colocar a amostra num recipiente, sendo ambos preenchidos com mercúrio. Ao se aumentar a pressão sobre o mercúrio o seu nível é reduzido à medida que este penetra nos poros da amostra, chegando aos poros de menor diâmetro à medida que a pressão aumenta, como mostra a Figura 2.6.

Figura 2.6 - Representação típica de uma curva de porosimetria ao mercúrio



Fonte: Adaptado de Webb; Orr (1997)

A literatura indica que a porosidade dos agregados, de um modo geral, é superior a absorção de água (LEITE, 2001; METHA; MONTEIRO, 2008; TSENG, 2010). Isto confirma que a porosidade é composta de duas partes, porosidade aberta, correspondente aos poros abertos do material acessíveis à água, e a porosidade fechada em que a água não tem penetração (ANGULO *et al.*, 2012). A porosidade e as densidades dos agregados se relacionam conforme apresentado na Equação (2.5).

$$P(\%) = \left[1 - \left(\frac{d_a}{d_r} \right) \right] \cdot 100 \quad (2.5)$$

Nesta Equação (2.5) d_a é a massa específica aparente, e d_r a massa específica real. Esta é uma forma indireta da determinação da porosidade dos agregados. Angulo (2000) analisou a relação entre a absorção de água e a porosidade de agregados graúdos reciclados de RCC a partir da Equação (2.5), obtendo os valores do Quadro 2.3.

Quadro 2.3. Resultados de massas específicas aparente e absorção de água dos agregados graúdos de RCC reciclados separados densitariamente pelo “Sink and Float”.

Agregados separados por densidade	Massa específica aparente (kg/dm ³)	Absorção (%)	Volume de poros (%)
C $d < 1,9$	1,78	14,6	39,0
V $d < 1,9$	1,74	15,3	40,9
C $1,9 < d < 2,2$	2,11	8,0	21,4
V $1,9 < d < 2,2$	2,02	9,0	24,0
C $2,2 < d < 2,5$	2,53	2,0	5,3
V $2,2 < d < 2,5$	2,49	2,8	7,5
C $d > 2,5$	2,60	1,5	4,0
V $d > 2,5$	2,62	1,4	3,7

Fonte: Angulo (2005)

No Quadro 2.3, Angulo (2005) determinou os valores das porosidades como o produto entre as absorções e a densidade real dos agregados, para um valor médio de 2,67 g/cm³, determinada por picnometria, e a absorção de água de acordo com NBR NM 53 (ABNT, 2006).

Por outro lado, Kahrahan e Toraman (2008) determinaram a porosidade de agregados obtidos de rochas e obtiveram valores entre 0,38% e 5,5%, para densidades aparentes entre 2,62 g/cm³ e 2,58 g/cm³, respectivamente.

A alta porosidade, conseqüentemente menores densidades e alta absorção de água são características físicas dos agregados reciclados de RCC que reduz a qualidade desses agregados. Por isto essas propriedades tem sido o foco de várias pesquisas (LEITE, 2001; METHA; MONTEIRO, 2008; TSENG, 2010; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016; TAM *et al.*, 2018).

Esses pesquisadores observaram que, de um modo geral, o ARC pode ter um percentual de absorção de água dez vezes superior ao do agregado natural, dependendo das características do resíduo de origem e do tamanho dos agregados.

A caracterização de agregados para concretos e argamassas consideram a porosidade aberta, correspondente à absorção de água (LEITE, 2001; METHA; MONTEIRO, 2008; TSENG, 2010).

A absorção de água dos agregados é a quantidade de água que penetra nos poros permeáveis desse material. Esta absorção de água, A (%), é calculada como o ganho de massa de água no ponto de massa saturada com superfície seca (M_{SSS}), comparado com a massa seca (M_s), sendo determinada pela Equação (2.6), de acordo com a NM 53 (ABNT, 2006).

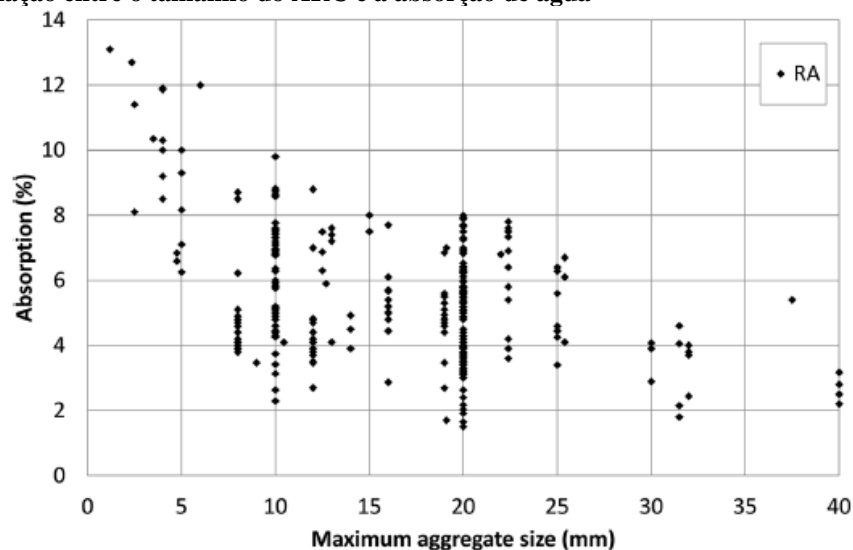
$$A(\%) = \left(\frac{M_{SSS} - M_S}{M_S} \right) \cdot 100 \quad (2.6)$$

A massa do agregado saturado com a superfície seca é obtida após os agregados ficarem submersos durante 24 horas e secos com pano, de modo que não apresentem água visível na superfície.

Considera-se, portanto, a porosidade aberta de um material como sendo a absorção de água. Os pesquisadores têm observado que a absorção de água dos agregados é inversamente proporcional ao tamanho do agregado para um mesmo material (LEITE, 2001; ÂNGULO, 2005; METHA; MONTEIRO, 2008; TSENG, 2010; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016).

Hansen (1992) encontrou valores de absorção da ordem de 3,6% a 8% para AGRC e entre 8,3% e 12,1% para os AMRC. Nixon (1976), Hansen; Narud (1983), Leite (2001), Tseng (2010), verificaram que a absorção de água do AMRC é, de modo geral, cerca de 50% maior que a do AGRC, para um mesmo concreto. González-Taboada *et al.* (2016) analisaram um banco de dados de mais de cem artigos, e encontraram resultados de absorção de AGRC valores variando entre 1,12% a 8,82%, com média de 5,06%. Para o AMRC valores entre 6,84% e 13,10% com uma média de 9,89%, como observado na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Relação entre o tamanho do ARC e a absorção de água



Fonte: González-Taboada *et al.* (2016)

A literatura mostra que os valores de absorção de água dos AGRC são superiores aos dos agregados graúdos naturais devido à maior porosidade da argamassa presa aos agregados (LEITE, 2001; TSENG, 2010; ULSSEN, 2011).

Metha e Monteiro (2008) verificaram que agregados reciclados obtidos de concreto de alto desempenho apresentam porosidade de cerca de 7%, enquanto agregados naturais têm porosidade que pode chegar a 1,6%. Tseng (2010), por sua vez, observa que o ARC, obtido de concreto convencional, tem porosidade que pode chegar ao valor de 17%.

Para os agregados naturais a porosidade ou absorção de água, que de um modo geral varia entre 0,30% a 1,60%, não exerce influência significativa nas misturas de concreto. Por outro lado, os percentuais de absorção de água dos agregados reciclados, por serem superiores aos dos agregados naturais, exercem grande influência nos concretos (MEHTA; MONTEIRO, 2008).

Tendo em vista a alta absorção de água dos agregados reciclados, e conseqüentemente à sua influência nas propriedades dos concretos e argamassas nos estados fresco e endurecido, alguns métodos de produção do concreto propõem alternativa para minimizar os efeitos da absorção, como a pré molhagem dos agregados (LEITE, 2001; TENÓRIO, 2007; TAM *et al.*, 2011).

Nas análises de definição dos tempos usados para a pré-molhagem ou dos percentuais adequados de absorção em função do tempo, tem-se usado a velocidade de absorção de água dos agregados reciclados. Em vista disso, vários modelos matemáticos foram criados para determinar os percentuais de absorção de água em função do tempo.

2.2.2.1 Cinética de absorção de água

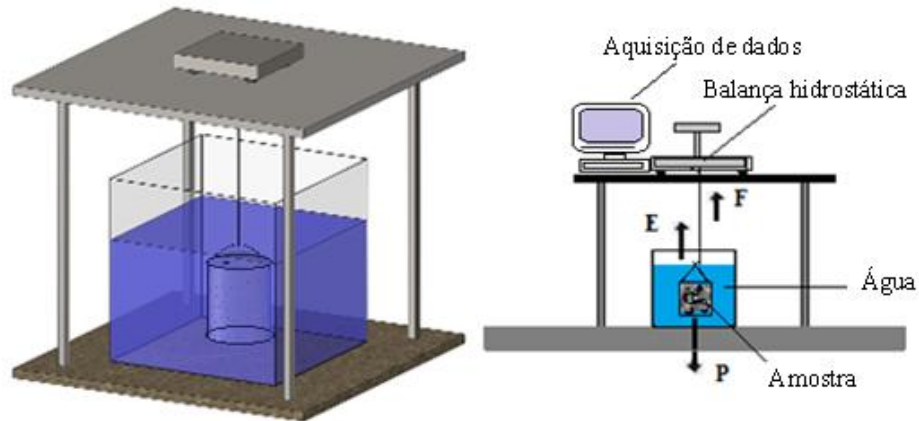
O método experimental normalmente utilizado para determinar a absorção de água dos agregados reciclados, consiste na imersão de uma amostra de agregado em água durante vinte e quatro horas e, em seguida, secagem manual das partículas, no caso de agregados graúdos, conforme determina a NBR NM 53 (ABNT, 2003).

Para o agregado miúdo é realizada uma secagem natural ou com uma fonte de ar quente, aplicada uniformemente nas partículas, mesmo método usado para agregados naturais. Em ambos os casos, é procurada a condição saturada com superfície seca (sss). Segundo Daminelli (2007), os procedimentos adotados pela NM 53 (ABNT, 2003) são semelhantes aos da norma ASTM C 127- 01. Entre os problemas mais comuns estão a subjetividade inerente à definição da condição saturado com superfície seca (sss), especialmente no caso de agregados miúdos, e o longo tempo necessário para a realização dos ensaios.

Leite (2001) realizou o ensaio de cinética de absorção de água usando uma balança hidrostática definido pela NBR NM 53 (ABNT, 2003), colocando uma peneira de malha de

abertura de 75 μm para não permitir perda de material fino durante o ensaio, como mostra equipamento da Figura 2.8.

Figura 2.8 - Balança hidrostática para os ensaios de absorção, densidades e cinética de absorção de água



Fonte: Adaptado de Leite (2001)

O mecanismo de ensaio é composto de um cesto fabricado com malha metálica de abertura 75 μm , um recipiente para colocação de água, uma balança hidrostática conectada com um sistema de aquisição de dados e ganchos que servem como suporte para o cesto.

A metodologia do ensaio funciona segundo o princípio do empuxo de Arquimedes, sendo a equação básica do fenômeno dada pela Equação (2.7), obtido com o uso da aplicação da 3ª lei de Newton no sistema apresentado na Figura (2.8).

$$F = P - E \quad (2.7)$$

Nesta equação tem-se:

P – Peso seco da amostra (constante);

E – Empuxo;

F – Força resultante, dado pela indicação da balança.

O empuxo (E) é dado pela Equação (2.8).

$$E = V_{\text{deslocado}} \cdot g \cdot \rho_{\text{água}} \quad (2.8)$$

Assim, o volume de água deslocado pelo material, corresponde ao volume de sólidos e conseqüentemente ao empuxo, os quais são funções do tempo.

A força P (peso constante), depende da massa seca (M_s) do material e da aceleração da gravidade (g). A variação da força resultante (F), indicação da balança, depende das variações do empuxo (E). O empuxo varia e depende da variação do $V_{(deslocado)}$.

Os agregados representam uma grande parte do volume da mistura, normalmente entre 65 e 80% do volume de concreto convencional (CC), e entre 60 e 64% do CAA (GOMES; BARROS, 2009). A consequência de ignorar a absorção de água dos agregados reciclados pode ser refletida na perda de trabalhabilidade do concreto fresco.

Entretanto, se for adicionada a água de absorção para melhorar a trabalhabilidade, corre-se o risco de perda de resistência pela elevação do fator a/c efetivo da mistura, tendo em vista que Abrams (1919) verificou que o fator a/c é o índice mais importante na determinação da resistência à compressão do concreto, para uma mesma composição de agregados e mesma quantidade de cimento.

Portanto, deve-se determinar a quantidade de água adequada, no tempo adequado, para que o concreto não perca qualidade, tanto no estado fresco como no endurecido.

A definição da absorção de água dos agregados reciclados em função do tempo foi bastante pesquisada. Leite (2001); Daminelli (2007); Tenório (2007); Tegger (2011); Klein et al., (2014); Gomes et al. (2015) usaram a metodologia da balança hidrostática para a determinação do gráfico da cinética de absorção de agregados reciclados graúdos (AGR).

Tenório (2007) observou que em um minuto o AGR misto absorveu 65% do total da água de absorção e aos 10 minutos atingiu um percentual próximo de 90%. Gomes *et al.*, (2015) observaram que agregados graúdos reciclados de blocos de concreto, por serem mais porosos, em 10 minutos atingiu percentual próximo de 80% da absorção total.

Mesmo não havendo consenso em relação aos percentuais de absorção dos agregados em função do tempo, esse estudo é importante, principalmente para os agregados reciclados, devido à absorção de água elevada em relação aos agregados naturais (AN).

Devido à influência da água de absorção dos agregados reciclados, e a necessidade do seu controle na produção dos concretos, pesquisas sugerem fazer a pré molhagem dos agregados reciclados, com um percentual de água que o agregado absorveria em 24 horas, para evitar o aumento no volume de água livre disponível nestas misturas, colaborando para a redução da resistência mecânica dos concretos. Em vista disso, algumas técnicas foram usadas para a obtenção de concretos com propriedades semelhantes aos produzidos com agregados naturais.

Tam *et al.* (2013), produziram concretos de uma forma denominada de dois estágios. Neste trabalho, o agregado miúdo natural foi misturado a uma composição de AGRC e AGN

juntamente à água de absorção por 60 segundos, e em seguida adicionado o cimento e misturado por 30 segundos. Finalmente foi adicionado o restante da água e misturado por 120 segundos.

De acordo com esse estudo, o concreto obtido com a pré molhagem apresentou resultados melhores de que o concreto produzido da forma convencional, isto devido à redução da porosidade do AGRC, por causa do preenchimento dos poros dos agregados.

Em relação ao percentual da água de absorção a ser usado na pré molhagem, não existe consenso. Leite (2001) usou percentuais de 40% e 50%, entretanto, a maioria dos pesquisadores sugerem a utilização de 80% do total da água de absorção (CABRAL, 2007; TENÓRIO *et al.*, 2012; GOMES *et al.*, 2015).

Dessa forma se verifica que colocando-se 80% da água de absorção dos agregados reciclados, o percentual restante vai ser absorvido lentamente, não interferindo de forma significativa na água de amassamento da mistura do concreto. Em vista disto, se considera que o controle da absorção de água dos agregados reciclados é um aspecto importante na obtenção de concretos com agregados reciclados de melhor qualidade.

Nesse contexto é importante a determinação de modelos matemáticos que possam prever a absorção dos agregados em função do tempo, principalmente para os agregados reciclados e dessa forma definir o percentual de água de absorção adequado para evitar excesso de água disponível nas misturas de concreto. Diante disso várias formulações matemáticas foram propostas.

Tegguer (2011) sugere a Equação proposta pelo modelo de Hall para determinação do percentual de absorção em função do tempo, dado pela Equação (2.9).

$$W = A + S \cdot t^{\left(\frac{1}{2}\right)} - C \cdot t \quad (2.9)$$

W é a quantidade de água absorvida acumulada. S é a absorvidade, que caracteriza a capacidade dos poros do material absorver e transmitir água por capilaridade. A e C são constantes.

Foi observado que para tempos suficientemente grandes, o valor de W decresce, podendo inclusive ser negativo, o que caracteriza uma inconsistência física desse modelo. Entretanto, esse modelo dentro de um tempo limite de 24 horas, aplicado para agregados graúdos naturais e reciclados apresentou índice de correlação entre 0,98 e 0,99, quando comparado com os ensaios.

Outro modelo baseado no trabalho de Schonlin, citado por Tegguer (2011), é representado pela Equação (2.10), em que W_1 é a quantidade de água absorvida após uma hora, n é uma constante e t o tempo em horas.

$$W = W_1 \cdot t^n \quad (2.10)$$

Klein *et al.* (2014) criaram um modelo capaz de descrever a evolução da absorção de água pelos agregados graúdos naturais e agregados leves. Este modelo é uma função de absorção de água em vinte e quatro horas, o que é um valor comum no campo técnico. O modelo validado experimentalmente é dado pela Equação (2.11).

$$Abs_{,(t)} = Abs_{i(24)} \cdot \left[1 - e^{-k \left(\frac{t}{Q} \right)^p} \right] \quad (2.11)$$

Nesta equação Q tem o valor constante de 0,0003 h, ou aproximadamente 1 s, que é a abscissa do ponto de inflexão da curva representada pela Equação (2.11). O valor da constante (p) representa a inclinação da curva no ponto de inflexão, e tem valor de 0,50 para rochas naturais, sendo maior para agregados mais porosos. A constante (k) depende da porosidade do material e do tamanho dos agregados, geralmente varia entre 0,01 e 0,05 (KLEIN *et al.*, 2014). Esse modelo matemático desenvolvido por Klein *et al.* (2014) representa um avanço na compreensão da cinética de absorção de água de materiais porosos.

Na aplicação desse modelo Klein *et al* (2014) encontraram valores de absorção em 24 horas para os agregados naturais, entre 0,24% e 1,13% para os agregados graníticos e silicosos, e entre 6,5% e 24,36% para os agregados porosos. Entretanto, esse modelo não foi usado para descrever a cinética de absorção dos agregados graúdos reciclados de concreto.

2.2.3 Morfologia de agregados graúdos para concreto

Estudos realizados por Hudson (1999) mostraram que 80% do volume total do concreto consistem de agregados e cerca de 60% desse percentual pode ser de agregado graúdo.

Shilstone (1990) verificou que partículas irregulares e alongadas, principalmente aquelas de tamanhos intermediários entre 2,36 e 9,5 mm, podem afetar a mobilidade das misturas. Desta forma o excesso de partículas mal formadas pode reduzir a resistência do concreto devido ao aumento da demanda de água. Segundo Galloway (2009), as partículas

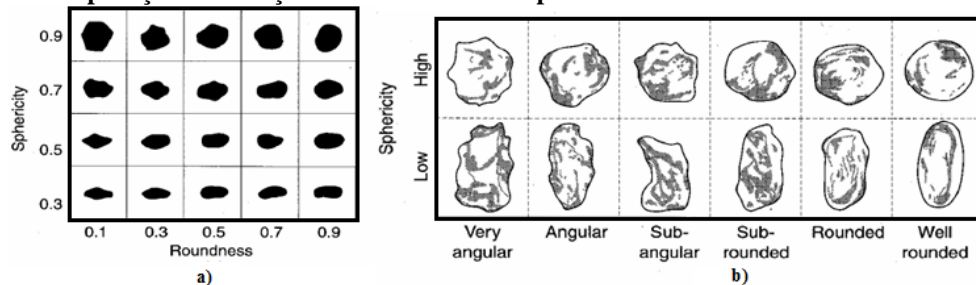
planas podem ser orientadas de tal forma que podem prejudicar a resistência e a durabilidade do concreto.

Por sua vez, De Larrard (1999) observou que a eficiência do empacotamento dos agregados também é afetada pela forma do agregado. Hudson (1999) constatou que no concreto, as partículas mais grossas podem ser empacotadas sem interferência, quando tem formato cúbico ou esférico. Observou ainda que se tem uma redução de pasta de cimento de cerca de 4% a 5%, quando agregados cúbicos são usados em vez de partículas chatas e alongadas. Corroborando com esses pesquisadores, Mehta; Monteiro (2008) indicaram que as partículas alongadas e planas devem ser limitadas a um máximo de 15% em peso do total do agregado.

Em relação à forma e ao contorno, as partículas podem ser classificadas qualitativamente como cúbicas, esféricas, planas ou alongadas e pontiagudas, quando possuem arestas cortantes.

Quiroga; Fowler (2005) observaram que existem outras duas características que são denominadas de arredondamento e angularidade, que interferem no empacotamento dos agregados, como mostra a Figura 2.9.

Figura 2.9 - Comparação e avaliação visual da forma da partícula



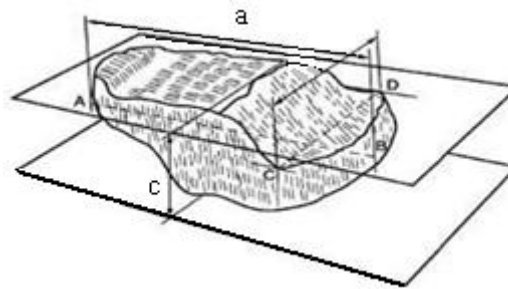
Fonte: Quiroga; Fowler (2005)

Popovics (1990) por sua vez, identifica que a angularidade está relacionada com a nitidez das bordas e cantos de uma partícula, da seguinte forma:

- Angular: pouca evidência de desgaste na superfície da partícula;
- Subangular: evidência de algum desgaste, mas enfrenta cantos intocados;
- Subarredado: desgaste considerável enfrenta redução na área;
- Arredondado: as arestas praticamente desaparecem;
- Bem arredondado: não existe aresta.

A NBR 7809 (ABNT, 2019) usa padrões geométricos básicos para identificar a característica de forma dominante de materiais particulados graúdos para uso no concreto, de acordo com a Figura (2.10).

Figura 2.10 - Dimensões consideradas da partícula de agregado (ABNT NBR 5564, 2011).



Fonte: NBR 5564 (ABNT, 2011)

O ensaio de Índice de Forma (I.F.) é conhecido como método do paquímetro, dada pela Equação (2.12).

$$IF = \frac{L}{I} = \frac{a}{c} \quad (2.12)$$

Nesta Equação (2.11), L e I são a maior e menor medida respectivamente, correspondentes ao comprimento e a espessura. Neste ensaio considera-se uma amostra de 200 agregados, escolhidos proporcionalmente ao percentual retido acumulados nas peneiras acima de 9,5 mm.

A NBR 7211 (ABNT, 2004) considera que o agregado graúdo é adequado para o concreto quando $I. F. \leq 3,0$. Outra forma de classificação dos agregados graúdos é a definida dada pela NBR 5564 (ABNT, 2011). A partir das medidas verificadas na Figura 2.9 se obtém os resultados que indicaram as características dos agregados de acordo as classificações apresentadas no Quadro (2.4).

Quadro 2.4: Classificação da forma dos agregados graúdos

Relações (b/a) e (c/b)	Classificação da forma
$b/a > 0,50$ e $c/b > 0,50$	Cúbica
$b/a < 0,50$ e $c/b \geq 0,50$	Alongada
$b/a \geq 0,50$ e $c/b < 0,50$	Lamelar
$b/a < 0,50$ e $c/b < 0,50$	Alongada - Lamelar

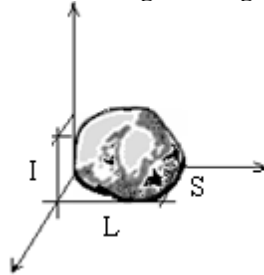
Fonte: NBR 5564 (ABNT, 2011)

Fazendo uma análise dos dados apresentados no Quadro 2.4, se observa que para um agregado com $a = 1,25$ cm, $c \geq 0,42$ cm e $b \geq 0,63$ para que se tenha $I. F = a/c \leq 3,0$, para que este agregado apresente características de forma apropriada para concretos, sendo classificado com forma cúbica.

Em relação à esfericidade dos agregados, Krumbein (1941), em um dos primeiros estudos sobre a forma de sistemas particulados, sugeriu para determinar a esfericidade a Equação (2.13), baseado na Figura 2.11, considerando para a esfera a esfericidade igual a 1,0.

$$Esf_K = \sqrt[3]{\frac{L \cdot I \cdot S}{L^3}} \quad (2.13)$$

Figura 2.11 - Medidas para determinação da morfologia dos agregados graúdos



Fonte: Adaptado de Krumbein (1941)

Considerando as dimensões principais de uma partícula, tem-se:

L – Comprimento, maior distância;

I – Comprimento médio;

S – Comprimento menor.

Hawlistshek *et al.* (2013) verificaram a tendência atual de caracterização dos parâmetros geométricos de material particulado, com o uso dos sistemas de análise de imagens por fluxo dinâmico. Esses métodos são descritos pela norma ISO/13322-2/06 (ISO, 2006).

O Camsizer-L, apresentado na Figura 2.12, é o equipamento adequado que possibilita a análise de centenas de milhares de partículas em um amplo espectro de tamanhos. Este equipamento de processamento digital de imagens (PDI) abrange um intervalo de partículas com tamanhos de 30 µm a 30 mm.

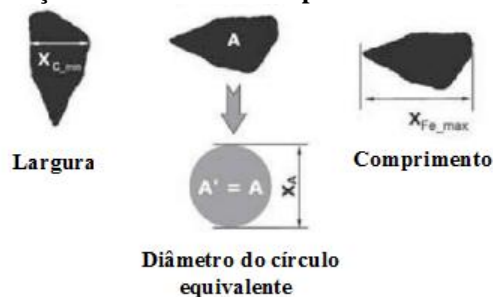
Figura 2.12 - Camsizer-L – equipamento de ensaios do AGRC



Fonte: Laboratório de Materiais USP/SP (2019)

Cada partícula é fotografada em dois ângulos diferentes com parâmetros de análise determinados de acordo com a Figura 2.13.

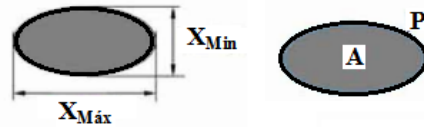
Figura 2.13 - Comparação e avaliação visual da forma da partícula



Fonte: HAWLISTSHEK *et al.* (2014)

Com as dimensões das partículas são determinados os parâmetros de forma como: simetria, convexidade, esfericidade, e a razão entre o menor e o maior diâmetro da partícula chamada de relação de aspecto (b/l), Figura 2.14, com o uso das Equações (2.14) e (2.15), respectivamente.

Figura 2.14 - Parâmetros de forma dos agregados - CAMSIZER – L



Fonte: HAWLISTSHEK *et al.*, (2014)

$$\frac{b}{l} = \frac{X_{\min}}{X_{\max}} \quad (2.14)$$

$$Esf. = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P} \quad (2.15)$$

Os resultados de caracterização da forma dos AGRC são mais variáveis em relação aos AGN. Os AGN por serem homogêneos e produzidos de forma padronizada pelas pedreiras, apresentam menor variação no índice de forma.

Melo (2019) avaliou AGN 12,5 mm de três pedreiras em Maceió e encontrou índices de forma médios de 2,05, 2,35 e 2,45, sendo todas aprovadas para uso em concretos, tendo em vista que o I. F foi menor que 3,0, conforme determina a NBR 7211 (ABNT, 2004)

Os agregados graúdos reciclados, por sua vez, por serem de material heterogêneo, apresentam parâmetros de forma que dependem do equipamento de beneficiamento e do tipo de resíduo. É importante salientar que os parâmetros de forma dos agregados variam de acordo com a fração granulométrica.

Silva et al. (2015), caracterizaram agregado graúdo reciclado de blocos de concreto (ARBC), e encontraram: índice de forma (IF) de 4,7 para a fração 9,5 a 12,5 mm, e 5,8 para a fração entre 12,5 e 19,0 mm; relação de aspecto, para a faixa de 9,5 mm a 12,5 mm, com o uso do paquímetro e do Camsizer, de 0,75 e 0,73, respectivamente, e esfericidade, determinada pelo Camsizer e pela equação de Krumbein, de 0,81 e 0,63, respectivamente; e para faixa entre 12,5 mm e 19,0 mm, a relação de aspecto encontrada foi de 0,76 com paquímetro e 0,72 no Camsizer, e as esfericidades usando o Camsizer e a equação de Krumbein, foram 0,72 e 0,65, respectivamente.

Tseng (2010) usou britador de mandíbula e de impacto para a obtenção de agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC). Encontrou parâmetros $b/a = 0,73$ e $c/b = 0,69$, para uma faixa entre 9 e 12 mm para os AGRC obtidos com o britador de mandíbula. Com o britador de impacto os resultados foram $b/a = 0,74$ e $c/b = 0,66$, para a mesma faixa de agregados.

Conforme já mencionado a exigência da norma NBR 7211 (ABNT, 2004) é que o índice de forma (IF), seja inferior a 3,0, sendo o índice mais desfavorável para agregados graúdos para concreto. A relação de aspecto obtido pelo PDI (CAMSIZER – L), é o inverso do IF, significa um valor limite próximo de 0,33.

Estudos realizados por Edorgan; Fowler (2005), obtiveram esfericidades de 0,75 e 0,78 para AGRC, obtidos por esmagamento, sendo usado tomografia com o uso do raio X. Nesse estudo foram observados resultados para a relação de aspecto b/a , entre 0,65 e 0,94 e esfericidade entre 0,54 e 0,85.

2.2.4 Resistência à abrasão

A resistência à abrasão é a resistência ao desgaste superficial dos agregados quando é submetido ao atrito. Este ensaio mede a capacidade do agregado não sofrer quebras ou desgaste quando submetido principalmente aos esforços de cisalhamento. Este ensaio é realizado num equipamento composto por um cilindro oco de aço que gira durante um tempo estabelecido com os agregados juntamente com bolas de aço no seu interior, o impacto das bolas com os agregados e com o recipiente provoca o desgaste das partículas. O ensaio é realizado de acordo com a NBR 51 (ABNT, 2001), e o resultado do ensaio é calculado usando a Equação (2.16).

$$Perdas (\%) = \frac{M_1}{M_2} \cdot 100 \quad (2.16)$$

O equipamento de abrasão tem uma frequência de 33 rpm, e são necessárias 500 rotações. É considerado como perda o material que se desprende do agregado devido ao impacto das esferas, material que passa na peneira de abertura 1,68 mm. O percentual de perda ou de transformação é determinado de acordo com a Equação (2.16), cujas variáveis tem os seguintes significados: M_1 – massa de material que passa na peneira 1,68 mm (g), M_2 – massa inicial de agregado (g).

As resistências à abrasão LA dos agregados naturais são definidas pelas rochas de origem dos agregados. Kahrahan; Toraman (2008) determinaram o índice de abrasão LA de agregados de 11 tipos de rochas, como apresentado no Quadro (2.5).

Quadro 2.5: Índice de abrasão LA de agregados de diversos tipos de rochas

Tipo de rocha	Abrasão LA (%)	Densidade (g/cm ³)	Porosidade(%)
Basalto	17,2	2,58	5,5
Granito cinza	33,7	2,55	0,62
Granito (K. Rosa)	40,3	2,62	0,63
Granito (Kyrcegi)	34,7	2,47	0,98
Mármore (1)	47,2	2,62	0,13
Mármore (2)	40,6	2,69	0,37
Migmatita	16,6	2,75	1,33
Serpentinita	15,9	2,73	0,91
Cálcario dolomítico	25,0	2,63	0,31
Travertino	40,1	2,36	4,08
Calcário	28,9	2,61	0,38

Fonte: Kahrahan; Toraman (2008)

Os resultados no Quadro (2.5) variaram entre o menor índice de 15,9 % para a serpentinita, e o maior percentual de perdas de 47,20% para o mármore. A análise dos dados apresentados indica que não existe, de um modo geral uma correlação definida entre os índices de abrasão LA e porosidade e densidade dos agregados naturais. Isto pode ser constatado tomando como referência agregados de Basalto. Mesmo tendo baixo índice de perdas por abrasão LA, apresenta alta porosidade. Em relação aos agregados naturais, os AGRC apresentam maior índice de abrasão LA devido à maior fragilidade da argamassa presa aos agregados naturais. Algumas pesquisas indicam a resistência à abrasão LA como uma característica que identifica a qualidade do agregado graúdo reciclado para concreto. Quanto menor o índice de abrasão LA, maior a densidade e menor a absorção de água (HANSEN; NARUD, 1983; JUAN; GUTIÉRREZ, 2009; TSENG, 2010).

Juan; Gutiérrez (2009) concluíram que a absorção de água, a densidade e o índice de abrasão dependem do tamanho do agregado reciclado de concreto. Além disto, depende também da origem do concreto. Hansen; Narud (1983) analisaram ARC, provenientes de concretos de alta resistência (A), média resistência (M) e baixa resistência (B), observam que a relação a/c no concreto de origem e o índice de abrasão apresentado pelo ARC são diretamente proporcionais, como apresentado no Quadro 2.6.

Quadro 2.6: Propriedades de ARC – Britador de mandíbula

Agregado	Diâmetro (mm)	Densidade g/cm ³	Absorção (%)	Perda Abrasão (Los Angeles) (L500)	Volume de argamassa presa aos grãos naturais (%)
Reciclado (A)	(4 - 8)	2,34	8,5	30,1	58,0
	(8 - 16)	2,45	5,0	26,7	38,0
	(16 - 32)	2,49	3,8	22,4	35,0
Reciclado(M)	(4 - 8)	2,35	8,7	32,6	64,0
	(8 - 16)	2,44	5,4	29,2	39,0
	(16 - 32)	2,48	4,0	25,4	28,0
Reciclado (B)	(4 - 8)	2,34	8,7	41,4	61,0
	(8 - 16)	2,42	5,7	37,0	39,0
	(16 - 32)	2,49	3,7	31,5	25,0

Fonte: Hansen; Narud (1983)

Os dados apresentados no Quadro 2.6 mostram que, tomando como referência os agregados de diâmetro entre 4 e 8 mm, para os três tipos de concretos, se verifica que ARC obtidos de concretos mais resistentes apresentaram menor índice de abrasão LA, entretanto a diferença dos percentuais de absorção de água, não foram significativos. Por outro lado, as pesquisas mostram que ARC obtidos de concretos de menor resistência apresenta menor percentual de argamassa presa aos agregados naturais. Para relações a/c de 0,4; 0,7 e 1,2, Hansen; Narud (1983), encontraram nas frações de agregados reciclados com tamanhos entre (8-12 mm), índice de abrasão LA de respectivamente 25%, 28%, e 39%.

Tseng (2010) ao analisar AGRC obtidos com britadores de mandíbula e de impacto, observou índice de abrasão LA de 38% e 43% respectivamente. Assim, observou que o britador de mandíbula produz AGRC com maior percentual de argamassa presa nas superfícies dos agregados, caracterizado pelo maior índice de abrasão LA.

De acordo com o que foi apresentado, a resistência à abrasão é a resistência ao desgaste superficial dos agregados, mede, portanto, a capacidade do agregado não sofrer alterações. quando é submetido ao impacto e ao atrito.

Portanto, conforme determina a NBR 7211 (ABNT, 2009), o ensaio de abrasão LA para agregados graúdos define um dos parâmetros que identificam a qualidade do agregado para concretos, sendo aceitos agregados com índice de abrasão LA inferiores a 50%.

2.3 Concretos com agregados reciclados de concreto

Os materiais usados na produção de concretos ainda são em sua maioria provenientes de recursos naturais. Estes recursos não renováveis como as jazidas de rochas e de areias estão gradualmente se tornando empobrecidos, ou muito distantes, o que encarece demais o custo do produto (TSENG, 2010; ULSEN, 2011).

O aumento dos esforços de reciclagem, com a incorporação de resíduos de construção e demolição (RCC), criando materiais amigos do meio ambiente, parece ser o caminho que se deve seguir (JHON, 2000). Nesse sentido, concretos com agregados graúdo e miúdo originados de RCC parece ser um caminho viável.

Ettxeberria *et al.* (2007) produziram concreto com percentuais de substituição de AGN de 25%, 50% e 100%, obtendo resultados satisfatórios com resistência entre 20 e 45 MPa. Entretanto, concluiu que a resistência e o módulo de elasticidade são cerca de 20% menores que do concreto com agregados naturais, para mesma composição. Os estudos mostram que o uso do ARC na obtenção de novos concretos, de modo geral, tem se mostrado satisfatório, e continua sendo melhorado com novas possibilidades de uso, com a inserção de novos materiais e tratamentos. O Quadro 2.7 apresenta alguns estudos analisados.

Quadro 2.7: Pesquisas de concretos com ARC com substituição parcial ou total do AGN

Agregado	Substituição	Pesquisador
AGRC	100%	NIXON (1976)**
AGRC - AMRC	Ambos 100%	HANSEN (1986)**
AGRC - AMRC	50% - 100%	KATZ (2003)**
AGRC	(25, 50 e 100)%	ETXEBERRIA <i>et al.</i> (2007)*
AGRC	(50, 100)%	GRDIC <i>et al.</i> (2010)*
AGRC	100%	TSENG (2010)**
AGRC	(10, 20, 30 e 40)%	PANDA; BAL (2012)*
AMRC	(25, 50, 75, 100)%	PEREIRA <i>et al.</i> (2012)*
AGRC	(25, 50 e 100)%	GONZALEZ; ETXEBERRIA (2014)*
AMRC	(25, 50, 100)%	FAN <i>et al.</i> (2016)**
AGRC	100%	TENÓRIO (2016)*
AGRC - AMRC	Ambos 20%	CAMPOS <i>et al.</i> (2018)*
AGRC	(20, 50 e 100)%	SEARA-PAZ <i>et al.</i> , (2018)**

Fonte: Compilação dos autores (2019)

*Concreto autoadensável (CAA), **Concreto convencional (CC)

Os resultados obtidos nas propriedades dos concretos, produzidos com a substituição do AGN pelo AGRC são diversificados, dependendo do percentual de substituição. Alguns pesquisadores sugerem um percentual máximo de substituição de 50,0% (HANSEN, 1986; KATZ, 2003).

Ettxeberria *et al.* (2007); Zhu *et al.* (2010), mesmo constatando uma redução da ordem de 10,0% a 20,0% da resistência à compressão e de até 30,0% no módulo de elasticidade e um acréscimo na retração, consideram importante a substituição de 100% dos AGN pelo AGRC, como ação de preservação dos recursos naturais.

Não existe consenso da influência nas propriedades dos concretos, em função da substituição do AGN pelo AGRC, assim como o percentual de substituição ideal. Alguns pesquisadores consideram o percentual de substituição de 50,0% adequado (GRDIC *et al.* 2010; GONZALEZ; ETXEBERRIA, 2014).

Por outro lado, outros consideram adequada a substituição de 100% do AGN pelo AGRC, ainda que a resistência à compressão seja ligeiramente inferior ao concreto com AGN (NIXON, 1976; HANSEN, 1986; TSENG, 2010).

SEARA-PAZ *et al.*, (2018) analisaram o comportamento de vigas de concreto armado, em ensaios à flexão de três pontos. Os concretos apresentaram proporções de substituição de AGRC de 20,0%, 50,0% e 100,0%. Observaram que os modos de ruptura foram semelhantes ao concreto com AGN. No entanto, as vigas com AGRC apresentaram fissuração mais largas, e em maior quantidade para o mesmo carregamento.

O aspecto comum em estudos de concretos com AGRC é a influência negativa que a argamassa presa a esses agregados pode ter. A falta de consenso da influência da substituição do AGRC, e do percentual adequado de substituição, permite verificar que é necessária uma investigação maior do uso do AGRC e AMRC. Em vista disto é importante desenvolver novos métodos de dosagens e técnicas de tratamento para a redução da argamassa presa aos ARC.

2.4 Tratamentos de agregados graúdos reciclados de concretos

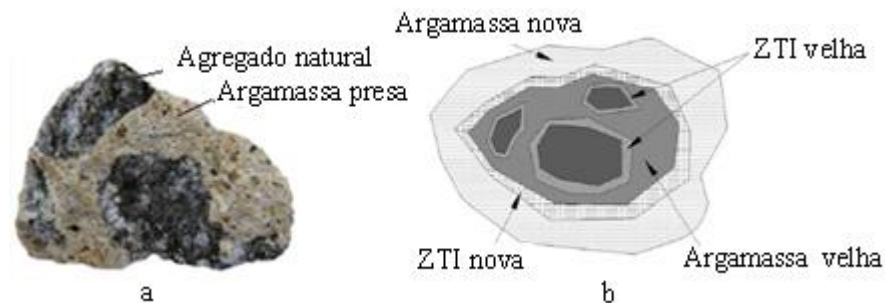
Pesquisas realizadas por Nixon (1976), Hansen (1992) indicaram que o concreto com baixa resistência fornece agregados reciclados mais porosos, e concretos de resistência mais alta fornecem agregados menos porosos.

Esses estudos são compatíveis com a pesquisa de Tabsh; Abdelfatah (2009). Constataram que as características mecânicas do concreto produzido com AGRC oriundos de

concretos de resistência superior a 50 MPa não foram diferentes das características mecânicas dos concretos com AGN.

Pesquisas indicam que a interface entre a argamassa e o agregado, chamada de zona de transição interfacial (ZTI), é considerada o ponto mais fraco do concreto, notadamente em concretos com ARC, como mostra as Figuras (2.15a e 2.15b).

Figura 2.15 - Características do AGRC: a) originado; b) reuso



Fonte: a - Ulsen *et al.* (2013); b - Modani; Mohitkar (2014)

Kumar; Bahattacharjee (2003) constataram que a porosidade da argamassa presa ao agregado é maior que a porosidade da argamassa solta, porque a ZTI é uma região mais porosa. O AGRC dentro de um novo concreto possui duas ZTI: uma interface entre o agregado natural e a argamassa antiga, e outra entre a argamassa antiga e a nova argamassa, o que significa duas regiões de fragilidade do agregado.

Metha; Monteiro (2008) observaram que a ZTI é quem governa as propriedades mecânicas do concreto, tais como resistência à compressão, resistência à flexão, módulo de deformação, fluência, porosidade e durabilidade. Observaram que esta ZTI tem uma espessura da ordem de 10 μm a 50 μm .

Existe conhecimento consolidado portanto, que no AGRC a camada de argamassa velha presa ao agregado natural é mais frágil e mais porosa, responsável pela alta absorção de água, em relação ao agregado natural (KUMAR; BAHATTACHARJEE; 2003; METHA; MONTEIRO, 2008; MODANI; MOHITKAR, 2014; AL-BAYATI *et al.*, 2016). Assim, para melhorar as propriedades físicas dos agregados reciclados de concreto (ARC) é fundamental a redução da camada de argamassa presa ao agregado natural.

Vários estudos de tratamentos de ARC visando reduzir a camada de argamassa presa ao agregado natural ou impermeabilizar os poros para reduzir a porosidade dos agregados foram realizadas (AL-BAYATI *et al.*, 2016; HO KIM *et al.*, 2013; SPAETH.;TEGGUER, 2014; DILBAS, H. *et al.*, 2019). Esses estudos podem ser divididos em tratamentos químicos, térmicos e tratamentos mecânicos associado ao térmico (Termomecânicos).

Entre as pesquisas realizadas com tratamento químico, merece destaque o estudo de ZHU *et al.* (2010), no qual foram analisadas as propriedades de durabilidade do concreto, usando tratamento do AGRC com substância hidro-repelente à base de silano (polímero hidro repelente). Verificou-se que o tratamento por imersão em silano com 100% de concentração pode melhorar a durabilidade do concreto com ARC. Entretanto, foi observado uma redução na resistência à compressão dos concretos com os agregados reciclados tratados com silano.

Tsujino *et al.* (2007) efetuaram o tratamento do AGRC com óleo a base de parafina e silano, considerando as resistências do RC em baixa e média. Os resultados de absorção de água foram melhores com o tratamento de silano, onde a absorção foi reduzida de 3,53% para 1,15%. Já os com tratamento com óleo reduziu a absorção de água de 3,78% para 3,53%. Entretanto, as resistências à compressão dos concretos tratados com óleo foram maiores que os tratados com silano. Ambos os tratamentos foram eficientes em relação ao agregado sem tratamento.

Tam *et al.* (2007) estudaram a carbonatação de AGRC e verificaram que um aumento da carbonatação reduz a quantidade de poros do agregado, melhorando sua qualidade. Shia *et al.* (2015) consideram o uso do dióxido de carbono para o tratamento do ARC não apenas um método eficiente para melhorar a propriedades da ARC, mas também um processo amigo do ambiente.

Seguindo essa linha, Tenório (2016) pesquisou a carbonatação do AGRC na faixa granulométrica entre 4,75 mm e 12,5 mm, obtendo resultado satisfatório na redução da porosidade, em cerca de 15%. O método de carbonatação de ARC se mostra eficiente na redução da porosidade, entretanto, sua aplicação necessita de câmaras eficientes e apresenta dificuldades, notadamente no tratamento em grande escala.

Em relação aos tratamentos químicos, de um modo geral, apresentaram o inconveniente de ser agressivo ao meio ambiente.

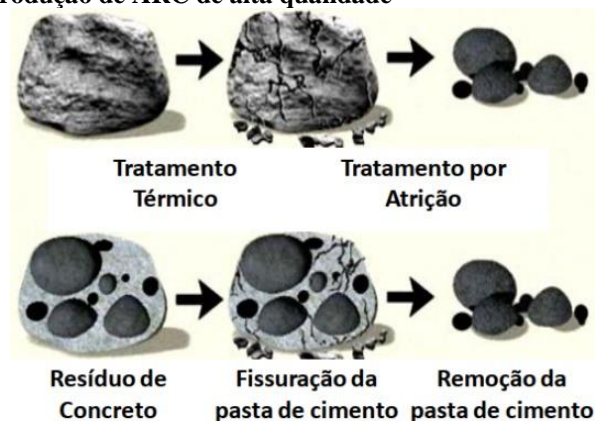
Estudos foram realizados usando técnicas de preenchimento dos poros da argamassa do ARC com material pulverulento e pozzolânico com a imersão dos agregados em solução desses materiais. Katz (2004) usou duas formas de tratamento do AGRC: impregnação em sílica e limpeza ultrassônica.

Foi observado que o concreto com AGRC tratado por impregnação em solução de sílica teve um acréscimo de 15 % a 30% na resistência à compressão nas idades de 7 e 28 dias. Da mesma forma, os concretos com AGRC tratados com ultrassom, apresentaram um desempenho melhor que o de referência, porém inferior ao tratado com sílica, provavelmente devido ao efeito pozzolânico da sílica.

Os tratamentos mecânicos e termomecânicos foram amplamente pesquisados. Ulsen *et al.* (2013), observaram que a argamassa velha pode ser removida parcial ou integralmente por meio de mecanismos como atrição com o Vertical Shaft Impactors (VSI), e associado à lavagem e seleção densitária obtendo-se agregados miúdos reciclados com propriedades superiores ao agregado natural.

Uma forma de aproveitamento do ARC, principalmente no Japão, ocorre com o esmagamento do RC submetido ao calor. O RC quando esmagado a uma temperatura de cerca de 300 °C, separa a parte correspondente ao agregado natural da argamassa de concreto (SHIMA *et al.*, 2005; NAWA, 2010), Figura 2.17.

Figura 2.17 - Método de produção de ARC de alta qualidade



Fonte: Nawa (2010)

De acordo com Angulo; Figueredo (2013), este processo de reciclagem do resíduo de concreto (RC) é amplamente usado e os ARC são usados substituindo o AGN em bases de rodovias no Japão.

Este processo tem se mostrado eficiente, entretanto, tem alto consumo de energia. Angulo *et al.* (2013) realizaram a moagem de RC com tratamento térmico obtendo ARC miúdo, a partir de concretos com três classes de resistência: (10 – 20) MPa, (35 – 45) MPa e (45 – 55) MPa.

Os resultados mostraram que ARC obtidos de RC de resistências mais baixas são mais porosos. Além disso, concluíram que esse processo produz areia reciclada menos porosa, porque a pasta de cimento por ser mais frágil, se transforma em filer. Esse material pulverulento apresentou partículas de cimento não hidratado, podendo ser usadas como adição em concretos e argamassas.

Tratamentos do AGRC e respectivos resultados das propriedades dos agregados tratados, e de resistência à compressão dos concretos produzidos com esses agregados, estão apresentados no Quadro 2.8.

Quadro 2.8: Tratamentos do AGRC e efeito no concreto

Efeito no AGRC				Efeito no concreto Endurecido	Referência
Material	Tratamento	Absorção (água)	Densidade	Resistência à compressão	
AGRC	Carbonatação	Reduziu	Aumentou	10% >	Tam <i>et al.</i> (2007)
AGRC	Sílica (finos)	Reduziu	Aumentou	(15% - 30) % >	Katz (2004)
AGRC	Ultra som	Reduziu	Aumentou	7% >	Katz (2004)
AGRC	Silano	Reduziu	Aumentou	15% >	Zhu <i>et al.</i> (2010)
AGRC	Ácido (HCl)	Reduziu	Aumentou	25% >	Ismail; Ramli (2013)
AGRC	Óleo mineral	Reduziu	Aumentou	(15 - 25) % >	Tsujino <i>et al.</i> (2007)
AGRC	Silano	Reduziu	Aumentou	15% >	Tsujino <i>et al.</i> (2007)
AGRC	Abrasão/calor	Reduziu	Aumentou	(15 - 20) % >	Belin <i>et al.</i> (2013)
ARC	Moagem/calor	Reduziu	Aumentou	Nd*	Angulo <i>et al.</i> (2013)
AGRC	Carbonatação	Reduziu	Aumentou	14%<	Tenório (2016)

Fonte: Autor (2020)

*Nd – Não definido

Como se verifica no Quadro 2.8, os tratamentos indicados foram eficientes na redução do percentual de argamassa presa aos agregados naturais, o que pode ser constatado pela redução da porosidade dos agregados reciclados, caracterizado pela redução da absorção de água e aumento da densidade.

Os percentuais de redução da absorção foram maiores para o tratamento com ácido, chegando a valores superiores a 65% (ISMAIL; RAMLI, 2013). As reduções menores ocorreram nos tratamentos de carbonatação e com óleo mineral (TSUJINO *et al.*, 2007; TAM *et al.*, 2007; TENÓRIO, 2016).

Como consequência das melhorias das propriedades dos AGRC tratados, foi possível a obtenção de concretos com resistências à compressão maiores. Entretanto os acréscimos nas resistências à compressão não foram equivalentes aos ganhos observados nas absorções e densidades.

Portanto, os tratamentos de ARC, no sentido de reduzir a sua porosidade tem se mostrado eficiente. No entanto foi observado que os tratamentos apresentados de um modo geral apresentam dificuldade de execução, além de impacto ambiental. Além disso, se verificou que são processos de tratamentos que apresentam deficiência de execução em larga escala, devido à dificuldade de controle das variáveis dos processos.

Tavares; Carvalho (2009) fizeram um estudo de desgaste em agregados graúdos naturais sob efeito do tratamento em moinho de bolas (MB). Chegaram à conclusão que este fenômeno pode ser explicado por uma equação diferencial de primeira ordem (EDO). Esse trabalho descreveu as equações que envolvem as energias do processamento e os diâmetros das partículas, apoiados nos estudos de Austin *et al.*, (1982).

Conforme observado na literatura existem alguns estudos onde foi utilizado o equipamento de abrasão LA, como um MB, no tratamento de desgaste de AGRC. O Quadro 2.9 apresenta um resumo dos trabalhos pesquisados.

Quadro 2.9: Pesquisas com tratamento de agregados no moinho de bolas (MB)

Autor	Título	Atividade
RAJAMANI; HERBEST (1990)	Optimal control of a ball mill grinding circuit-i. grinding circuit modeling and dynamic simulation	Sugestão de Equação diferencial (tratamento de minérios)
ABDELLAOUI; GAFFET (1994)	Mechanical alloying in a planetary ball mill: mathematical treatment	Energia cinética envolvida no MB planetário, definição da potência de choque em MB planetário
CHATTOPADHYAY <i>et al.</i> , (2000)	A mathematical analysis of milling mechanics in a planetary ball mill	Análise matemática e física do movimento do MB planetário. (Tratamento de minérios)
TAVARES; CARVALHO (2009)	Modeling breakage rates of coarse particles in ball mills	Sugere Equação diferencial de 1ª ordem para definir a taxa de quebra do agregado graúdo. Cálculo de energia e forças envolvidas no sistema MB
DILBAS, H. <i>et al.</i> , (2019)	Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method	Tratamento no MB do ARC, modelo do equipamento de abrasão LA. Análise de rotações e quantidade de bolas diferentes. Substituição de até 60% do AR.

Fonte:Autor (2020)

Como se observa nos trabalhos citados no Quadro 2.9, o trabalho desenvolvido por Dilbas *et al.*, 2019 merece destaque tendo vista que os pesquisadores desenvolveram ampla pesquisa de tratamentos de AGRC no MB, equipamento usado no ensaio de abrasão LA.

Neste trabalho foram variadas o número de rotações do equipamento entre 100 a 500 rotações com variação constante de 100 rotações. Foi variado também a quantidade de esferas, entre 2 a 12, com variação de 2 esferas. Esses tratamentos foram empregados em AGRC em duas faixas granulométricas entre 4 mm a 11 mm e 11,2 mm e 22,4 mm. Os resultados obtidos na redução da porosidade dos agregados foram satisfatórios chegando a uma redução de

absorção de duas vezes, entre o agregado tratado e não tratado. O acréscimo na densidade foi $1,68 \text{ g/cm}^3$ para $2,49 \text{ g/cm}^3$.

Concretos obtidos com agregados reciclados tratados numa substituição de 60% do AGN, obteve uma resistência à compressão 38% superior em relação ao concreto com agregado graúdo reciclado não tratado.

Conforme as pesquisas apresentadas, se observa que existe uma possibilidade importante do aproveitamento do dispositivo de ensaio de abrasão LA, para ser usado como instrumento de tratamento do AGRC.

As análises dos estudos no MB permitem concluir que a energia empregada pelo equipamento pode ser controlada com o uso do tempo de tratamento, de modo a não proporcionar a destruição completa dos agregados, provocando apenas o desgaste da sua superfície.

2.5 Considerações finais

Os fenômenos físicos abordando as trocas de energias e os esforços atuantes nas partículas do AGRCT, nos tratamentos do AGRC não foram objetivos do presente trabalho. As análises apresentadas nesse estudo correspondem a identificação dos percentuais de geração de AGRCT por meio de formulação numérica, baseada nos resultados experimentais.

Dessa forma, foi observado que existem lacunas que precisam ser preenchidas por novas pesquisas de tratamento de AGRC, com o controle dos tempos de tratamentos com a quantidade de esferas fixas, de modo que as respostas possam ser implementadas em tratamentos em escala industrial. Uma dessas respostas é identificar a forma como as variáveis de um processo de tratamento mecânico influenciam nas propriedades físicas do AGRC.

Diante do foi pesquisado, o presente trabalho apresenta uma proposta de método de tratamento no sentido de responder perguntas sobre métodos de tratamento mecânico e as propriedades físicas do AGRC obtidos com esse processo. Assim, foram desenvolvidos métodos de tratamentos mecânico no moinho de bolas (MB). Nestes tratamentos propostos o tempo foi considerado como a variável de controle.

Este modelo de tratamento proposto, diferentemente dos pesquisados, pode ser usado como parte integrante de um processo de produção industrial de AGRCT, em larga escala, para uso em concretos com fins estrutural.

A verificação dos comportamentos dos AGRC e AGRCT em concretos foram realizadas com a aplicação em CAA e em concretos convencionais (CC).

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

3.1 Programa experimental desenvolvido na pesquisa

O programa experimental, desenvolvido para o atendimento ao objetivo do estudo, que consiste no tratamento de agregados graúdos reciclados de concreto (AGRC), pelo método de desgaste por moinhos de bola (MB), gerando agregados graúdos reciclados de concreto tratados (AGRCT), estes com melhores propriedades físicas que as dos AGRC, para aplicação em concretos com fins estruturais, foi dividido em três fases:

- Primeira fase, denominado de estudo 1, apresentado no capítulo 3, consistiu na obtenção e caracterização do agregado graúdo reciclado de concreto (AGRC) e de seu tratamento por meio de moinho de bola (MB), gerando o AGRCT. Para este estudo, foram realizadas as seguintes etapas: seleção do resíduo de concreto (RC); processo de beneficiamento do RC, geração de agregado reciclado de concreto (ARC); obtenção do agregado graúdo reciclado (AGRC); caracterização do AGRC; método de tratamento proposto (Equipamento e fundamentação teórica); tratamento do AGRC e obtenção do AGRCT. Nesta fase, o agregado graúdo natural (AGN) também foi caracterizado.

- Segunda fase, denominado de estudo 2, apresentado no capítulo 4, foi determinada e analisada as características dos agregados graúdos reciclados de concreto tratados (AGRCT): composições granulométricas, esfericidade, índice de forma, relação de aspecto, absorção e cinética de absorção de água, densidades e percentuais de argamassa presa aos agregados naturais. Nesta fase, foram realizadas também a comparação destas propriedades físicas e morfológicas do AGRCT com as das AGRC.

Na terceira fase da pesquisa, estudo 3, apresentado no capítulo 5, os AGRC e AGRCT foram usados em dois tipos de concretos: concretos autoadensáveis (CAA) e concreto convencional (CC), sendo verificadas as suas propriedades nos estados fresco e endurecido.

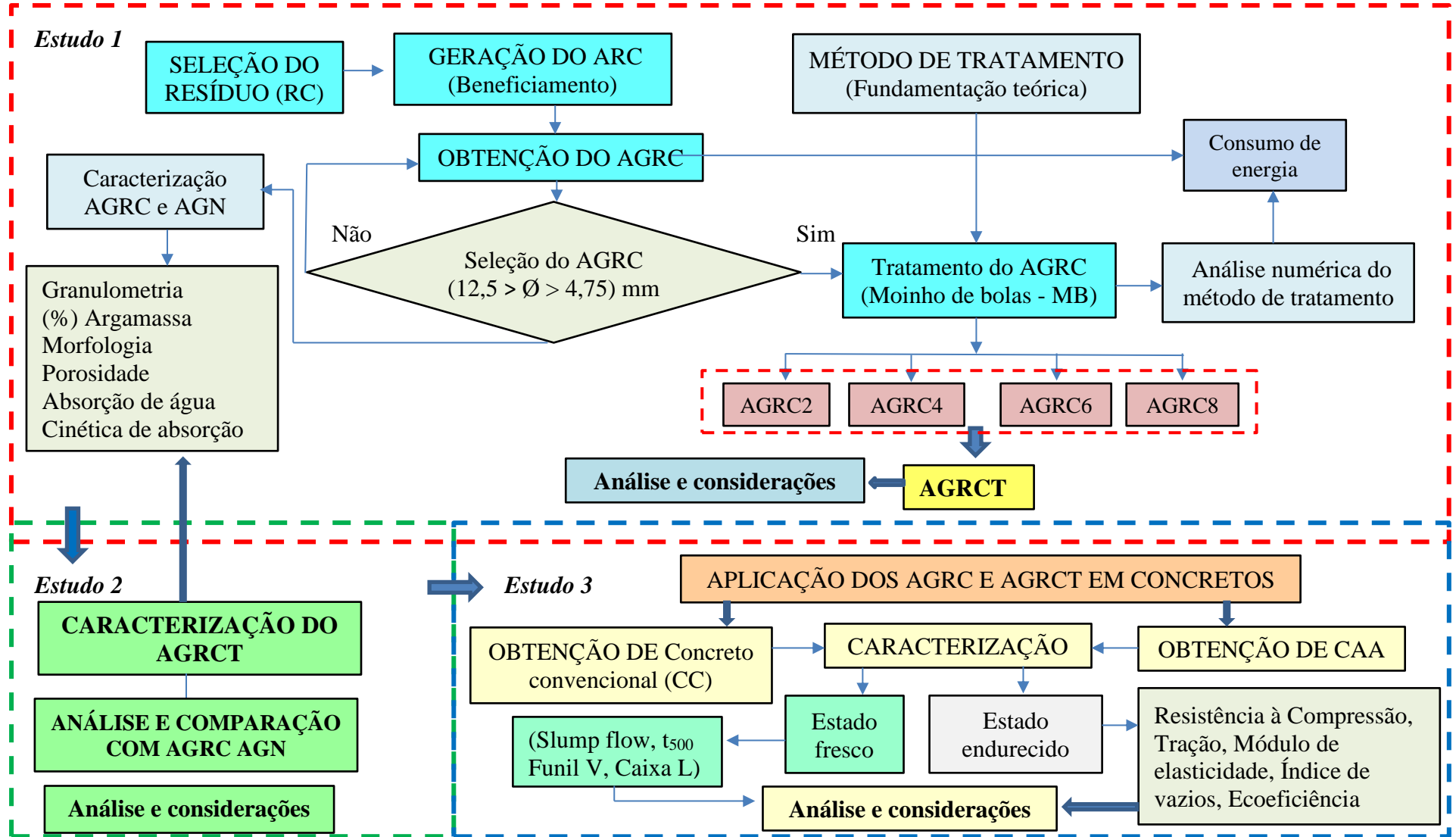
No estado fresco foram analisados os resultados dos ensaios Slump flow, t_{500} , Funil-V e Caixa L para o CAA, e o do abatimento para o CC.

Considerando o estado endurecido foram determinadas as resistências à compressão, à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e o índice de vazios, para ambos concretos.

A eficiência dos tratamentos foi verificada com as análises estatísticas, usando ANOVA e correlação de Pearson. Foram realizados estudos de ecoeficiência dos concretos, tendo como referência as resistências à compressão e os custos de energia na obtenção e tratamentos dos

AGRC e AGRCT. O resumo do desenvolvimento da presente pesquisa, desenvolvida no laboratório de materiais da Universidade Federal de Alagoas (LEMA/UFAL), está apresentado no fluxograma da Figura 3.1.

Figura 3.1 - Fluxograma do desenvolvimento da pesquisa



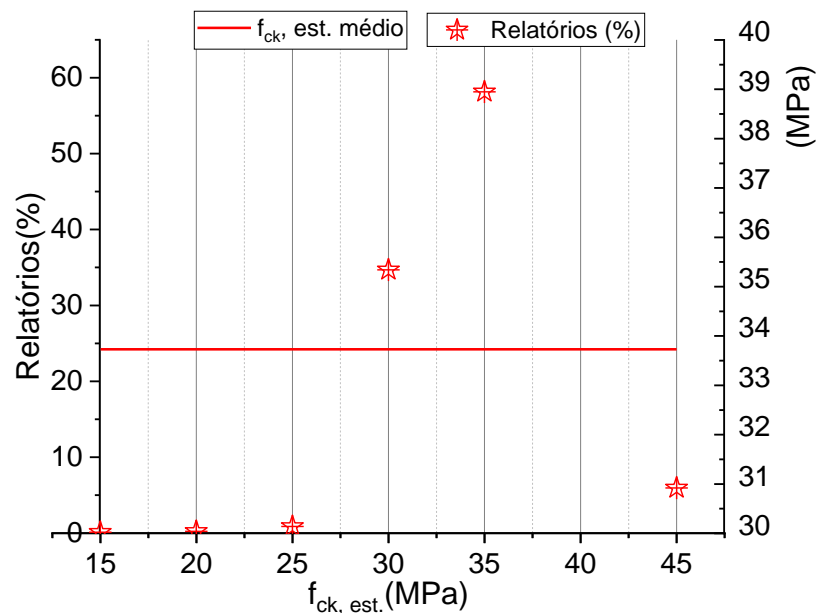
Fonte: Autor (2020)

3.1.1 Geração do agregado reciclado de concreto

A obtenção do agregado reciclado de concreto (ARC) teve como ponto inicial a seleção do resíduo de concreto (RC). O RC usado nessa pesquisa foi obtido de corpos de prova (cp) cilíndricos de concreto, com 10 cm de diâmetro e 20 cm de altura, provenientes de construtoras estabelecidas no estado de Alagoas, originados do controle tecnológico do concreto de obra, este realizado pelo LEMA/UFAL.

Os resíduos de cp, após o ensaio de rompimento por compressão, foram armazenados e nas idades entre 60 e 720 dias foram utilizados. As resistências à compressão dos cp determinadas durante os ensaios de rompimento foram obtidas de relatórios do LEMA/UFAL e estão apresentadas na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Dados de relatorios das resistências a compressão dos cp que originaram o resíduo de RC



Fonte: Adaptado de Silva (2014)

Foram analisados uma amostra de 908 dados, onde os cp foram classificados em seis grupos de $f_{ck, est.}$ entre 15MPa e 45 MPa. Os percentuais de cp de concretos com $f_{ck, est.}$, de 15 MPa, 20 MPa e 25 MPa somados apresentaram percentual inferior a 2 %.

As resistências de 30 MPa e 35 MPa totalizaram cerca de 93% do total dos cp usados como RC. A resistência média estimada dos cp, definida pela média aritmética ponderada foi de 33,73 MPa, Figura 3.2.

O processo de beneficiamento do RC foi iniciado pela cominuição do resíduo. Porém, antes da produção do ARC pelo processo de cominuição, foi realizada a análise dos britadores disponíveis de mandíbula e de impacto, no sentido de verificar qual dos dois é mais adequado para produzir maior quantidade de agregado graúdo. O primeiro funciona por mandíbula de esmagamento e o segundo por impacto de martelos. Nesta avaliação, ambos foram ajustados para obtenção de agregados com dimensão máxima de 20 mm e com a mesma quantidade de RC. A Figura 3.3 mostra o RC usado no estudo e os britadores de mandíbula e de martelos, respectivamente.

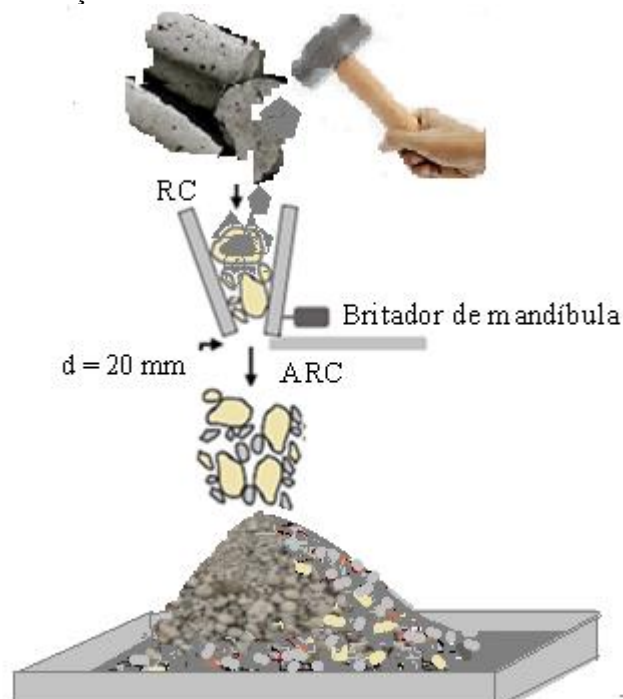
Figura 3.3 – Fotos do RC, do britador de mandíbulas e o de martelos.



Fonte: Autor (2020)

No processo de cominuição, antes de inserir o RC nos britadores, foram usadas marretas para a redução do tamanho do RC, no sentido de facilitar o seu esmagamento como mostra o exemplo do britador de mandíbulas, apresentado na Figura 3.4.

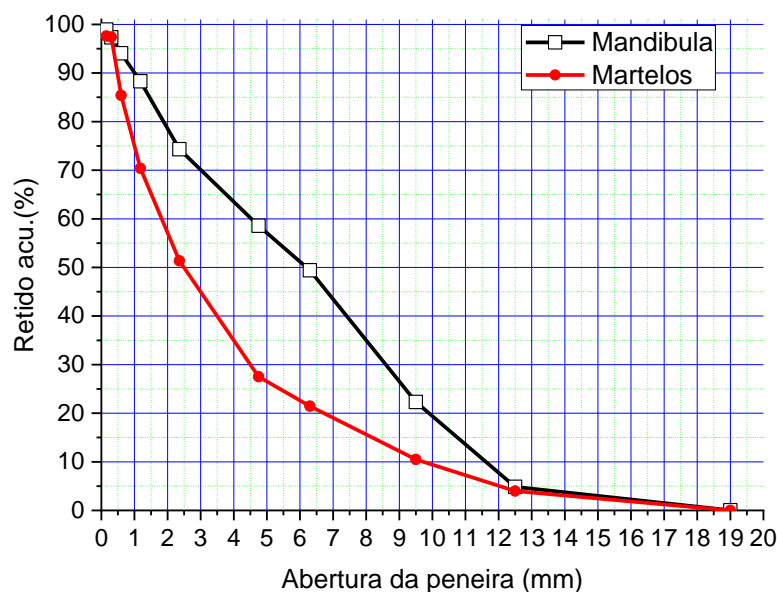
Figura 3.4 - Processo de cominuição do RC no britador de mandíbulas



Fonte Autor (2020)

Após o processamento do RC com os britadores foi constatado que a cominuição efetuada pelo equipamento de mandíbula, com abertura de 20,00 mm, gerou menos agregados miúdos, ou que resultou em uma maior quantidade de AGRC, como evidenciado na Figura 3.5 e resultados apresentados na Tabela A1 (Apêndice A). Portanto, a partir dos resultados, foi constatado que o britador de mandíbula foi mais eficiente na geração de AGRC, conforme confirmado na literatura (HANSEN; NARUD, 1983, TSENG, 2010).

Figura 3.5 - Comparação entre os britadores na geração do ARC



Fonte: Autor (2020)

A regulação do britador de mandíbula para produção do ARC, é definida de acordo com a abertura das mandíbulas e pode ser regulada de acordo com a especificação do fabricante como mostra o Quadro 3.1, onde se observa também a produção de ARC, em função da perícia do operador.

Quadro 3. 1: Produção de AR do britador de mandíbula

Abertura da boca (mm)	6,0	12,0	20,0	25,0
Produção (m ³ /hora)	0,8 - 1,0	1,0 - 2,0	2,0 - 3,0	3,0 - 4,0

Fonte: Manual do equipamento – Britadores de Mandíbulas – FURLAN BM2010.

No presente estudo foram adotados os parâmetros de 20,0 mm para a abertura da mandíbula do britador e a produção de ARC de 2 m³/hora, para definir o custo de produção dos AGRC

Com a abertura da mandíbula de 20 mm foram produzidos 58,53% de AGRC com diâmetros entre 4,75 mm e 12,50 mm; superior à porcentagem do AMRC, que ficou próximo de 18% como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3. 1: Percentuais obtidos de ARC – mandíbula com abertura de 20,0 mm

Amostras	AGRC	AMRC	Filer
	(4,75 < Φ < 12,5) mm	(4,75 > Φ > 0,15) mm	(Φ < 0,15) mm
1	58,65	18,42	0,08
2	60,69	18,11	0,05
3	56,24	17,34	0,07
Média	58,53	17,9	0,08
Dp	2,23	0,56	0,01
Cv (%)	3,81	3,11	9,43

Fonte: Autor (2020)

Cerca de 23,47% em média dos AGRC apresentaram $D_{m\acute{a}x} > 12,50$ mm, sendo recolocado no britador para redução do seu tamanho.

Obtidos os AGRC estes foram armazenados em quatro depósitos de 500 kg, para serem submetidos à caracterização e aos tratamentos no moinho de bolas (MB).

3.2 Caracterização do agregado graúdo reciclado de concreto

As propriedades físicas do AGRC e AGN determinadas foram: granulometria; morfologia; percentual de argamassa (exceto para o AGN); resistência à abrasão “Los Angeles”; densidade; absorção de água; porosimetria por injeção de mercúrio e cinética de absorção de água. O Quadro 3.2 apresenta os ensaios e a metodologia, com as respectivas normas usada na caracterização dos agregados. Os ensaios foram realizados no laboratório de materiais da Universidade Federal de Alagoas (LEMA/UFAL).

Quadro 3. 2: Métodos de ensaios e normas usadas para a caracterização dos agregados

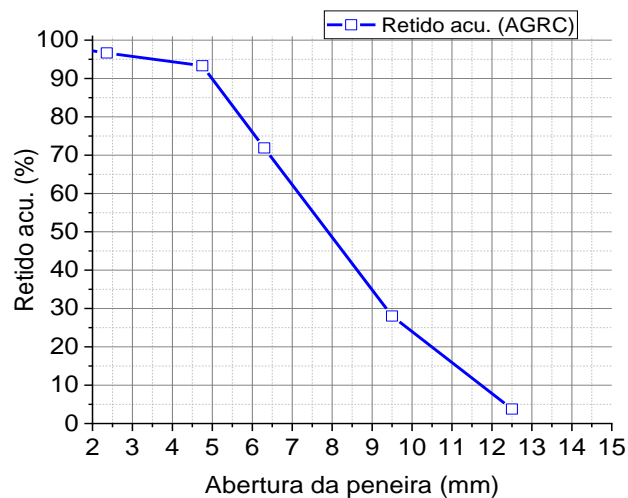
Ensaio (AGRC e AGN)	Normas
Granulometria	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
$D_{m\acute{a}x}$ e Módulo de finura	NBR 7211 (ABNT, 2003)
Densidade	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Absorção de água	NBR NM 53 (ABNT, 2009)
Índice de forma	NBR 7809 (ABNT, 2019)
Fator de aspecto e Esfericidade (Camsizer)	ISO/13322-2/06 (ISO, 2006).
Esfericidade	Equação de Krumbein
Percentual de argamassa	Visual (proposto) HCl (33%)
Cinética de absorção de água	Análise numérica - Equação proposta

Fonte: Autor (2020)

3.2.1 Granulometria

Os resultados dos ensaios da composição granulométrica do AGRC e AGN estão apresentados na Figura 3.6 e 3.7, e os dados dos ensaios de granulometria são mostrados nas Tabelas A2 e A3, Anexo A, respectivamente, sendo consideradas as amostras de 5,0 kg, obtidas por quarteamento.

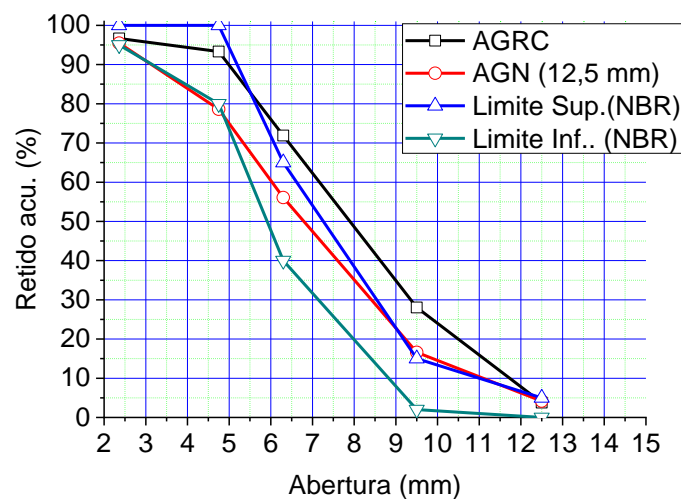
Figura 3.6 - Composição granulométrica do AGRC



Fonte: Autor (2020)

Como se pode observar na Figura 3.6, cerca de 95% dos AGRC tem tamanhos superiores a 4,75 mm. Aproximadamente 25% dos agregados tem diâmetros entre 9,50 mm e 12,50 mm, 50% tem diâmetro entre 6,30 mm e 9,50 mm e cerca de 20% entre 4,75 mm e 6,30 mm.

Figura 3.7 - Granulometria do AGRC, AGN e os limites da NBR NM 248:2003



Fonte: Autor (2020)

Dando prosseguimento a análise granulométrica do AGRC e comparando com a do AGN (12,50 mm), material comercial encontrado no mercado, verifica-se que a curva granulométrica do AGRC teve um comportamento diferente ao do AGN, como mostra a Figura 3.7.

Esses dois agregados apresentam curvas granulométricas paralelas entre as peneiras de abertura 4,75 mm e 9,5 mm, porém o AGRC na parte mais fina ($< 5,5$ mm) se apresenta dentro dos limites determinados pela NBR NM 248 (ABNT, 2003) e fora na parte mais grossa ($> 5,5$ mm), enquanto que o AGN obedece os limites da norma.

O resumo dos parâmetros granulométricos do AGRC e do AGN estão apresentados na Tabela 3.2.

Tabela 3. 2: Características da granulometria do AGRC (12,5 mm) produzido no britador de mandíbulas

AGN	Módulo de finura (M. F)	5,90
	Diâmetro máximo característico (Dmáx.)	12,50 mm
AGRC	Módulo de finura (M F)	6,18
	Diâmetro máximo característico (Dmáx)	12,50 mm

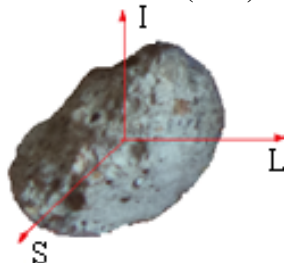
Fonte: Autor (2020)

3.2.2 Morfologia

Na investigação dos parâmetros de forma do AGRC empregou-se o paquímetro digital, baseado na NBR7809 (ABNT, 2005), o método de processamento digital de imagens (PDI) usando o Camsizer-L, de acordo com a ISSO/13322-2/06, e a equação de Krumbein (1941).

Na aplicação da equação proposta por Krumbein (1941), foi usado o modelo tridimensional apresentado na Figura 3.8.

Figura 3.8 - Medidas usando o modelo de Krumbein (1941)



Fonte: Adaptado de Krumbein (1941)

Os resultados da caracterização de forma do AGRC estão apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3. 3: Características de forma do AGRC

AGRC (12,5 mm)	Equação	Amostra1	Amostra 2	Amostra 3	Média	Dp	Cv
Esfericidade (krumbein)	$\sqrt[3]{\frac{L \cdot I \cdot S}{L^3}}$	0,65	0,76	0,71	0,70	0,05	7,83
Índice de forma NBR7809 (ABNT, 2005)	$\frac{L}{l} = \frac{c}{e}$	1,85	1,75	1,65	1,75	0,12	5,71
Fator de aspecto (Camsizer-L)	$\frac{b}{l} = \frac{X_{\min}}{X_{\max}}$	0,72	-	-	0,72		
Esfericidade (Camsizer-L)	$Esf. = \frac{4 \cdot \pi \cdot A}{P}$	0,81			0,81		

Fonte: Autor (2020)

Os resultados obtidos da esfericidade obtidos com Camsizer apresentaram valor maior que o uso da Equação de Krumbein, devido à dificuldade de identificação das medidas usando o paquímetro digital. Por sua vez, os valores do índice de forma e do fator de aspecto são compatíveis, observando-se que o fator de aspecto é o inverso do índice de forma. Foi possível observar com esses resultados, que os valores obtidos com o uso do método de PDI apresentaram resultados mais consistentes em relação ao método usando o paquímetro, tendo em vista a interferência do operador. Observou-se ainda que a relação de aspecto obtida pelo PDI é o inverso do índice de forma definido pela NBR7809 (ABNT, 2005).

Resultados obtidos por Mendes (2016) para agregados graúdos reciclados de blocos de concreto, usando o mesmo método de obtenção dos agregados, foi de 0,79 para a esfericidade e 0,68 para a relação de aspecto. Silva *et al.* (2015) encontraram 0,73 para a relação de aspecto com o PDI e 0,75 com uso do paquímetro. As esfericidades foram 0,83 com o PDI e 0,63 com o paquímetro, usando a equação de Krumbein (1941).

O AGRC apresentou forma predominante cúbica nas faixas 9,5 – 12,5 mm, com índice de forma de 1,75, sendo considerado adequado para concreto de acordo com a NBR7809 (ABNT, 2005)

3.2.3 Percentual de argamassa

A determinação do percentual de argamassa presa aos AGRC é importante porque esse percentual tem grande influência nas propriedades físicas desses agregados. Assim, esse percentual foi determinado usando dois métodos: o visual, por ser um ensaio rápido e de custo e impacto ambiental baixos ou insignificante, e o com uso de ácido clorídrico (HCl), com

concentração de 33%. Este último se mostrou eficiente em vários estudos (ANGULO, 2005; TAM *et al.*, 2007; GOMES *et al.*, 2015).

A caracterização visual foi realizada com o uso de lupas com lentes de aumento de até 3 vezes, em duas amostras do material. O AGRC é um material heterogêneo constituído de três fases visíveis: agregado natural, agregados de argamassa e agregados mistos, como mostra a Figura 3.9.

Figura 3.9 – Apresentação do AGRC 12,5 mm usado para a análise do percentual de argamassa presa



Fonte: Autor (2020)

Nesta investigação foi possível identificar de forma simples, os percentuais de argamassa presa ao agregado natural de uma amostra representativa, obtida de acordo com a NBR7809 (ABNT, 2005), tendo em vista a inexistência de uma norma específica para esse ensaio.

Os agregados mistos se constituem de agregado natural com argamassa presa na sua superfície em proporções diversas como mostrado na Figura 3.9. Além das três fases visíveis tem a zona de transição interfacial (ZTI), que limita o agregado natural da argamassa.

O percentual de argamassa de cada agregado foi identificado dividindo-o em quadrantes. Dessa forma se estimou os percentuais de argamassa presa de cada um, como mostra a Figura 3.10.

Figura 3.10 - Detalhe do método usado na caracterização visual do AGRC



Fonte: Autor (2020)

Os valores dos percentuais foram calculados usando-se uma planilha, onde se determinou os percentuais médios de agregados naturais e de argamassa presa ao agregado natural, considerando o volume desses componentes. A Tabela 3.4 mostra o critério matemático usado nessa caracterização.

Tabela 3. 4: Planilha usada na caracterização visual do AGRC.

N_i	(1) n° A	(2) n° AA	(3) n° AM	(4) (%) Argamassa
1	A_1	AA_1	AM_1	$(\%)_1$
2	A_2	AA_2	AM_2	$(\%)_2$
...
200	A_n	AA_n	AM_n	$(\%)_n$
Total	$\Sigma (1)$	$\Sigma (2)$	$\Sigma (3)$	M

Fonte: Autor (2020)

Os parâmetros analisados na Tabela 3.4 foram identificados como:

N_i - número de agregados = 200, NBR7809(ABNT, 2005); (n° A) - Agregados 100% natural; (n° AA) - Agregados 100% de argamassa; (n° AM) - Agregados mistos; (M) - Média dos percentuais de argamassa.

Os percentuais de agregados naturais (A), representado por % ($\Sigma 1$); o percentual de agregados de argamassa, (%) AA($\Sigma 2$) e o percentual de agregado misto, (%) AM($\Sigma 3$) foram calculados com a Equação (3.1).

$$(\%) = \frac{(\Sigma)}{200} \cdot 100 \quad (3.1)$$

Com a quantidade total de agregados mistos e do percentual médio de argamassa (M) determinou-se o número de agregados equivalentes de argamassa (AEA), com a Equação (3.2).

$$AEA = \frac{100}{M} \quad (3.2)$$

Os percentuais totais de argamassa e rocha presentes nas amostras de AGRC foram determinados pelas Equações (3.3) e (3.4), respectivamente.

$$(\%)Argamassa = (\%)\Sigma(2) + \frac{(\Sigma 3) \cdot 100}{(AEA) \cdot 200} \quad (3.3)$$

$$(\%)Rocha = 100 - (\%)Argamassa \quad (3.4)$$

O resultado da caracterização visual do AGRC, considerando o valor médio para duas amostras, está apresentado na Tabela 3.5.

Tabela 3. 5: Composição do AGRC (12,5 mm) – Método visual

Caracterização visual	Média (%)	Argamassa (%)	Natural (%)
Agregado natural	32,55	0,00	32,55
Agregado de argamassa	30,00	31,8	0,00
Agregado misto	33,85	16,45	19,25
Média	100,00	48,25	51,8
Des. Padrão		4,17	
Cv		8,65	

Fonte: Autor (2020)

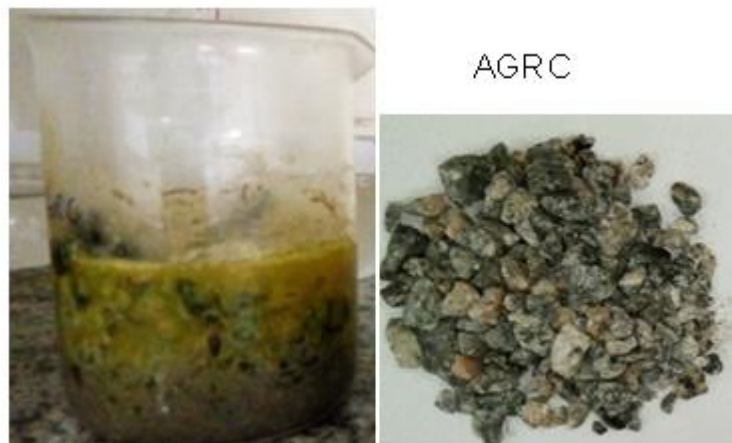
Realizada a ponderação dos dados obtidos das amostras, se chegou à conclusão que o percentual médio de argamassa para as duas amostras do AGRC foi de 48,25%.

Este ensaio apresenta limitação devido à dificuldade da identificação dos percentuais de argamassa nos agregados mistos. Entretanto é um ensaio rápido e de baixo custo que pode ser útil para uma determinação preliminar do teor de argamassa presa aos AGRC.

Dando prosseguimento a essa investigação, foi realizada a análise do percentual de argamassa com tratamento por meio de ataque de ácido clorídrico (HCl).

A determinação do percentual de argamassa usando o tratamento de HCl é mais preciso em relação ao método visual, tendo em vista que com o uso do ácido libera-se todo o material cimentício, extraído através da reação química e lavagem, ficando apenas o agregado natural, como mostra a Figura 3.11.

Figura 3.11 - AGRC no tratamento com HCl



Fonte: Autor (2020)

Foram realizados dois ciclos de ataque de 24 horas e em seguida realizada a lavagem em peneira de 2,36 mm, lavado em água corrente para remover toda argamassa presa no AGRC. O percentual de argamassa e de agregado natural foi determinado de acordo com as Equações (3.5) e (3.6).

$$(\%)Argamassa = 100 - (\%)AGN \quad (3.5)$$

$$(\%)AGN = \left(\frac{M_t - M_{arg.}}{M_t} \right) \cdot 100 \quad (3.6)$$

A massa de argamassa da Equação (3.6) é calculada da diferença entre a massa total da amostra menos a massa de agregado graúdo natural, após o ensaio. Os resultados dos percentuais de argamassa do AGRC com o uso de ácido, considerando o valor médio para duas amostras, estão apresentados na Tabela 3.6.

Tabela 3. 6: Resultados de ataque ácido com HCl em amostras AGRC

Tratamento com (HCl)	Argamassa (%)	Natural (%)
Amostra 1	45,06	54,94
Amostra 2	42,54	57,46
Média	43,8	56,2
Des. Padrão	1,78	1,78
Cv	4,07	3,17

Fonte: Autor (2020)

A diferença entre os resultados dos percentuais de argamassa determinado pelo método visual e com o uso de ácido foi de 4,30%, indicando um percentual menor de argamassa no ensaio com o uso de ácido.

A diferença observada entre os métodos foi pequena, significando que o ensaio de determinação visual do percentual de argamassa é um ensaio útil e tem impacto ambiental inexistente.

Portanto, o método visual pode ser útil em uma caracterização inicial, tendo em vista que é uma operação simples e tem custos financeiro e ambiental desprezíveis em relação ao uso de ácido.

Os resultados encontrados por Hansen; Narud (1983); Juan; Gutiérrez (2009), como também por Tseng (2010) para AGRC com diâmetros entre 4 mm e 16 mm ficou entre 23% e 44%.

3.2.4 Resistência à abrasão “Los Angeles”

O ensaio de resistência ao desgaste por abrasão “Los Angeles” (LA) é realizado de acordo com a norma NBRNM 51 (ABNT, 2001). Os resultados dos ensaios para o AGRC foram determinados em duas amostras, cujos resultados estão apresentados na Tabela 3.7.

Tabela 3.7: Resultados dos percentuais de perdas nos ensaios de abrasão LA

Agregados	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Média (%)	Dp	Cv
AGRC	40,05	41,4	40,73	0,95	2,34
AGN (Brita)	34,5	35,4	34,95	0,64	1,82

Fonte: Autor (2020)

O valor encontrado para o índice de abrasão médio do AGRC foi de 40,73%, inferior ao limite estabelecido pela NBR 7211(ABNT, 2009). Conforme estudos de desgaste por abrasão LA de AGRC, com diâmetros entre 8 mm e 16 mm realizados por Hansen; Narud (1983), encontraram valores de 38% para concreto de alta resistência, 39% para média e baixa resistências. O RC usado neste trabalho, de acordo os relatórios de ensaios, cujo resumo está apresentado no Quadro 3.2, indica que a origem dos cdp foram de concretos com resistência média. Os resultados dos ensaios de abrasão LA dos agregados naturais com a granulometria próxima a do AGRC, spresentou um valor médio de perdas de 34,95 %. Como se observa a resistência à abrasão apresentada pelo AGRC é menor que a do agregado natural, o que significa maior percentual de perdas no ensaio.

3.2.5 Densidade e absorção de água

O resumo dos resultados obtidos das densidade e absorção de água do AGRC está apresentado na Tabela 3.8, considerando os valores médios de três ensaios, realizados de acordo com a NBR NM53 (ABNT, 2003).

Tabela 3. 8: Resultado da densidade e absorção de água do AGRC.

	M_{sss}	M_{sub}	d_a	d_{sss}	d_r	A
Ensaio	(g)	(g)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(%)
1	2122,00	1216,08	2,21	2,34	2,55	6,1
2	2099,20	1200,40	2,23	2,34	2,50	4,96
3	2119,20	1184,80	2,14	2,27	2,45	5,96
Média	2113,48	1200,44	2,18	2,30	2,51	5,67
Dp			0,04	0,04	0,05	0,62
Cv			2,04	1,77	1,95	10,95

Fonte: Autor (2020)

Como se observa a d_a é a menor das densidades, pois considera os poros dos agregados. Em relação a absorção de água do AGRC, o valor médio obtido no ensaio de massa saturada com a superfície seca foi de 5,67%.

A análise dos resultados encontrados na literatura, indicam que o resultado obtido para a absorção de água média do AGRC usado nesse trabalho, está coerente com os resultados encontrados em estudos já realizados.

Visando um aprofundamento da investigação dessa propriedade devido a sua importância, tendo em vista que a porosidade aberta controla as propriedades físicas dos agregados reciclados, foi realizado o ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio no AGRC.

3.2.6 Porosimetria por injeção de mercúrio

O ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio do AGRC foi realizado no laboratório da USP. Este ensaio foi usado para a determinação das suas propriedades físicas com o objetivo de confirmar as propriedades de absorção de água e das densidades, tendo em vista que esse é um ensaio mais preciso. O resumo dos resultados obtidos neste ensaio consta na Tabela 3.9.

Tabela 3. 9: Resultados dos parâmetros físicos do AGRC no ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio

CARACTERÍSTICAS	AGRC
Volume total de Hg introduzido (ml/g)	0,057
Área de superfície específica (m ² /g)	4,522
Diâmetro médio dos poros (nm)	50,400
Diâmetro mediano dos poros (nm)	120,950
Densidade aparente (na pressão de enchimento utilizada) – g/ml	2,208
Densidade real pelo método (na pressão final utilizada) – g/ml	2,526
Porosidade (%)	12,570

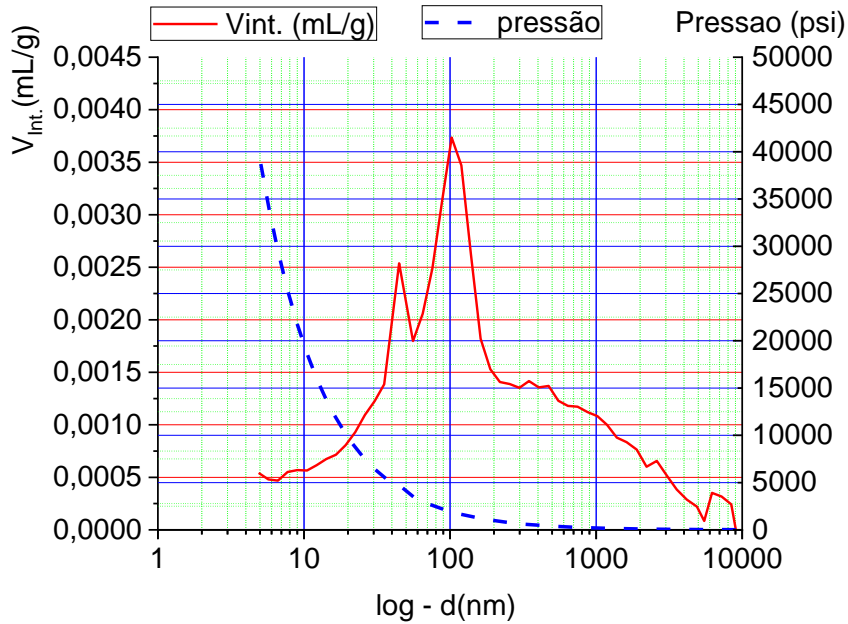
Fonte: Laboratório USP (2019)

Esses resultados mostram que a densidade aparente do AGRC foi de 2,21 g/cm³ e densidade real de 2,52 g/cm³, apresentando uma porosidade de 12,57%.

Conforme estudo realizado por Angulo (2005), este encontrou porosidade de 21,40% para agregados reciclados separados por densidades entre 1,9 g/cm³ e 2,2 g/cm³, enquanto que para agregados separados por densidades entre 2,2 g/cm³ e 2,5 g/cm³ o valor foi de 7,5%.

De acordo com o gráfico apresentado na Figura 3.12, o diâmetro médio dos AGRC é de 50,40 nm, diâmetro correspondente ao volume de mercúrio introduzido quando submetido a metade da pressão máxima de ensaio equivalente a 25.000 psi.

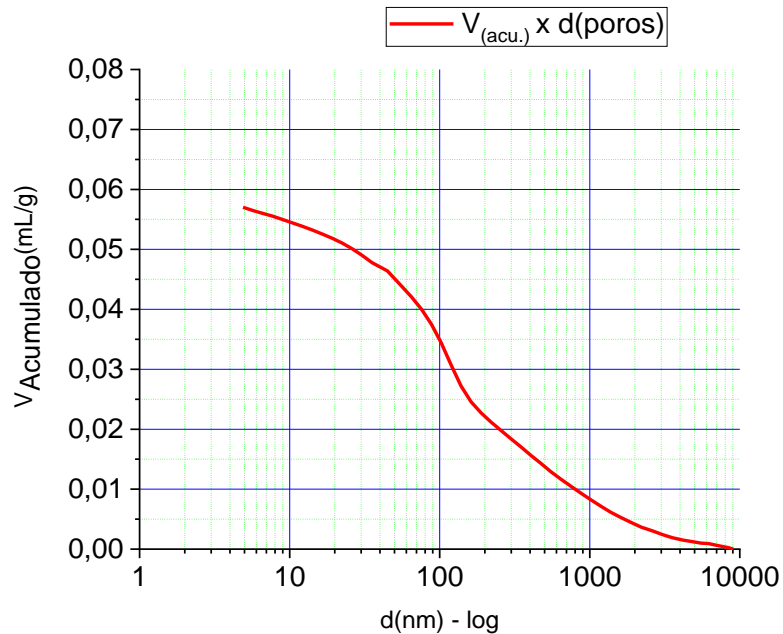
Figura 3.12 - Pressão e volume de mercúrio introduzido em função do diâmetro dos poros



Fonte Laboratório da USP (2020)

Os resumos dos resultados do ensaio de porosimetria por injeção de mercúrio do AGRC estão representados nas Figuras 3.12 e 3.13.

Figura 3.13 - Volume de mercúrio acumulado em função do diâmetro dos poros



Fonte: Laboratório da USP (2020)

Observa-se a partir do gráfico das Figuras 3.12 e 3.13 que 50 % dos poros abertos desse agregado têm diâmetros superiores a 100 nm, que são os poros acessados pela água.

A análise comparativa desses resultados com os valores obtidos nos ensaios de absorção de água e densidades obtidos de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2003), são coerentes como mostra a Tabela 3.10.

Tabela 3. 10: Resultados de densidades determinadas por diferentes métodos

Ensaio (NBR NM 53: 2002)		Ensaio (Porosimetria)	
d_a	d_r	d_a	d_r
(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)	(g/cm ³)
2,18	2,51	2,21	2,53

Fonte: Autor (2020)

Como se observa nos resultados apresentados na Tabela 3.10, a diferença entre os valores das densidades aparentes obtidas pelo método da NBR NM 53 (ABNT, 2003) e por injeção de mercúrio foi inferior a 1,5%, e a diferença entre as porosidades foi de 3,90%.

3.2.7 Cinética de absorção de água

O ensaio de cinética de absorção realizado no AGRC usou o mesmo dispositivo usado para determinar a absorção de água para agregados graúdos a NBR NM 53 (ABNT, 2003), com algumas mudanças.

Nestes ensaios o equipamento usado foi composto de uma balança hidrostática com software para a aquisição e registro de dados, um cesto fabricado com malha metálica de abertura 75µm, a fim de evitar perda de material, e um recipiente com volume de água suficiente para que os agregados e o cesto ficassem submersos.

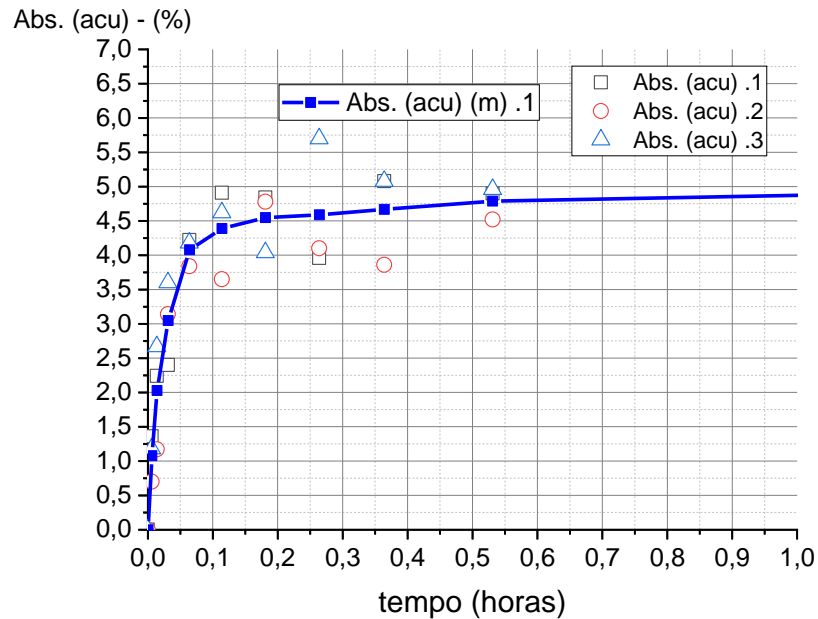
Os ensaios para as análises da cinética de absorção de água foram realizados com uma massa seca de 500,00 g para cada amostra de AGRC. As equações que demonstram os valores das absorções para cada tempo de ensaio foram calculadas usando a Equação (3.7).

$$A(\%) = \left(\frac{M_{(sub)(t)} - M_{(sub)(t-1)}}{M_S} \right) \cdot 100 \quad (3.7)$$

Os ensaios foram realizados em um tempo superior a vinte e quatro horas a fim de garantir a estabilização dos dados dos ensaios.

Os resultados obtidos estão apresentados na Figura 3.14, onde foi considerado os valores médios para três amostra, conforme apresentado no Anexo A, Tabela A5.

Figura 3.14 - Percentual de absorção de água dos ensaios das amostras

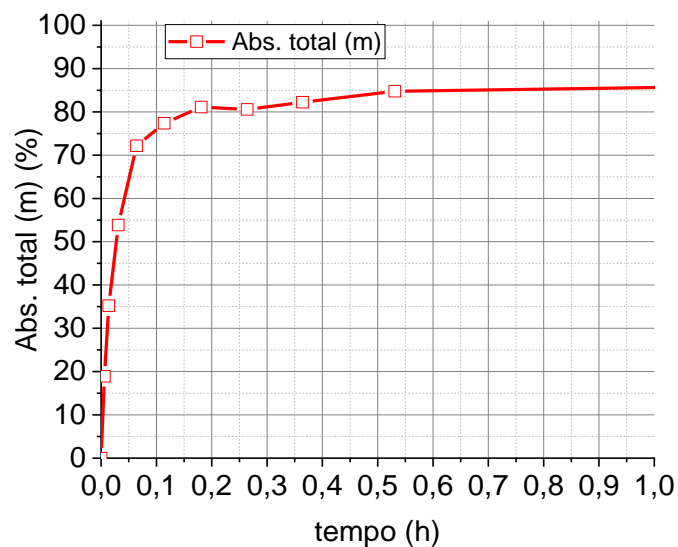


Fonte: Autor (2020)

De acordo com este gráfico se observa que os dados apresentados pelas amostras tiveram oscilação de valores, fenômeno comum neste tipo de ensaio.

Dando prosseguimento ao estudo da cinética de absorção de água, foram determinados os percentuais de absorção em relação ao percentual total do AGRC, conforme apresentado na Figura 3.15, cujos cálculos estão apresentados no Anexo A, Tabela A6.

Figura 3.15 - Percentual de absorção total



Fonte: Autor (2020)

Os resultados mostram que o AGRC absorve cerca de 80% da sua absorção total em um tempo entre 9 minutos e 10 minutos após a imersão em água.

Entretanto, não existe consenso em relação ao tempo para o AGRC atingir esse percentual de absorção.

De acordo com o resultado apresentado nesse estudo deve-se fazer uma pré molhagem do AGRC na produção de concretos de 9 minutos.

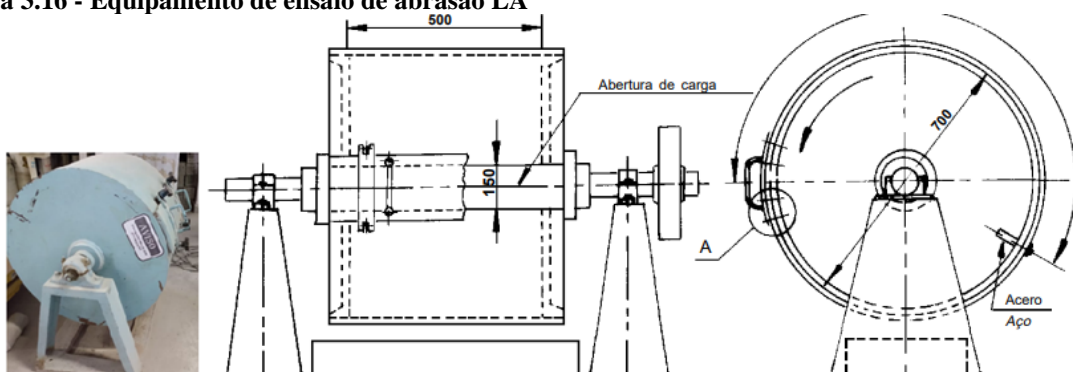
A literatura apresenta um tempo entre 7 e 16 minutos para os agregados reciclados atingirem esse percentual de absorção de água.

3.3 Método de tratamento

O equipamento usado nos tratamentos dos AGRC nesse estudo, foi o equipamento de ensaio de abrasão “Los Angeles”, chamado de moinho de bolas (MB).

Este equipamento tem uma carga abrasiva composta de 12 esferas de 48,0 mm de diâmetro com massa de 445 g e espaço interno do cilíndrico com comprimento de 0,50 m e diâmetro de 0,70 m, como mostra a Figura 3.16.

Figura 3.16 - Equipamento de ensaio de abrasão LA



Fonte: Autor (2020)

No ensaio de abrasão LA, são usados 5,0 kg de agregado graúdo e o equipamento gira 33 rpm, dando 500 rotações, o que significa um tempo de ensaio de 15,15 minutos.

Os esforços provocados pela rotação do cilindro e impacto das esferas de aço, fazem com que o material sofra desgaste na sua superfície, sem quebra das partículas.

Os fenômenos físicos que ocorrem em MB aplicados em mineração são similares aos que ocorrem no equipamento de ensaio de abrasão LA, tendo em vista que ambos são formados por um cilindro com esferas de aço no seu interior.

Ao girar o cilindro o atrito e o impacto das esferas provocam o desgaste das partículas no seu interior. No entanto, o MB usado em mineração tem dimensões e esferas menores e são usados com altas velocidades de rotação, em relação ao equipamento usado nos ensaios de abrasão LA.

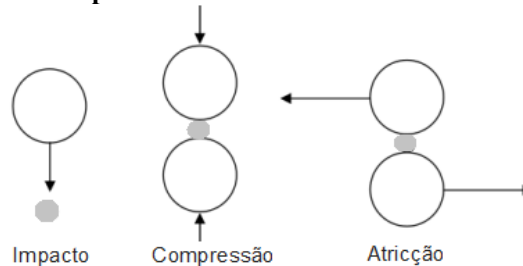
As relações físicas entre os parâmetros do sistema MB foram estudadas, sendo identificadas as relações de tensão e energia que ocorrem durante o seu funcionamento (VENKATARAMAN; NARAYAMAN, 1997; ROSENKRANZ *et al.*, 2011).

As relações cinemáticas, dinâmicas e de energia das esferas do MB de eixo vertical, chamados de planetários, também foram amplamente analisados em trabalhos de mineração (AUSTIN *et al.*, 1982; RAJAMANI *et al.*, 1991; ABDELLAOUI; GAFFET, 1995; CHATTOPADHYAY *et al.*, 2001; CHIEREGATI, 2001; TAVARES; CARVALHO, 2009).

De modo geral, os MB foram usados e estudados em laboratórios em pequena escala. Observa-se que a energia envolvida no impacto entre as bolas e o material submetido ao tratamento neste dispositivo, depende das dimensões do equipamento, do diâmetro e do material constituinte das esferas.

Dentro do MB, o contato entre as esferas e os materiais tratados são elevados. As partículas sofrem as ações por forças centrífugas e de gravidade. As ações atuantes nas partículas no sistema MB estão representadas na Figura 3.17.

Figura 3.17 - Esforços submetidas as partículas no M. B



Fonte: Chierigati (2001)

Venkataraman; Narayaman (1997), por meio de mecânica do contínuo, quantificaram a força de impacto das esferas com o uso da Equação (3.8).

$$F_i = \left(\frac{5 \cdot m}{8}\right)^{\frac{3}{5}} \left(\frac{2 \cdot r}{9 \cdot \pi^2 k^2}\right)^{\frac{1}{5}} v^{\frac{6}{5}} \quad (3.8)$$

Esta Equação é significativa porque a partir dela é possível determinar a força de impacto das esferas no MB com quaisquer dimensões e material. Nesta equação tem-se as seguintes variáveis: (m) massa da esfera, (r) raio da esfera, (k) variável definida pela Equação (3.9), (E) o módulo de elasticidade do material e (v) o coeficiente de Poisson.

$$k = \frac{(1 - \nu^2)}{(\pi \cdot E)} \quad (3.9)$$

De acordo com a Equação (3.8), as partículas de material submetidas ao choque das esferas no MB podem sofrer uma tensão superior a 1 GPa, tendo em vista que a superfície de contato é bastante pequena.

Outro aspecto importante neste processo é a quantificação da energia mecânica envolvida para a efetivação do tratamento. Este fenômeno foi analisado por Abdellaoui; Gaffet (1995), com a conclusão de que a energia mecânica acumulada liberada pelas esferas para o material durante o processo, produz uma potência de choque determinada pela Equação (3.10).

$$P_{ot} = \frac{1}{T} \int_0^T d E_k = f \cdot E_k \quad (3.10)$$

Nesta equação T é o período, E_k a energia mecânica resultante e f a frequência. A energia mecânica transferida pelo moinho ao material submetido ao tratamento é obtida da transformação contínua da energia potencial gravitacional em energia cinética.

Esta transferência de energia ao material pelo mecanismo de abrasão é caracterizada pela aplicação de esforços normais insuficientes para ruptura, ou pela aplicação de esforços cisalhantes na superfície da partícula causando fragmentação superficial.

O resultado é uma redução muito limitada de tamanho da partícula original e a geração de um grande número de partículas muito finas (ABDELLAOUI; GAFFET,1995).

3.3.1 Tratamento do agregado graúdo reciclado de concreto

Conforme já relatado na revisão bibliográfica, os tratamentos nos AGRC têm como objetivo reduzir a porosidade do AGRC retirando a parte da argamassa mais porosa presa na superfície dos agregados ou pelo preenchimento dos poros abertos, como mostra a Figura 3.18.

Figura 3.18 – Detalhe da parte de argamassa do AGRC usado.



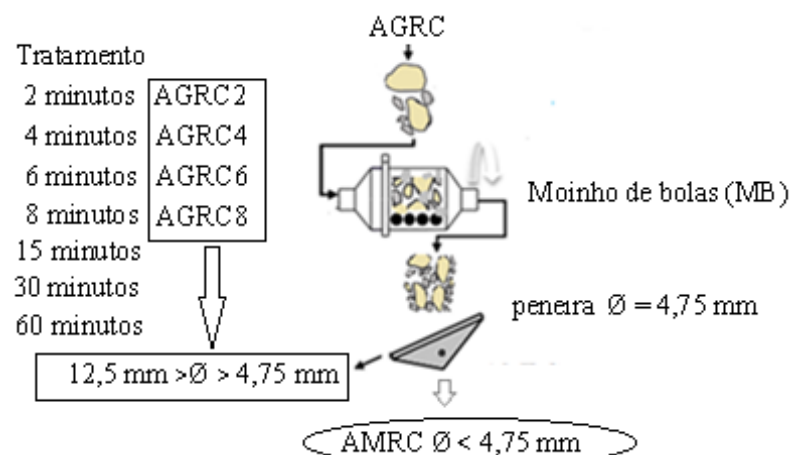
Fonte: Autor (2020)

O método de tratamento proposto neste trabalho consiste no desgaste por abrasão, usando o mesmo equipamento do ensaio de abrasão LA. Os tempos de tratamento foram definidos de acordo com um estudo inicial de desgaste, onde foi verificada a quantidade de material miúdo que foi gerado.

Os tratamentos foram realizados com amostras de massa fixa de AGRC de 5,0 kg, para todos os tempos.

Após os tratamentos os AGRC tratados (AGRCT) foram separados na peneira de 4,75 mm. Os AGRCT foram denominados de AGRC2, AGRC4, AGRC6, e AGRC8, respectivamente de acordo com os tempos de 2, 4, 6 e 8 minutos, definidos com estudos prévios, sendo considerada a variável independente, como mostra a Figura 3.19.

Figura 3.19 - Processo de tratamento de desgaste por abrasão no MB



Fonte: Autor (2020)

Os tempos usados para os tratamentos do AGRC foram definidos a partir de estudos prévios, onde se verificou que o tempo acima de 8 minutos provocava um desgaste excessivo do material e, portanto, um percentual de perdas acima do limite desejado.

O processo de transformação sofrido pelo AGRC no MB, tem dois aspectos de análise de troca de energia que devem ser considerados: a energia mecânica correspondente ao movimento das esferas e a energia responsável pelo funcionamento do equipamento.

No caso da energia mecânica decorrente do movimento das esferas, ocorre uma transformação contínua da energia potencial gravitacional em energia cinética que provoca o impacto e o atrito entre as esferas e as partículas do ARC.

O efeito físico dessa ação é detectado na redução das dimensões das partículas do AGRC. Neste sentido, esse efeito é proporcional à massa e às características do material das esferas, das dimensões do espaço físico interno do moinho, e da velocidade de rotação do MB, conforme definido por Venkataraman; Narayaman (1997), Equação (3.8).

A definição dos parâmetros de energia envolvidas no processo depende da relação entre o espaço físico e a quantidade de material processado. Este parâmetro é caracterizado pela relação entre o volume do MB e o volume de material processado, caracterizado pela relação (V/V_A). Neste caso, foram usadas massas constantes de AGRC de 5000,00g por tratamento.

Os resultados obtidos neste processo mostraram que teoricamente, os AGRCT obtidos do tratamento no MB são capazes de resistir à compressão superior a 1 GPa, como já previsto por Venkataraman; Narayaman (1997).

No tratamento definido neste trabalho, os resultados dos parâmetros de energia mecânica do processamento estão indicados na Tabela 3.11, considerando as dimensões do equipamento apresentado na Figura 3.16.

Tabela 3. 11: Resultados dos parâmetros físicos do MB

Equipamento				Esfera		Energia		Esforços	
D (m)	L (m)	V (m ³)	V/V _A	Raio (m)	Massa (kg)	Potencial (Joule)	Velocidade (m/s)	Força (N)	Compressão (Pa)
0,70	0,50	0,77	45,79	0,048	0,445	2,68	3,47	1750,99	1,75.x10 ⁹

Fonte: Autor (2020)

Esses resultados indicaram que os AGRCT que são submetidos ao tratamento no MB perdem a parte frágil, corresponde a argamassa presa ao AGRC, adquirindo maior resistência à compressão.

A análise do processo de tratamento pode ser realizado pelos percentuais de AGRCT que ficam retidos na peneira de abertura de 4,75 mm, ou em relação ao material passante na peneira de 4,75 mm. Nesse estudo foi realizado a análise dos percentuais de AGRCT retido na peneira de abertura 4,75 mm em função do tempo de tratamento, cujos resultados estão apresentados na Tabela (A.)

Como se pode observar foi considerada a massa inicial de 5000,00 g de AGRC, e a partir daí foram obtidos os resultados das massas de AGRCT para os tempos indicados. Nesta Tabela 3.11 estão apresentadas as massas de material passante na peneira de abertura de 4,75 mm, as massas retidas na peneira de abertura de 4,75 mm, que correspondem aos AGRCT gerado e os resultados correspondentes em percentual. A partir desses resultados foi realizado o estudo da definição numérica do comportamento das quantidades de AGRCT produzido.

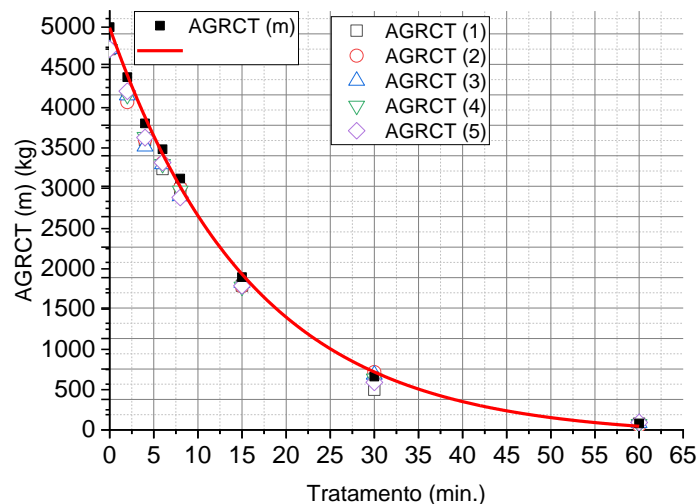
3.3.2 Análise numérica do método de tratamento

As transformações sofridas pelo AGRC tratado no MB gerando os AGRCT, foram investigadas sendo definido um modelo numérico com uma equação diferencial, que permite a determinação da quantidade de AGRCT gerado em função do tempo de tratamento.

As equações diferenciais têm ampla variedade de aplicações nas ciências naturais, pois, muitos fenômenos quando formulados em conceitos matemáticos envolvem funções e taxas de variações destas funções (ZILL, 2003; STEWART, 2017). Estas equações são usadas com frequência para descrever processos nos quais ocorrem mudança de uma medida ou dimensão causada pelo próprio processo.

Durante a realização dos ensaios de tratamentos do AGRC se verificou que as quantidades de AGRCT gerado, em termos percentuais em relação a quantidade inicial de AGRC, tinha um comportamento cuja tendência poderia ser definida com uma equação matemática, como mostra a Figura 3.20, baseado nos dados na Tabela A7, Anexo A.

Figura 3.20 - Curva representativa do fenômeno de desgaste



Desta forma, foi formulado um modelo matemático envolvendo uma Equação diferencial que permite estimar a quantidade de AGRCT.

Este modelo matemático se constituiu de uma equação diferencial ordinária (EDO), mais especificamente, de variáveis separáveis, que são equações diferenciais cuja solução pode ser obtida mediante integração direta.

De acordo com os resultados obtidos no tratamento do AGRC em função do tempo foi desenvolvido o gráfico apresentado na Figura 3.22. Esses resultados indicam que num tempo superior a 60 minutos todo AGRC é transformado em agregado miúdo. A modelagem da curva de tendência das transformações sofridas pelo AGRC foi definida em função dos valores médios.

Como se observa na tendência de comportamento da curva representada na Figura 3.22, a função que descreve esse comportamento é uma exponencial descendente. Esta curva pode ser modelada pela Equação (3.11), tendo similaridade matemática com os fenômenos físicos que partem de um valor máximo e é reduzido em função do tempo com uma taxa de transformação variável.

$$\frac{dM_{(AGRCT)}(t)}{dt} = A \cdot c \cdot e^{(c \cdot t)} \quad (3.11)$$

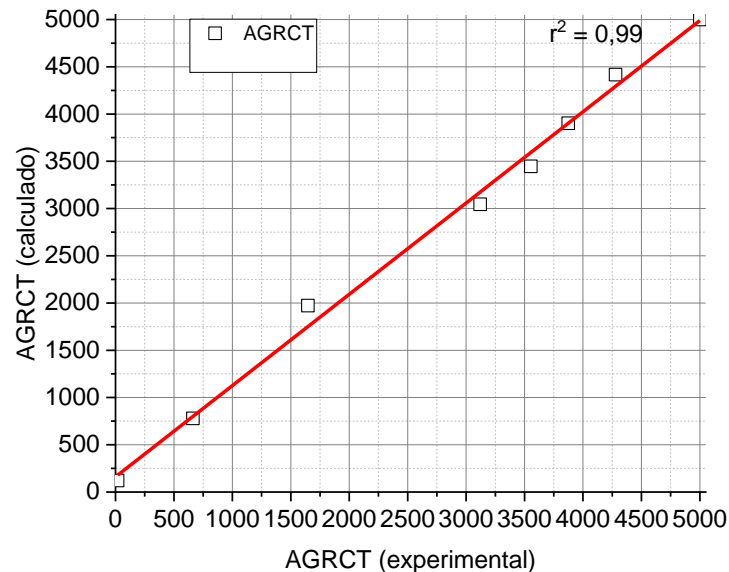
A solução da Equação (3.11) é dada pela Equação (3.12), obtida com a integração. Entretanto, é possível a obtenção dos coeficientes A e c da Equação (3.12) diretamente da análise dos dados experimentais, usando recursos computacionais de modelagem, com o uso do método dos mínimos quadrados (MMQ) (HELENE, 2006; MONTGOMERY; RUNGER, 2011). Entre os diversos métodos disponíveis para tratamento de dados experimentais sujeitos a erros estatísticos o MMQ é o mais utilizado, tendo em vista as ferramentas computacionais disponíveis (HELENE, 2006).

$$M_{(AGRCT)}(t) = A \cdot e^{(c \cdot t)} \quad (3.12)$$

Na Equação (4.5), $M_{(AGRCT)}$ é a massa de AGRCT produzida em função do tempo, sendo $A = 5000,00$ g, massa inicial do AGRC, e $c = -0,062$ (minutos⁻¹), constante definida no MMQ. É importante salientar que esse modelo matemático foi definido considerando as características do equipamento de tratamento e das características físicas do AGRC.

Foi realizada a análise entre os percentuais de AGRCT obtidos a partir dos resultados experimentais e os calculados pela Equação (3.12), que está apresentado na Tabela A8. Esta análise de correlação entre os resultados está apresentada na Figura 3.21, que indica uma correlação entre os resultados de $r^2 = 0,99$.

Figura 3.21 - Correlação entre os resultados calculados e o experimental



Fonte: Autor (2020)

Em prosseguimento à pesquisa, um aspecto importante no estudo de obtenção de agregados reciclados é o consumo de energia na obtenção dos agregados (QUATTRONE *et al.* 2014, 2013; GOMES *et al.*, 2015).

Neste estudo, esse aspecto foi analisado com o consumo de energia na obtenção dos AGRC e AGRCT, visando a ecoeficiência dos concretos obtidos para uma análise da viabilidade econômica na obtenção dos concretos.

3.3.3 Estudo do consumo de energia da produção e tratamento

O consumo de energia elétrica na transformação de RC em ARC para uso na construção civil é um dos parâmetros de custo mais importante a ser observado.

Para a determinação do consumo de energia no processamento do RC, foi adotado o parâmetro de produção correspondente ao mínimo de 1,00 m³/hora, de acordo com os parâmetros do equipamento apresentado no Quadro 3.3.

Neste estudo foi determinado o consumo de energia elétrica do britador de mandíbula com abertura de 20,0 mm, considerando o resultado médio obtido dos três ensaios realizados, sendo a potência do motor de 7,5 cv.

A determinação dos consumos de energia foi calculada pela Equação (3.13), conforme sugerido por Gomes *et al.* (2015).

$$E_i = (P_i \cdot \eta^{-1}) \cdot C^{-1} \quad (3.13)$$

Os parâmetros apresentados na Equação (3.13) têm os seguintes significados:

E_i é o consumo de energia elétrica (kWh/kg);

P_i é a Potência elétrica do equipamento em (kW);

C é a capacidade de produção equipamento;

η é a eficiência do equipamento, considerada igual a 0,90 para o britador de mandíbula.

Os resultados dos custos obtidos na determinação do beneficiamento do RC estão apresentados na Tabela 3.12. Esses resultados foram obtidos considerando a relação de 1,00 US\$ = R\$ 4,09, e a massa unitária do ARC igual a 1650,00 kg/m³.

Tabela 3. 12: Custo de energia para obtenção ARC e AGRC – 1,0 KWh (R\$ 0,87)

Agregados	kWh/kg	R\$/kg	US\$/kg
ARC	0,0033	0,0029	0,00079
AGRC	0,0057	0,0050	0,00133

Fonte: Autor (2020)

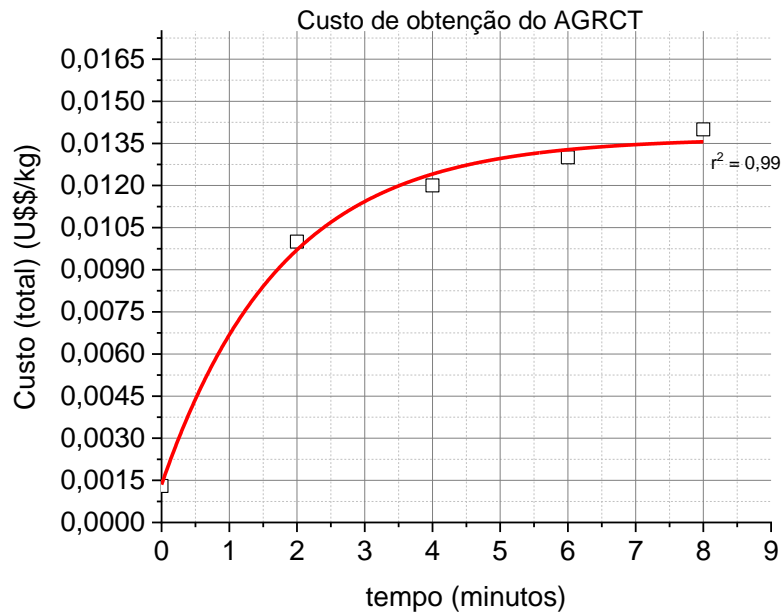
A Tabela 3.12 apresenta o resumo dos consumos de energias e os custos na obtenção do AGRC e no tratamento de desgaste por abrasão, para produção de 1kg de AGRCT.

Os valores foram calculados considerando os dados do fabricante do MB para ensaios de abrasão LA, com o motor de potência de 1,00 cv. Nesses resultados não estão inseridos os custos de obtenção do RC. Entretanto, esse custo será comum a todos os AGRC e AGRCT, de modo que na comparação entre eles, esse custo não altera os resultados.

A análise dos dados da Tabela A9 indica que existe uma tendência da relação entre os tempos de tratamentos e os custos de obtenção do AGRCT.

A definição da curva que melhor representa esse comportamento, obtida com o uso do MMQ, está apresentada na Figura 3.22.

Figura 3.22 - Custos de energia total do AGRC e AGRCT



Fonte: Autor (2020)

Como se observa na Figura 3.22, a curva representativa do custo de obtenção do AGRCT em função dos tempos de tratamento no intervalo de tempo considerado, foi definida pela Equação (3.14)

$$y_c = y_0 + A \cdot e^{(k.t)} \quad (3.14)$$

Nesta equação os parâmetros y_0 é o custo de obtenção do AGRC e A e k são constantes relacionadas as taxas de crescimento do custo. Essas constantes foram obtidas com o uso do MMQ, nesta análise, sendo $y_0 = 0,013$, $A = - 0,012$ e $k = - 0,56$. A obtenção da Equação (3.14) tem a finalidade de equacionar o custo de obtenção do AGRCT, permitindo a previsão do custo de obtenção do AGRCT dentro do intervalo de tempo de 0 a 8 minutos.

3.4 Considerações finais

Os estudos realizados nessa etapa da pesquisa, possibilitaram chegar as seguintes considerações:

- A obtenção de AGRC com diâmetro máximo característico de 12,50 mm, a partir de resíduo de concreto de resistência média, é mais eficiente com o uso do moinho de mandíbula

em relação ao moinho de martelos. Assim, ficou evidenciado que o moinho de mandíbula produz maior quantidade de agregados graúdos e consequentemente menos agregados miúdos quando comparado ao moinho de martelos;

- A abertura da mandíbula com 20 mm é a mais eficiente para o aproveitamento do resíduo de concreto na produção de AGRC com DMC de 12,50 mm;
- O método visual proposto para determinação do percentual de argamassa presa no AGRC se mostrou um ensaio rápido, de baixo custo e sem a geração de resíduos, podendo ser usado para uma avaliação preliminar de percentuais de argamassa de AGRC. Entretanto, esse método apresentou resultados menos precisos em relação ao método com o uso de HCl, e diminui sua precisão quando o AGRC diminui o percentual de argamassa;
- Em relação às características de forma, a equação de Krumbein apresenta resultados satisfatórios na determinação da esfericidade de agregados graúdos, comparado com o método de processamento digital de imagens (PDI). O uso do PDI com o uso do Camsizer-L, apresentou resultados de esfericidade ligeiramente superiores ao uso da equação de Krumbein. Dessa maneira, fica evidente que a interferência do operador na verificação das medidas com o uso do paquímetro reduziu a precisão dos resultados no uso da equação de Krumbein;
- A resistência à abrasão do AGRC usado nesse estudo foi inferior a resistência à abrasão do agregado graúdo natural, de origem granítica, de mesmo diâmetro máximo característico. Entretanto, o índice de resistência à abrasão LA do AGRC foi cerca de 20% inferior ao limite máximo estabelecido pela NBR 7211(ABNT, 2009). Portanto, em relação a essa propriedade, o AGRC foi considerado adequado para uso em concretos;
- O tratamento de desgaste no moinho de bolas foi eficiente na redução da quantidade de argamassa presa nos AGRC. Isto ficou evidenciado pelos percentuais de material transformado, caracterizado como o material passante na peneira de abertura de 4,75 mm;

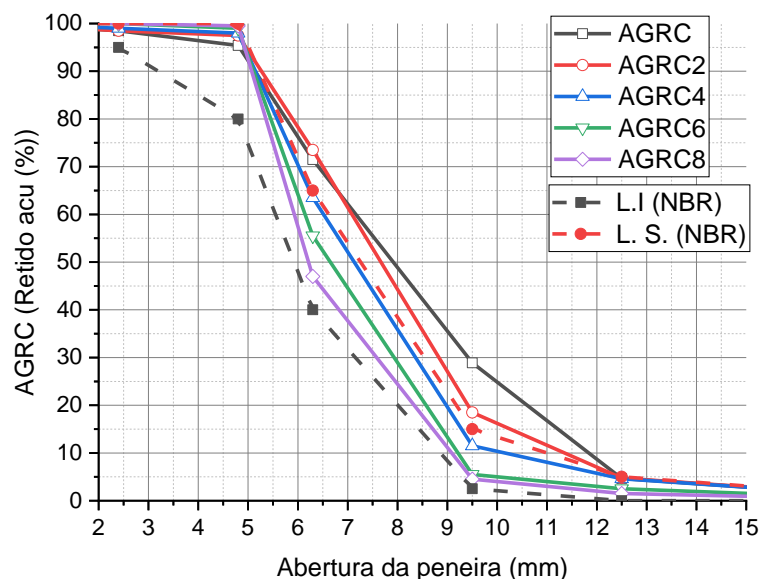
4 CARACTERIZAÇÃO DO AGREGADO GRAÚDO RECICLADO DE CONCRETO TRATADO

As caracterizações dos agregados graúdos reciclados de concreto tratados (AGRCT), foram determinadas relacionadas à forma e à porosidade. Essa primeira trata dos dados dos resultados dos ensaios de granulometria e morfologia. E a segunda dos resultados dos ensaios de percentual de argamassa presa aos agregados graúdos naturais, absorção de água, densidade e cinética de absorção. Em todas as características o AGRC sem tratamento foi considerado para comparação com os AGRCT. Nas análises das absorções de água foram realizadas análise estatística dos dados de absorção e foi proposto um método matemático de cálculo da absorção da zona de transição interfacial (ZTI) dos AGRC e AGRCT. Uma equação para a análise numérica da cinética de absorção de água desses agregados reciclados e do AGN foi apresentada.

4.1 Granulometria

Os ensaios foram realizados em amostras obtidas com o quarteador Jones de acordo com a NBR NM26 (ABNT, 2009). As curvas granulométricas foram elaborados a partir dos percentuais retidos acumulados médios de dois ensaios apresentadas na Figura 4.1. O resumo dos dados estão apresentados na Tabela B1, Anexo B.

Figura 4. 1- Curvas granulométricas obtidas de acordo com a NBR NM248 (ABNT, 2003)



Observa-se na Figura 4.1 que os AGRC4, AGRC6 e AGRC8 ficam dentro dos limites estabelecidos pela NBR NM248 (ABNT, 2003). As curvas granulométricas mostram que os AGRC após o tratamento eleva a percentagem de partículas mais finas e reduz as partículas mais grossas, pois os agregados sofrem desgastes uniforme e proporcional ao tempo de tratamento, que ocorre devido à redução da camada de argamassa mais porosa que se encontra em torno dos AGRC. Isto também pode ser identificado pelos módulos de finura e diâmetros máximos característicos ($D_{m\acute{a}x.}$) desses agregados, conforme apresentado na Tabela 4.1.

Tabela 4. 1: Resumo dos parâmetros granulométricos dos AGRC e AGRT

Agregado	$D_{m\acute{a}x.}$ (mm)	Módulo de Finura (MF)
AGRC	12,50	6,20
AGRC2	12,50	6,21
AGRC4	12,50	6,10
AGRC6	9,50	6,01
AGRC8	9,50	6,00

Fonte: Autor (2020)

4.2 Morfologia

Os resultados da esfericidade obtidos com a equação de Krumbein e do índice de forma pela NBR 7809, foram obtidos a partir de ensaios com duas amostras. O resumo dos resultados está apresentado na Tabela 4.2.

Tabela 4. 2: Parâmetro de forma do AGRC (12,5 mm) submetido ao tratamento

Agregados	Esfericidade					
	Amostra 1	Amostra 2	Esfericidade Média (Krumbein)	Des. Padrão	Cv	*Esfericidade Camsizer-L
AGRC	0,68	0,74	0,71	0,042	5,98	0,81
AGRC2	0,71	0,76	0,74	0,035	4,81	0,81
AGRC4	0,73	0,75	0,74	0,014	1,91	0,84
AGRC6	0,71	0,69	0,70	0,014	2,02	0,83
AGRC8	0,72	0,7	0,71	0,014	1,99	0,84
Índice de forma NBR 7809 (ABNT, 2009)						
Agregados	Amostra 1	Amostra 2	Média IF(1) NBR 7809	Des. Padrão	Cv	Relação. de aspecto Camsizer - L
AGRC	1,50	1,64	1,57	0,10	6,31	0,72
AGRC2	1,25	1,36	1,31	0,08	5,96	0,73
AGRC4	1,33	1,4	1,37	0,05	3,63	0,75
AGRC6	1,31	1,41	1,36	0,07	5,20	0,78
AGRC8	1,31	1,43	1,37	0,08	6,19	0,75

Fonte: Autor (2020)

A análise desses dados mostram que a esfericidade dos agregados, determinadas pela equação proposta por Krumbein difere da esfericidade obtida com o Camsizer-L, como mostra a Tabela 4.2.

Houve uma oscilação nos resultados das esfericidades obtidas com o uso do paquímetro e da equação de Krumbein. Essa oscilação pode ser explicada pela operação da verificação das medidas usando o paquímetro. Os resultados das esfericidades determinadas pela equação de Krumbein e com o uso do Camsizer apresentou uma diferença média maior para o AGRC8, equivalente a 16,0%.

A relação de aspecto determinada por ambos os métodos apresentou maior diferença no AGRC, apresentando uma diferença de 14,3%. Considerando que os resultados dos parâmetros de formas mais coerentes foram os determinados pelo Camsizer, estes resultados serão usados para a análise comparativa dos agregados nos concretos.

Dando prosseguimento as análises das transformações sofridas pelos AGRC, em seguida foram verificados os percentuais de argamassa presas aos agregados naturais. Os percentuais de argamassa presa aos agregados naturais foram determinados pelo método visual e com o uso de HCl, como já apresentado. O estudo dos percentuais de argamassa dos AGRC foi realizado em duas amostras de cada um dos agregados e os dados usados como referência foram os valores médios.

4.3 Percentual de argamassa

Os resultados dos ensaios de determinação dos percentuais de argamassa usando HCl, e usando o método visual estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4. 3: Percentuais de argamassa dos AGRC e AGRC

Caracterização com HCl					
Agregado	Amostra (1)	Amostra (2)	Média	Dp	C. v
	(%) Argamassa	(%) Argamassa	(%) Argamassa	(%)	(%)
AGRC	45,06	42,54	43,80	1,80	4,12
AGRC2	39,01	34,6	36,81	3,12	8,47
AGRC4	30,46	29,21	29,84	0,88	2,96
AGRC6	30,05	26,54	28,30	2,48	8,77
AGRC8	27,57	25,46	26,52	1,49	5,63
Caracterização visual					
AGRC	50,85	44,15	47,50	4,74	9,77
AGRC2	46,80	40,80	43,80	4,24	9,69
AGRC4	39,20	45,30	42,30	4,31	10,21
AGRC6	36,75	44,20	40,50	5,27	13,02
AGRC8	34,50	40,30	37,40	4,10	10,97

Fonte: Autor (2020)

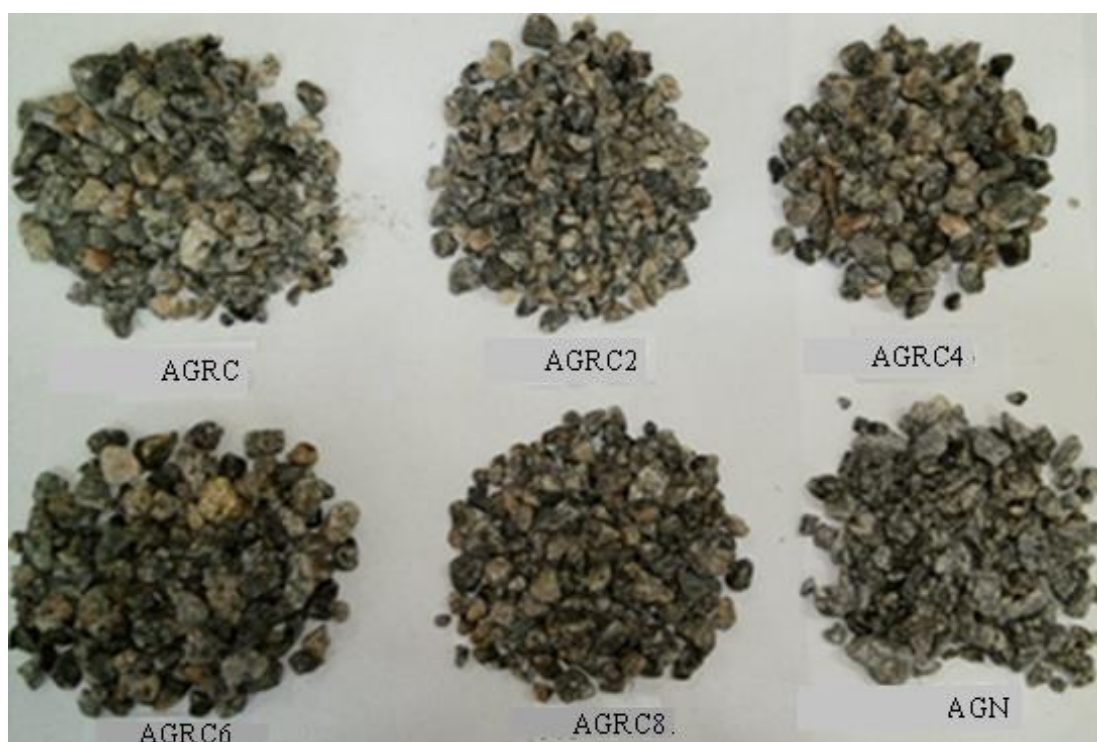
Esses resultados mostram que o método visual apresenta uma maior variação, caracterizado pelo coeficiente de variação (Cv) maior, entre 9,77% e 13,02%, enquanto que com o uso do ácido os valores ficaram entre 4,12% e 8,77%.

Os resultados indicaram também que o aumento do tempo de tratamento faz com que fique mais difícil a identificação da argamassa presa aos agregados naturais, com o método visual.

Por sua vez, como apresentado na Tabela 4.4, se verificou que os resultados dos percentuais de argamassa presa aos agregados naturais obtidos com o uso do ácido, são inferiores aos obtidos com o método visual. Foi constatado que os ensaios para a determinação do percentual de argamassa usando HCl, proporciona a retirada completa da argamassa.

Dessa forma, os resultados obtidos com esse ensaio são mais precisos, tendo em vista que os agregados obtidos com o tratamento ficam praticamente isentos da argamassa presa como mostra a Figura 4.2.

Figura 4. 2 - Detalhes das amostras do AGRC e AGRCT após os tratamentos com HCl

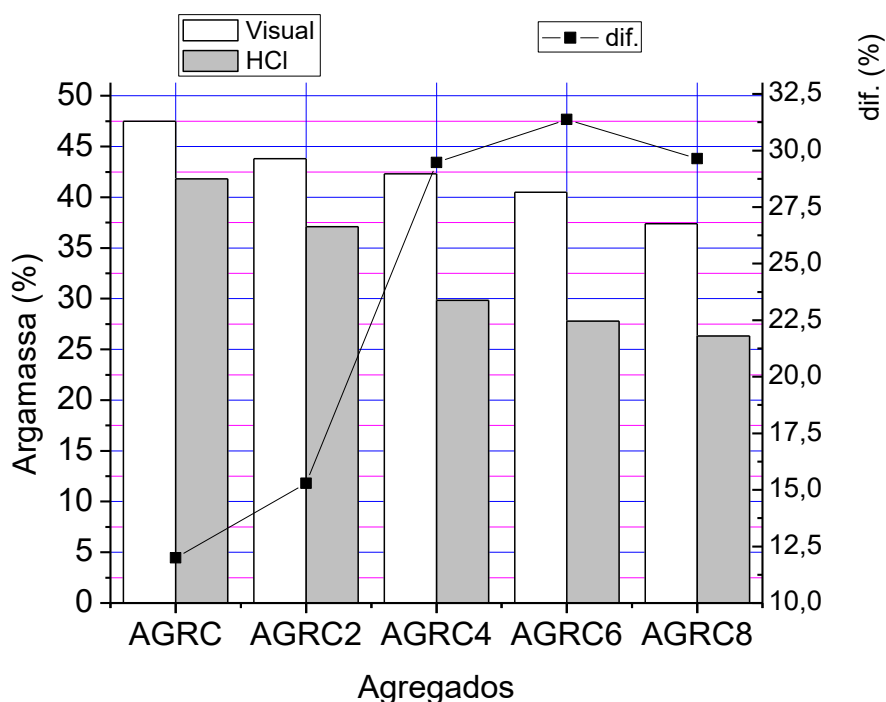


Fonte: Autor (2020)

Isto evidencia que o ensaio usando ácido (HCl) foi mais eficiente. Por outro lado, como já relatado, o método visual, pode ser útil na identificação inicial do percentual de argamassa presa ao AGRC e AGRCT.

Os resultados obtidos pelos diferentes métodos foram comparados conforme apresentados na Figura 4.3.

Figura 4. 3- Percentual de argamassa em função dos tratamentos



Fonte: Autor (2020)

Foi observado que houve uma diferença dos percentuais de argamassa entre os métodos, e se acentua com o tempo de tratamento. Para o AGRC a diferença foi próxima de 12%, enquanto que para os AGRC4, AGRC6 e AGRC8 ficaram entre 25% e 31%.

Isto pode ser explicado tendo em vista que o AGRC e AGRC2 tem a argamassa presa mais fácil de ser identificada com o instrumento de acuidade visual que foi usado.

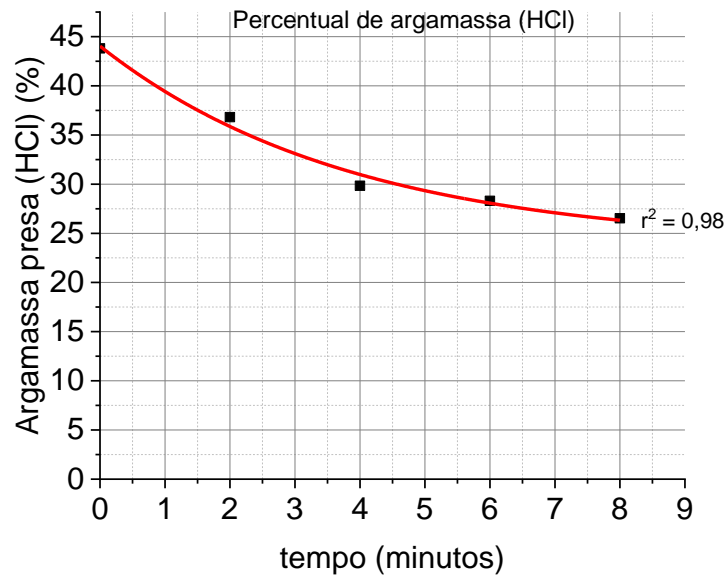
Considerando o tratamento com o HCl, foi observado que uma redução do percentual de argamassa dos agregados em função do tempo, o que era esperado, confirmando a hipótese que, o tratamento de abrasão produz AGRC com menor percentual de argamassa.

Entretanto a redução do percentual de argamassa, não é diretamente proporcional ao tempo de tratamento. Como se pode observar na Figura 4.4, a transformação maior ocorre do AGRC para o AGRC4, o que pode ser explicado pela fragilidade maior da argamassa presa no AGRC.

Após o tratamento de 4 minutos as perdas obedecem a uma tendência mais próxima, tendo em vista que a parte mais frágil da argamassa foi retirada.

Foi realizada a análise numérica da tendência do comportamento dos percentuais de argamassa aderida aos agregados naturais em função do tempo de tratamento com o uso de HCl. Essa curva de tendência está apresentada na Figura 4.4.

Figura 4. 4 - Percentual de argamassa em função do tratamento



Fonte: Autor (2020)

A Equação (4.1) representa a variação dos percentuais de argamassa dentro do intervalo de tempo pesquisado.

$$P_{Arg.(t)} = y_0 + A \cdot e^{(-R \cdot t)} \quad (4.1)$$

Os parâmetros $y_0 = 23,74$ (%), $A = 20,28$ (%) e $R = -0,26$ (%)/minuto, representando as constantes obtidas com o método utilizado, sendo o percentual mínimo de argamassa no intervalo de tempo considerado, percentual médio e a taxa média de redução, respectivamente.

A tendência apresentada pela curva exponencial decrescente da Figura 4.5, caracterizada pela Equação (4.1), pode ser útil na determinação de percentuais de argamassa em intervalos de tempo entre 0 e 8 minutos.

Fora desse intervalo é necessário o desenvolvimento de um novo modelo numérico, baseado no modelo apresentado.

4.4 Densidade e Absorções de água

Dando prosseguimento a caracterização dos AGRCT, foram realizados os ensaios para a verificação das densidades desses agregados. A determinação da densidade dos agregados é importante para o cálculo das composições dos concretos.

Os ensaios foram realizados de acordo com a NBR NM53 (ABNT (2003), que orienta a determinação das densidades e absorção de água de forma conjunta.

Os ensaios foram realizados usando-se duas amostras para cada tipo de agregado, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4. 4: Densidades do AGRCT (NBR NM 53:2003)

Massas saturadas com superfície seca (m_{sss}) – (g)						Massas submersas (m_{sub}) – (g)				
Agregados	m_{sss1}	m_{sss2}	m_{sss} (m)	Dp	Cv	m_{sub1}	m_{sub2}	m_{sub} (m)	Dp	Cv
AGRC	2120,80	2113,80	2117,30	15,65	0,74	1200,04	1210,05	1205,05	24,13	2,02
AGRC2	2114,40	2091,00	2102,70	11,68	0,56	1213,50	1200,30	1206,90	12,64	1,05
AGRC4	2101,80	2079,40	2090,60	12,72	0,61	1230,70	1192,90	1211,80	17,37	1,42
AGRC6	2083,20	2063,80	2073,50	13,22	0,63	1236,45	1190,40	1213,43	14,19	1,15
AGRC8	2090,80	2075,20	2083,00	11,38	0,55	1239,30	1185,80	1212,55	33,61	2,71
Densidade aparente da - (g/cm^3)						Densidade (sss) (g/cm^3)				
Agregados	d_{a1}	d_{a2}	d_a (m)	Dp	Cv	d_{sss1}	d_{sss2}	d_{sss} (m)	Dp	Cv
AGRC	2,17	2,19	2,18	0,01	0,51	2,30	2,30	2,30	0,005	0,20
AGRC2	2,22	2,26	2,24	0,03	1,26	2,35	2,35	2,35	0,004	0,18
AGRC4	2,30	2,32	2,31	0,02	0,86	2,41	2,41	2,41	0,004	0,16
AGRC6	2,36	2,38	2,37	0,01	0,48	2,46	2,48	2,47	0,014	0,56
AGRC8	2,35	2,45	2,40	0,07	3,02	2,46	2,52	2,49	0,049	1,96
Densidade real (dr) (g/cm^3)						Absorções de água				
Agregados	d_{r1}	d_{r2}	d_r (m)	Dp	Cv	A_1	A_2	A_m	Dp.	Cv
AGRC	2,50	2,46	2,48	0,028	1,15	6,04	5,69	5,67	0,78	13,81
AGRC2	2,54	2,52	2,53	0,018	0,72	5,72	4,55	5,13	0,58	11,39
AGRC4	2,60	2,56	2,58	0,028	1,08	5,09	3,97	4,53	0,64	14,04
AGRC6	2,62	2,64	2,63	0,015	0,57	4,16	3,19	4,21	0,66	15,7
AGRC8	2,63	2,63	2,63	0,001	0,05	4,54	3,76	3,73	0,57	15,3

Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 mostram que a metodologia de ensaio utilizada se mostrou eficiente, tendo em vista a coerência dos resultados obtidos.

De acordo com os dados apresentados nesta Tabela 4.4, se verifica que os resultados médios de absorção de água dos agregados variaram entre 5,67% a 3,73%, para o AGRC e AGRC8 respectivamente.

Isto mostra que os tratamentos realizados foram eficientes na redução dos percentuais de argamassas e como consequência houve uma redução da porosidade aberta dos agregados, como era esperado.

Os resultados apresentados na Tabela 4.4 mostram que o tratamento foi eficiente na obtenção de agregados mais densos, como consequência da redução da quantidade de argamassa presa aos AGN.

Comparando as densidades aparentes dos agregados se verificou que houve uma mudança de $2,18 \text{ g/cm}^3$ para $2,40 \text{ g/cm}^3$, para o AGRC e AGRC8, respectivamente. Em relação aos dados se verificou que os coeficientes de variação (C_v) dos dados das massas submersas foram inferiores aos das massas saturadas com superfície seca (m_{sss}).

Isto significa que as medidas das massas submersas foram mais homogêneas. Entretanto, os C_v das massas submersas ficaram próximas a 15%.

Os dados de absorção de água seguiram os coeficientes de variações (C_v 's) das m_{sss} , como esperado, tendo em vista a influência das m_{sss} .

Da mesma forma que o C_v das m_{sss} , o C_v das absorções ficou no limite ou inferior a 15% e, portanto, considerada baixa dispersão.

Os C_v 's das densidades aparentes ficaram entre 0,51% para o AGRC e 3,02% para o AGRC8. As densidades saturadas com superfície seca apresentaram C_v entre 0,16% e 1,96% para o AGRC4 e AGRC8 respectivamente.

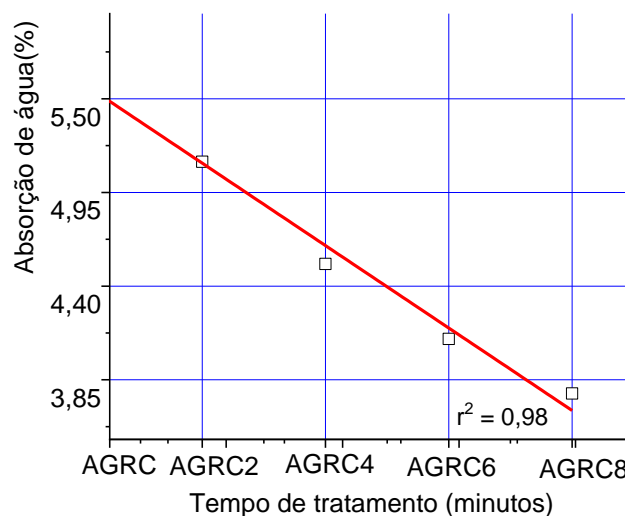
Esses resultados identificaram que os ensaios tiveram resultados coerentes e controles adequados. Como já observado, as absorções de água dos agregados são inversamente proporcionais às suas densidades. Este comportamento já foi observado por outros pesquisadores como Leite, (2001); Cavalcanti, (2006); Angulo, (2005); Tseng, (2010); Ulsen, (2011); Gozanzales-Tabuada *et al.* (2016).

Prosseguindo com a análise dos dados dos ensaios de absorção e densidades em função dos tempos de tratamentos, foram realizadas as análises de correlação de Pearson para verificar as correlações entre as variáveis estudadas. Foram realizadas as análises de correlação entre os tempos de tratamentos e as absorções de água, sendo considerados os seus valores médios apresentados na Tabela 4.4. Nesta análise foi definida a hipótese nula H_0 : não existência de correlação e a hipótese alternativa, H_a : existência de correlação.

O valor de $t_{\text{critico}} = 3,182$ e $t_{\text{calculado}} = 6,876$, sendo o valor de t calculado fora da zona de rejeição da hipótese nula. Portanto há evidência suficiente, ao nível de significância de 5%, que existe correlação entre os tempos de tratamento e das absorções de águas, Figura 4.5. Portanto, os resultados mostram que as absorções de água dos AGRCT, em função do tempo de tratamento, se aproximam de um comportamento linear com $r^2 = 0,98$.

Este comportamento foi verificado por outros pesquisadores (LEITE, 2001; ANGULO, 2005; CAVALCANTI, 2006; TSENG, 2010, ULSEN, 2011).

Figura 4. 5 - Comportamento da densidade aparente da absorção de água



Fonte: Autor (2020)

É consenso entre os pesquisadores que a característica que mais influencia na qualidade dos agregados reciclados é a permeabilidade, caracterizada pela absorção de água, sendo o fator determinante nas densidades dos agregados.

Conforme já relatado na revisão bibliográfica, no caso do AGRC, isto ocorre devido a argamassa presa aos agregados, por ser um material mais poroso. Desta forma foi realizado um estudo aprofundado da absorção de água dos AGRC e AGRCT.

Nesse estudo, os ensaios foram realizados considerando uma massa seca de 2000,00 g, e foram realizados ensaios em cinco amostras para cada tipo de agregado, cujos resultados estão apresentados na Tabela 4.5.

Tabela 4. 5: Absorção de água e massas específicas do AGRCT (NBR NM 53:2003)

Massas saturadas com superfície seca (m_{sss}) –(g)								
Agregados	m_{sss1}	m_{sss2}	m_{sss3}	m_{sss4}	m_{sss5}	m_{sss} (m)	Dp	Cv
AGRC	2120,80	2113,80	2123,60	2086,20	2122,40	2113,36	15,65	0,74
AGRC2	2114,40	2091,00	2109,20	2089,20	2109,60	2102,68	11,68	0,56
AGRC4	2101,80	2079,40	2095,20	2101,80	2074,80	2090,60	12,72	0,61
AGRC6	2083,20	2063,80	2098,00	2082,40	2093,60	2084,20	13,22	0,63
AGRC8	2090,80	2075,20	2066,40	2061,60	2079,00	2074,60	11,38	0,55
Absorção de água (%)								
Agregados	A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A ₅	A _m	Dp.	Cv
AGRC	6,04	5,69	6,18	4,31	6,12	5,67	0,78	13,81
AGRC2	5,72	4,55	5,46	4,46	5,48	5,13	0,58	11,39
AGRC4	5,09	3,97	4,76	5,09	3,74	4,53	0,64	14,04
AGRC6	4,16	3,19	4,90	4,12	4,68	4,21	0,66	15,70
AGRC8	4,54	3,76	3,32	3,08	3,95	3,73	0,57	15,30

Fonte: Autor (2020)

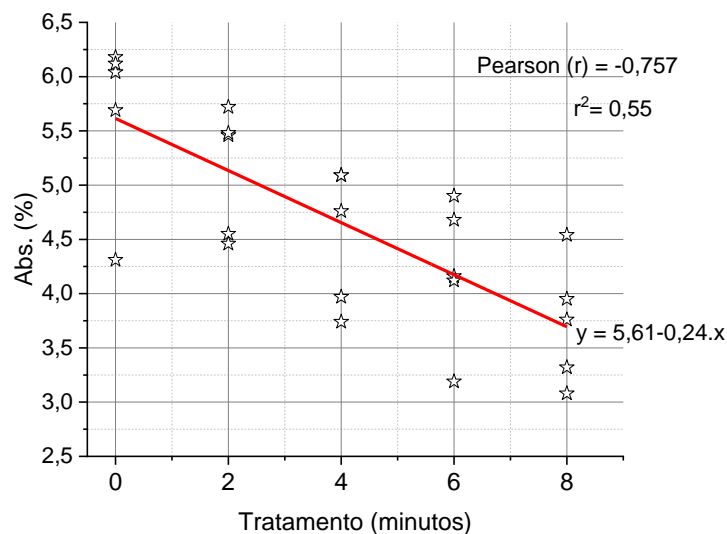
Como pode ser observado na Tabela 4.5 os resultados obtidos nas absorções de água tiveram um coeficiente de variação (Cv) que variaram de 15,70% para o AGRC6 e de 11,39%, para o AGRC2. Os Cv das m_{SSS} foram menores que os Cv das absorções de água. Isto porque os desvios padrão das m_{SSS} foram pequenos em relação as massas.

É comum nos ensaios de absorção de agregados reciclados se ter uma variabilidade de dados, devido a sensibilidade do ensaio na identificação visual do estado saturado com a superfície seca. Além disso, conforme já relatado por vários pesquisadores, deve-se ter cuidado para que não haja perda de material no manuseio dos agregados (LEITE, 2001; CAVALCANTI 2006; TSENG 2011). Tendo em vista a importância da porosidade dos agregados e sua relação com a absorção de água, cujo objetivo do trabalho foi a sua redução com os tratamentos propostos, foi realizada uma análise estatística dessa variável dos agregados em estudo. A variável de resposta considerada para análise dos AGRC e AGRCT foi a absorção de água porque é a propriedade determinante nos agregados para concreto.

4.4.1 Análise estatística das absorções de água

Inicialmente foi verificada a correlação amostral e populacional dos dados, para $n = 25$, dados obtidos das absorções de água em função dos tempos de tratamentos, apresentados na Tabela 4.5. O gráfico representativo da análise de correlação de Pearson está apresentado na Figura 4.6.

Figura 4. 6- Análise de Pearson das absorções de água



Nesta análise foi observado o valor crítico (r) tabelado ($r_{cr} = 0,396$). Logo foi calculado o coeficiente de correlação amostral, $|r| = 0,757 > 0,396$, significando que a correlação populacional é significativa (LARSON; FARBER, 2015).

A análise da correlação de Pearson entre apresentou valor da estatística p de $0,00227 < \alpha = 0,05$. Isto significa que no nível de significância de 5% existe correlação entre as variáveis analisadas. O coeficiente de Pearson mede o grau da correlação linear entre as variáveis, Figura 4.7. É um índice adimensional com valores situados ente -1,0 e 1,0, que reflete a intensidade de uma relação linear entre as variáveis (LARSON; FARBER, 2015).

Como se observa na Figura 4.9, existe uma forte correlação linear inversa entre os tempos de tratamentos e as absorções de água, indicado pelo valor de $r = - 0,757$. Este resultado confirma o conhecimento existente que indica que a quantidade de argamassa presa aos agregados naturais é proporcional ao percentual de absorção.

Os resultados obtidos mostram que o tempo de tratamento é inversamente proporcional a absorção de água, confirmando uma das hipóteses do presente trabalho, que o tratamento reduziria o percentual de argamassa e conseqüentemente a absorção de água dos AGRCT.

Na segunda análise, foi realizada a ANOVA com teste Tukey para verificar se os dados obtidos são estatisticamente diferentes. Antes, porém, foi verificada a normalidade dos dados com o teste de normalidade de Shapiro – Wilke. Os resultados dessas análises estão apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4. 6: Resumo da análise estatística das absorções de água

Testes de Normalidade - Absorção					
Testes	Estatísticas				P-valores
Shapiro - Wilk	0,97				0,55
Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrado Médio	Estat. F	P-valor
Agregados	4	11,61	2,91	6,83	0,001
Resíduos	20	8,48	0,42		
Teste Tukey - Absorção					
Agrupamentos					
Fator	Médias		Grupos		
AGRC	5,67		a		
AGRC2	5,13		b		
AGRC4	4,53		c		
AGRC6	4,21		d		
AGRC8	3,73		e		

Fonte: Autor (2020)

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.6, no nível de significância de 0,05, as amostras têm média estatisticamente diferentes.

Com isso, se pode concluir que os tratamentos provocaram alterações na superfície dos AGRCT, retirando argamassa presa, fazendo com que esses agregados se tornassem diferentes em relação à porosidade, caracterizada pela absorção de água.

Dando continuidade ao estudo foi realizada a análise entre as modificações morfológicas dos agregados e as suas propriedades físicas. O resumo dos resultados está apresentado na Tabela 4.7.

Tabela 4. 7: Resumo dos parâmetros de caracterização do AGRC e do AGRCT

Material	d_a g/cm ³	A (%)	Fator de forma				Granulometria	
			I. Forma (NBR)	Rel. de aspecto (* Camsizer)	Esfer. Camsizer	Esfer. Krumbein	Dmáx. (NBR) (mm)	MF. (NBR)
AGRC	2,18	5,67	1,37	1,40	0,81	0,71	12,5	6,20
AGRC2	2,24	5,13	1,31	1,37	0,81	0,74	12,5	6,21
AGRC4	2,31	4,53	1,36	1,33	0,84	0,74	12,5	6,10
AGRC6	2,37	4,09	1,36	1,28	0,83	0,70	9,5	6,01
AGRC8	2,40	3,77	1,37	1,33	0,84	0,71	9,5	6,00

Fonte: Autor (2020)

O diâmetro máximo característico (Dmáx.) começa com 12,5 mm para o AGRC, chegando a 9,50 mm para o AGRC6 e AGRC8. O módulo de finura (M.F), por sua vez, varia de 6,62 a 5,47 para o AGRC e AGRC8, respectivamente. Esses resultados evidenciam que o tratamento no MB provoca o desgaste da argamassa presa nos AGRC em todas as faixas granulométricas.

Na Tabela 4.7 se observa que os tratamentos têm pouca influência nas características de forma dos AGRCT. Por outro lado, foram observadas influências no Dmáx., e principalmente no módulo de finura (MF) e absorções de água. Os comportamentos dos MF e das absorções de água dos AGRCT são inversamente proporcionais aos tempos de tratamentos. Isto permite identificar que a retirada da argamassa presa aos AGRC diminui o diâmetro dos agregados, retirando a argamassa presa e conseqüentemente reduz o percentual de absorção de água.

4.4.2 Análise matemática das absorções de água

Os ARC são materiais compósitos, constituídos de três fases visíveis que são: agregados de argamassa, agregados naturais, e agregados naturais com argamassa presa em percentuais diversos. Entretanto, existe ainda uma película que une a argamassa ao AN que é a zona de transição interfacial (ZTI).

Essa a região tem uma espessura da ordem de 10^{-6} m, de acordo com Metha; Monteiro (2008). Desta forma, o percentual volumétrico da ZTI dentro da composição e a sua absorção de água é de difícil determinação.

Em vista disto foi realizada uma análise da absorção de água da ZTI de forma indireta. Esse estudo é uma proposta para determinar as absorções de água da ZTI dos AGRC e AGRCT, a partir das absorções dos componentes dos agregados. Para isso foi utilizada a equação da regra da mistura definida pela Equação (4.2).

$$Abs(\%) = f_{(AN)} \cdot Abs_{(AN)} + f_{(Arg)} \cdot Abs_{(Arg)} + f_{(ZTI)} \cdot Abs_{(ZTI)} \quad (4.2)$$

A partir da Equação (4.2), foi possível inferir a parcela correspondente à água de absorção da ZTI como a diferença entre o resultado experimental do ensaio de absorção, e as absorções de cada fase dos materiais.

Para o uso dessa Equação (4.2) foram realizados ensaios de absorção de agregados constituído apenas por argamassa e só com agregado natural do mesmo RC que deram origem aos AGRC e AGRCT, de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2003), sendo obtidos os valores médios de 7,85 % e 0,80 %, respectivamente.

Desta forma foi possível calcular o produto $f_{(ZTI)} \cdot Abs_{(ZTI)}$. Este produto foi considerado como a diferença entre a absorção experimental e a calculada com o uso da Equação (4.2), tendo em vista que não se tem informação da fração volumétrica da ZTI.

Na Equação (4.2), $f_{(AN)}$ é a fração de agregado natural, $Abs_{(AN)}$, é a absorção do agregado natural, $f_{(Arg)}$ é a fração de argamassa e $Abs_{(Arg)}$ a absorção da argamassa, e $f_{(ZTI)}$ e $Abs_{(ZTI)}$ são a fração e absorção da zona de transição interfacial (ZTI).

O uso da Equação (4.2) é uma proposta para calcular de forma indireta o percentual de absorção de água da ZTI dos AGRC e AGRCT, apresentado na Tabela 4.8.

Tabela 4. 8: Comparação usando a Equação (4.2) e o resultado experimental

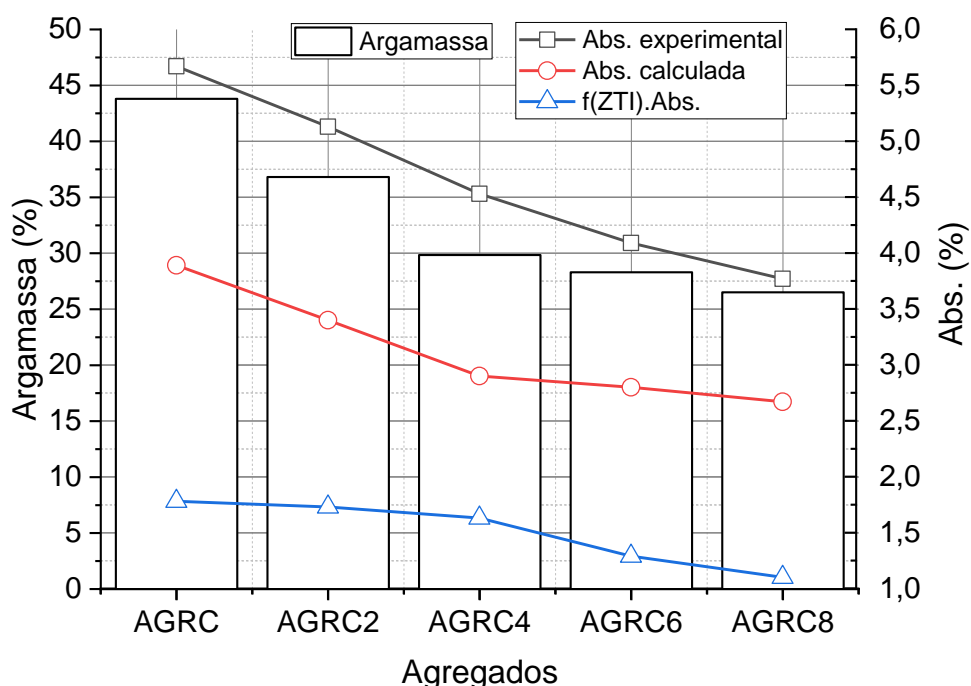
Agregados	AGN (%)	Argamassa (%)	Experimental A (%)	Calculado A (%)	ZTI $f_{(ZTI)} \cdot Abs_{(ZTI)}$ (%)
AGRC	56,20	43,80	5,67	3,89	1,78
AGRC2	63,19	36,81	5,13	3,40	1,73
AGRC4	70,16	29,84	4,53	2,90	1,63
AGRC6	71,70	28,30	4,09	2,80	1,29
AGRC8	73,48	26,52	3,77	2,67	1,10

Fonte: Autor (2020)

Os dados experimentais e de cálculo apresentados na Tabela 4.8, mostram que os percentuais de argamassa considerados foram os obtidos com ataque ácido.

Esses resultados são coerentes e mostram que com a redução dos percentuais de argamassa, ocorre a redução da região das ZTI e conseqüentemente dos percentuais de absorção de água. Isto pode ser melhor observado na Figura 4.7.

Figura 4.7 - Análise das absorções de água das ZTI dos AGRCT



Fonte: Autor (2020)

Como se observa na Figura 4.8, a diferença apresentada entre os valores da absorção de água experimental e a calculada está relacionada com a absorção de água da ZTI.

O valor dos resultados da absorção de água da ZTI variou entre 29,18% e 35,90% para o AGRC8 e AGRC4 respectivamente.

4.4.3 Cinética de absorção de água

Os ensaios para definição dos parâmetros da cinética de absorção de água dos agregados já foram amplamente comentados no estudo do AGRC.

Na análise desse fenômeno nos AGRCT foram realizados ensaios cujos dados estão apresentados na Tabela 4.5, sendo considerada uma massa seca de 2000,00 g.

A Tabela 4.9 é um resumo com os dados principais dos ensaios, sendo os dados completos apresentados no Apêndice B, Tabelas B2, B3, B4, B5, B6, B7 e B8.

Tabela 4. 9: Massas submersas e absorção dos AGRC e AGRCT

t_{acu} (min)	AGRC		AGRC2		AGRC4		AGRC6		AGRC8	
	$M_{(sub)}$ (g)	Abs. (%)	$M_{(sub)}$ (g)	Abs. (%)	$M_{(sub)}$ (g)	Abs. (%)	$M_{(sub)}$ (g)	Abs. (%)	$M_{(sub)}$ (g)	Abs. (%)
0,02	1090,30	0,00	1100,60	0,00	1120,60	0,00	1129,60	0,00	1145,70	0,00
0,15	1096,80	0,33	1103,00	0,12	1131,20	0,53	1157,20	1,38	1171,20	1,28
0,33	1099,50	0,46	1111,50	0,55	1137,50	0,85	1163,50	1,7	1177,70	1,6
3,83	1141,70	2,57	1141,70	2,06	1148,10	1,38	1171,10	2,08	1187,30	2,08
10,83	1182,20	4,60	1172,20	4,28	1171,00	3,82	1187,80	3,5	1190,60	2,74
61,83	1190,20	5,00	1187,20	4,33	1185,20	3,93	1199,20	3,78	1201,20	2,99
1.440,00	1205,05	5,74	1206,90	5,32	1211,80	4,56	1213,43	4,19	1212,55	3,34

Fonte: Autor (2020)

De acordo com os dados apresentados na Tabela 4.9, se observa que os dados iniciais coletados da massa submersa iniciais foram medidos a partir de 1,2 segundos.

Esses dados foram diferentes para os AGRC e AGRCT, mesmo a massa seca sendo a mesma. Isto era esperado porque esses agregados têm porosidades diferentes.

Os resultados das absorções de água nestes ensaios apresentaram ligeira diferença em relação aos ensaios de absorção, obtidos considerando o ensaio de massa saturada com a superfície seca (m_{SSS}).

Entretanto os resultados obtidos se mostraram coerentes, tendo em vista que a diferença entre estes ensaios e o de m_{SSS} (NBR NM 53:2003).

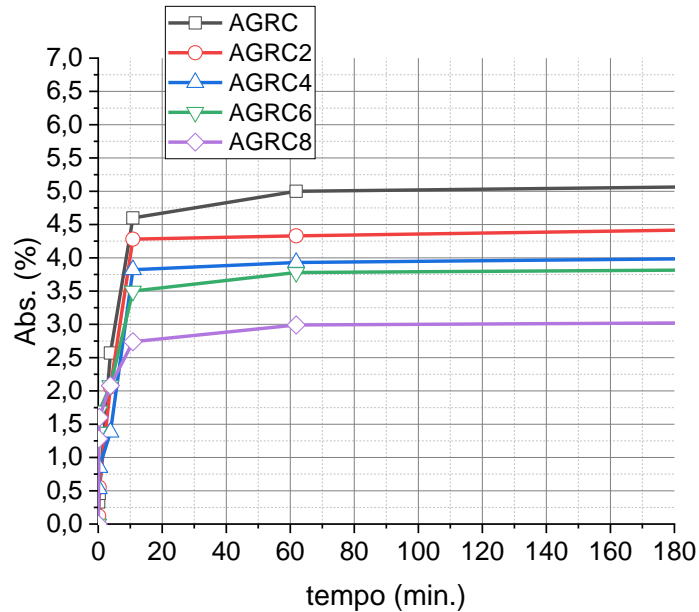
Como já relatado, a determinação das absorções de água com este ensaio tem a vantagem de dispensar a identificação visual dos agregados na condição m_{SSS} , que pode induzir a erros por parte do operador, além da possibilidade de perda de material, no momento da secagem com o pano, aspectos observados por outro pesquisadores (LEITE, 2001; CABRAL, 2007; TENÓRIO, 2007).

Por outro lado, o ensaio com o uso da balança hidrostática, tem a desvantagem de não ser possível a determinação da massa submersa no instante de tempo igual a zero.

Por essa razão os ensaios de absorção não apresentam os mesmos resultados para um mesmo agregado.

O resumo dos dados dos percentuais de absorção de água dos AGRC e AGRCT em função do tempo da Tabela 4.9 está ilustrado na Figura 4.8.

Figura 4. 8 - Curvas de cinética dessorção dos AGRC e AGRCT nos ensaios da balança hidrostática



Fonte: Autor (2020)

Como pode ser observado nesta Figura 4.8, os percentuais de absorção de água em função do tempo obedecem ao mesmo padrão, indicando que existe uma tendência de comportamento, no fenômeno da velocidade de absorção de água.

Na apresentação do gráfico apresentado na Figura 4.8 foi reduzida a escala de tempo para 180 minutos, a fim de apresentar uma melhor visualização dos comportamentos das curvas de absorção nas três primeiras horas. Esses resultados mostram que as curvas tem a mesma tendência de comportamento, atingindo em três horas percentuais próximo a 90% do total.

Dando continuidade a esse estudo, foram calculados os percentuais de absorção total dos agregados, apresentados na Tabela 4.10.

Tabela 4. 10: Absorção acumulada e total dos AGRCT

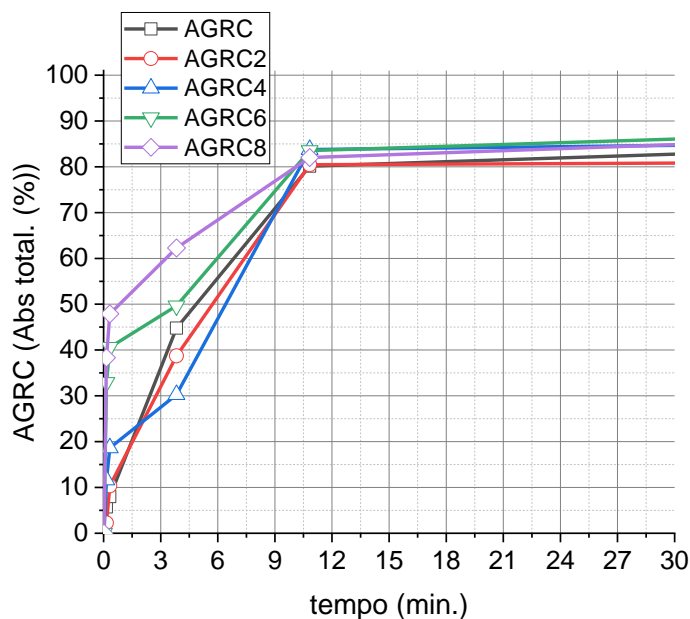
t_{acu} (min)	AGRC		AGRC2		AGRC4		AGRC6		AGRC8	
	Abs. (%)	Abs. (t)	Abs. (%)	Abs. (t)	Abs. (%)	Abs. (t)	Abs. (%)	Abs. (t)	Abs. (%)	Abs. (t)
0,02	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,15	0,33	5,75	0,12	2,26	0,53	11,62	1,38	32,94	1,28	38,32
0,33	0,46	8,01	0,55	10,34	0,85	18,64	1,7	40,57	1,6	47,90
3,83	2,57	44,77	2,06	38,72	1,38	30,26	2,08	49,64	2,08	62,28
10,83	4,60	80,14	4,28	80,45	3,82	83,77	3,5	83,53	2,74	82,04
61,83	5,00	87,11	4,33	81,39	3,93	86,18	3,78	90,21	2,99	89,52
1.440,00	5,74	100,00	5,32	100,00	4,56	100,00	4,19	100,00	3,34	100,00

Fonte: Autor (2020)

Os dados da Tabela 4.10 apresentam as absorções acumuladas dos agregados em função do tempo e também as absorções em relação ao percentual total.

Esta análise é útil pra identificar o tempo que o agregado absorve 80% do percentual de água total. Essa análise fica melhor evidenciada no gráfico apresentado na Figura 4.9.

Figura 4. 9- Curvas de absorção total de água dos AGRC e AGRCT



Fonte: Autor (2020)

Como pode ser observado na Figura 4.9, os AGRC e AGRCT absorvem 80% do total em um intervalo de tempo entre 8 e 10 minutos.

Não existe consenso entre os pesquisadores, quanto ao tempo de absorção do percentual de 80% dos agregados reciclado. As pesquisas relatam que esse tempo está no intervalo entre 6 e 16 minutos.

A definição do tempo de absorção de água de 80% do total, é importante para o controle de água dos agregados reciclados por ser mais porosos, e cujo excesso de água interfere nas propriedades físicas de concretos, produzidos com esses agregados (ABRAMS, 1919; METHA; MONTEIRO, 2008).

Em vista disso, alguns modelos matemáticos foram criados para a modelagem da cinética de absorção de água dos agregados, conforme já relatado.

Seguindo os resultados apresentados no gráfico da Figura 4.9, se observa que os tempos para 80% da absorção total dos AGRC e AGRCT estão entre 8 e 10 minutos. Assim, foi definido o tempo de 9 minutos como o tempo adequado para a pré molhagem desses agregados usados na obtenção dos concretos.

Neste trabalho foi realizado uma análise do modelo proposto por Klein *et al.* (2014), na aplicação dos AGRC, AGRCT e AGN.

O modelo apresentado por Klein *et al.* (2014) foi usado nesse trabalho com resultados satisfatórios. Entretanto, a modelagem matemática desse método apresenta dificuldades de obtenção.

Assim, foram elaboradas e avaliadas novas equações como proposta de análises dos percentuais de absorção dos agregados reciclados graúdos de concreto, baseado nos dados dos ensaios, com o uso do MMQ. As equações propostas foram aplicadas, avaliadas e comparadas com o modelo proposto por Klein *et al.* (2014).

4.4.3.1 Proposta e análise de modelos matemáticos de cinética de absorção

Vários pesquisadores relataram a importância da criação de um modelo matemático de definição dos percentuais de absorção de agregados porosos.

Existe consenso que esse controle é importante porque permite a determinação da quantidade de água que os agregados absorvem em função do tempo, sem interferir na água de amassamento dos concretos.

Isto permite a colocação de uma quantidade de água que não vai interferir nas propriedades das misturas, nos estados fresco e endurecido.

Por meio de estudos das equações diferenciais foi observado que o fenômeno físico de absorção de água de materiais porosos tem um comportamento que pode ser ajustado por uma equação exponencial logística (VERHULT, 1847). Essa equação explica os fenômenos naturais que têm crescimento exponencial e em seguida se estabiliza.

Nesse estudo foi proposto um modelo de equação para a modelagem do fenômeno de absorção de água, usando o ajuste dos pontos dos ensaios, baseado no modelo da equação logística utilizando o método dos mínimos quadrados (MMQ).

Para a definição da equação proposta para modelagem do fenômeno, se verificou que o modelo ficou melhor representado com o uso do logaritmo neperiano dos tempos em segundos, tendo em vista que esse artifício reduz a escala do tempo dos ensaios.

A partir dos estudos realizados, foi definida a equação que teve o melhor ajuste ao fenômeno observado, com as coordenadas, x ($\ln(t) - (s)$) e y (A%). O modelo da equação proposta e usada nesse estudo é representada pela Equação (4.3).

$$A_{(t)} = A. \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{x_0}\right)^p} \right] \quad (4.3)$$

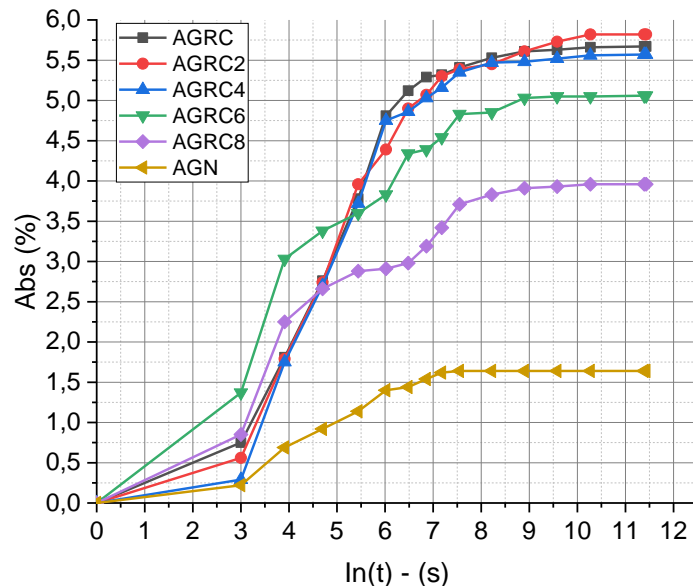
O coeficiente A da Equação (4.3) corresponde à absorção máxima do agregado, valor obtido para o tempo de 24 horas. Os coeficientes x_0 e p correspondem às constantes obtidas com o MMQ e estão relacionados a taxa de absorção e ao logaritmo natural do tempo em segundos.

Esses parâmetros foram obtidos com o uso do Origin8 pro e o Maple. Para a efetivação desse estudo foram realizados ensaios considerando uma massa seca constante de agregados de 500 g.

As massas foram secas em estufa a uma temperatura de $100^\circ \pm 10^\circ$, até adquirir peso constante. As tabelas com os resultados desses ensaios estão apresentadas no Anexo B, Tabelas B2, B3, B4, B5, B6, B7 e B8.

A partir dos resultados dos ensaios apresentados nas tabelas citadas foi definido o gráfico das curvas de absorção apresentado na Figura 4.10.

Figura 4. 10 - Curvas de absorção de água no ensaio da balança hidrostática

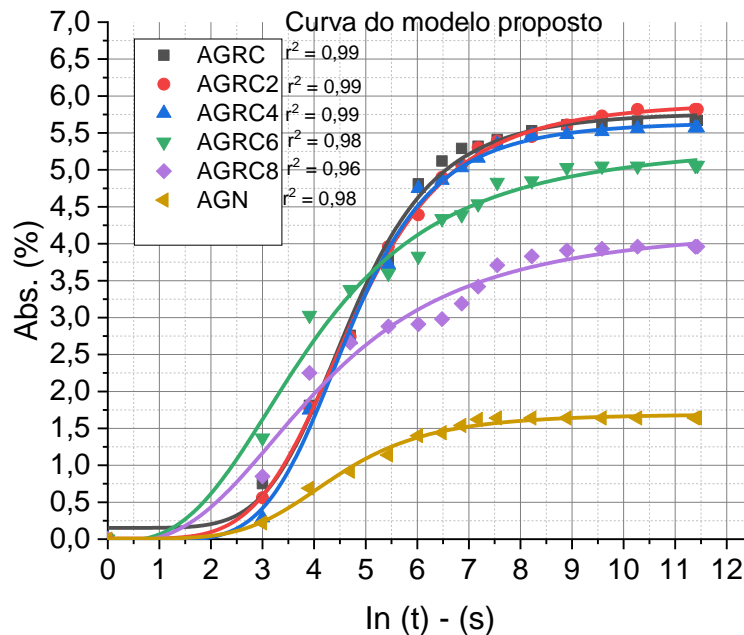


Fonte: Autor (2020)

Como se observa nas curvas de absorção da Figura 4.10, elas apresentam comportamento com uma mesma tendência, como já citado anteriormente.

Fazendo-se o ajuste dos pontos apresentados no gráfico da Figura 4.10 com o uso do MMQ, usando como referência a função logística se obtêm as curvas apresentadas na Figura 4.11.

Figura 4. 11 - Curvas de absorção de água definidas pelo modelo proposto



Fonte: Autor (2020)

Essas curvas foram geradas por funções que tem a característica do modelo proposto na Equação (4.3).

As curvas apresentaram mesma tendência de comportamento, e apresentaram índice de correlação de 0,96 para o AGN e AGRC8, e 0,99 para o AGRC, AGRC2 e AGRC4.

Assim, as curvas apresentaram coerência com os dados dos ensaios. As curvas do AGRC, AGRC2 e AGRC4 estão mais próximas, indicando que os dados de absorção têm diferença menor.

Por outro lado, as curvas do AGRC6, AGRC8 e a do AGN, estão mais espaçadas, caracterizando resultados de absorção menores.

As equações representativas das curvas apresentadas na Figura 4.11, com os respectivos índices de correlação estão na Tabela 4.11.

Observa-se na Tabela 4.11 que no estudo realizado, as curvas foram obtidas com coeficiente de correlação r^2 variando entre 0,96 e 0,99.

Tabela 4. 11: Parâmetros das equações dos agregados

Agregados	Equação	r ²
AGRC	$A_{(t)} = 5,63. \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{4,70}\right)^{5,48}} \right]$	0,99
AGRC2	$A_{(t)} = 5,92. \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{4,75}\right)^{4,81}} \right]$	0,99
AGRC4	$A_{(t)} = 5,65. \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{4,68}\right)^{5,53}} \right]$	0,98
AGRC6	$A_{(t)} = 5,37. \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{3,97}\right)^{2,90}} \right]$	0,96
AGRC8	$A_{(t)} = 4,24. \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{4,19}\right)^{2,79}} \right]$	0,98
AGN (12,50 mm)	$A_{(t)} = 1,69. \left[1 - \frac{1}{\left(1 + \frac{t}{4,29}\right)^{4,76}} \right]$	0,98

Fonte: Autor (2020)

Foram analisados os comportamentos dos dados dos ensaios com o modelo proposto por Klein *et al.* (2014). As equações deste modelo estão apresentadas na Tabela 4.12, onde os valores de k e p foram calculados por meio de métodos matemáticos utilizando os softwares existentes.

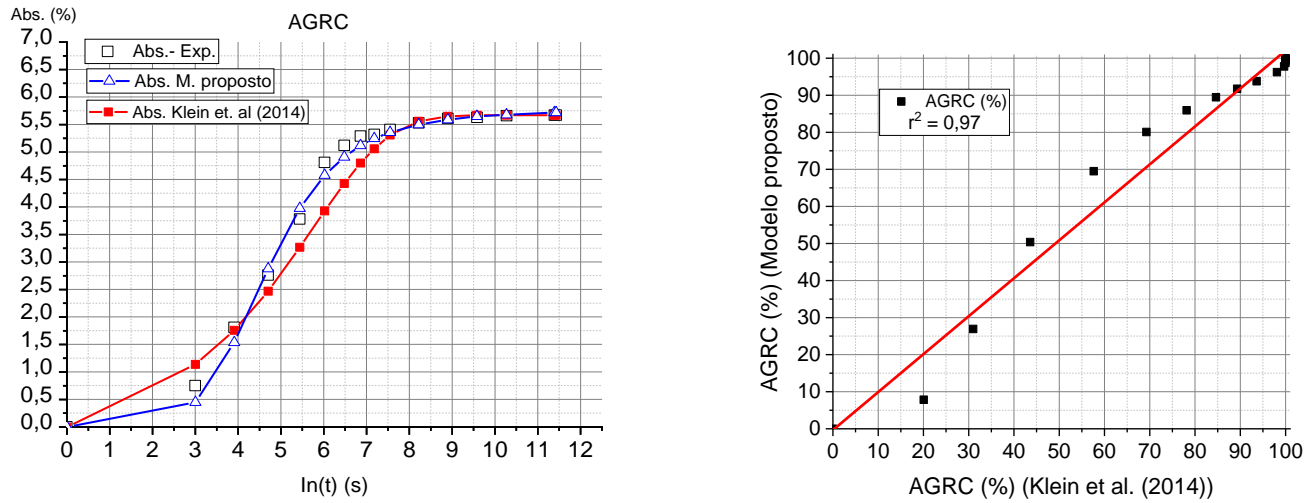
Tabela 4. 12: Parâmetros encontrados para os AGRC, AGRCT e AGN

Agregados	k	p	Equação	r ²
AGRC	0,045	0,57	$A_{(t)} = 5,67. \left[1 - e^{-0,045\left(\frac{t}{0,0003}\right)^{0,57}} \right]$	0,97
AGRC2	0,045	0,57	$A_{(t)} = 5,82. \left[1 - e^{-0,045\left(\frac{t}{0,0003}\right)^{0,57}} \right]$	0,97
AGRC4	0,045	0,57	$A_{(t)} = 5,57. \left[1 - e^{-0,045\left(\frac{t}{0,0003}\right)^{0,57}} \right]$	0,97
AGRC6	0,045	0,50	$A_{(t)} = 5,06. \left[1 - e^{-0,045\left(\frac{t}{0,0003}\right)^{0,50}} \right]$	0,99
AGRC8	0,045	0,39	$A_{(t)} = 3,96. \left[1 - e^{-0,045\left(\frac{t}{0,0003}\right)^{0,39}} \right]$	0,99
AGN	0,045	0,49	$A_{(t)} = 0,85. \left[1 - e^{-0,045\left(\frac{t}{0,0003}\right)^{0,49}} \right]$	0,82

Fonte: Autor (2019)

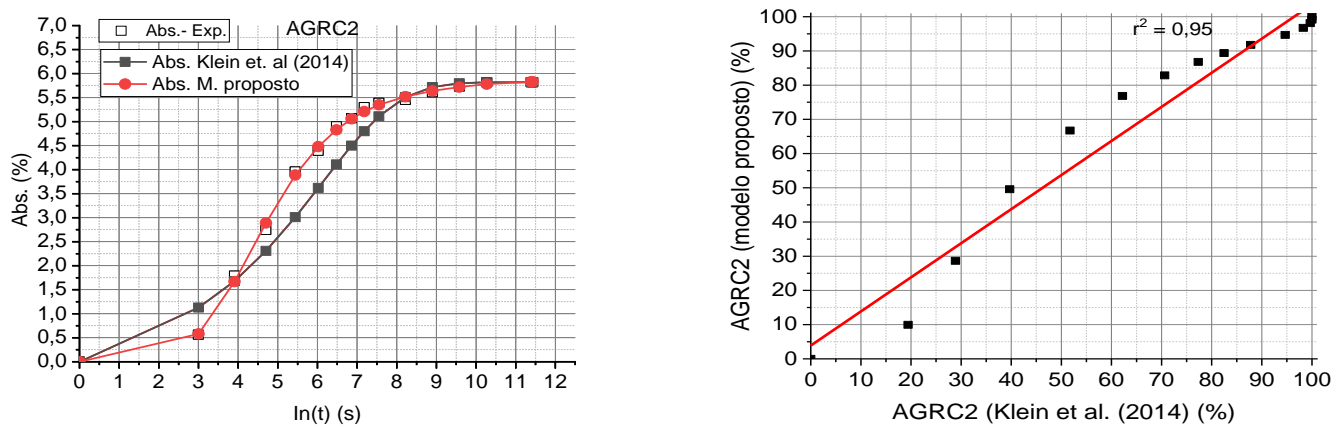
As equações apresentadas nesta Tabela 4.12, foram obtidas a partir dos dados dos ensaios. Como se observa essas equações apresentaram coeficiente de correlação igual ou superior a 0,97, com exceção da equação que modela os percentuais de absorção do agregado graúdo natural. Diante dos resultados obtidos com os modelos apresentados, foram realizadas análises gráficas entre os resultados obtidos entre eles, apresentadas nas Figuras 4.12, 4.13, 4.14, 4.15, 4.16 e 4. 17..

Figura 4. 12 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos - AGRC



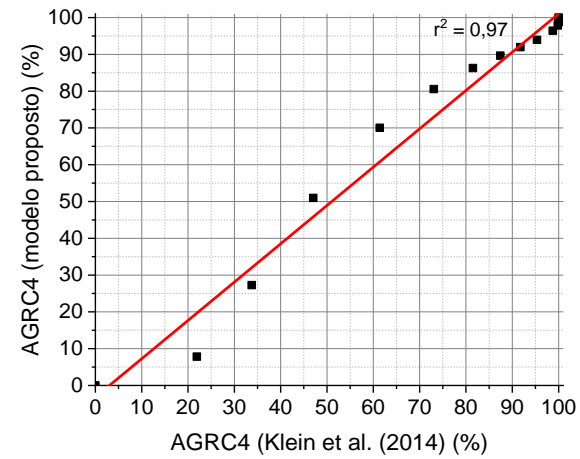
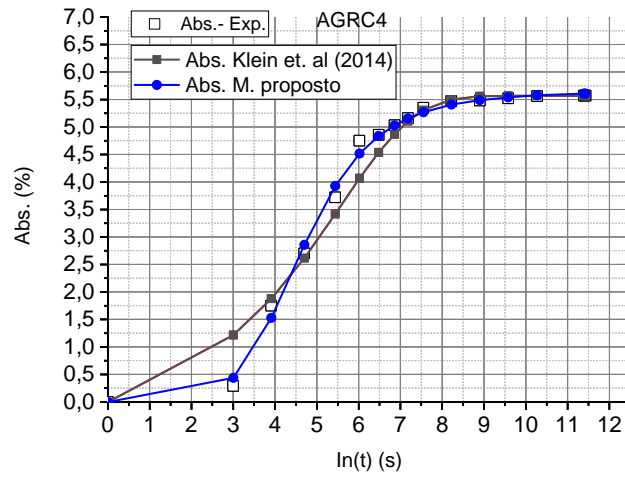
Fonte: Autor (2020)

Figura 4. 13 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos – AGRC2



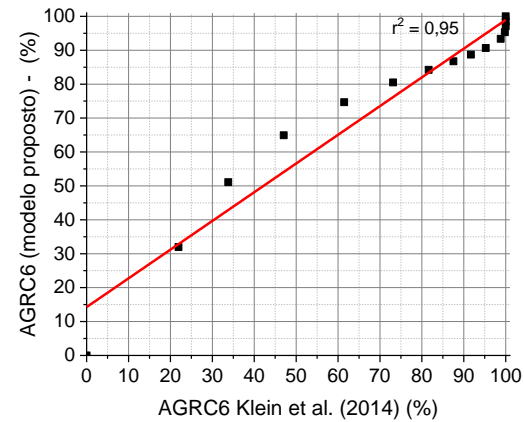
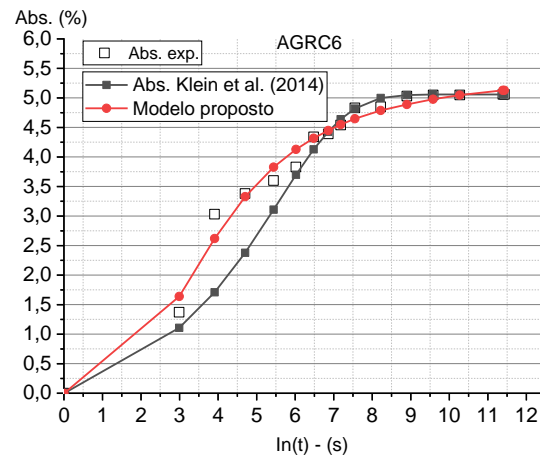
Fonte: Autor (2020)

Figura 4. 14 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos – AGRC4



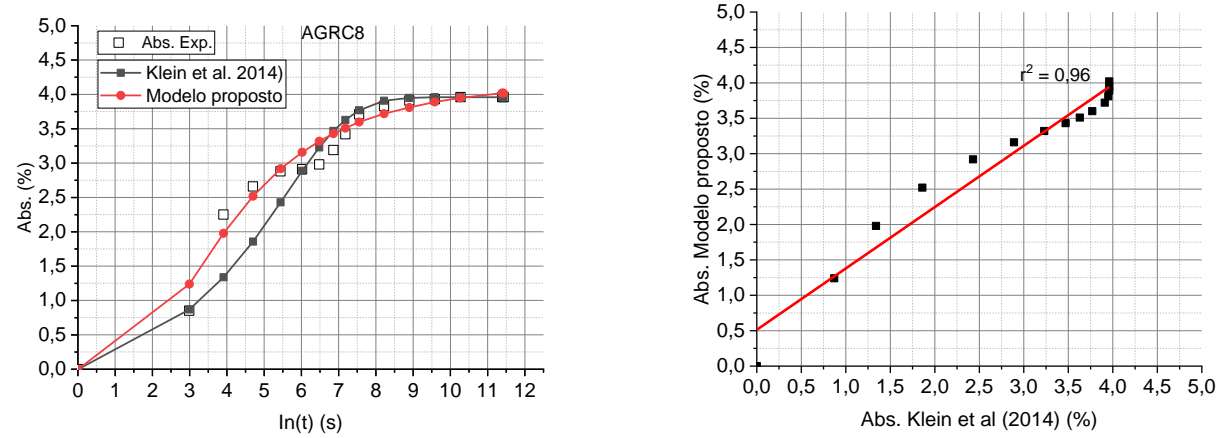
Fonte: Autor (2020)

Figura 4. 15 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos – AGRC6



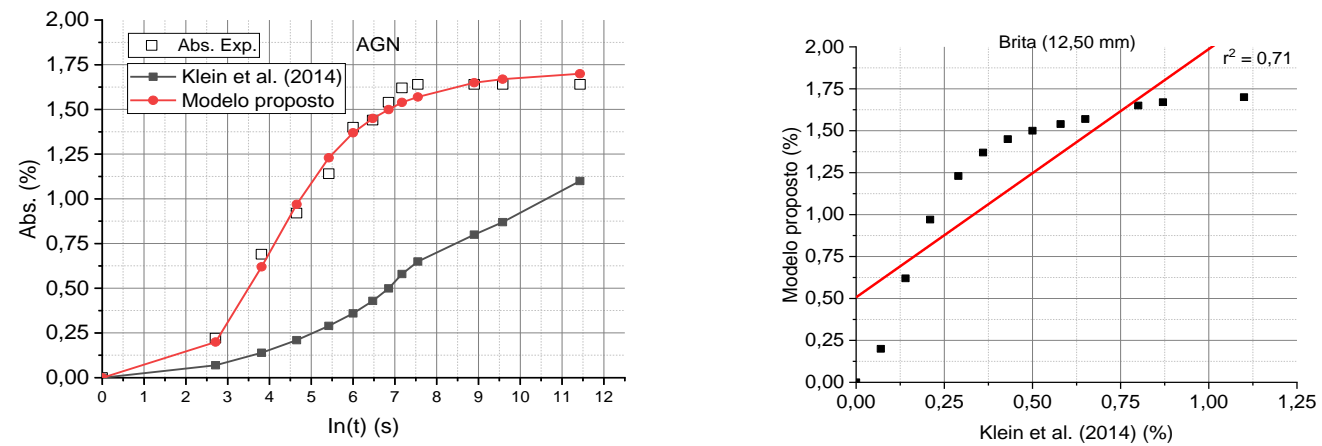
Fonte: Autor (2020)

Figura 4. 16 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos - AGRC8)



Fonte: Autor (2020)

Figura 4. 17 - Curvas de cinética de absorção de água – Comparação entre os modelos - AGN 12,5 mm



Fonte: Autor (2020)

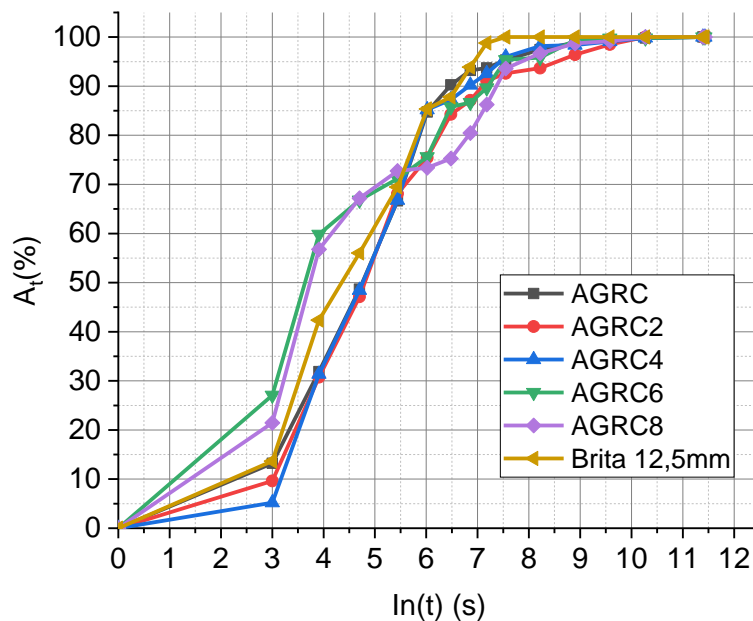
Como pode ser observado nos gráficos apresentados, a comparação entre os modelos tiveram índice de correlação acima de 0,95, com exceção do AGN, cujo índice foi de 0,71.

As análises efetuadas nesse estudo indicam que ambos os modelos são eficientes na modelagem do fenômeno da cinética de absorção de água de agregados reciclados de concreto.

No que diz respeito ao agregado natural analisado se faz necessário uma melhor investigação em relação as diferenças encontradas, entre a equação proposta e o modelo de Klein *et al.* (2014)

Dando prosseguimento ao estudo, foram realizadas as análises dos percentuais de absorções de água total, cujos dados dos ensaios estão apresentados nas tabelas no Apêndice B. A representação gráfica dos dados apresentados nestas tabelas é mostrada na Figura 4.18.

Figura 4. 18- Curvas de absorção de água considerando o percentual total



Fonte: Autor (2020)

Observando as curvas dos percentuais totais de absorção de água se verifica que os agregados absorvem 80% do percentual total entre 7 minutos e 10 minutos.

É consenso entre os pesquisadores que o tempo para os agregados reciclados absorverem 80% do percentual total fica entre 6 minutos e 16 minutos.

4.5 Considerações finais

Os estudos realizados nessa etapa da pesquisa, possibilitaram chegar as seguintes considerações:

- Os AGRCT obtidos com os tratamentos apresentaram percentuais de argamassa presa aos agregados naturais, inversamente proporcional aos tempos de tratamentos. Portanto, mostrou que o tratamento foi eficiente na obtenção de agregados menos porosos e assim mais densos;
- As transformações sofridas pelo AGRC, correspondente aos percentuais de retirada da argamassa presa em função dos tempos de tratamento, foi bem definida com o modelo numérico representado por uma equação exponencial descendente;
- Os consumos de energia usados nos tratamentos para a obtenção dos AGRCT apresentaram tendência de comportamento que foi bem definida por equação exponencial crescente, seguindo, portanto, a tendência dos percentuais de retirada de argamassa dos AGRC;
- Os tratamentos provocaram alterações nas curvas granulométricas reduzindo as partículas de todos os diâmetros do AGRC, provocando pequena quantidade de quebra do AGN;
- A absorção de água e as densidades sofreram maior influência com os tratamentos que os parâmetros de forma. Isto evidencia que os tratamentos de desgaste no moinho de bolas retiram argamassa de maneira uniforme em todas as superfícies dos agregados graúdos reciclados de concreto;
- A análise estatística dos resultados das absorções de água do AGRC e dos AGRCT mostraram que os tratamentos são eficientes para reduzir a porosidade dos agregados graúdos reciclados de concreto;
- O método proposto para análise da cinética de absorção de água dos agregados apresentou maior correlação com os resultados experimentais que o método proposto por Klein *et al.* (2014), além de maior facilidade de obtenção das equações correspondentes aos modelos dos agregados em estudo.

5 CONCRETOS COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE CONCRETO TRATADOS E NÃO TRATADOS

5.1 Introdução

Tendo em vista os objetivos definidos no presente trabalho, neste capítulo foram analisadas as influências dos tratamentos nos AGRC e AGRC2 em concretos. Foram escolhidos concretos autoadensáveis (CAA), tendo em vista o atendimento as propriedades de autoadensabilidade que podem ser altamente influenciadas pela absorção de água desses agregados, e concretos convencionais (CC) com dosagem de uso comum. As influências dos AGRC e AGRC2 nos concretos foram verificadas nos estados fresco e endurecido.

Todos os concretos foram produzidos com agregado miúdo natural (AMN). Nos concretos com AGRC sem tratamento e com tratamento de 2, 4, 6, e 8 minutos (AGRC, AGRC2, AGRC4, AGRC6 e AGRC8) foram usados substituindo em 100% o AGN. Quando a água de absorção dos agregados reciclados foi considerado na produção dos concretos o valor máximo foi de 80% da água de absorção. O concreto de referência do CAA (CAR) e do CC (CCR) foi com 100% de AGN. O planejamento dos concretos está apresentado na Tabela 5.1.

Tabela 5. 1: Resumo dos concretos produzidos com AGRC e AGRC2 e AGN
Concreto autoadensável (CAA)

Agregado graúdo	Concreto – 0% Abs.	Concreto – 80% Abs.
*AGN	CAR	CARc/a
AGRC	CA0s/a	CA0c/a
AGRC2	CA2s/a	CA2c/a
AGRC4	CA4s/a	CA4c/a
AGRC6	CA6s/a	CA6c/a
AGRC8	CA8s/a	CA8c/a
Concreto convencional (CC)		
*AGN	-	CCR
AGRC	-	CC0
AGRC2	-	CC2
AGRC4	-	CC4
AGRC6	-	CC6
AGRC8	-	CC8
*Concretos de referência		

Fonte: Autor (2020)

Nesta Tabela 5.1, os termos “s/a” e “c/a”, significam sem o uso da água de absorção e com o uso de 80% da água de absorção dos AGRC e AGRC2.

Os códigos apresentados tem os seguintes significados: CA0s/a: CAA com AGRC sem o uso da sua água de absorção do AGRC. CA2c/a: CAA com AGRC tratado em 2 minutos (AGRC2), com o uso de 80% da água de absorção do AGRC2. CAR, CAA de referência, produzido com agregados naturais. CC0: CC com AGRC sem tratamento. CC2: com AGRC tratado em 2 minutos (AGRC2). Já no CC todos foram produzidos com 80% da água de absorção do agregado graúdo, por não ser o foco dos CC o estudo da influência da água de absorção dos agregados reciclados.

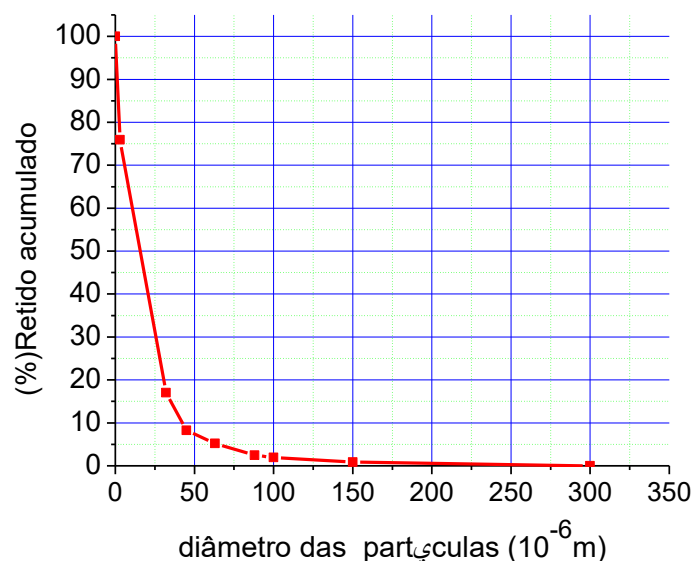
5.2 Materiais usados na obtenção dos concretos

Os materiais utilizados na produção das pastas foram: o cimento CII – Z 32, o resíduo de bloco de mármore e granito (RBMG), a água e o superplastificante. O RBMG usado neste trabalho, como adição mineral, foi obtido de depósito de resíduos de empresas que beneficiam essas rochas e os depositam em terrenos próximo a empresa.

O RBMG foi inicialmente secado em estufa a uma temperatura de $100^{\circ} \pm 5^{\circ}$, em seguida destorroado e peneirado em peneira de abertura 300 μm seguindo o procedimento adotado por CAVALCANTI (2006).

A curva de distribuição granulométrica do RBMG usado nesse trabalho está apresentado na Figura 5.1.

Figura 5. 1- Curva granulométrica do RBMG



Fonte: Autor (2020)

O resultado da composição granulométrica do RBMG mostra que 95% do material usado nos ensaios têm dimensões inferiores a 100 μm .

Dando prosseguimento à determinação das propriedades dos materiais, foi realizada as caracterizações química e física das partículas com diâmetros inferiores a 300 μm .

Esses ensaios foram realizados com o objetivo de verificar as características desses materiais, e dessa forma identificar suas influências nas propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido.

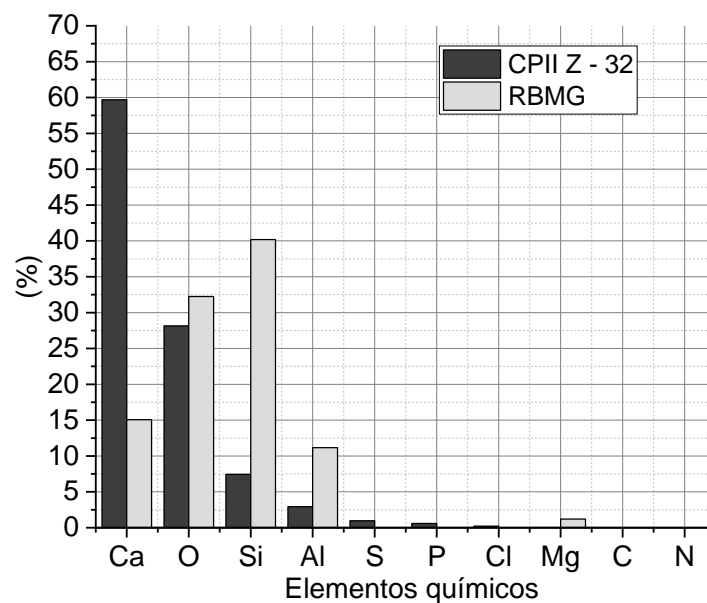
Os resultados da análise do cimento e do RBMG, obtidos do MEV e DRX, ensaios realizados no laboratório de física da UFAL, estão apresentados na Tabela 5.2 e na Figura 5.2.

Tabela 5. 2: Elementos químicos (MEV) - (%) peso

Elementos químicos	CPII Z - 32	RBMG
Cálcio - Ca	59,68	15,06
Oxigênio - O	28,16	32,24
Silício - Si	7,44	40,18
Alumínio - Al	2,92	11,161
Enxofre - S	0,97	0,00
Fósforo - P	0,59	0,00
Cloro - Cl	0,21	0,00
Magnésio - Mg	0,02	1,20
Carbono - C	0,00	0,00
Nitrogênio - N	0,00	0,00

Fonte: Autor (2020)

Figura 5. 2 - Elementos químicos presentes nos materiais CPII – Z e RBMG

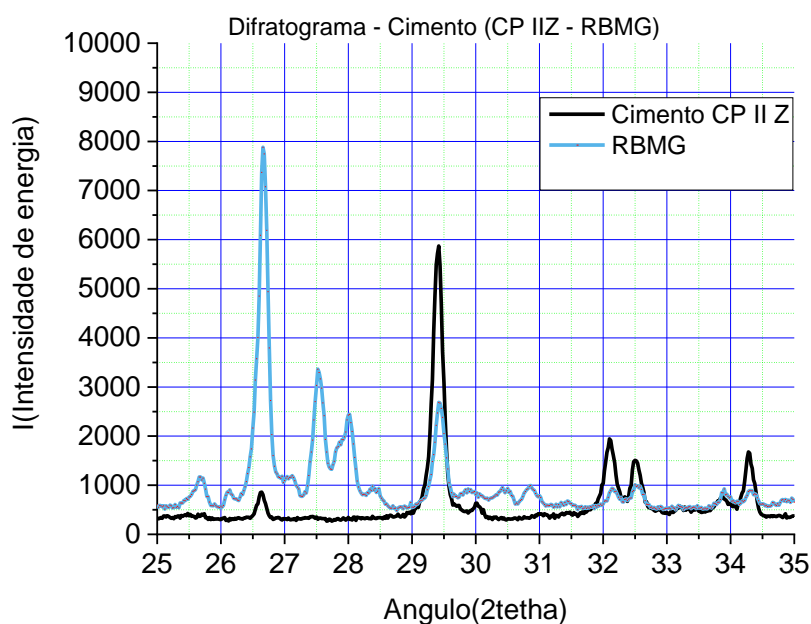


Fonte: Autor (2020)

Observa-se que o percentual de cálcio do cimento, proveniente das substâncias calcárias responsáveis pelas reações de endurecimento, é superior aos dos outros materiais.

O RBMG apresenta composição compatível com as rochas que lhe deram origem, compostas basicamente do mineral silício. A Figura 5.3 mostra o ensaio de difração de Raio x desses materiais.

Figura 5.3 - Resultado do ensaio de DRX



Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados na Figura 5.3 mostram que os materiais têm características diferentes, o cimento tem picos de energia em ângulos diferentes do RBMG.

Seguindo com a caracterização dos materiais utilizados na composição das pastas, o Quadro 5.1 apresenta a massa específica do cimento, do RBMG, da água e do superplastificante, deste último são apresentadas outras informações fornecidas pelo fabricante.

Quadro 5.1: Propriedades físicas dos materiais usados

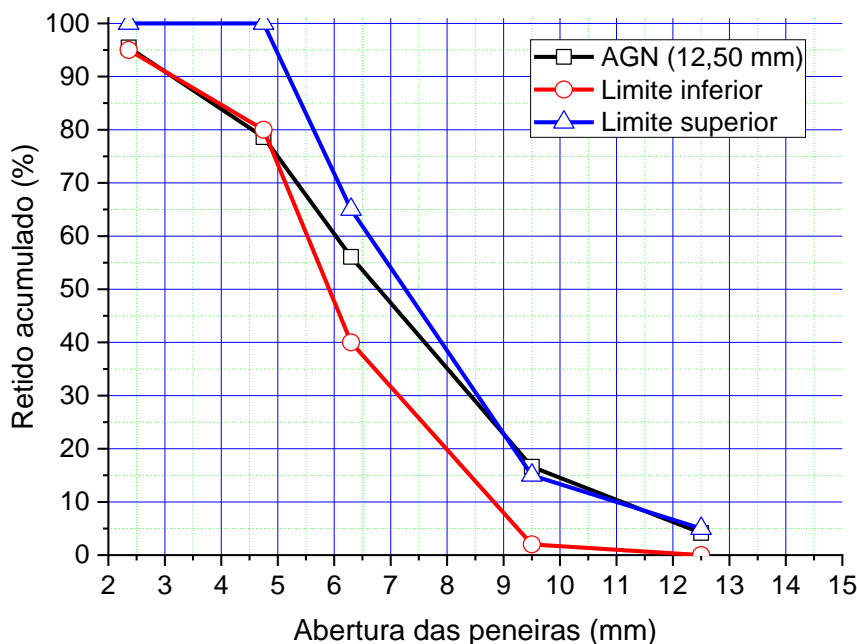
(a) Cimento (CPII – Z 32)		RBMG	Água		
Massa específica - d (g/cm ³)	3,01	2,65	1,00		
(b) Superplastificante (Sp)					
Massa específica d _{sp} (g/cm ³)	Dosagem	Teor de Sólido (%)	Base química	Viscosidade η (cps)	pH
1,067 – 1,107	(0,2 a 1,0) *	28,50 -31,50	Peter carboxylate	<125	5 a 7
(*) Calculado sobre o peso de cimento					

Fonte: (a) Elizabeth cimentos (2017); (b) Ficha técnica da BASF S/A (2019)

As composições das pastas foram determinadas inicialmente para um fator água/cimento (a/c) = 0,50, e um percentual de RBMG de 50% em relação à massa de cimento, definidos de trabalhos já realizados no LEMA/UFAL (LISBOA, 2004; CAVALCANTI, 2006; GOMES; BARROS, 2009; MONTEIRO ET AL., 2015).

O ensaio de composição granulométrica do agregado graúdo natural (AGN) foi realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), cujos dados estão apresentados na Tabela A.3, e gráfico representativo da distribuição representado na Figura 5.4.

Figura 5. 4 - Curva granulométrica da brita 12,5 mm



Fonte: Autor (2020)

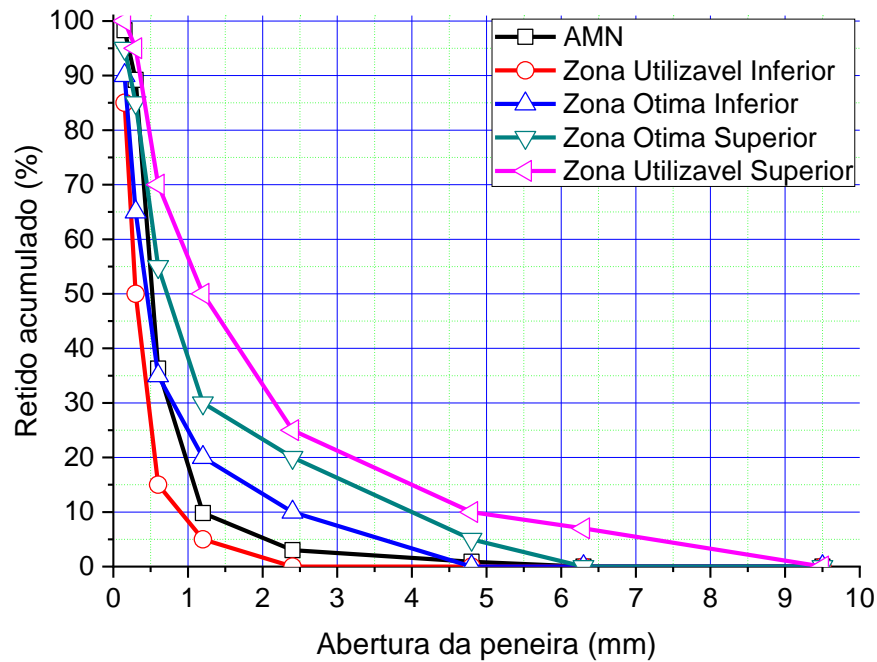
Esse gráfico mostra que esse agregado está dentro dos limites estabelecido pela norma, sendo classificado como brita 12,5 mm.

Essa curva indica que esse agregado tende a uma distribuição proporcional ao tamanho dos agregados, que resulta em boa continuidade. Isto pode ser identificado tendo em vista a inclinação da curva representativa da distribuição granulométrica.

Dando continuidade à caracterização dos materiais usados nessa pesquisa, em seguida foi realizada a caracterização do agregado miúdo natural (AMN).

A composição granulométrica da areia (AMN) usada nesse trabalho, realizada de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2003), apresentou uma característica cujos dados estão apresentados na Figura 5.5.

Figura 5.5 - Curva de distribuição granulométrica do AMN



Fonte: Autor (2020)

O resumo dos parâmetros de granulometria desse agregado está apresentado na Tabela 5.3, onde se observa que ele tem características de um agregado miúdo considerado médio.

Tabela 5.3: Parâmetros granulométricos do AMN

Diâmetro máximo característico (D _{máx})		Módulo de finura (M F)	
2,40		2,40	
d _a (g/cm ³)	d _{sss} (g/cm ³)	A (%)	d(g/cm ³)
2,61	2,63	0,90	2,65

Fonte: Autor (2020)

O gráfico mostra que esse AMN tem um percentual de 35% dos agregados com diâmetro inferior a 0,5 mm. Cerca de 25% entre os diâmetros de 1,28 mm e 0,50 mm. Apenas cerca de 8,0% de agregados entre 1,28 mm e 2,48 mm.

Comparando esse AMN com os limites determinados pela NBR 248 (ABNT, 2008), se observa que este agregado está entre as zonas utilizável e ótima inferior.

Os agregados usados na obtenção dos concretos além dos AGN e AMN foram os AGRC e AGRCT, obtidos e caracterizados nos capítulos 3 e 4.

5.3 Métodos usados na obtenção dos concretos

A obtenção dos concretos autoadensáveis foi realizada usando o método de Gomes (GOMES, 2002), como já apresentado no fluxograma da Figura 2.19.

Os métodos de determinação do ponto de saturação do superplastificante (Psp) e de determinação dos percentuais de agregados, usando as composições com o “esqueleto granular”, foram determinados como propostas de métodos apresentados a seguir.

5.3.1 Estudo e composição das pastas

Para a apresentação do método de determinação do Psp das pastas, inicialmente foi realizado o estudo das pastas.

As composições das pastas que foram usadas para a determinação do Psp, com o ensaio do cone de Marsh, assim como os parâmetros físicos que foram usados nesse estudo, estão apresentadas na Tabela 5.4, onde se verifica que foi usado um volume fixo de pasta de 1,10 litros.

Tabela 5. 4: Parâmetros e quantidade de materiais para as pastas $a/c=0,50$

Sp. (%) de sólido	RBMG (%)	Cimento d – (kg/m ³)	RBMG d – (kg/m ³)	V(pasta) (litros)
30%	0,50	3.010,00	2.650,00	1,10
Superplastificante (%) Sp	Cimento (g)	RBMG (g)	Água (Real) (ml)	Sp (g)
0,00	1077,48	538,74	538,74	0,00
0,20	1077,48	538,74	531,55	7,19
0,40	1077,48	538,74	524,37	14,37
0,60	1077,48	538,74	517,19	21,55
0,80	1077,48	538,74	510,00	28,74

Fonte: Autor (2020)

Observa-se nos dados da Tabela 5.4 que os percentuais de superplastificante variaram de 0,00% a 0,80%, em intervalos equivalentes de 0,20%, onde as quantidades de superplastificantes foram calculadas em relação à massa de cimento.

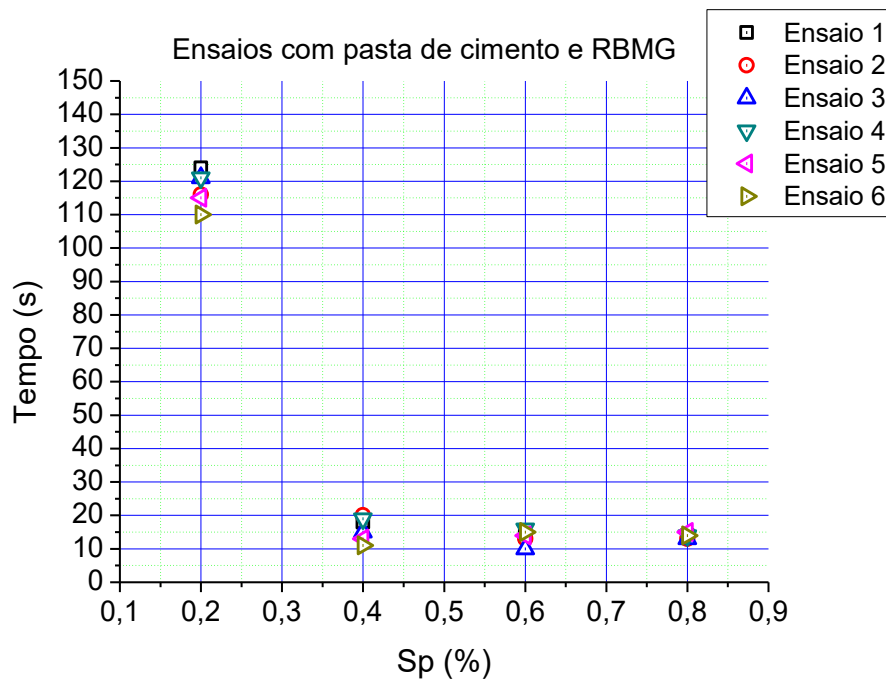
Como se observa na Tabela 5.4, a água do superplastificante é compensada, de modo que diminui na medida que aumenta o percentual do superplastificante.

5.3.1.1 Determinação do ponto de saturação do superplastificante – Método analítico proposto

Os ensaios para determinação do ponto de saturação da pasta da matriz cimentícia foram realizados usando o cone de Marsh de acordo com o procedimento usado por vários pesquisadores (GOMES, 2002; LISBOA 2004; MONTEIRO 2015; MELO 2019).

Foram realizados seis ensaios para cada um dos percentuais de superplastificante, usando pasta com mesmas composição de materias, sendo alterado apenas os percentuais de superplastificantes. Os tempos médios, correspondentes aos escoamentos das pastas, estão apresentados na Figura 5.6.

Figura 5. 6 - Gráfico representativo dos ensaios de pastas



Fonte: Autor (2020)

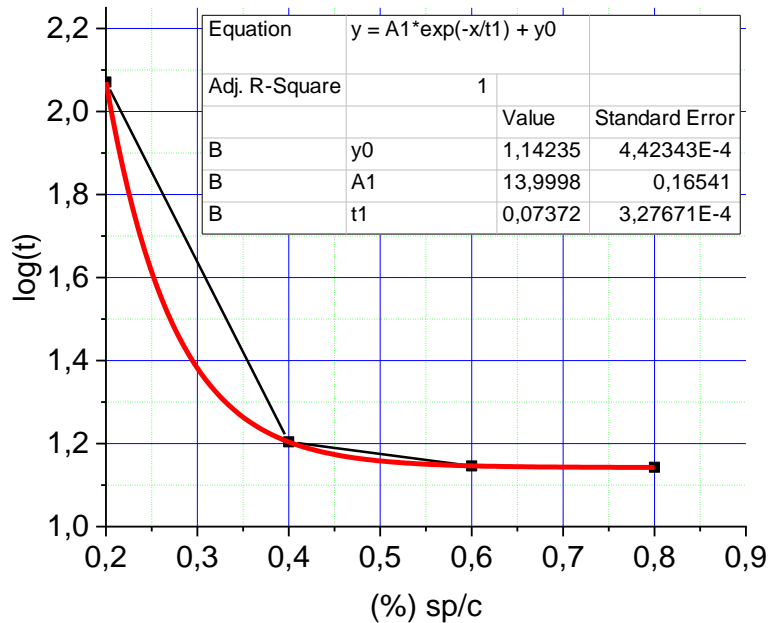
A partir desses resultados foram obtidos os valores constantes da Tabela 5.5, que foram usados para obtenção do gráfico representado na Figura 5.7.

Tabela 5. 5: Resultados dos ensaios no cone de Marsh – pastas a/c=0,50

% Sp	Tempo médios (s)	log(t)
0,2	118,0	2,071
0,4	16,0	1,204
0,6	14,0	1,146
0,8	13,9	1,143

Fonte: Autor (2020)

Figura 5.7 - Gráfico de determinação do ponto de saturação do superplastificante



Fonte: Autor (2020)

Aplicando-se o MAP, com os dados da Tabela 5.5, foi obtida a curva representativa do fenômeno, Figura 5.7, juntamente com os parâmetros da função sugerida para a modelagem do fenômeno, apresentado como MAP.

De acordo com os parâmetros obtidos pelo MMQ, (A_1 , t_1 e y_0), substituindo na função proposta pelo MAP, tem-se a Equação (5.1).

$$y = 13,999. e^{\left(-\frac{x}{0,073}\right)} + 1,142 \quad (5.1)$$

O MAP identifica o Psp como o percentual de (Sp/c) - x, ponto onde a derivada da função representativa do fenômeno de escoamento do material cimentício é igual a (-0,57), de acordo com a Equação (5.2).

$$\frac{dy}{dx} = -189,883. e^{-13,565.x} = -0,57 \rightarrow x = 0,43\% \quad (5.2)$$

A solução da Equação (5.2) apresenta como resultado para o percentual ótimo de superplastificante o valor de 0,43 %. Este valor foi o considerado como referência para a

composição das pastas usadas na obtenção dos CAA, desse estudo. Com o resultado obtido para o Psp na pasta, foi considerado o valor de 0,45% para ser usado nos CAA.

Uma vez definida a dosagem de superplastificante, em função da dosagem do cimento, e dos demais componentes, percentual de RBMG, fator a/c, foram determinadas a dosagem do cimento.

Dando prosseguimento a definição das composições dos CAA's foram determinadas as composições dos agregados, tendo como referência a produção de 1m³ de concreto.

5.3.2 Estudo da composição dos agregados – Método proposto

As composições de agregados foram determinadas para os binários AGN e AMN, AGRC com AMN e AGRCT com AMN; todos já caracterizados nos capítulos anteriores. Os percentuais ótimos das misturas de agregados graúdos e agregados miúdos, foram definidos baseados nos menores índices de vazios da composição binária.

Para isso foram realizados ensaios de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), método “C”. Método já aplicado em vários estudos para a determinação da composição de agregados para CAA (GOMES, 2002; MONTEIRO, 2015 MELO, 2019).

Neste estudo os percentuais ótimos de agregados foram determinados ajustando os dados dos ensaios de composição, “esqueleto granular”, por uma curva parabólica do segundo grau que, por meio de análise dos dados, se constituiu como a função que melhor se ajustou ao fenômeno.

Este método matemático proposto auxilia na determinação do ponto que representa a melhor percentagem da composição em função do menor índice de vazios, considerando que em se tratando de agregados reciclados há uma maior variação da medição da massa unitária de cada medida da composição, o que dificulta a seleção do ponto de melhor percentagem, fato que a curva pode auxiliar nesta determinação do menor índice de vazios. Neste estudo, o método foi aplicado para todas as composições binárias dos agregados.

A aplicação em agregados naturais apresentou resultados mais precisos. Em agregados reciclados apresentaram resultados coerentes quando comparados com os obtidos diretamente dos ensaios.

O método apresentado tem pode auxiliar na elaboração de programas computacionais voltados para a dosagem de concretos.

A seguir são apresentadas as equações (5.3) e (5.4), que representam as equações usadas na determinação dos percentuais das composições de agregados, considerando o menor percentual de vazios.

As Equações (5.5) e (5.6) que definem a maior massa unitária.

$$f(x) = ax^2 + bx + c \quad (5.3)$$

$$\frac{dy}{dx} = 2. a. x + c = 0 \quad (5.4)$$

$$g(x) = ew^2 + gx + h \quad (5.5)$$

$$\frac{dg}{dw} = 2. e. x + g = 0 \quad (5.6)$$

Nessas equações, os valores de x são definidos para $x \in \mathbb{R}/0 \leq x \leq 100$.

Os coeficientes dessas equações são obtidos pelo Método dos Mínimos Quadrados (MMQ), por meio de software disponíveis no mercado como o Origin8-pro e Maple.

Esta proposta de método para a definição dos percentuais de agregados, foi elaborada a partir das observações dos comportamentos das massas unitárias e percentuais de vazios de várias composições desse estudo e de outros autores.

Conforme estudos observados na literatura, vários pesquisadores já identificaram que nos ensaios de esqueleto granular de agregados, os comportamentos das variações de massas unitárias e percentuais dos índices de vazios se aproximam de curvas parabólicas (DÍAZ, 1998; GOMES, 2002; MONTEIRO *et al.*, 2015; TORALES *et al.*, 2018).

Díaz (1998) indica que o comportamento das variações das massas unitárias e dos percentuais de vazios descrevem uma curva, entretanto não foi realizada análise para definição das curvas que identificam o comportamento das composições de agregados.

Em vista disso foi desenvolvido neste estudo um método numérico com o ajuste de curvas para descrever esses ensaios.

Desta forma, os resultados obtidos dos ensaios foram analisados de acordo com o ajuste de curvas, por meio de uma função de segundo grau como já relatado.

5.3.2.1 Composição de agregados – Aplicação do método

A definição das composições com os agregados utilizados, foram realizadas pela determinação da massa unitária, variando em cada composição o percentual de areia.

Foi iniciado com o percentual de 100% de agregado graúdo, o que significa que os percentuais de agregado miúdo foram crescentes de 0% a 100% em intervalos de 10%.

Em todos os ensaios, tanto para os agregados naturais como para os AGRC e AGRCT, para a medição dos volumes foi usando um recipiente cilíndrico com capacidade 0,008m³.

Para cada percentual de areia foram efetuadas três medições, sendo usados para a definição dos parâmetros das curvas, o valor médio das medições.

Os resultados dos ensaios das composições com agregados naturais estão apresentados no Anexo C, Tabela (C1).

Os resultados para as massas unitárias foram obtidos a partir do uso da Equação (5.7). Esse valor da unitária média ($M_{Unit. (m)}$) foi calculado como a média das três amostras

$$M_{unit.(m)} = \frac{M_m}{V} \quad (5.7)$$

Os Índices de vazios foram calculados usando a Equação (5.8).

$$I_{Vazios}(\%) = \frac{(MEA - M_{Unit.})}{MEA} \cdot 100 \quad (5.8)$$

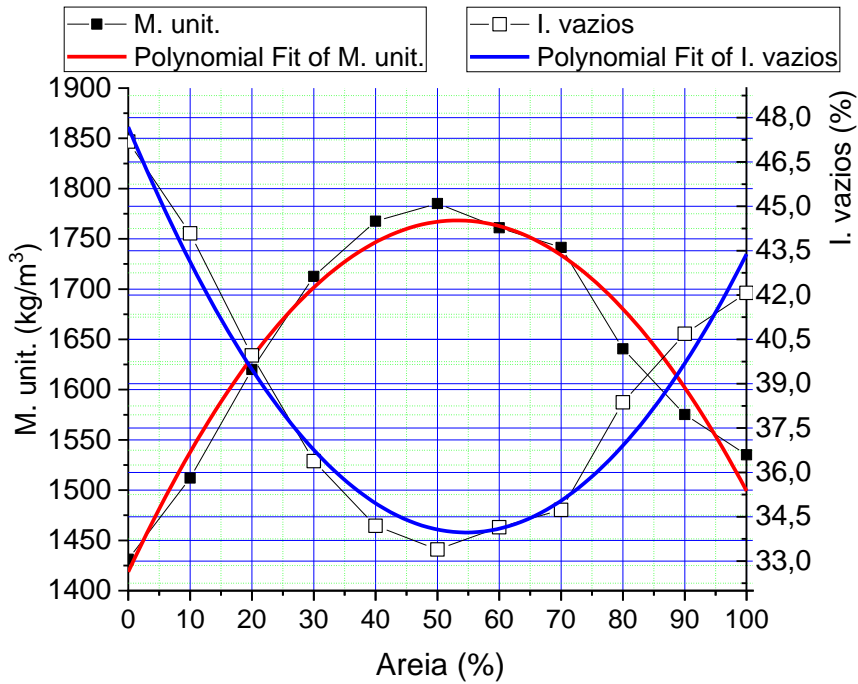
A massa específica aparente (MEA) para cada percentual de substituição da composição foi calculada com o uso da Equação (5.9).

$$MEA = f_{AM} \cdot MEA_{(AM)} + f_{AG} \cdot MEA_{(AG)} \quad (5.9)$$

Nesta Equação (5.9), f_{AM} e f_{AG} são as frações unitárias do agregado miúdo e do agregado graúdo, respectivamente. $MEA_{(AM)}$ e $MEA_{(AG)}$ por sua vez, são as massas específicas aparentes do agregado miúdo e graúdo.

A análise dos dados da Tabela C1, Anexo C, mostrou que o ponto de maior massa unitária e menor índice de vazios corresponde ao percentual de substituição de 50%. Entretanto, é possível que esse ponto tenha um valor diferente, pois esses dados são pontuais em intervalos de 10%. O resultado da análise dos dados da Tabela C1 está apresentado na Figura 5.8.

Figura 5. 8 - Ensaio de Composição “Esqueleto granular” de AGN e AMN



Fonte: Autor (2020)

Na definição das funções o grau de correlação das curvas foram, $r^2 = 0,95$. Verificou-se que os pontos de máximo e de mínimo das curvas, correspondente a maior massa unitária e menor percentual de vazios respectivamente, diferem da observação de 50% de substituição, e que esses pontos não coincidem.

Este gráfico mostra que os pontos de máximo da curva, correspondente ao percentual de substituição que fornece maior massa unitária e se encontra muito próximo do ponto de mínimo, correspondente ao menor índice de vazios.

Isto ocorre quando a mistura é composta de agregados naturais, porque as massas específicas têm valores aproximados. As equações propostas para determinação dos pontos de massa unitária máxima e menor índice de vazios estão representadas na Tabela 5.6.

Tabela 5. 6: Parâmetros da composição AGN x AMN

Equações	Condição	M. unit. (máxima) - (%)	
Equação ($M_{unit} = y=f(x)$)	$\frac{dy}{dx} = 0$	cálculo	54,70
		experimental	50,00
$y_{Munit.} = -0,12x^2 + 13,13.x + 1418,66$	$-0,24x + 13,13 = 0$		
Equação ($I_{vazio} = y=f(x)$)	$\frac{dy}{dx} = 0$	Índice de vazios (mínimo)	
		cálculo	53,37%
$y_{I.vazio.} = 0,0046x^2 + 0,50.x + 47,68$	$-0,009x + 0,50 = 0$	experimental	50,00

Fonte: Autor (2020)

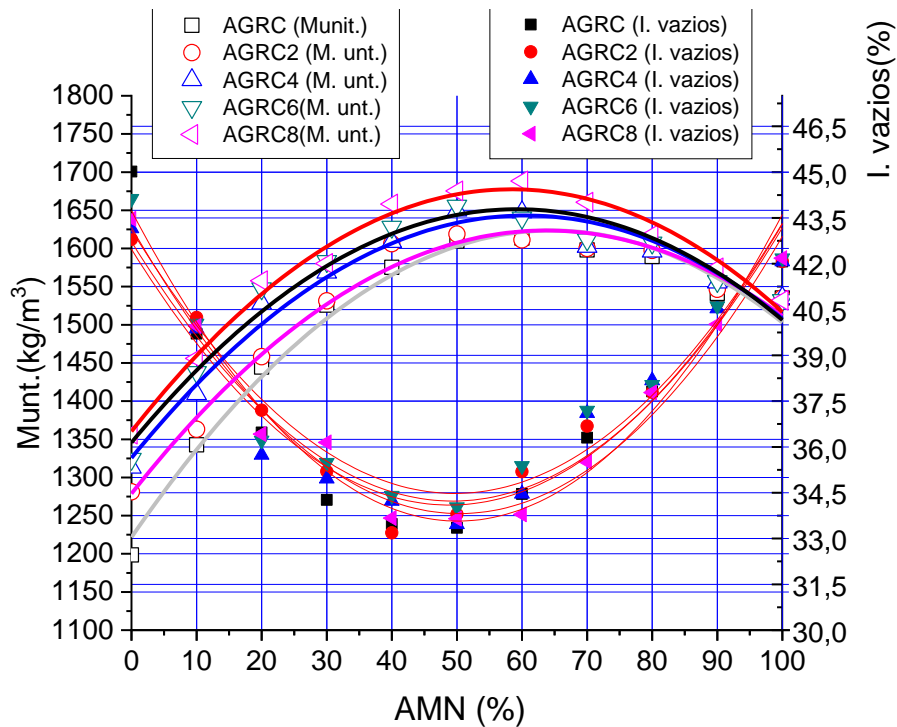
Como mostra a Tabela 5.6, enquanto que os percentuais de agregado miúdo obtido do ensaio é de 50%, o calculado é de 54,70% de areia para a maior massa unitária e 53,37% para o menor índice de vazios.

Tendo em vista que os valores calculados adotados no estudo, estão mais próximos de um percentual de 55% de agregado miúdo natural, sendo o valor inteiro mais próximo, esse percentual foi definido para a composição desse concreto, considerado como concreto de referência (CAR).

A determinação das composições binárias variando os percentuais de AMN (areia) com AGRC, e conseqüentemente com cada AGRCT, (AGRC2, AGRC4, AGRC6 e AGRC8), também foram obtidos com o uso da elaboração dos gráficos onde se representam no mesmo gráfico, a variação do percentual de vazios e a massa unitária da composição.

Os agregados são misturados, de modo a se obter máxima homogeneização, e são realizadas três pesagens para cada percentual de substituição. A Figura 5.9 apresenta o gráfico das curvas das massas unitárias e dos percentuais de vazios, obtidas de acordo com a metodologia já apresentada.

Figura 5. 9- Curvas das massas unitárias e índice de vazios



Fonte: Autor (2020)

Os dados das composições granulométricas dos AGRC e AGRCT estão apresentadas na Tabela C1. Esses dados mostram que existe uma relação entre os tempos de tratamento e as

massas unitárias. Com um tempo maior de tratamento as massas unitárias aumentaram, de modo que as do AGRC8 apresentam valores maiores.

Isto se explica porque com o acréscimo do tempo de tratamento, aumenta o percentual de argamassa retirada dos AGRC, e dessa forma se tem agregados mais densos, como já foi confirmado nos ensaios de porosidade e absorção de água.

Além disso, os acréscimos das massas unitárias refletem não apenas a redução da porosidade dos agregados graúdos, mas também a modificação da forma do AGRCT e da diminuição do diâmetro das partículas, fatores que estão relacionados com o empacotamento, e um melhor empacotamento leva a maior massa unitária.

As análises dos valores das massas unitárias mostram que os percentuais de AMN que proporcionam massa unitária máxima está no intervalo entre 50% e 60% de substituição de AMN. Por sua vez os pontos de menor índice de vazios das composições estão no intervalo de substituição de AMN entre 40% e 60%, para os dados determinados em intervalos de substituição de 10%, como mostra a Figura 5.9.

Observa-se nesse gráfico que existe uma tendência que se compatibiliza com o comportamento do gráfico de uma função parabólica do segundo grau. Esse comportamento já foi identificado por ensaios realizados por outros pesquisadores (DÍAZ, 1998; GOMES, 2002; TORALES *et al.*, 2018). Verificaram ainda que o percentual de vazios decresce, passa por um valor mínimo e volta a crescer, de acordo com os percentuais de substituição dos agregados na mistura.

A tendência identificada nos dados obtidos dos ensaios do esqueleto granular foi analisada e quantificada. Com a utilização de software foram obtidas as funções com o uso do MMQ, representando a variação das massas unitárias em função dos percentuais de substituição de AMN, apresentadas na Tabela 5.7.

Tabela 5. 7: Equações das massas unitárias

Composição	Equação ($M_{unit} = y=f(x)$)	$\frac{dy}{dx} = 0$	r^2
AGRC	$y_{Munit.} = -0,096x^2 + 12,44.x + 1221,61$	$-0,192x + 12,44 = 0$	0,97
AGRC2	$y_{Munit.} = -0,084x^2 + 10,82.x + 1278,77$	$-0,168x + 10,82 = 0$	0,97
AGRC4	$y_{Munit.} = -0,086x^2 + 10,49.x + 1324,92$	$-0,172x + 10,49 = 0$	0,95
AGRC6	$y_{Munit.} = -0,087x^2 + 10,32x + 1354,77$	$-0,174x + 10,32 = 0$	0,95
AGRC8	$y_{Munit.} = -0,092x^2 + 10,85.x + 1360,29$	$-0,184x + 10,85 = 0$	0,97

Fonte: Autor (2020)

Os índices de correlação dos resultados obtidos dos ensaios apresentados na Tabela 5.8 ficaram entre 0,95 e 0,97.

Utilizando o mesmo método, foram obtidas as funções que definem as variações dos percentuais de vazios das respectivas composições, sendo definidas as equações representadas na Tabela 5.8. Nessa análise os índices de correlação (r^2) ficaram entre 0,92 e 0,97.

Tabela 5. 8: Equações dos percentuais de vazios - Iv (%)

AGRC	Equação ($I_{\text{vazio}} = y=f(x)$)	$\frac{dy}{dx} = 0$	r^2
AGRC	$y_{V(\%)} = 0,0035x^2 - 0,34 \cdot x + 43,73$	$0,07x - 0,34 = 0$	0,93
AGRC2	$y_{V(\%)} = 0,0034x^2 - 0,34 \cdot x + 42,72$	$0,006x - 0,34 = 0$	0,93
AGRC4	$y_{V(\%)} = 0,0035x^2 - 0,34 \cdot x + 42,47$	$0,006x - 0,34 = 0$	0,92
AGRC6	$y_{V(\%)} = 0,0035x^2 - 0,340 \cdot x + 43,10$	$0,007x - 0,340 = 0$	0,92
AGRC8	$y_{V(\%)} = 0,0037x^2 - 0,37 \cdot x + 43,10$	$0,0074x - 0,37 = 0$	0,97

Fonte: Autor (2020)

Efetivando-se os cálculos dos percentuais de AMN que proporcionam os menores percentuais de vazios e maiores massas unitárias, que correspondem a resolução das equações diferenciais das Tabelas (5.7 e 5.8), tem-se os resultados apresentados na Tabela 5.9.

Tabela 5. 9: Valores dos percentuais de AMN para o Iv (%) mínimo e a $M_{\text{unit.}}$ máxima

Agregado gráudo	Função (vazios)		Função ($M_{\text{unit.}}$)	
	(%) AMN	Iv (%) _{min.}	(%) AMN	$M_{\text{unit.max}}$
AGRC	50	33,60	65	1624,61
AGRC2	57	32,85	63	1619,09
AGRC4	57	32,73	61	1645,40
AGRC6	50	32,70	57	1690,36
AGRC8	52	36,48	63	1615,50
AGN	55	34,09	55	1777,50

Fonte: Autor (2020)

Como foi observado, o percentual obtido na composição entre o AGN e o AMN, correspondente ao menor índice de vazios e maior massa unitária foi de 53,37% de AMN e 46,63% de AGN. Entretanto, conforme já definido, utilizou-se os percentuais de 55,0% de substituição de AMN e 45,0% de AGN.

Os resultados obtidos apresentados na Tabela 5.9, mostram que os percentuais de AMN correspondentes ao menor percentual de vazios calculados, foram diferentes, variando entre 50,0% e 57,0%. Para continuidade da determinação da composição e evitando variações entre

as composições dos agregados nos concretos, se considerou usar os mesmos percentuais de AMN usado na composição com o AGN, isto é 55,0% de agregado miúdo e 45,0% para o agregado graúdo.

Seguindo esse critério, foi identificado os percentuais de menor índice de vazios das composições, entre os valores obtidos dos ensaios e os obtidos com o uso das equações da Tabela 5.8. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.10.

Tabela 5. 10: Parâmetros do Índices de vazios (%) e a substituição de AMN (%)

Agregado graúdo	Calculado (%)		Usado (%)		Índice de vazios (%)		Diferença
	AMN	AGRC	AMN	AGRC	Calculado	Experimental	Índice de vazios (%)
AGN(Ref.)	55	45	55	45	34,10	33,69	0,41
AGRC	50	50	55	45	35,48	33,35	2,13
AGRC2	57	43	55	45	34,71	33,18	1,36
AGRC4	57	43	55	45	35,09	34,03	1,74
AGRC6	50	50	55	45	35,48	34,03	2,13
AGRC8	52	48	55	45	33,86	33,65	0,51

Fonte: Autor (2020)

É importante salientar que o objetivo desse estudo foi encontrar uma função matemática para modelar a forma como as massas unitárias e os volumes de vazios se comportam em função dos percentuais de agregados das misturas.

5.3.3 Procedimento de obtenção e caracterização dos CAA

Dentro do aspecto analisado nesse estudo de composição de agregados, verifica-se que a definição numérica das composições de agregados para o cálculo dos percentuais de menor índice de vazios e maior massa unitária é possível e produz resultados satisfatórios.

Esse método apresentado permite a obtenção de resultados de massas unitárias e percentuais de vazios para qualquer percentual de substituição. Isto porque são obtidos por uma função matemática contínua dentro do intervalo considerado no ensaio.

A definição pelos pontos dos ensaios experimental, permite uma definição de um intervalo, ou a definição de um ponto que pode não se constituir no ponto ótimo. Com o método proposto, além da definição matemática de um ponto específico da composição, tem-se a vantagem de ser usado como parte de uma rotina computacional para a definição dos percentuais de agregados na obtenção das composições de concretos.

Uma vez definida a composição da pasta e do esqueleto granular foram definidas as composições do CAA em função do volume de pasta.

A caracterização dos concretos foi realizada de acordo com os procedimentos apresentados no Quadro 5.2.

Quadro 5. 2: Métodos de ensaios e normas usadas na caracterização dos concretos

Estado	Ensaio	Normas	Idade (dias)	Amostra
Fresco	Espalhamento (Slump flow)	NBR 15823 2 (ABNT, 2017b)	-	1
	Caixa L	NBR 15823- 4 (ABNT, 2017c)		1
	Funil V	NBR 15823- 5 (ABNT, 2017d)		1
	Consistência (Abatimento do tronco de cone)	NBR NM67 (ABNT, 2011)		1
Endurecido	Resistência à compressão	NBR 5739 (ABNT, 2018)	28	5
	Módulo de elasticidade	NBR 5739 (ABNT, 2017c)	28	3
	Resistência à tração por compressão diametral	NBR 7222 (ABNT, 2019)	28	3
	Absorção de água, Índice de vazios e massa específica	NBR 9778 (ABNT, 2009)	28	2

Fonte: Autor (2020)

Dando prosseguimento à pesquisa de acordo com o planejamento experimental apresentado, passou-se a etapa de elaboração dos concretos sendo iniciado pelos CAA e em seguida os concretos convencionais (CC).

Os estudos dos AGRC e AGRCT mostraram que as propriedades físicas que mais sofreram influências dos tratamentos foram as porosidades, determinadas pelas absorções de água e as densidades.

Desta forma, foram produzidos CAA sem água de absorção dos AGRC e AGRCT e CAA com 80% da água de absorção desses agregados, como forma de verificar a influência que os tratamentos teriam nesses concretos. Além disso, vários estudos pesquisados indicam que os agregados reciclados absorvem cerca de 80% da sua água de absorção durante a produção dos concretos.

Com as composições do CAA determinadas, a produção dos concretos foi realizada em uma betoneira com capacidade de 150 litros, sendo produzidos 23 litros de concreto para cada composição.

A sequência de produção dos concretos foi realizada de acordo com o seguinte procedimento:

a) Colocação dos agregados (AMN, AGRC) juntamente com a água de absorção, misturando por 2 minutos;

- b) Colocação do RBMG e do cimento juntamente com 80% da água da composição, misturando por 2 minutos. Fica reservado cerca de 20% da água da mistura para lavar o resíduo de superplastificante do recipiente, promovendo o seu aproveitamento total;
- c) Parada de 2 minuto para limpeza da betoneira com colher de pedreiro e espátula, para descolamento da argamassa presa à betoneira;
- d) Colocação do superplastificante e do restante da água da composição, misturando por 3 minutos;
- e) Retirada do concreto para os ensaios e preenchimento dos corpos de prova.

O tempo total de preparação do CAA foi de 9 minutos, correspondente ao tempo de absorção de 80% do total da água de absorção do AGRC e AGRCT. Vale salientar que nos dois casos, com e sem água de absorção, a dosagem de superplastificante foi a mesma.

5.4 CAA com 40% de pasta sem água de absorção dos AGRC e AGRCT

Uma vez definida a composição da pasta com a definição do Psp, e dos percentuais ótimos de agregados baseado em estudos já relatados, foram definidas as composições do CAA em função do volume de pasta. Em estudos prévios foi definido o volume de pasta adequado de 40%.

A fim de melhor investigar o efeito da água de absorção dos agregados reciclados nos concretos, e assim também observar de que forma este procedimento se comportará com os AGRCT, foram obtidos concretos com 40% de pasta e sem água de absorção dos AGRC e AGRCT.

A Tabela 5.11 apresenta o resumo das propriedades físicas dos agregados usados nas composições dos CAA com 40% de pasta.

Tabela 5. 11: Propriedades físicas dos agregados

Agregados	d_r (kg/m ³)	d_a (kg/m ³)	d_{SSS} (kg/m ³)	$A_{água}$ (%)
AGRC	2.500,00	2.180,00	2.310,00	5,67
AGRC2	2.530,00	2.240,00	2.360,00	5,13
AGRC4	2.540,00	2.310,00	2.420,00	4,53
AGRC6	2.560,00	2.370,00	2.470,00	4,09
AGRC8	2.630,00	2.400,00	2.490,00	3,77
AGN	2.710,00	2.650,00	2.680,00	0,80
AMN	2.650,00	2.610,00	2.625,00	1,00

Fonte: Autor (2020)

As características físicas dos agregados variaram de acordo com o tempo de tratamento, onde se verifica que enquanto o AGRC apresentou uma densidade aparente de 2.180,00 kg/m³, o AGRC8 apresentou densidade aparente de 2.400,00 kg/m³, correspondente a um acréscimo superior a 10,0%. Por sua vez, a absorção de água foi reduzida cerca de 66%.

De acordo com esses resultados das propriedades dos agregados foi calculada a composição de cada um dos concretos, conforme apresentado na Tabela 5.12, levando em consideração a definição do uso de 40% de pasta em todas as composições. O CAA de referência (CAR) foi obtido com 100% de agregados naturais.

Tabela 5. 12: Composições do CAAs/a com 40% de volume de pasta.

CAA	Materiais em volume (dm ³)						Materiais em Massa (kg)						Arg. seca. (%)
	Água	Cimento	AM	AG	RBMG	Sp	Água	Cimento	AM	AG	RBMG	Sp	
CA0	192	127	332	270	74	5,4	192	392	880	675	196	5,90	68
CA2	192	127	332	270	74	5,4	192	392	880	683	196	5,90	68
CA2	192	127	332	270	74	5,4	192	392	880	686	196	5,90	68
CA6	192	127	332	270	74	5,4	192	392	880	691	196	5,90	68
CA8	192	127	332	270	74	5,4	192	392	880	713	196	5,90	67
Composição do concreto de referência													
CAR*	192	127	332	270	74	5,4	192	392	880	732	196	5,90	67

Fonte: Autor (2020)

*CAR – Concreto autoadensável de referência (Produzido com agregados naturais)

O teor de superplastificante (Sp) usado em todas as composições foi de 0,45% da dosagem de cimento, onde o teor de sólido do Sp foi de 30%.

O teor de água contido no Sp foi descontado da água da mistura. As relações paramétricas dos concretos com as composições apresentadas na Tabela 5.12, estão apresentadas na Tabela 5.13.

Tabela 5. 13: Relações paramétricas dos concretos

CAA	RELAÇÃO PARAMÉTRICA DAS COMPOSIÇÕES				
	V(ag)/Vt(ag) (m ³ /m ³)	V(ag) (%/m ³)	Vam/V(arg) (%/m ³)	M(ag)/m ³ (kg/m ³)	M(am)/m ³ (kg/m ³)
CA0	0,45	32	45	675	880
CA2	0,45	32	45	683	880
CA2	0,45	32	45	686	880
CA6	0,45	32	45	691	880
CA8	0,45	32	45	713	880
CAR	0,45	32	45	732	880

Fonte: Autor (2020)

As relações paramétricas apresentadas na Tabela 5.13, mostra as relações entre os volumes de agregado graúdo $V(ag)$, volume total de agregados $Vt(ag)$, volume de argamassa $V(arg)$, volume de agregado miúdo $V(am)$, e a massa de agregados miúdos $M(am)$ e graúdos $M(ag)$, em relação ao volume de concreto. Se observa nesta Tabela 5.13 que os valores das relações paramétricas dos concretos produzidos estão dentro dos limites de referências para CAA, de acordo com a literatura existente (GOMES, 2002; LISBOA, 2004; GOMES; BARROS, 2009; MONTEIRO *et al.*, 2015; MELO, 2019). Conforme já relatado, a produção dos CAA com 40% de volume de pasta foram divididos em dois grupos: 1 - CAA sem água de absorção (CAAs/a) e 2 – CAA com água de absorção (CAAc/a).

Uma vez obtidos os CAA, foram realizados os testes para a identificação das suas propriedades nos estados fresco e endurecido.

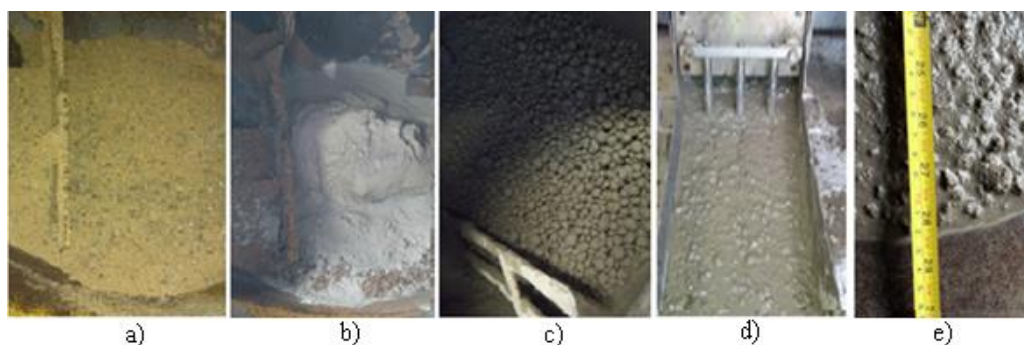
5.4.1 Propriedades no estado fresco do CAAs/a

As variáveis medidas nos ensaios no estado fresco, para a determinação dos parâmetros de autoadensabilidade, foram espalhamento (Slump flow, t500 e o índice de estabilidade visual (IEV), tempo de escoamento (Funil – V) e habilidade passante (Caixa – L, com três ferros).

Todos os ensaios foram baseados na NBR 15823 (ABNT, 2017). Os CAAs/a com 40% de pasta foram produzidos com a mesma metodologia usada na obtenção dos CA038.

Na figura 5.10 são apresentados os detalhes da produção e de alguns ensaios realizados dos CAA com 40% de volume de pasta e sem o uso da água de absorção.

Figura 5. 10 - Etapas da produção e ensaios do CAA sem água de absorção



Fonte: Autor (2020)

A Figura 5.9a) mostra a mistura de agregados graúdos e miúdos com parte da água de amassamento da mistura; A 5.9b), a adição do cimento e RBMG; A 5.9c) mostra o aspecto do concreto após a mistura dos sólidos com 80% da água da mistura, verifica-se o empelotamento

da mistura antes da aplicação do Sp; A 5.9d) o CAA na Caixa-L e na Figura 5.9e) detalhe do concreto no ensaio de Slump flow. Os resultados dos ensaios de autoadensabilidade monoponto dos CAA sem água de absorção estão apresentados na Tabela 5.14.

Tabela 5. 14: Resultados dos ensaios monoponto dos CAA

CAA	t ₅₀₀ (s)	d ₁ (mm)	d ₂ (mm)	Slump (médio) mm	FUNIL - V (s)	Caixa-L (h ₂ /h ₁)
CA0s/a	4	570	560	565	11,0	0,85
CA2s/a	3	580	560	570	10,0	0,85
CA4s/a	3	590	610	600	11,0	0,92
CA6s/a	2	610	640	625	8,0	0,93
CA8s/a	3	590	630	610	8,0	0,90
CAR	2	570	620	595	11,0	0,85

Fonte: Autor (2020)

Esses resultados da Tabela 5.14 mostram que os CAA estão dentro dos parâmetros exigidos pela NBR 15823 (ABNT, 2017) como mostrado na Tabela 5.15.

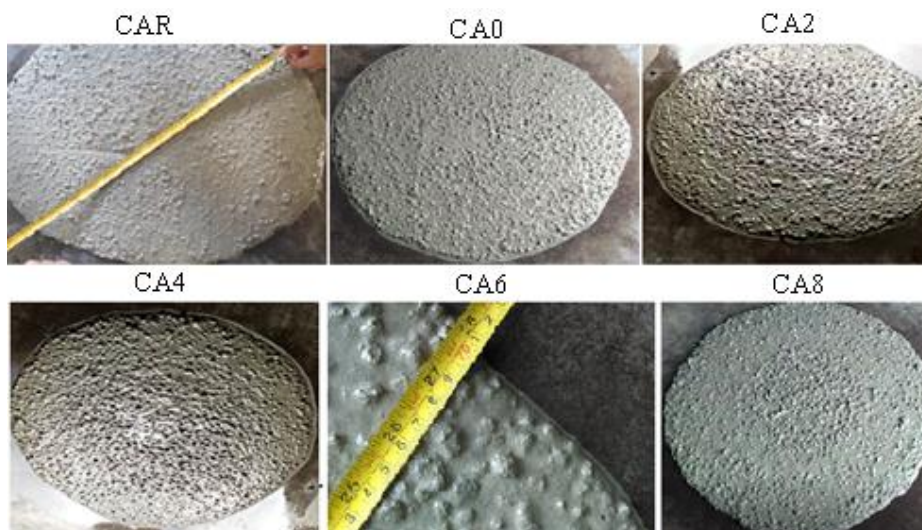
Tabela 5. 15: Parâmetros adotados pela EFNARC e NBR 15823 (ABNT, 2017)

Método	Un.	Ensaio		Classificação NBR 15823 (ABNT, 2017)					
		Mínimo	Máximo	CA0	CA2	CA2	CA6	CA8	CAR
Slump	mm	550	800	SF1	SF1	SF1	SF1	SF1	SF1
T ₅₀₀	(s)	2,0	5,0	VS2	VS2	VS2	VS2	VS2	VS1
Funil-V	(s)	6,0	12	VF2	VF2	VF2	VF2	VF2	VF1
L - Box	h ₂ /h ₁	0,80	1,0	PL2	PL2	PL2	PL2	PL2	PL2

Fonte: NBR 15823 (ABNT, 2019)

As análises dos índices de estabilidade (IEV) de todos os CAA, conforme apresentados na Figura 5.11, indicam que os concretos apresentaram estabilidade.

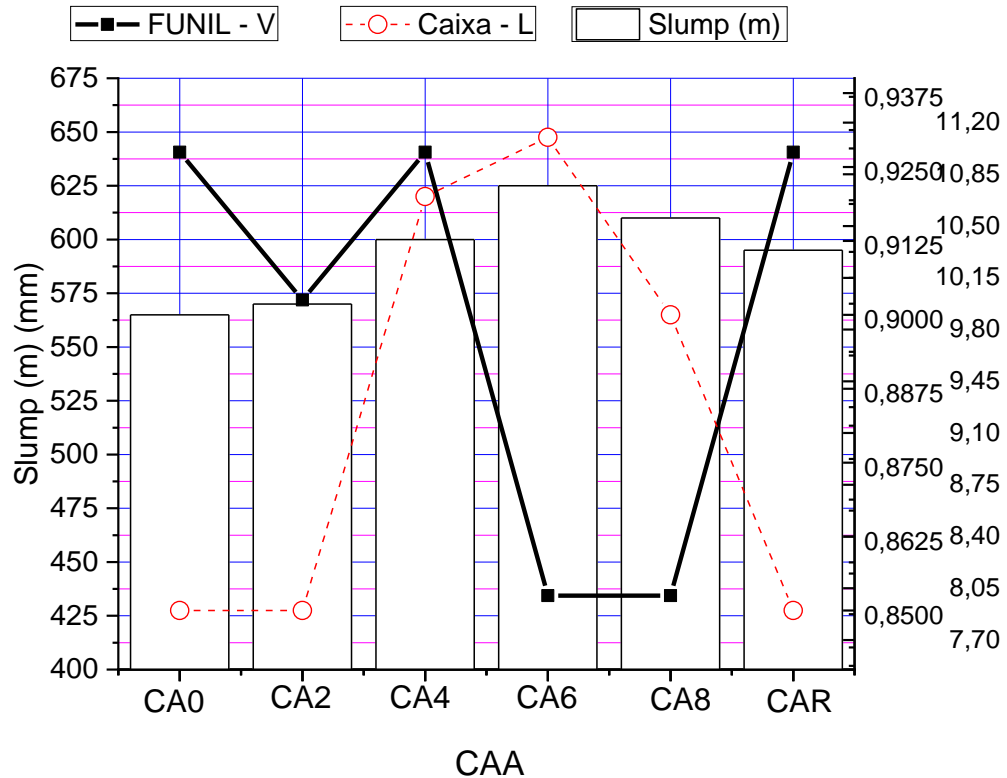
Figura 5. 11- Slump flow dos CAA



Fonte: Autor (2020)

Para melhor entendimento dos resultados alcançados pelos CAA sem água de absorção foi realizada a análise dos parâmetros dos ensaios monoponto, cujo resumo está apresentado na Figura 5.12.

Figura 5.12 - Análise dos ensaios monoponto



Fonte: Autor (2020)

A análise do gráfico apresentado na Figura 5.16 mostra que os tratamentos foram eficientes de modo que proporcionaram CAA com maiores espalhamentos (Slump flow).

Os resultados dos índices obtidos na Caixa – L foram coerentes com os resultados do Slump flow. Os resultados obtidos dos escoamentos no Funil - V tem um comportamento compatível com os resultados mencionados anteriormente. Entretanto os resultados não apresentam o mesmo padrão de proporcionalidade.

Esperava-se que com o aumento do tempo de tratamento, produzindo AGRCT mais arredondado e menos porosos os espalhamentos seriam proporcionais aos tempos de tratamentos. Seguindo com esse critério os índices da Caixa – L aumentariam e os tempos de escoamento no Funil – V diminuiriam.

Isto não ocorre de forma linear. Portanto, os resultados apresentados indicam que outros fatores, como as mudanças nas características granulométricas dos agregados graúdos, interferem nesses índices.

Ao comparar os resultados dos ensaios monoponto dos CAA com o CAR se verificou que CA4, CA6 e CA8 apresentaram maior espalhamento que o CAR, assim como apresentaram maior capacidade passante, caracterizado pelos índices da Caixa - L. Entretanto, o CAR apresentou coesão semelhante ao CA0 e CA4.

Esta análise mostra ainda que, conforme já observado o CAA que teve um melhor desempenho nos parâmetros dos ensaios monoponto foi o CA6.

Os parâmetros de autoadensabilidade, Slump flow e Funil-V do CA6 e CA8, tem valores próximos, no entanto o parâmetro correspondente à Caixa-L, indica que o CA6 apresenta melhor parâmetro de capacidade passante.

5.4.2 Propriedades no estado endurecido do CAAs/a

As características dos concretos no estado endurecido foram determinadas com a análise dos seguintes ensaios: resistência à compressão axial (f_c), de acordo com a norma NBR5739 (ABNT, 2019), módulo de elasticidade estático tangente inicial na compressão (E_{ci}), realizado de acordo com a norma NBR8522 (ABNT, 2017) e resistência à tração por compressão diametral (f_t).

Além desses ensaios de resistência foram determinadas as porosidades com o uso da absorção de água de acordo com a norma NBR 9778 (ABNT, 2005).

Os corpos de provas (cp) utilizados para determinação das propriedades citadas foram curados em tanques de água e os ensaios de caracterização foram realizados com a idade de 28 dias, com os cp úmidos. Antes, porém, os cp foram retificados para garantir que as suas superfícies estivessem horizontais, garantindo uma tensão de compressão uniformemente distribuída.

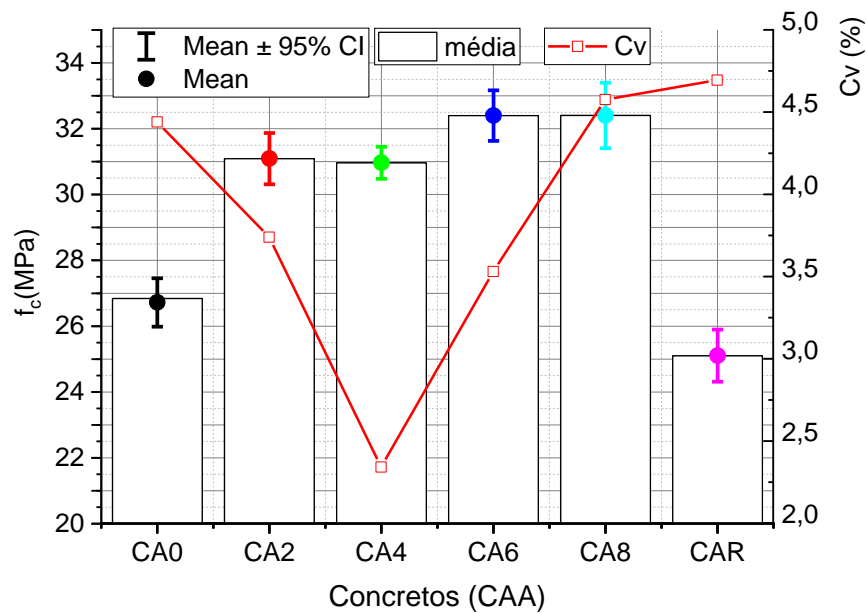
Os resultados e análises das propriedades físicas dos CAAs/a foram realizadas por meio de análise estatística e comparações de tabelas e gráficos, relacionando as variáveis de resposta com as características dos AGRC, AGRCT e com o concreto de referência (CAR).

Estas análises tiveram como objetivo determinar as influências dos tratamentos de desgaste dos agregados nos respectivos concretos.

5.4.2.1 Análise estatística dos resultados das resistências à compressão do CAAs/a

Os cdp cilíndricos (10 cm x 20 cm) dos CAA foram rompidos de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2019) para determinação da resistência à compressão, os resultados estão apresentados na Figura 5.13. Esses resultados foram resumidos a partir dos ensaios apresentados no Anexo C, Tabela C2.

Figura 5. 13 - Resultados dos ensaios à compressão dos CAAs/a



Fonte: Autor (2020)

Como se observa na Figura 5.13, tanto o desvio padrão (Dp) quanto ao coeficiente de variação (Cv) dos valores de f_c , podem ser considerados bons para todos os concretos, tendo em vista a classificação da NBR 5739 (ABNT, 2018).

Esta norma considera o ensaio excelente quando $Cv \leq 3$, muito bom para $3 < Cv \leq 4$, bom quando $4 < Cv \leq 5$, razoável $5 < Cv \leq 6$ e deficiente quando $Cv > 6$. É importante observar que esse grupo de concretos com AGRC e AGRCT apresentaram $f_{ck} > 25$ MPa.

Ao comparar as resistências à compressão média (f_{cm}) dos CAAs/a, se observou que as resistências médias dos CAA com AGRC e AGRCT foram maiores que a do CAA com agregados naturais, considerado CAA de referência (CAR).

A análise estatística dos resultados dos CAA sem água de absorção foi realizada tendo em vista as diferenças de resistência à compressão apresentadas. Estas análises foram usadas

para verificar se as diferenças apresentadas qualificam os concretos como materiais estatisticamente diferentes. Neste sentido foi realizada a análise usando o método de normalidade de dados de Shapiro–Wilk. Em seguida, foi usada a ANOVA e método de Tukey. As respostas das análises de normalidade dos dados, juntamente com a análise estatística citada, estão representados na Tabela 5.16.

Tabela 5. 16: Análise de normalidade, ANOVA e teste Tukey dos dados de resistência à compressão

Testes de Normalidade					
Testes	Estatísticas				P-valores
Shapiro - Wilk	0,936328472				0,0725
Tabela da ANOVA					
	G.L.	Soma de Quadrados	Quadrados Médio	Estat. F	P-valor
CAA	4	141,32	35,33	26,05	1,33E-08
Resíduos	25	33,89	1,35		
Teste Tukey					
Agrupamentos					
Fator	Médias das resistências à compress (MPa)o			Grupos	
CA6	32,69			a	
CA8	32,49			a	
CA2	30,97			a	
CA4	30,78			a	
CA0	26,66			b	

Fonte: Autor (2020)

O teste de normalidade apresentado mostra o $p\text{-valor} = 0,0725 > 0,05$, portanto a hipótese H_0 deve ser rejeitada no nível de significância de 0,05. A conclusão é que os dados são considerados como provenientes de uma população normalmente distribuída.

Tendo em vista o resultado apresentado no teste de normalidade, foi aplicado a análise de variância (ANOVA), a fim de verificar se os resultados apresentados pelas resistências à compressão dos CAAs/a são estatisticamente diferentes, no nível de significância de 5%. Os resultados obtidos estão apresentados na Tabela 5.16 e mostram que o $p\text{-valor} = 1,33 \cdot 10^{-8} < 0,05$, indica que a hipótese nula deve ser rejeitada, pois existe ao menos um valor estatisticamente diferente. Portanto, é necessário aplicar o teste Tukey a fim de identificar os concretos diferentes.

O teste Tukey mostrou que os concretos do mesmo grupo, neste caso, o grupo correspondente a letra a, não apresentam diferenças, sendo portanto considerados estatisticamente iguais, como mostra a Tabela 5.16. Nesta análise ficou caracterizado que o CA0 é um concreto diferente dos demais, apresentando resistência à compressão média inferior. Por outro lado os concretos CA2s/a, CA4s/a, CA6s/a e CA8s/a são considerados estatisticamente iguais, em relação a resistência à compressão.

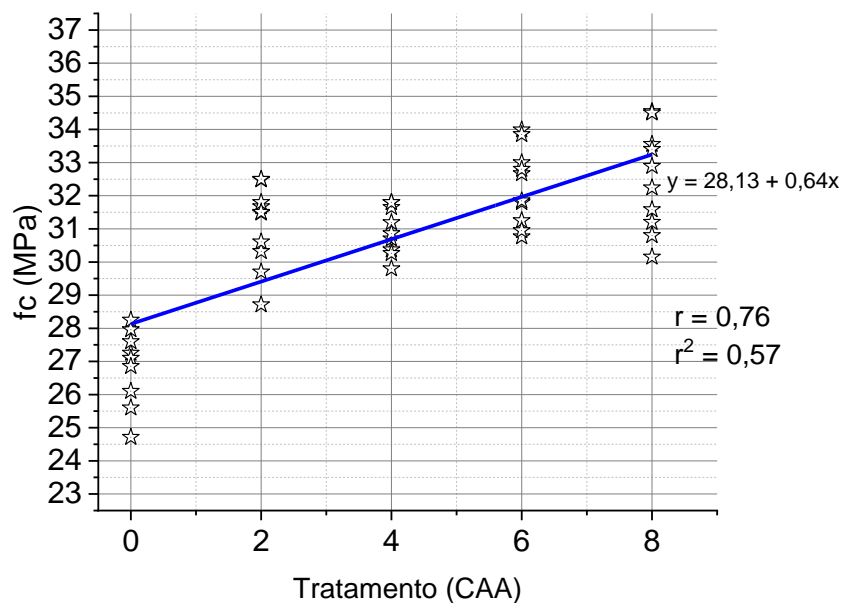
Isto indica que, de acordo com essa análise, o tempo de 2 minutos é suficiente para o tratamento de desgaste dos AGRC, de acordo com a composição e metodologia utilizadas.

Foi determinada a análise de correlação de Pearson, tendo como variável de resposta a resistência à compressão. O valor obtido para p foi de $1,39 \times 10^{-10}$, portanto inferior a 0,05. Desta forma se concluiu pela não rejeição da hipótese nula.

Portanto, existe correlação entre as variáveis tempo de tratamento dos AGRC caracterizado pelos tempo de tratamentos de 2, 4, 6 e 8 minutos e as respectivas resistências à compressão.

Existe uma correlação forte entre as variáveis apresentadas, dado pelo coeficiente r de Pearson equivalente a 0,76, sendo uma correlação linear positiva. Os resultado dessa análise está apresentada na Figura 5.14.

Figura 5. 14 - Relação entre as resistências à compressão dos CAA s/a e os tempos de tratamento dos AGRC



Fonte: Autor (2020)

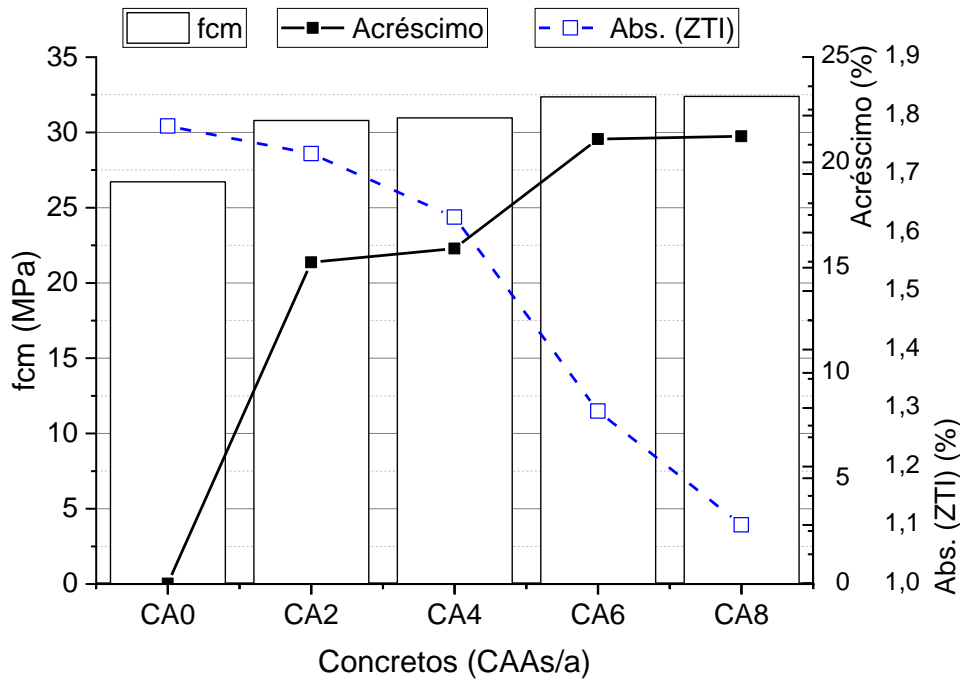
Conforme o resultado apresentado na Figura 5.14, a correlação forte apresentada entre os tempos de tratamentos dos AGRC e os acréscimos das resistências à compressão dos CAAs/a obtidos, confirmam a hipótese de que os tratamentos no AGRC são eficientes.

Portanto, proporcionam agregados menos porosos, mais densos, em consequência concretos com resistências à compressão maiores.

Dando prosseguimento às análises das propriedades físicas dos CAAs/a, foram realizadas as diversas comparações entre as resistências à compressão dos concretos e as propriedades físicas dos AGRC e AGRCT.

Em relação aos CAA com AGRC e AGRCT se observou um acréscimo de resistência à compressão em função dos tempos de tratamentos, como apresentado na Figura 5.15.

Figura 5. 15- Resistências à compressão em relação a absorção da ZTI dos AGRC no CAAs/a



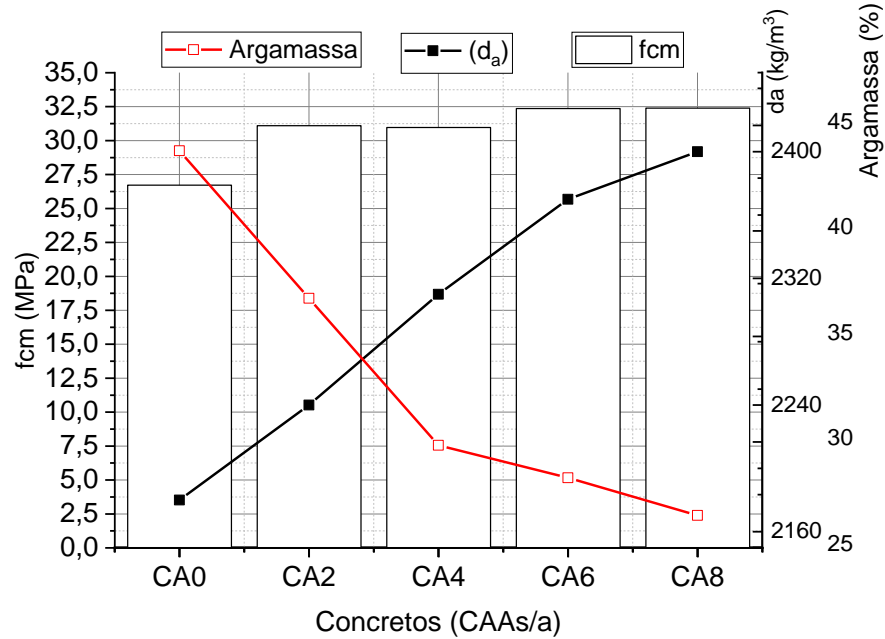
Fonte: Autor (2020)

Ao analisar as resistências à compressão dos CAAs/a representados na Figura 5.15, se observou que existe uma relação entre o acréscimo da resistência à compressão e a redução da absorção da ZTI dos AGRC e AGRCT.

Esses resultados são coerentes com os resultados encontrados por outros pesquisadores (METHA; MONTEIRO, 2008). Concluíram que a zona de transição interfacial (ZTI) dos concretos é quem determina as suas resistências, por ser o ponto mais frágil do material, local de maior absorção de água. Isto confirma a hipótese de que os tratamentos produzem agregados de melhor qualidade e portanto, concretos mais resistentes.

A avaliação da relação entre a resistência à compressão axial média (f_{cm}), os percentuais de argamassa presa dos AGRC e AGRCT e as densidades aparentes (d_a) dos concretos estão apresentadas na figura 5.16.

Figura 5.16 - Análise das resistências à compressão, percentuais de argamassa e densidades dos CAAs/a



Fonte: Autor (2020)

Na Figura 5.16, verifica-se, em geral, que o aumento da resistência à compressão está relacionado a diminuição do teor de argamassa presa nos AGRC e consequentemente nas melhoras das propriedades de densidade e absorção de água dos AGRCT.

Se observa também neste gráfico que, tendo em vista que os concretos foram produzidos sem a água de absorção do agregado graúdo, fica evidente que o fator que tem maior influência na diferença das resistências apresentadas é decorrente da porosidade dos agregados, caracterizado pelo aumento da densidade dos AGRCT.

Agregados mais porosos, por ter uma absorção de água maior, implica em um fator a/c efetivo menor. Em consequência disso, em princípio, concretos com agregados de mesma natureza, mas com diferença na porosidade, os concretos produzidos com os de maior porosidade poderia ter maior resistência à compressão.

Porém a resistência do agregado, caracterizada pela densidade, e da zona de transição também interferem fortemente na resistência. Além disto, se observa que a fragilidade da ZTI, é o fator determinante da resistência dos concretos com AGRC e AGRCT, comportamento confirmados por Tenório (2007), Tseng (2010), Tenório (2016).

Estudos publicados apresentaram resultados diversos para concretos com AGRC. Para um consumo de cimento próximo a 400 kg/m^3 foram obtidos concretos com f_{cm} superiores a 40 MPa, usando materiais pozolânicos como adição mineral, como a sílica ativa, e próximo a 30 MPa quando não foram usadas adições pozolânicas (TAM *et al.*, 2018; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016).

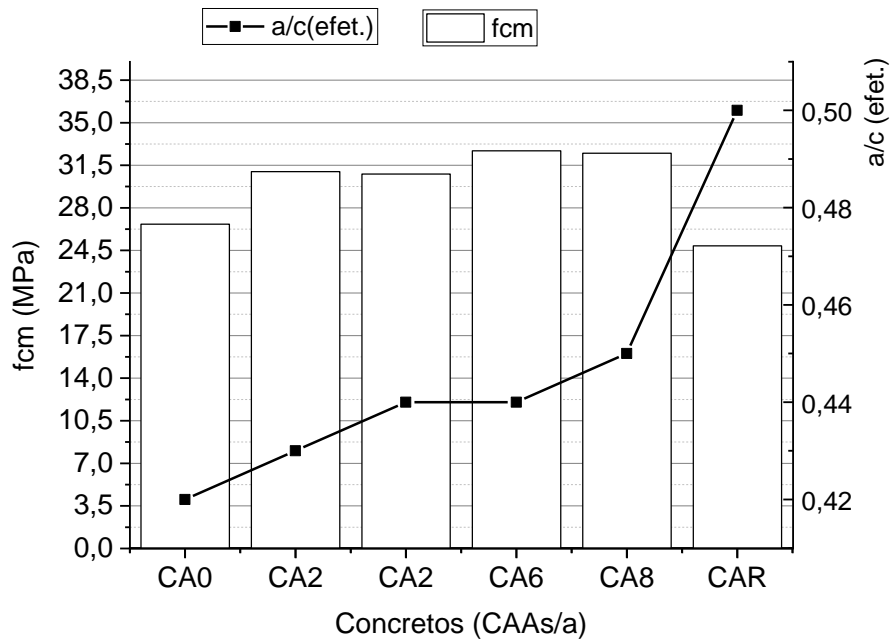
Para observar melhor a influência da água de absorção dos AGRC e AGRCT na resistência à compressão dos CAA, foi calculado o fator a/c efetivo dos CAA, e comparado com as resistências à compressão conforme apresentado no anexo C, Tabela C3.

O fator a/c efetivo dos CAA foram calculados retirando 80% da água de absorção dos AGRC e AGRCT, da água da mistura computada inicialmente de um fator $a/c = 0,50$.

Os valores de redução do fator água/cimento como já mencionado anteriormente foram determinados, considerando o teor de água que os AGRC e AGRCT absorvem nos 9 primeiros minutos, o que correspondem a 80% da sua absorção total de água.

A análise das resistências à compressão média em função dos fatores a/c efetivos ($a/c_{\text{efet.}}$), estão apresentados na Figura 5.17.

Figura 5.17 - Análise comparativa entre as resistências à compressão e os fatores a/c efetivos



Fonte: Autor (2020)

A análise desse gráfico mostra que o concreto CAR apresentou fator a/c efetivo 20% superior ao do CA0, apresentando portanto, menor resistência à compressão.

O CA0, com AGRC sem tratamento, apresentou menor fator a/c efetivo, entretanto, por ter agregados com maior percentual de argamassa presa, o que significa ZTI mais frágil, teve menor resistência à compressão em relação aos CAA com AGRCT.

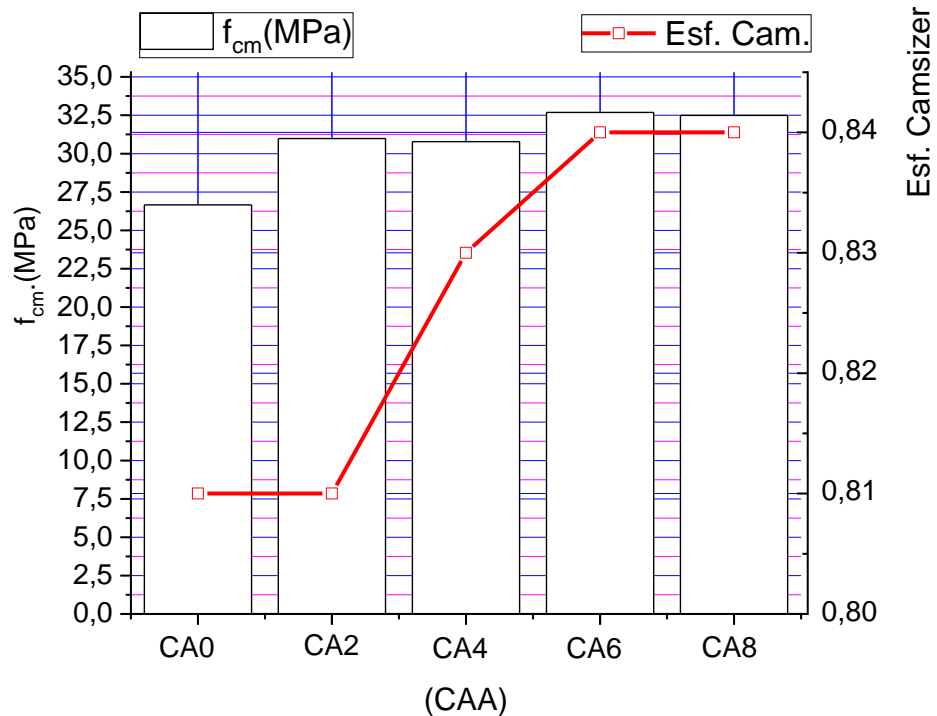
No caso dos concretos com AGRCT, mesmo tendo um fator a/c efetivo um pouco maior que o do CA0, outros fatores como a diminuição do diâmetro das partículas, e maior resistência da nova ZTI pode ter sido responsável pelas maiores resistências à compressão apresentadas.

O limite de resistência á compressão dos CAA com AGRCT podem indicar o limite de resistência da nova ZTI dos AGRCT.

Desta forma, se aproximoram da resistência à compressão média dos cp dos concretos que deram origem ao RC. Isto é, os CAA com AGRCT podem ter resistência da nova ZTI próximas as resistências das ZTI dos concretos que deram origem aos RC.

Foi analisado também a influência das esfericidades dos AGRC e AGRCT, determinadas com a utilização do Camsizer-L, nas resistências à compressão média dos CAA, apresentadas na Figura 5.18.

Figura 5. 18 - Relação entre a esfericidade e as resistências à compressão

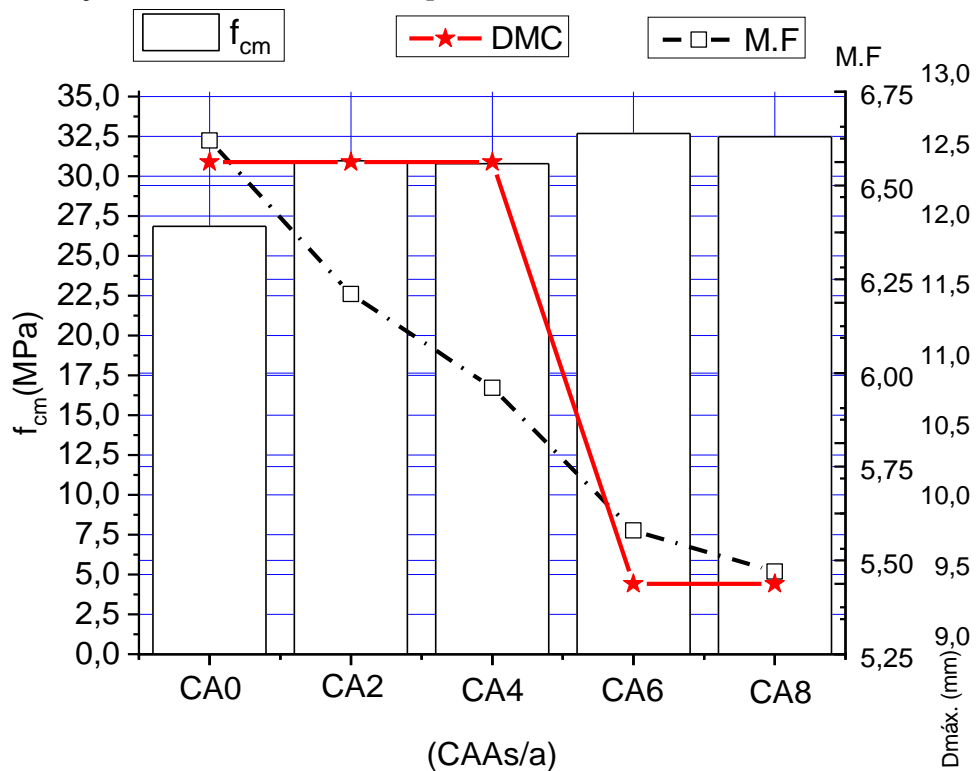


Fonte: Autor (2020)

A análise dos parâmetros apresentados na Figura 5.18 mostram que a melhora na esfericidade do AGRC2 até o AGRC8, obtida com o aumento do tempo de tratamento, não foi significativa, e portanto, não influenciou significativamente na resistência à compressão média dos CAAs/a.

Por outro lado, a análise da f_{cm} em relação à variação do diâmetro máximo característico ($D_{máx.}$) e do módulo de finura (M F) dos AGRC e AGRCT, mostrou que houve influência como está apresentado na Figura 5.19.

Figura 5.19 - Relação entre as resistências à compressão o $D_{m\acute{a}x}$ e o M. F.



Fonte: Autor (2020)

A análise da Figura 5.19 mostra que a redução do $D_{m\acute{a}x}$, das partícula reduziram a quantidade de argamassa presa na superfície dos AGRC, proporcionando agregados mais resistentes e mais densos.

Esse fenômeno corrobora com pesquisas que identificaram que agregados menores proporcionam concretos mais resistentes (GOMES, 2002; METHA; MONTEIRO, 2008; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016).

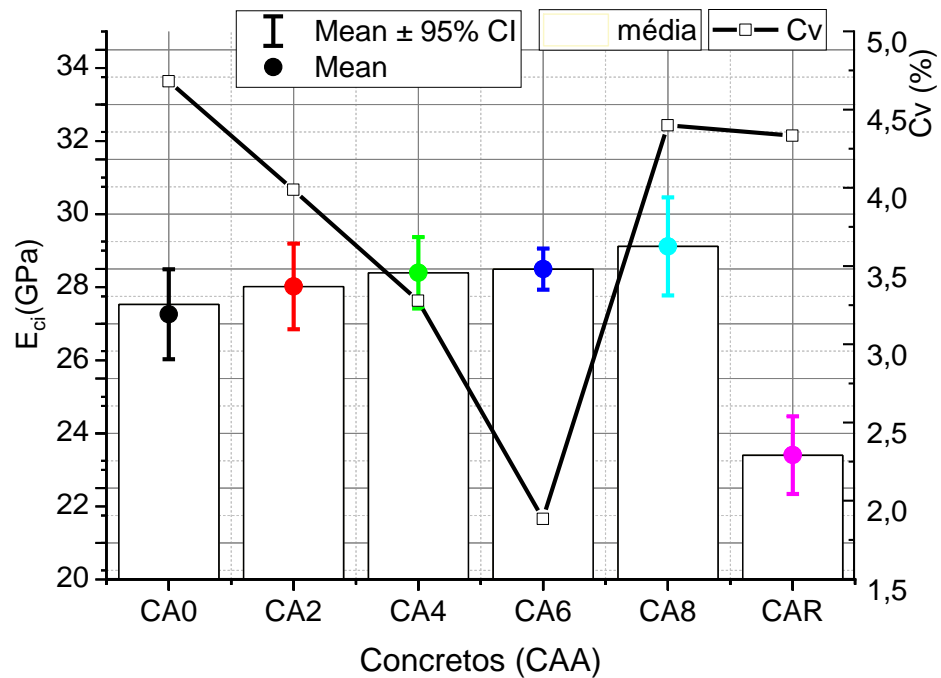
5.4.2.2 Módulo de elasticidade do CAAs/a

Os resultados dos ensaios de módulo de elasticidade dos CAA, estão apresentados na Figura 5.20. Esses resultados foram resumidos a partir dos dados apresentados no Anexo, Tabela 4C.

Como se observa na Figura 5.20, tanto o desvio padrão quanto o coeficiente de correlação dos valores de E_{ci} foram baixos, o que pode-se considerar resultados homogêneos.

Os resultados dos E_{cm} obtidos dos CAA com AGRC e AGRCT apresentaram valores ligeiramente superiores ao concreto com agregado natural (CAR).

Figura 5. 20 - Comparação dos resultados dos módulos de elasticidade dos CAAs/a



Fonte: Autor (2020)

Esse resultado form diferentes dos resultados obtidos por outros pesquisadores, que de um modo geral, obtiveram valores entre 10% e 30% inferiores para os valores de E_{cm} de concretos com agregados graúdos reciclados de concreto, dependendo do nível de substituição do agregado graúdo natural (TSENG, 2010; METHA; MONTEIRO, 20; GONZÁLEZ-TABOADA *et al.*, 2016).

Entre os CAA com AGRC os resultados tiveram valores próximos, como mostra a Figura 5.20.

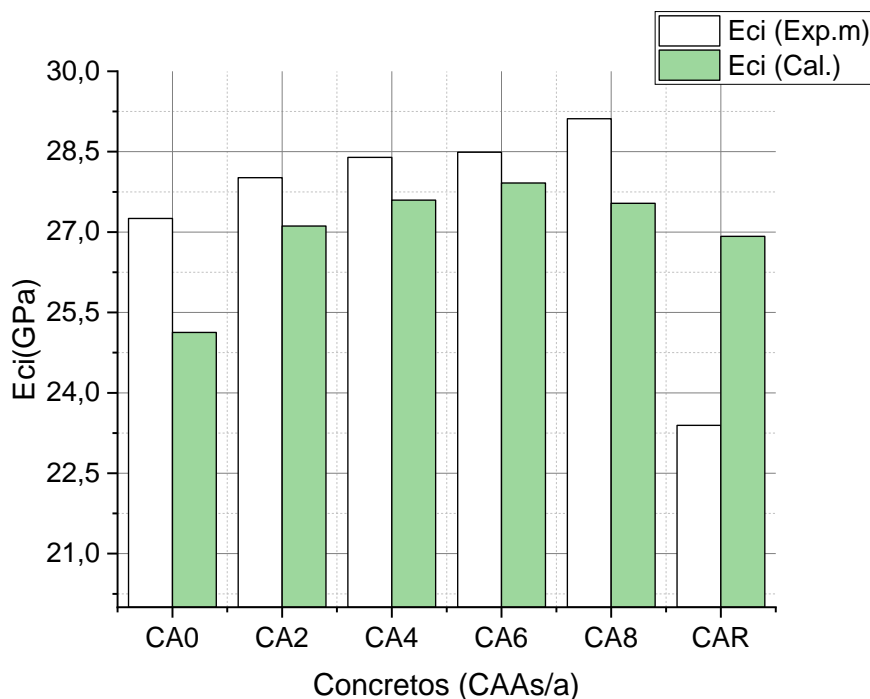
Foram realizadas análises comparativas dos módulos de elasticidade experimentais e os estimados de acordo com a NBR 6118 (ABNT, 2014), que determina o cálculo de acordo com o tipo de agregado graúdo utilizado.

Esta norma inseriu um coeficiente mutiplicador de acordo com o tipo de agregado graúdo, variando de $\alpha = 1,2$ para basaltos e diabásicos a 0,7 para arenitos.

Nesta pesquisa, o coeficiente considerado para os AGRC e AGRCT foi de $\alpha = 0,90$, assumindo o mesmo fator do agregado de calcário. Os resultados dessas análises estão apresentadas na Figura 5.21.

Observa-se que os resultados experimentais foram superiores aos estimados nos CAAs/a com AGRC e AGRCT. Por outro o valor calculado para o CAR foi maior.

Figura 5. 21 - Módulos de elasticidade experimental e os estimados pela NBR 6118 (ABNT, 2014)



Fonte: Autor (2020)

Esses resultados refletem os valores dos dados das resistências à compressão, e conseqüentemente os f_{ck} , tendo em vista que na equação proposta pela norma, o f_{ck} tem grande influência.

5.4.2.3 Resistência à tração por compressão diametral do CAAs/a

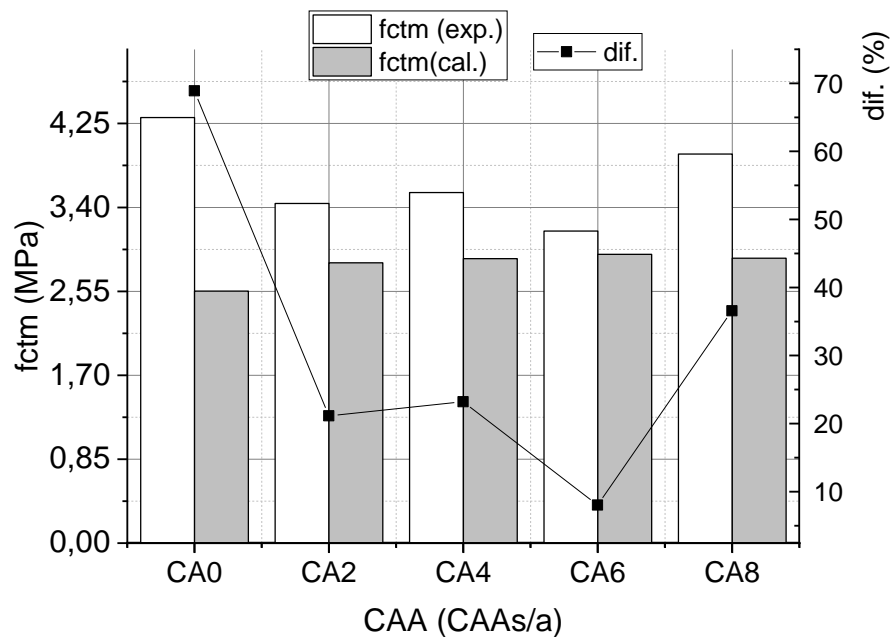
O ensaio de tração por compressão diametral é um método indireto de obtenção do valor da resistência à tração do concreto.

Este ensaio foi executado de acordo com as prescrições da norma NBR 7222 (ABNT, 2011), com a utilização de corpos de prova cilíndricos idênticos aos utilizados no ensaio de compressão axial para o concreto, já descrito no planejamento experimental, cujo resultado encontra-se no Anexo C, Tabela C5.

Como observado nesta Tabela C5, os coeficientes de variação variaram entre 0,06 e 0,26. Os valores dos coeficientes de variação (C_v) ficaram entre 7,43 e 1,33, o que revela que os dados foram homogêneos, apresentando C_v inferior a 10,0%.

Foi realizada uma análise dos resultados experimentais, em relação ao resultado calculado de acordo com a equação indicada pela norma NBR 6118 (ABNT, 2014). Esses resultados estão apresentados na Figura 5.22.

Figura 5. 22 - Resultado dos ensaios de resistência à tração dos CAAs/a



Fonte: Autor (2020)

Os resultados dos ensaios de tração foram maiores que os calculados com o uso da equação proposta pela NBR 6118 (ABNT, 2014), para todos os CAAs/a com agregados graúdos reciclados de concreto.

Foi observado que a diferença foi maior para o CA0, cuja diferença foi superior a 60%, provavelmente devido ao fator a/c efetivo, como já discutido na análise da resistência à compressão.

A equação proposta para estimar a resistência à tração média ($f_{ct,m}$) foi conservadora em relação aos resultados experimentais nos CAAs/a, com a metodologia apresentada.

5.4.2.4 Absorção de água e índice de vazios do CAAs/a

A absorção de água, índice de vazios e a massa específica dos concretos foram determinadas de acordo com a NBR9778 (ABNT, 2005). Os resultados estão apresentados no Anexo C, Tabela C6.

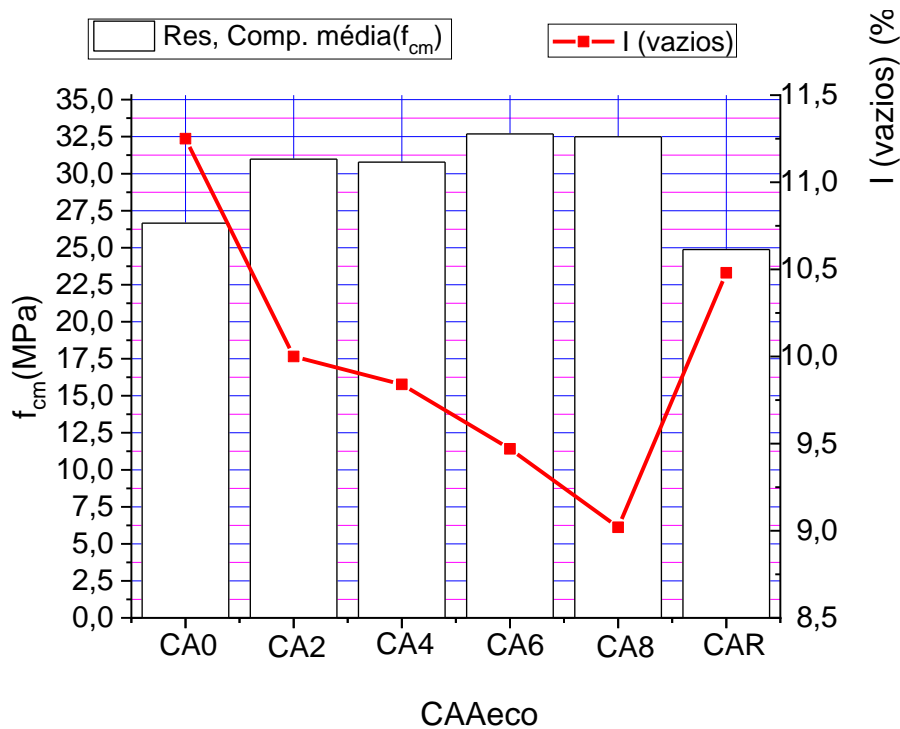
Os resultados das massas saturadas com as superfícies secas (M_{sss}), as massas submersas (M_{sub}), as massas secas (M_s), foram obtidas de duas amostras, como apresentado Na Tabela C6.

As propriedades massa específica aparente (ρ_a), massa específica saturado com a superfície seca (ρ_{sss}) e a massa específica real (ρ_r), todas relativas aos CAAs/a, foram

consideradas os valores médios. Esses resultados mostram que os CAAs/a reduziu a sua porosidade de acordo com a redução da porosidade dos AGRC e AGRCT usados.

O CA0s/a apresentou maior porosidade, caracterizada pelo índice de vazios de 11,25%, apresentado um Cv entre as duas amostras de 9,70%. De um modo geral o desvio padrão (Dp) e o coeficiente de variação das amostras ficaram dentro dos limites aceitáveis, sendo o CA2 o que apresentou maior Cv. Uma análise resumida dos resultados obtidos nesses ensaios estão apresentados na Figura 5.23.

Figura 5. 23 - Resultados da resistência à compressão e dos índices de vazios dos CAAs/a



Fonte: Autor (2020)

De acordo com os resultados apresentados na Figura 5.23, como era previsto, a porosidade dos concretos foram reduzidas de acordo com o aumento do tempo de tratamento de abrasão do AGRC, tendo em vista que os AGRCT foram ficando menos porosos e com maior densidade.

Entretanto, se verifica que, mesmo a redução da absorção de água tendo um comportamento linear em relação ao tempo de tratamento, essa proporcionalidade não é transmitida para o acréscimo de resistência à compressão dos CAAs/a.

Observa-se ainda que o concreto CA8s/a apresentou menor índice de vazios e absorção de água que o CAR.

5.4.3 Considerações finais

Considerando os estudos realizados e os resultados obtidos na caracterização dos CAA com 40% de pasta e sem o uso da água de absorção dos AGRC e AGRCT, tendo em vista a metodologia que foi empregada, foi possível chegar as seguintes considerações:

- Os ensaios monoponto dos CAAs/a, mostraram que o tratamento de desgaste no MB, transformou os AGRC em AGRCT mais arredondados e menos porosos, proporcionando melhora na trabalhabilidade dos concretos. Entretanto, essa melhora dos parâmetros de autoadensabilidade não foi diretamente proporcional ao tempo de tratamento de desgaste;
- Os CAAs/a com AGRC e AGRCT apresentaram resultados de parâmetros de autoadensabilidade satisfatórios, com valores superiores ou equivalente ao concreto com AGN;
- Os resultados dos ensaios dos concretos no estado endurecido mostraram que todos apresentaram resistência à compressão característica aos 28 dias, superior ao limite mínimo estabelecido pela NBR 8953(ABNT, 2015) para concretos para fins estrutural. Além disso, as resistência à compressão dos CAAs/a com AGRC e AGRCT apresentaram resistências à compressão maiores que a dos CAR;
- A análise estatística dos resultados dos ensaios de resistência à compressão indicaram que existe uma correlação forte positiva, entre essa propriedade e os tempos de tratamentos do AGRC. Por outro lado, mostrou também que dois minutos é o tempo suficiente para o tratamento do AGRC. Portanto, tratamento com um tempo superior a dois minutos não produziu CAAs/a com resistências à compressão estatisticamente diferentes;
- O CA0s/a apresentou menor resistência à compressão, mesmo apresentando menor fator a/c. Dessa forma, ficou evidente que esse comportamento foi devido a maior fragilidade da argamassa presa no AGRC, e em consequência maior influência das zonas de transição interfacial (ZTI);
- Os resultados dos módulos de elasticidade foram compatíveis com os encontrados na literatura. Entretanto, diferentemente de alguns resultados relatados, o E_{ci} dos CAAs/a com AGRC e AGRCT foram superiores ao do CAR, produzidos com a metodologia apresentada;

- Os resultados dos módulos de elasticidade dos CAAs/a com AGRC e AGRCT, quando comparados, não apresentam diferenças significativas. Portanto, as influências dos tratamentos não foram observadas nessa propriedade com CAAs/a;
- A comparação dos resultados dos módulos de elasticidade experimentais com os resultados obtidos pela equação indicada pela norma, mostraram que os resultados calculados foram inferiores aos experimentais;
- Os resultados das resistências à tração por compressão diametral apresentaram valores coerentes com os encontrados na literatura. Não foi identificada correlação entre os tempos de tratamentos dos AGRC e as resistências à tração com os CAAs/a obtidos com a metodologia apresentada. A comparação entre os resultados experimentais e os calculados pela equação indicada pela norma, mostraram que os resultados experimentais foram superiores aos calculados;
- Nos ensaios de absorção de água dos concretos, foi observado que os CAAs/a com AGRCT apresentaram menor absorção de água e conseqüentemente menor índice de vazios, refletindo os resultados dos tratamentos dos agregados;
- A observação da forma de ruptura das amostras dos CAAs/a com AGRC e AGRCT, após os testes de resistência à compressão e à tração por compressão diametral, mostraram modos de rupturas diversos que revelaram a falha na ZTI nova e velha dos agregados graúdos e até ruptura do AGN.

Dando prosseguimento à pesquisa foi realizada a investigação do comportamento desses mesmos concretos com 40% de pasta, sendo nesta etapa colocado a 80% da água de absorção dos AGRC e AGRCT..

5.5 CAA 40% de pasta com 80% da água de absorção do AGRC e AGRCT

Os concretos obtidos nesta etapa da pesquisa foram produzidos com uma pré molhagem de 10 minutos, com 80% da água de absorção dos AGRC e AGRCT.

Essa metodologia de uso de 80% da água de absorção dos agregados reciclados já foi usada por vários pesquisadores (LEITE 2001, CAVALCANTI, 2006; TSENG, 2010; TAM *et al.*, 2013). A composição dos CAAc/a para 1m³ de concreto estão apresentados na Tabela 5.17.

Tabela 5. 17: Composição dos concretos com 40% de pasta e com 80% da água de absorção (CAAc/a)

CAA	Materiais em volumem (dm ³ /m ³)						Materiais em Massa (kg/m ³)						
	Água	Cimento	AM	AG	RBMB	Água (80% Abs.)	Água	Cimento	AM	AG	RBMB	Sp	Arg. seca. (%)
CA0	192	127	332	270	74	37,6	192	392	880	675	196	5,90	68
CA2	192	127	332	270	74	35,0	192	392	880	683	196	5,90	68
CA2	192	127	332	270	74	32,4	192	392	880	686	196	5,90	68
CA6	192	127	332	270	74	29,8	192	392	880	691	196	5,90	68
CA8	192	127	332	270	74	27,7	192	392	880	713	196	5,90	67
Composição do concreto de referência													
CAR*	192	127	332	270	74	5,4	196	392	880	732	196	5,90	67

Fonte: Autor (2020)

Nesta Tabela 5.17 a composição dos CAAc/a foi a mesma dos CAAs/a, apenas com a colocação de 80% da água de absorção dos AGRC e AGRCT.

5.5.1 Propriedades no estado fresco do CAAc/a

Os resultados dos ensaios monopontos dos CAA com 80% da água de absorção estão apresentados Figura 5.24.

Figura 5. 24 - Ensaios de espalhamento e Caixa - L dos CAAc/a CA6c/a



Fonte: Autor (2020)

Os resultados obtidos das medições dos ensaios monoponto dos CAA com o uso de 80% da água de absorção estão apresentados na Tabela 5.18.

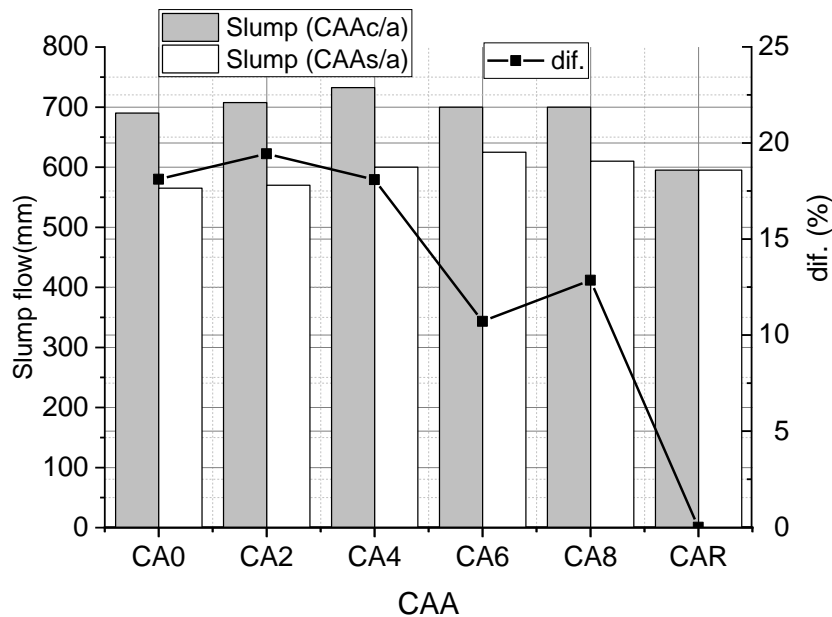
Tabela 5. 18: Resultados dos parâmetros de autoadensabilidade do CAAc/a

CAAc/a	t_{500}	d_1	d_2	Slump (médio) mm	FUNIL - V (s)	Caixa-L (h_2/h_1)
	(s)	(mm)	(mm)			
CA0c/a	2,5	760,0	740,0	650,0	9,0	0,90
CA2c/a	3,0	700,0	715,0	707,5	7,0	0,95
CA4c/a	3,0	720,0	745,0	732,5	5,0	0,96
CA6c/a	2,5	680,0	720,0	700,0	8,0	0,97
CA8c/a	3,0	680,0	720,0	700,0	8,0	0,97

Fonte: Autor (2020)

Esses resultados indicam que os concretos atingiram parâmetros de autoadensabilidade aceitáveis. A comparação dos parâmetros de autoadensabilidade entre os CAA sem absorção e com 80% de absorção está apresentada na Figura 5.25.

Figura 5. 25 - Comparação entre o slump dos CAAc/a



Fonte: Autor (2020)

Estes resultados indicam que o percentual de absorção influenciou nos espalhamentos dos concretos e mostram que houve um acréscimo dos parâmetros do Slump flow variando entre 10,71% a 19,43%, para o CA6 e o CA2, respectivamente.

A análise visual dos concretos apresentada na Figura 5.24 indica que o CA4, CA6 e CA8 apresentaram indícios de excesso de água. De acordo com esta observação é possível

inferir que o percentual de 0,45% de S_p poderia ter sido reduzido para 0,43%. Nos ensaios de habilidade passante se observou, conforme a Figura 5.24, os CAAc/a não apresentaram dificuldades, estando todos dentro dos limites estabelecidos pela NBR15823(ABNT, 2017). O mesmo aconteceu com os parâmetros do t_{500} e o Funil-V.

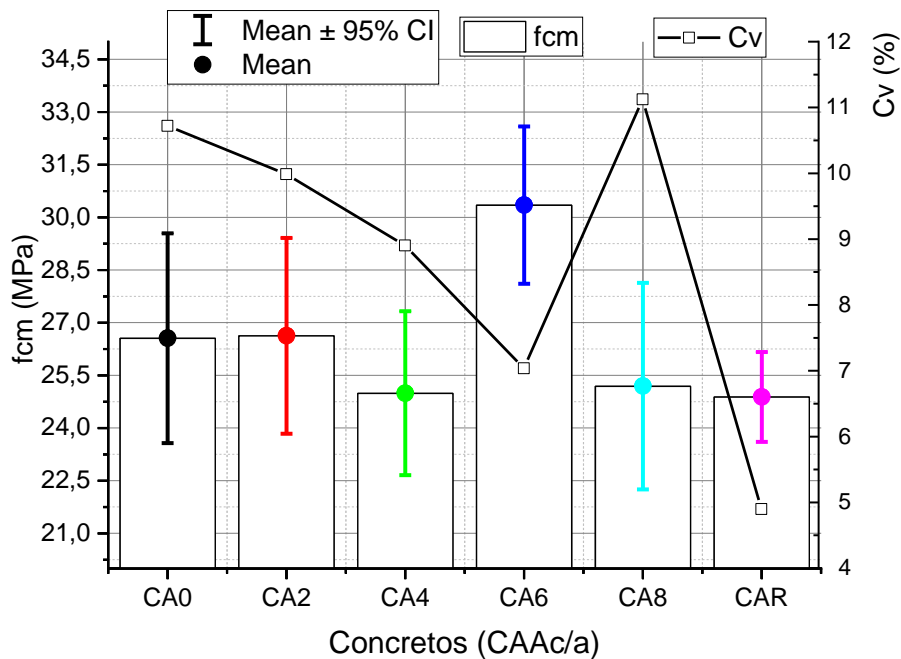
5.5.2 Propriedades no estado endurecido do CAAc/a

O estudo do comportamento dos CAAc/a no estado endurecido, com o uso de 80% da água de absorção, foi realizado com a análise das seguintes propriedades: resistência à compressão, módulo de elasticidade, resistência à tração por compressão diametral e a porosidade, caracterizada pela absorção de água e pelo índice de vazios, aos 28 dias.

5.5.2.1 Análise estatística da resistência à compressão do CAAc/a

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão dos CAAc/a estão apresentadas na Tabela C7, constante no Anexo C. Os resultados apresentaram resistências médias entre 24,88 MPa para o CAR e 30,35 MPa para o CA6c/a, como mostra a Figura 5.26.

Figura 5. 26 - Comparação entre os resultados dos ensaios à compressão dos CAAc/a



Os resultados das resistências à compressão desse conjunto de concretos apresentaram desvio padrão (Dp) entre 2,85 MPa e 1,22 MPa, para o CA0c/a e CAR respectivamente.

Os desvios padrão (Dp) e os coeficientes de variação (Cv) apresentaram resultados heterogêneos, com o CA8c/a apresentando o maior valor igual a 11,12%. Tendo em vista esses resultados, de acordo com os critérios apresentados pela NBR 5739 (ABNT, 2018), os ensaios de resistência à compressão desse conjunto de concretos com AGRC e AGRCT, apresentaram resultados de Cv deficientes ($Cv > 6$).

Os Dp e Cv dos CAAc/a foram maiores que os verificados para os CAAs/a. Esses resultados indicaram resistências menores e com maior variação que as do CAAs/a. Este comportamento pode estar associado ao uso da água de absorção, porque foi o único parâmetro que foi alterado entre os dois métodos de obtenção dos concretos.

Os resultados obtidos para os f_{ck} dos CAAc/a foram superiores a 20MPa, estando acima do limite estabelecido para concretos com fins estrutural.

Para uma melhor compreensão dos comportamentos das resistências à compressão desses concretos foi realizada uma análise estatística dos resultados apresentados na Tabela C7, desenvolvida a seguir.

De forma similar ao estudo estatístico que foi realizado nos CAA s/a, o mesmo estudo foi realizado nesse conjunto de concretos. Inicialmente foram realizadas as análises de normalidade, e ANOVA com teste Tukey.

O teste de normalidade indicaram que no nível de significância de 5%, os dados são provenientes de uma distribuição normal. Os resultados estão apresentados na Tabela 5.19.

Tabela 5. 19: Resultado dos testes estatísticos

Testes		Estatísticas	P - valores		
Shapiro - Wilk		0,982	0,815		
Resultados da ANOVA					
	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	P. valor
Fator	5	128,44	25,68	4,52	0,0034
Resíduos	30	170,15	5,67		
Teste Tukey - Agrupamento					
Fator	Médias	Grupos			
CA6	30,35	a			
CA2	26,62	ab			
CA0	26,56	ab			
CA8	25,19	b			
CA4	24,99	b			
CAR	24,88	b			

Fonte: Autor (2020)

As análises dos testes ANOVA e Tukey indicaram que três tipos de concretos. CA0 e CA2 são estatisticamente da mesma categoria em relação à resistência à compressão.

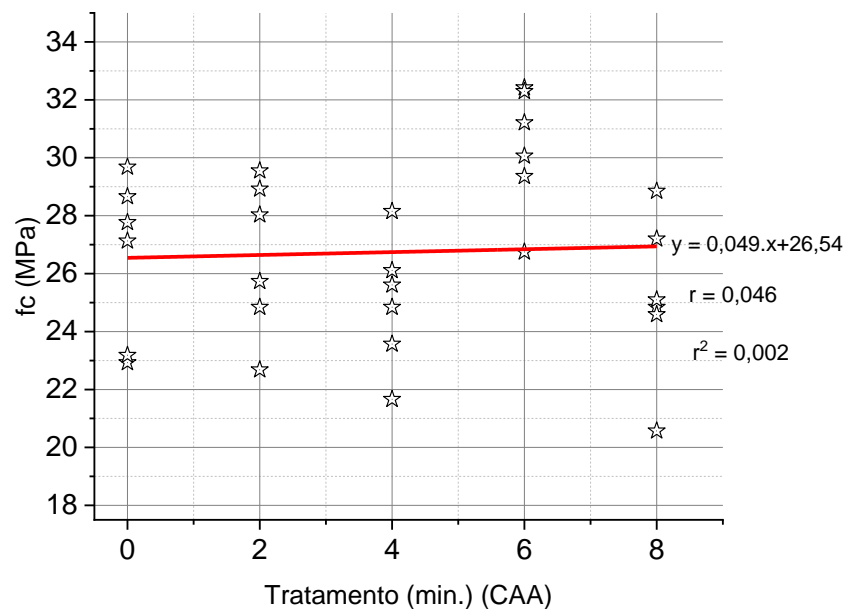
Os concretos CAR, CA4 e CA8, fazem parte de outro grupo e o CA6 é estatisticamente diferente de todos os outros. O CA6 se constitui como o CAA com 80% da água de absorção com melhor resistência à compressão. Entretanto, se observa que essa análise precisa ser analisada com maior profundidade.

Dando prosseguimento à análise estatística, foi realizada a análise de correlação de Pearson dos resultados obtidos para as resistências à compressão. O p-valor obtido na análise foi de 0,808, sendo $p > 0,05$, sendo adotado o nível de significância de 5 %.

Desta forma a hipótese H_0 deve ser rejeitada, logo não existe correlação entre as variáveis, tempos de tratamento do AGRC, caracterizado pelos AGRCT, e as resistências à compressão dos CAA, nesse caso, com o uso de 80% da água de absorção.

A representação gráfica da dispersão das variáveis analisadas juntamente com o resultado do coeficiente de Pearson estão apresentados na Figura 5.27, onde se pode concluir que a correlação é muito fraca ou praticamente inexistente.

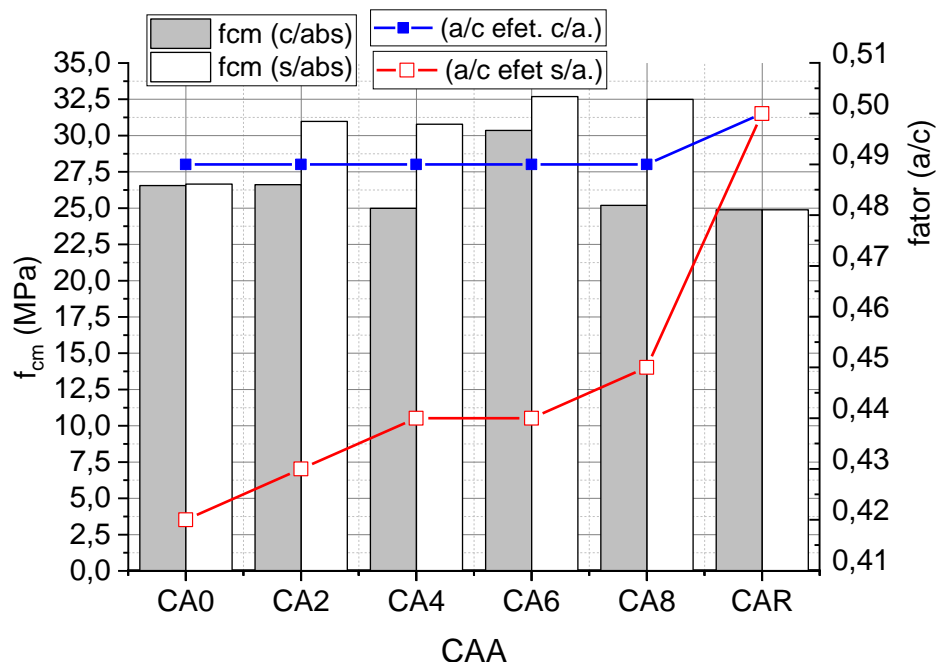
Figura 5. 27 - Análise de correlação de Pearson do CAAc/a



Fonte: Autor (2020)

Tendo em vista que o único fator que foi alterado entre os dois conjuntos de concretos foi a água de basorção, os resultados das resistências à compressão foram analisadas em relação ao fator a/c efetivo. Os resultados estão apresentados na Tabela C8, Anexo C e na Figura 5.28.

Figura 5. 28 - Comparação entre as resistências à compressão dos CAA's



Fonte: Autor (2020)

Ao comparar as resistências à compressão do CA0c/a com o CAR, verifica-se que a resistência à compressão foi influenciada pelo percentual de absorção dos agregados.

Comparando os concretos com AGRC e AGRCT produzidos com o uso de 80% da água de absorção, foi observado que a influência da água de absorção mascara os benefícios provocados pelos tratamentos, de modo que os concretos não apresentaram uma resposta convincente à cerca das influências dos tratamentos.

Foi realizada uma análise no comportamento do CA0c/a, tendo em vista que este concreto apresentou menor fator a/c efetivo, entretanto, sua f_{cm} não sofreu alteração.

Foi observado que no caso do CA0s/a, houve a ruptura da argamassa antiga presa aos agregados, indicando fragilidade da ZTI antiga.

O modo de ruptura observado no CA0 levou ao entendimento que o CA0 sem uso da água de absorção permitiu a pasta de cimento penetrar na argamassa antiga e promover o preenchimento dos poros. Isto fez com que a ZTI nova adquirisse resistência equivalente a ZTI antiga.

Por outro lado no CA0 com o uso de 80% da água de absorção, houve deslocamento do agregado graúdo, significando uma fragilidade maior entre a ZTI antiga e nova, como mostra a Figura 5.29.

Figura 5. 29 - Forma de ruptura do CA0 com absorção (CAAc/a)



Fonte: Autor (2020)

Essa compreensão foi estendida aos demais concretos obtidos com o uso de 80% da água de absorção. A análise precisa dos modos de ruptura dos concretos requer o uso de metodologia e equipamentos apropriados, sendo portanto assunto bastante extenso, de modo que não fez parte dos objetivos dessa tese.

Dando prosseguimento ao estudo das propriedades físicas dos concretos, no estado endurecido obtidos com 80% da água de absorção, foram analisados os resultados dos módulos de elasticidade.

5.5.2.2 Resultados dos módulos de elasticidade.

Os resultados dos ensaios do módulo de elasticidade estão apresentados na Tabela 5.20.

Tabela 5. 20: Resultados dos módulos de elasticidade - 28 dias do CAAc/a

CAA (E - GPa)					
Ensaio	CA0	CA2	CA4	CA6	CA8
1	24,13	27,10	26,74	28,70	25,12
2	24,27	25,12	24,47	27,63	22,86
3	27,46	27,40	25,12	26,07	25,25
E_{cm}	25,73	26,37	25,06	27,67	25,32
D_p	1,47	0,99	1,22	1,08	1,59
C_v (%)	5,71	3,75	4,87	3,92	6,28
f_{ck}	24,91	24,97	23,34	28,7	23,54
E_{ci}	25,16	25,18	24,35	27,00	24,45

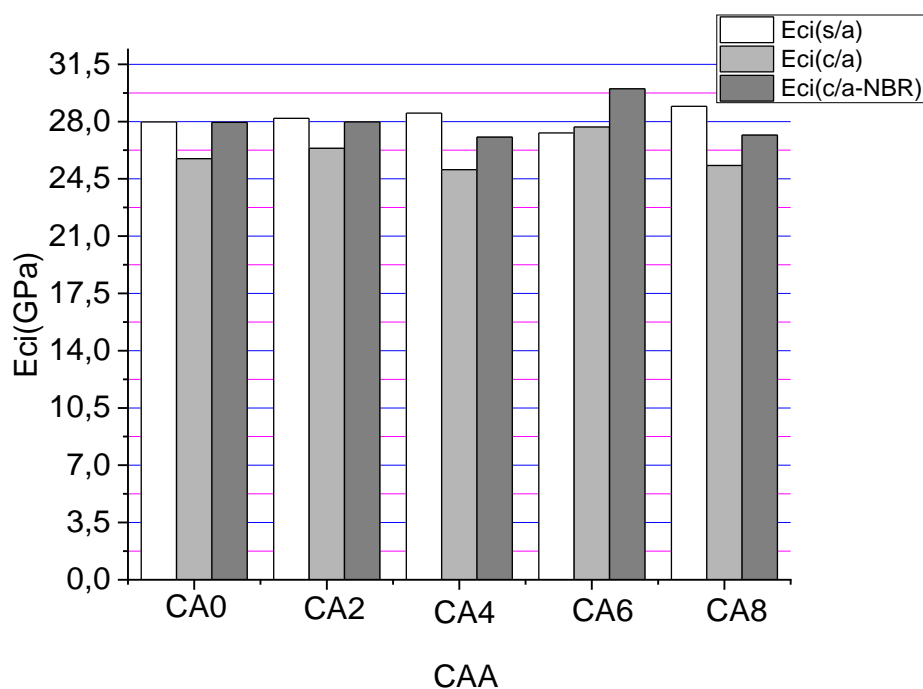
Fonte: Autor (2020)

Foram usados três corpos de provas para a verificação desta propriedade, cujos ensaios foram realizados de acordo com a NBR6118(ABNT, 2003).

Os resultados apresentados na Tabela 5.20 mostram que o módulo de elasticidade médio do CA6c/a foi ligeiramente superior aos dos demais concretos.

A comparação entre os módulos de elasticidade dos concretos sem absorção de água e com 80% de absorção, assim como os valores calculados pela equação indicada pela norma estão apresentados na Figura 5.30.

Figura 5. 30 - Comparação entre os módulos de elasticidade dos CAA s/a e CAAc/a



Fonte: Autor (2020)

A análise desses resultados indicam que o módulo de elasticidade obtido dos CAA sem absorção de água é superior aos obtidos dos mesmos concretos com o uso de 80% da água de absorção.

Observa-se ainda que os valores obtidos com o uso da equação da norma foram maiores que os resultados obtidos dos ensaios, para os CAA com 80% da água de absorção. Em relação aos CAA sem absorção de água, os resultados obtidos dos ensaios foram superiores, com exceção do CA6.

5.5.2.3 Resistência à tração por compressão diametral do CAAc/a

Os resultados dos ensaios à tração indireta dos CAA obtidos com o uso de 80% da água de absorção, estão apresentados na Tabela 5.21.

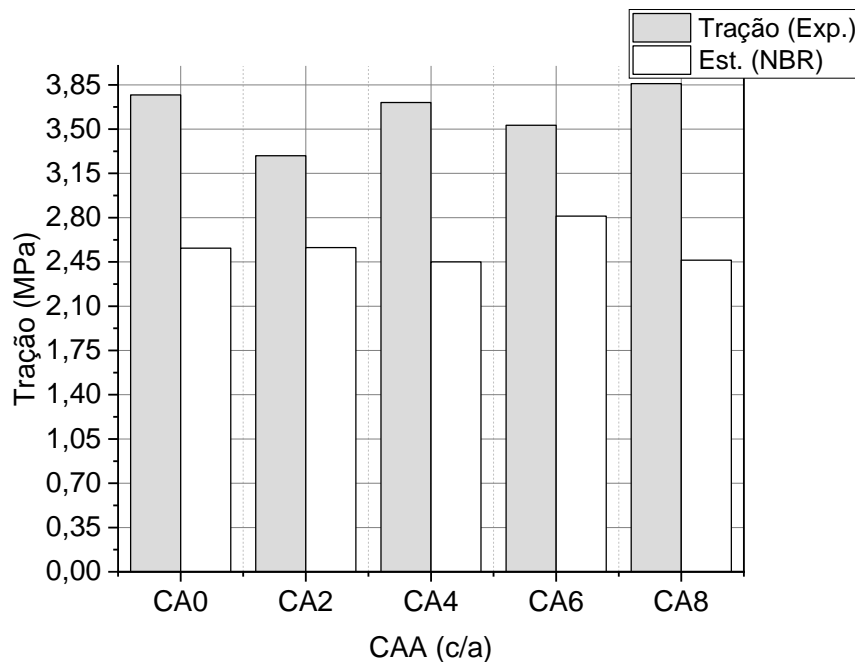
Tabela 5. 21: Resultados dos ensaios à tração por compressão diametral– 28 dias

CAA. c/abs. (Tração - MPa)					
Ensaio	CA0	CA2	CA2	CA6	CA8
1	3,50	3,18	3,94	3,30	4,10
2	3,80	3,3	3,70	3,50	3,80
3	4,00	3,38	3,50	3,80	3,68
f_{ctm}	3,77	3,29	3,71	3,53	3,86
Dp	0,25	0,10	0,22	0,25	0,22
Cv (%)	6,68	3,06	5,93	7,12	5,60

Fonte: Autor (2020)

Estes resultados mostram que o CA8 apresentou maior resistência à tração média no ensaio de tração por compressão diametral. A Figura 5.31 mostra a análise dos resultados da Tabela 5.21 e os obtidos com o uso da equação definida pela NBR 6118 (ABNT, 2014).

Figura 5. 31 - Comparação entre as resistências à tração dos CAAs/a

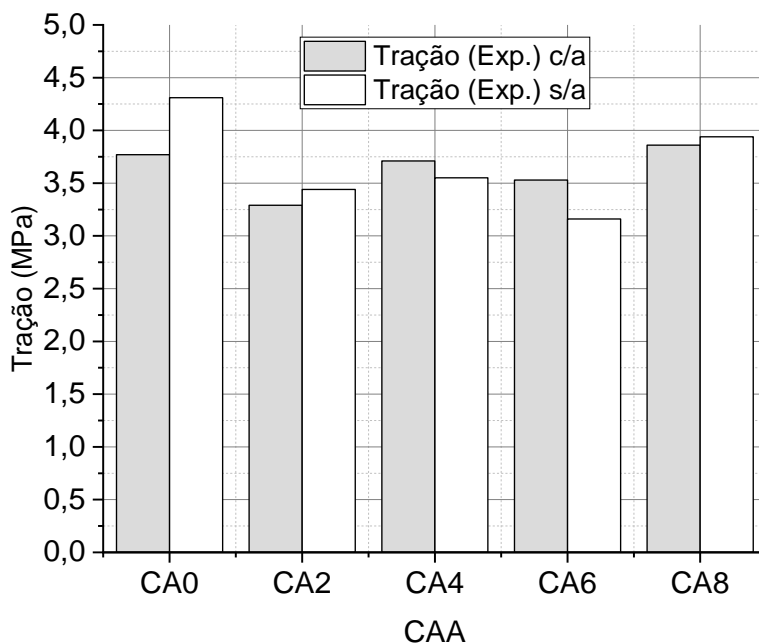


Fonte: Autor (2020)

Esses resultados indicam que os resultados da resistência à tração obtidas dos ensaios por compressão diametral foram maiores que os resultados obtidos pelo cálculo com o uso da equação proposta pela norma, para todos os concretos.

Isto indica que da mesma forma que para os agregados naturais, a equação proposta para o cálculo da resistência à tração é conservadora, em relação aos resultados obtidos dos ensaios, como mostra a Figura 5.32.

Figura 5. 32 - Comparação entre as resistências à tração dos CAA com e sem absorção



Fonte: Autor (2020)

Comparando as resistências à tração entre os CAA se observa que o fator a/c teve também influência, como verificada na compressão, caracterizada pela maior diferença apresentada no CA0c/a.

No trabalho realizado por Thomas *et al.* (2018), os resultados obtidos foram de 34,80 MPa para a resistência à compressão média, 3,50 e 5,70 MPa para a resistência à tração e valores entre 34,80 e 52,80 GPa para o módulo de elasticidade para um consumo de cimento entre 350 e 450 kg/m³, respectivamente. Isto para AGRC com absorção de água de 6,4% e um percentual de substituição de 50% e 75%.

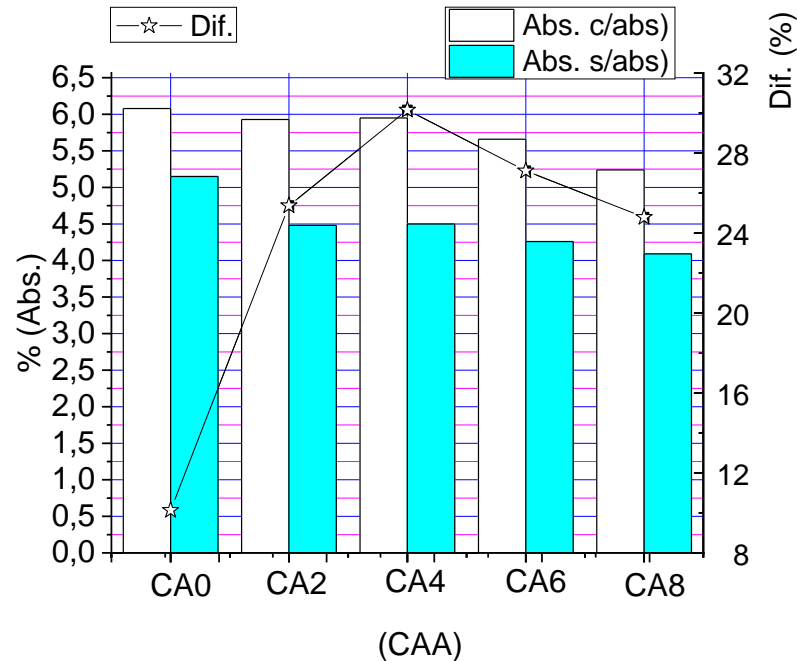
5.5.2.4 Absorção de água e porosidade

Os resultados dos ensaios de absorção de água dos CAA com 80% da água de absorção estão apresentados no Anexo C, Tabela C8. Estes valores foram obtidos considerando um valor médio de três amostras, baseado na NBR9778 (ABNT, 2005).

Os coeficientes de variação (Cv) dos resultados dos índices de vazios foram inferiores a 10,0%. Os valores dos índices de vazios, caracterizados pelas absorções de água, obtidos desses ensaios estão próximos do limite recomendado pela NBR 9778 para concreto

convencional, $4,2 \leq A (\%) \leq 6,2$. A comparação dos valores de absorção de água entre os CAAs/a e o CAAc/a, está apresentado na Figura 5.33.

Figura 5. 33 - Comparação entre as absorções de água dos CAA



Fonte: Autor (2020)

Esse gráfico mostra que a absorção de água e consequentemente a porosidade aberta dos CAA é inversamente proporcional aos tempos de tratamentos. Se observa que de um modo geral, a absorção de água dos CAAs/a foram inferiores a dos CAAc/a, sendo as diferenças maiores as do CA4 e CA6. O concreto que apresentou menor diferença entre as absorções de água foi o CA0, isto pode estar relacionado a maior porosidade do AGRC.

5.5.3 Considerações finais

Considerando os estudos realizados e os resultados obtidos na caracterização dos CAA com 40% de pasta e com o uso de 80% da água de absorção do AGRC e AGRCT, tendo em vista a metodologia e os procedimentos que foram empregados, foi possível chegar as seguintes considerações:

- Os resultados obtidos dos ensaios monopontos mostraram que o tratamento dos AGRC melhora os parâmetros de autoadensabilidade. Entretanto, a partir do CA2, os CAA não apresentam melhorias significativas nos parâmetros;

- A análise visual permitiu constatar que a manutenção do percentual de superplastificante de 0,45% melhora os parâmetros de autoadensabilidade dos CAA com absorção, em relação aos sem absorção. No entanto, os concretos CA4c/a, CA6c/a e CA8c/a, apresentaram indícios de exsudação. Dessa forma, esses CAA obtidos com a metodologia apresentada, não comprovaram as vantagens dos tratamentos para os tempos de 4, 6 e 8 minutos;
- As resistências à compressão características (f_{ck}) dos concretos foram superiores ao limite mínimo estabelecido pela NBR 8953 (ABNT;2015) para aplicação estrutural. A resistência média dos CAA com AGRC e AGRCT apresentaram resistências à compressão maiores que a do CAA com agregados naturais (CAR);
- A análise estatística usando ANOVA e Tukey dos resultados das resistências à compressão indicaram que os concretos podem ser classificados em três classes, CA6, CA0 e CA2; CA4, CA8 e CAR. O CA6 foi o que apresentou maior resultado. Corroborando com essa análise, não foi identificada correlação entre as resistências à compressão e os tempos de tratamento, de acordo com o coeficiente de correlação de Pearson;
- Na análise visual dos corpos de provas que foram rompidos nos ensaios resistência à compressão, observou-se que a ruptura dos cdp se deram na nova ZTI dos concretos, na maioria dos casos. Portanto, é possível presumir que o uso de 80% da água de absorção do AGRC e AGRCT provocaram uma maior fragilidade da ZTI nova desses CAA;
- Os resultados dos módulos de elasticidade médios ficaram entre 25 e 27 GPa, sendo os menores valores para o CA2c/a e os maiores para o CA6c/a. Os resultados experimentais comparados com os calculados pela equação prevista pela norma, mostraram que os calculados apresentaram resultados superiores, diferentes dos resultados apresentados pelos CAAs/a;
- As resistências à tração apresentadas por esse grupo de concretos foram coerentes com os resultados das resistências à compressão. Observou-se que o CA0 apresentou maior resistência influenciado pelo fator a/c. Os resultados das resistências à tração calculados pela equação proposta pela norma, da forma similar aos CAAs/a, foram inferiores aos experimentais;
- A porosidade desses concreto foram superiores aos obtidos sem o uso da água de absorção.

Dando prosseguimento as análises das influências dos AGRC e AGRCT nos comportamentos dos concretos, nessa etapa da pesquisa foram produzidos concretos convencionais (CC), com o uso de 80% da água de absorção desses agregados graúdos.

5.6 Obtenção de concreto convencional

Foram analisados os comportamentos dos AGRC e AGRCT em concretos convencionais (CC), e o CC de referência (CCR), com agregado graúdo natural, utilizando 80% da água de absorção, conforme procedimento indicado anteriormente.

As composições dos concretos convencionais foram idealizadas para o consumo de cimento de 350 kg/m^3 e fator $a/c = 0,45$, por ser uma dosagem comum para concretos convencionais.

Foi usado a dosagem de superplastificante de 0,40 % para o alcance da trabalhabilidade desejada. As quantidades de materiais assim como o teor de argamassa seca usados nos concretos convencionais, estão apresentadas na Tabela 5.22.

Tabela 5. 22: Composição dos concretos produzidos (Traços em volumes e massas)

Traço	Relação a/c	Materiais em volume (dm^3)					Materiais em massa (kg/m^3)					Teor de argamassa seca (%)
		Água	Sp	Cimento	AM	AG	Água	Cimento	AM	AG	Sp	
CC0	0,45	154	4,3	113	326	403	154	350	864	881	4,67	57,9
CC2	0,45	154	4,3	113	326	403	154	350	864	905	4,67	57,3
CC4	0,45	154	4,3	113	326	403	154	350	864	933	4,67	56,5
CC6	0,45	154	4,3	113	326	403	154	350	864	957	4,67	55,9
CC8	0,45	154	4,3	113	326	403	154	350	864	970	4,67	55,6
CCR	0,45	154	4,3	113	326	403	154	350	864	1091	4,67	52,7

Fonte: Autor (2020)

A Tabela 5.22 mostra que o teor de argamassa se reduz a medida que aumenta o tempo de tratamento do AGRC e em consequência a massa específica dos agregados graúdos. Esse comportamento dos concretos com agregados reciclados já foram identificados por Leite (2001); Tenório (2007); Tseng (2010).

5.6.1 Propriedades no estado fresco

Esse conjunto de concretos foram obtidos estabelecendo-se uma trabalhabilidade correspondente a um abatimento do tronco de cone médio de $80 \text{ mm} \pm 20 \text{ mm}$, Tabela 5.23.

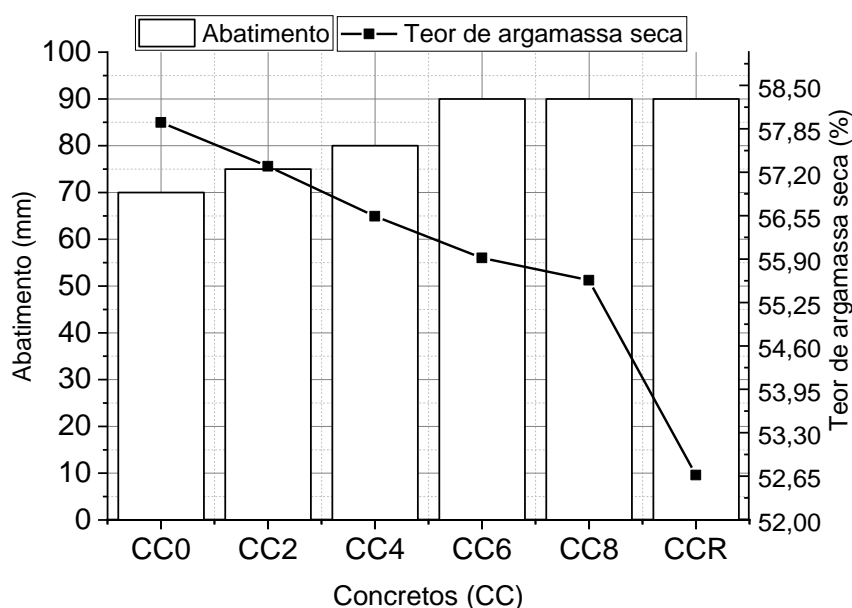
Tabela 5. 23: Slump dos concretos convencionais

Concretos	1º Ensaio	Réplica	Média (mm)
	Abatimento (mm)	Abatimento (mm)	
CCR	80,0	100,0	90,0
CC0	65,0	75,0	70,0
CC2	72,0	78,0	75,0
CC4	77,0	83,0	80,0
CC6	86,5	93,5	90,0
CC8	85,5	94,5	90,0

Fonte: Autor (2020)

Os ensaios de abatimento de tronco de cone foram realizados de acordo com a NBR NM67(ABNT:1998) e mostram que a trabalhabilidade dos concretos cresceram com os tempos de tratamentos dos AGRCT. O CC6, CC8 apresentaram resultados equivalentes ao CCR. Esses resultados apresentaram relação inversa com os percentuais de argamassa seca, como mostra a comparação gráfica apresentada na Figura 5.34.

Figura 5. 34 - Valores observados no ensaio de tronco de cone



Fonte: Autor (2020)

A comparação dos resultados médios apresentados na Figura 5.34 mostram que o deslocamento vertical dos CC, caracterizado pelo abatimento do tronco de cone, com AGRC é inversamente proporcional ao percentual de argamassa seca, devido à influência dos tratamentos.

Isto se verifica porque, quanto maior a densidade do AGRC menor o percentual de argamassa seca, mantendo-se constante os demais componentes da composição. Sendo

portanto, maior o peso da mistura, provocando maior deslocamento vertical sob a ação da gravidade.

5.6.2 Propriedades no estado endurecido dos concretos convencionais

As propriedades no estado endurecido dos concretos convencionais (CC) foram realizadas de acordo com a NBR5739.

As propriedades analisadas foram a resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade e índice de vazios. Os ensaios foram realizados aos 28 dias.

5.6.2.1 Análise estatística das resistências à compressão dos concretos

Os resultados das resistências à compressão dos concretos convencionais foram medidos nos corpos de prova da 1ª moldagem e da réplica, como mostram a Tabela 5.24.

Tabela 5. 24: Resistência à compressão dos concretos convencionais

1º Ensaio							Réplica						
cp	CC0	CC2	CC4	CC6	CC8	CCR	cp	CC0	CC2	CC4	CC6	CC8	CCR
1	25,22	25,78	25,33	26,11	26,29	25,1	1	23,96	26,4	25,68	26,88	28,84	25,1
2	24,84	25,45	26,5	26,59	25,82	25,61	2	23,22	25,08	26,76	26,97	27,48	25,61
3	24,97	25,64	25,31	25,1	27,2	24,46	3	23,5	26,65	26,31	27,8	28,15	24,46
4	24,59	26,4	26,78	25,97	26,05	25,18	f_{cm}	23,56	26,04	26,25	27,21	28,15	25,06
5	24,84	25,29	25,57	25,54	26,82	24,33	Dp	0,37	0,84	0,54	0,5	0,68	0,58
f_{cm}	24,89	25,71	25,9	25,86	26,44	24,94	Cv	1,59	3,24	2,07	1,86	2,42	2,3
Dp	0,23	0,43	0,69	0,57	0,57	0,53	f_{ck}	22,95	24,65	25,36	26,39	27,03	24,1
Cv	0,92	1,66	2,67	2,19	2,14	2,14	Resultados da média do 1º ensaio e da réplica						
f_{ck}	24,51	25	24,76	24,92	25,5	24,07	$f_{ck}(m)$	23,73	24,83	25,06	25,65	26,26	24,08

Fonte: Autor (2020)

De acordo com os resultados obtidos se observou que houve um aumento da resistência à compressão axial média dos CC em função dos tempos de tratamentos dos AGRC, indicando que as melhores propriedades físicas dos AGRCT influenciaram nas resistências à compressão dos concretos.

Isto ficou melhor evidenciado nos ensaios das réplicas, como mostra a Tabela 5.24. Os dados obtidos dos ensaios apresentaram variação pequena, tendo em vista os valores dos desvios padrão e dos coeficientes de variação que ficaram 0,84 e 3,24% respectivamente.

Os resultados médios do primeiro ensaio e da réplica mostrou pequena variação sendo o CC8 o concreto que apresentou maior resistência à compressão média.

A análise dos valores de f_{ck} desses concretos são superiores a 20 MPa, portanto adequados como elementos de concreto armado ou concretos para fins estruturais de acordo com a NBR6118

A fim de uma melhor análise das resistências à compressão apresentadas na Tabela 5.24, foi realizada uma análise estatística desses dados.

Foi realizada inicialmente a verificação da normalidade dos dados e em seguida a análise de variância (ANOVA) com o teste de Tukey.

O nível de significância adotado foi de 5%, para constatar se as diferenças dos resultados obtidos dos testes de compressão são significativas.

Os resultados estão apresentados na Tabela 5.25, onde foram analisados os dados da 1ª moldagem.

Tabela 5. 25: Resultado da análise estatística – Resistência à compressão

Testes		Estatísticas	P - valores		
Shapiro - Wilk		0,988	0,913		
Resultados da ANOVA					
	G.L.	Soma.de.Quadrados	Quadrado.Médio	Estat..F	p. valor
Fator	Fator	5	9,04	1,81	6,62
Resíduos	Resíduos	24	6,56	0,27	
Teste Tukey - Agrupamento					
Fator	Médias	Grupos			
CC8	26,43	a			
CC4	25,89	ab			
CC6	25,86	ab			
CC2	25,71	ab			
CCR	24,93	b			
CC0	24,89	b			

Fonte: Autor (2020)

Os resultados apresentados na Tabela 5.25 mostram que, para um nível de 5%, os dados provêm de uma população com distribuição normal, de acordo com o teste de Shapiro-Wilk.

Em vista disto, foi realizada a análise de variância (ANOVA), juntamente com o teste de Tukey, com nível de significância também de 5%.

O resultado da ANOVA apresentada na Tabela 5.25 indicam que os concretos são estatisticamente diferentes, sendo necessário a realização do teste Tukey para a identificação dos agrupamentos.

A análise desses resultados mostra que, não existe diferença significativa entre os concretos com AGRC sem tratamento (CC0) e o concreto com agregado graúdo natural (CCR),

em relação à resistência à compressão. Os concretos CC2, C4 e CC6 são considerados do mesmo grupo, não apresentando diferenças significativas nas resistências à compressão.

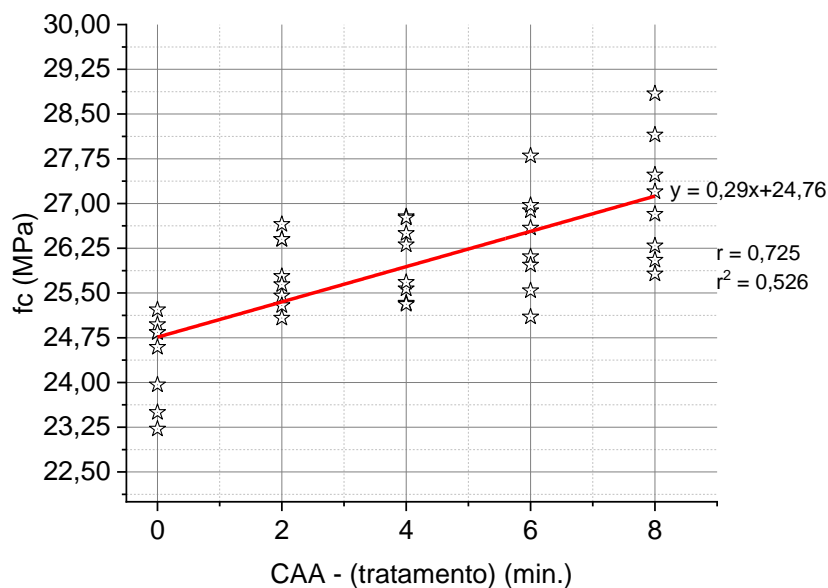
Entretanto, esses concretos apresentam diferença significativa em relação aos concretos CCR e CC0. O concreto que apresentou melhores resultados nesta propriedade foi o CC8 que é estatisticamente diferente dos demais concretos.

Continuando com a análise estatística, foi realizada a análise do coeficiente de Pearson, para verificação da significância das influências dos tratamentos e as resistências à compressão. O resultado do valor-p = $1,18 \times 10^{-7}$, é um valor inferior a 0,05, que permite concluir pela rejeição da hipótese nula (H_0 : Não existe relação entre os tempos de tratamento e as resistências à compressão).

Portanto, existe significativa influência entre a variável independente, o tempo de tratamento do AGRC e a variável de resposta escolhida, a resistência à compressão dos concretos aos 28 dias.

A análise dos dados permitiu concluir, que de acordo com o coeficiente de Pearson, $r = 0,725$, existe uma relação linear positiva forte entre os tempos de tratamentos e a resistência à compressão, o que significa grandezas diretamente proporcionais num índice de 72,50%. O gráfico representativo dessa análise está representado na Figura 5.35.

Figura 5. 35 - Análise de correlação dos tratamentos e a resistência à compressão

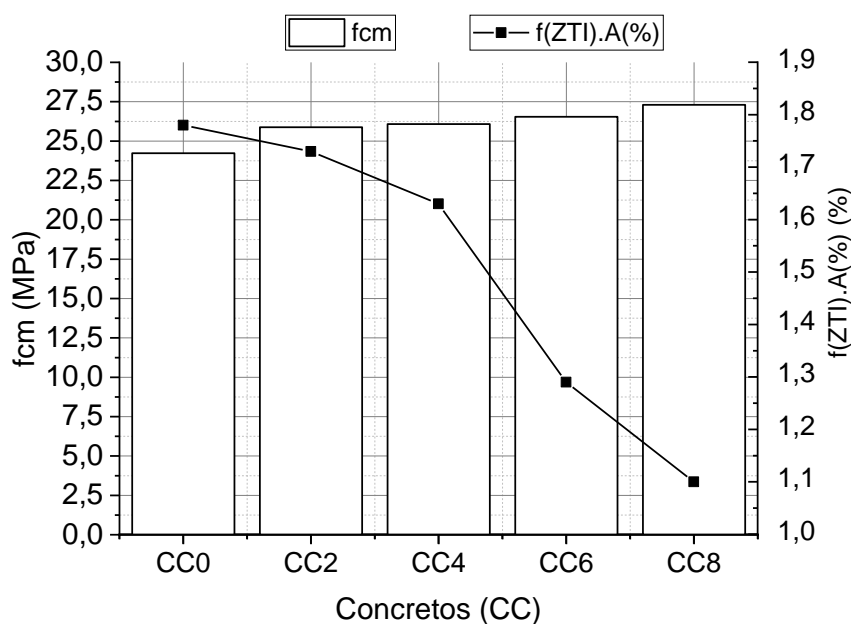


Fonte: Autor (2020)

Prosseguindo com a presente pesquisa, após os resultados do estudo estatístico dos CC, foram realizadas análises das características físicas desses concretos com as propriedades dos AGRC e AGRCT.

Inicialmente foi realizada a comparação entre as resistências à compressão dos concretos com as absorções das ZTI dos AGRC e AGRCT, apresentadas na Figura 5.36.

Figura 5. 36 - Comparação das resistências à compressão dos CC e a absorção das ZTI



Fonte: Autor (2020)

Na comparação apresentada na Figura 5.36, se observa que existe coerência entre as resistências à compressão dos CC com AGRC e AGRCT e a redução das absorções das zonas de ZTI dos respectivos agregados, sendo grandezas inversamente proporcionais.

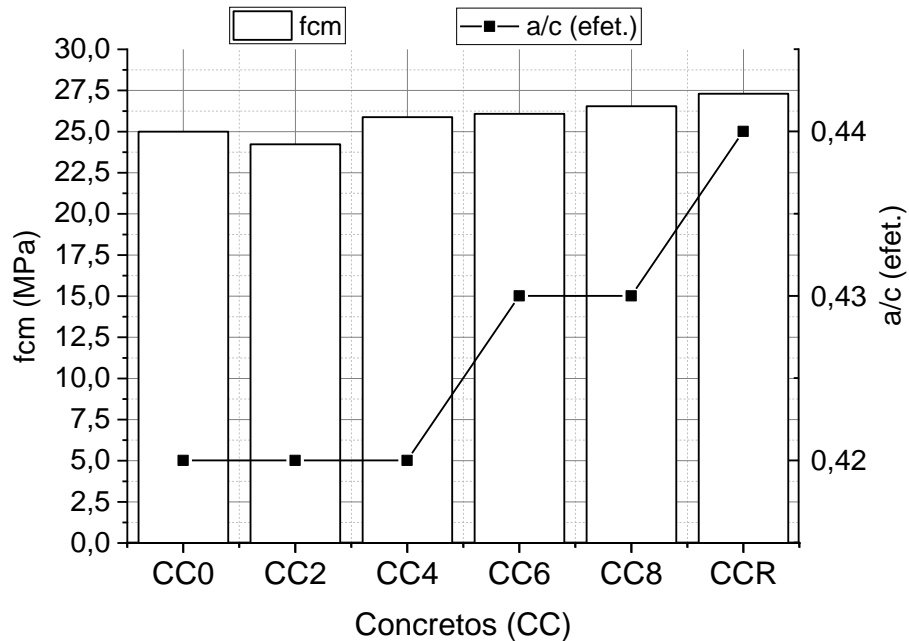
Foi realizada também a relação entre as resistências à compressão, os dados das composições dos concretos e os seus fatores a/c efetivos, como mostra a Tabela C10, no Anexo C.

Os valores obtidos dos ensaios mostram que as resistências à compressão média ficaram entre 24,23 e 27,30 MPa, sendo maior para o CC8 conforme apresentado no gráfico da Figura 5.36, sendo consideradas as médias das duas moldagens.

Nas análises foram observados os fatores a/c efetivos, calculados retirando 20% da água de absorção dos AGRC e AGRCT.

A composição foi calculada inicialmente para o fator $a/c = 0,45$, houve portanto uma pequena variação que não deve ter interferido nas resistências à compressão média dos concretos, como mostra a Figura 5.37.

Figura 5. 37 - Resistência à compressão média para $a/c = 0,45$



Fonte: Autor (2020)

Os valores das resistências à compressão foram compatíveis com os apresentados na literatura. Tenório (2007), ao usar AGRC em concretos com um consumo de cimento de 400 kg/m^3 e fator $a/c = 0,67$, encontrou uma resistência à compressão média de 27,40 MPa.

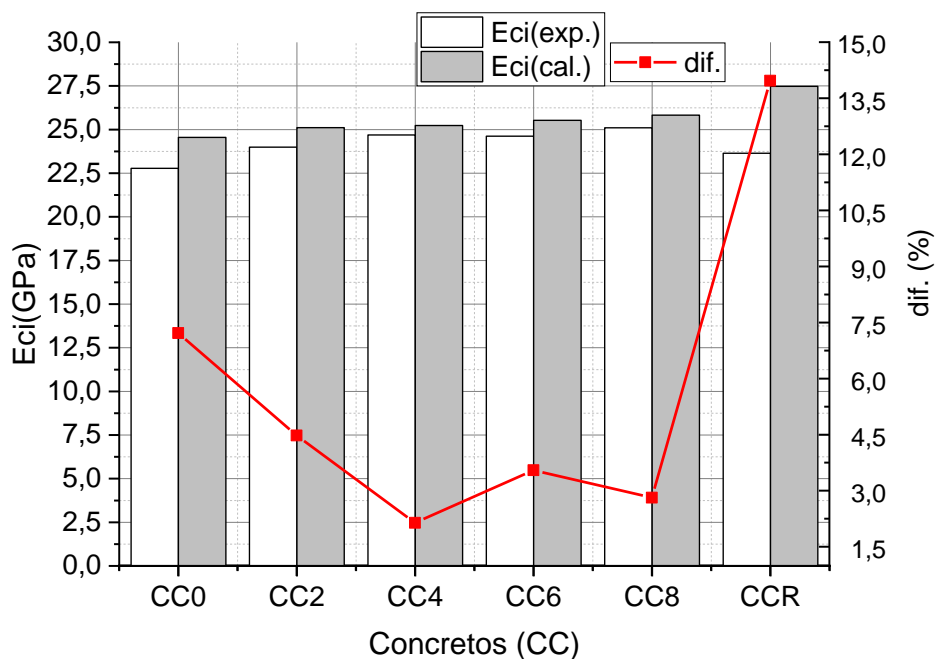
Tseng (2010) usou um consumo de cimento 358 kg/m^3 e obteve uma resistência à compressão média de 30,24 MPa. Tenório (2016) alcançou uma resistência à compressão de 29,0 MPa, usando um consumo de cimento de 410 kg/m^3 , e relação $a/c = 0,50$.

Estudo realizado por Gonzáles-Taboada *et al.* (2016) constatou que concretos com fator a/c entre 0,35 e 0,75 e percentual de substituição entre 30% e 50% de AGRC apresentaram resistência à compressão entre 30MPa e 50 MPa.

5.6.2.2 Módulo de elasticidade dos concretos convencionais

Os resultados obtidos dos ensaios do módulo de elasticidade dos concretos estão apresentados na Tabela C12, Anexo C e Figura 5.38.

Figura 5. 38 - Comparação entre módulos de elasticidade



Fonte: Autor (2020)

A Figura 5.38 mostra a comparação entre os resultados. A maior diferença foi observada no CC0, e as menores nos concretos CC4, CC6 e CC8.

Outro aspecto importante observado nesses ensaios foi que o módulo de elasticidade experimental foi menor que o calculado com o uso da equação da NBR6118, sendo considerado o coeficiente $\alpha = 0,90$ para agregados de calcário para efeito de cálculo, mesmo valor adotado para os outros CAA.

Os resultados encontrados na literatura referente ao módulo de elasticidade de concretos com AGRC, de um modo geral são cerca de 20 a 30% inferiores aos mesmos concretos com agregados naturais (GONZÁLEZ-TABUADA, 2016).

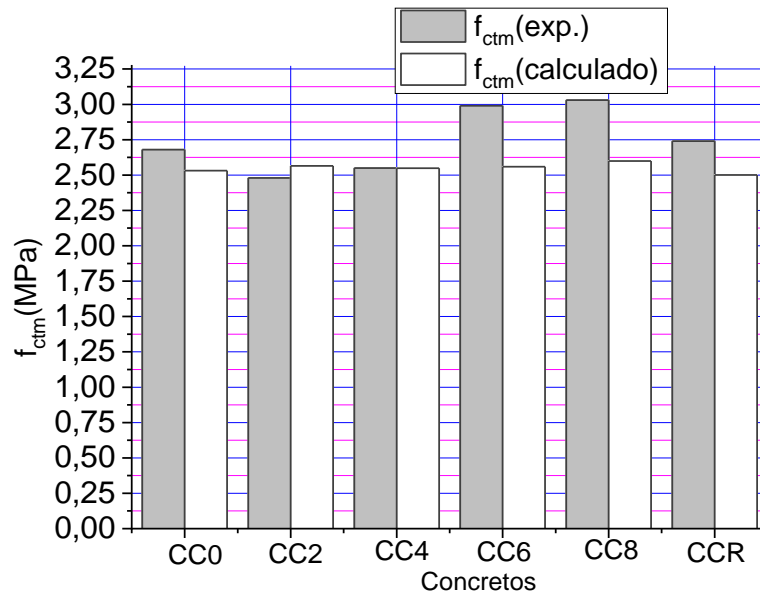
5.6.2.3 Resistência à tração por compressão diametral dos concretos convencionais

Os resultados obtidos dos ensaios de tração por compressão diametral dos corpos de prova do concreto convencional (CC) estão apresentados na Tabela 5.37.

O concreto que apresentou maior resistência à tração foi o CC8 e o que apresentou menor valor foi o CC2, entretanto, esses valores apresentaram uma diferença de 0,55MPa, correspondente a 22,17%.

Os dados obtidos desses ensaios foram comparados com os calculados com o uso da equação indicada pela NBR6118 (ABNT, 2014). Os resultados experimentais foram superiores em todos os concretos, sendo as maiores diferenças observadas no CC6 e o CC8, como mostra a Figura 5.39.

Figura 5. 39 - Comparação entre as resistências à tração por compressão diametral



Fonte: Autor (2020)

5.6.2.4 Absorção de água e porosidade dos CC

Os resultados obtidos dos ensaios de absorção de água, realizado de acordo com a NBR 9778 (ABNT, 2005), estão apresentados na Tabela 5.26.

Tabela 5. 26: Resultados de absorção de água e índice de vazios

Concreto comum (CC)	M_{sss}	M_s	M_{sub}	M_a	A	ρ_a	ρ_{sss}	ρ_r	Iv(m)	Dp (Iv)	Cv (Iv)
	(g)				(%)	g/cm ³			(%)	(%)	(%)
CC0	3584,1	3360,0	2012,3	224,1	6,67	2,14	2,28	2,49	14,26	1,3	9,1
CC2	3597,4	3340,1	2030,7	257,4	7,71	2,13	2,30	2,55	16,43	1,1	6,7
CC4	3537,0	3315,2	1971,1	222,0	6,70	2,12	2,26	2,47	14,18	0,9	6,3
CC6	3589,3	3350,0	2006,8	239,3	7,14	2,12	2,27	2,49	15,12	0,8	5,3
CC8	3569,4	3355,2	1994,2	214,4	6,39	2,13	2,27	2,47	13,61	1,1	8,1
CCR	3645,3	3445,1	2070,2	200,3	5,81	2,19	2,31	2,51	12,72	1,0	7,9

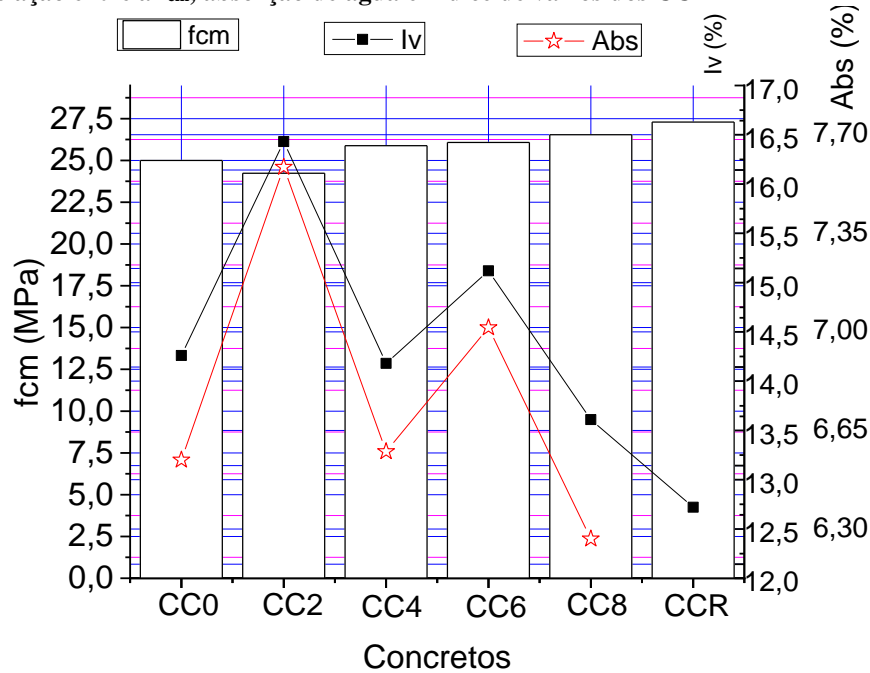
Fonte: Autor (2020)

Os resultados obtidos dos ensaios de densidades e índice de vazios apresentaram pequena variação, caracterizada pelos coeficientes de variação (Cv), que variou entre 9,1% e 6,3%, para o CC0 e CC4, respectivamente.

Esses resultados mostraram que o concreto que apresentou maior absorção de água foi CC2 e a menor absorção foi CCR.

A relação observada entre as propriedades de absorção de água e a porosidade dos concretos observada na Figura 5.40, é compatível com as propriedades correspondentes dos AGRC e AGRCT.

Figura 5. 40 - Relação entre a f_{cm} , absorção de água e índice de vazios dos CC



Fonte: Autor (2020)

Observa-se que entre os concretos CC0 e CC2 aparece uma incoerência onde o primeiro, mesmo tendo agregados mais porosos tem menor índice de vazios. Isto pode ser justificado pela possibilidade da pasta de cimento preencher os vazios maiores do AGRC2.

Foi observado que as formas de ruptura dos concretos ocorreram, de modo mais comum, com o deslocamento do agregado graúdo, caracterizando a quebra da nova zona de transição interfacial (ZTI), provocando o deslocamento do agregado graúdo.

Estudos apresentados na literatura mostram que a ZTI entre a argamassa antiga e a argamassa nova tem um papel crítico no desempenho mecânico de resistência dos concretos com AGR. Esta zona de transição influencia diretamente o comportamento final do concreto.

Metha; Monteiro (2008) concluíram que nos concretos com resistências à compressão inferior a 30 MPa, a ruptura se dá na maioria das vezes por quebrar na ZTI.

Estudos realizados por González-Tabuada *et al.* (2016) mostram que quando a relação a/c é superior a 0,60, a influência na resistência à compressão na presença de AGRC, não é significativa.

Nesses casos o efeito da baixa qualidade da argamassa nova é mais significativo. Os valores obtidos dos ensaios de resistência à compressão dos concretos em estudo indicaram um valor médio para os concretos com AGRCT, ligeiramente superiores ao concreto de referência (CCR).

5.6.3 Considerações finais

Considerando os resultados obtidos na caracterização dos concretos convencionais (CC), tendo em vista a metodologia e os procedimentos que foram empregados se chegou as seguintes considerações:

:

- Os resultados dos ensaios de abatimento no tronco de cone mostraram que os tratamentos dos AGRC melhoraram a trabalhabilidade dos concretos.;
- Os resultados dos ensaios de resistência à compressão indicaram que os tratamentos dos AGRC foram eficientes e mostraram que o CC8 apresentou melhores resultados, se caracterizando como um concreto com qualidade de resistência superior aos demais;
- A análise estatística mostrou que existe correlação linear forte entre os tempos de tratamentos dos AGRC e as resistências à compressão dos concretos. Dessa forma, o tempo de tratamento caracterizado pelo tipo de AGRC é proporcional a resistência à compressão dos concretos com os respectivos agregados;
- Os módulos de elasticidade dos concretos foram equivalentes, variando entre 23,0 GPa e 25,0 GPa, sendo maior para o CC8. Comparando os resultados obtidos pela equação proposta pela norma e os experimentais, indicaram que os calculados foram ligeiramente superiores para todos os concretos;
- A resistência à tração dos concretos convencionais com AGRC e AGRCT apresentaram resultados próximos ao concreto convencional de referência (CCR). Ao comparar os resultados experimentais com os obtidos pela equação proposta pela norma, os resultados experimentais

foram superiores para todos os concretos, com exceção dos concretos CC2 e CC4 que tiveram resultados próximos;

➤ Os resultados da absorção de água e porosidade caracterizado pelo índice vazios, mostraram que os tratamentos do AGRC produziram CC menos porosos, inversamente proporcional aos tempos de tratamento.

Dando prosseguimento a pesquisa, no tópico seguinte foram realizadas as análises de custo dos concretos, tendo como parâmetros o consumo de energia no beneficiamento do RC e dos tratamentos do AGRC, e as resistências à compressão dos concretos.

5.7 Análise de ecoeficiência dos concretos

A ecoeficiência dos materiais cimentícios é uma característica que tem sido pesquisada, tendo em vista a alta geração de CO₂ no processo de fabricação do cimento portland (CP). (DAMINELLI *et al.*, 2010; HASANBEIGI *et al.*, 2012). Torgal; Jalali (2017), consideram a ecoeficiência o estágio anterior à sustentabilidade.

De um modo geral, as pesquisas tem verificado a ecoeficiência dos materiais cimentícios, em função da redução do consumo de CP. Ainda que a adição de materiais pozolânicos encareçam o produto final.

Popovics (1990) e Isaías (2003) relacionaram a quantidade de cimento com a resistência à compressão, criando o indicador (kg de CP/MPa) como parâmetro simplificado da ecoeficiência de concretos.

Aïtcin (1999), por sua vez, definiu eficiência econômica como o custo de 1MPa ou um ano de vida útil de uma estrutura de concreto.

Daminelli *et al.* (2013) determinaram um parâmetro de ecoeficiência, dado pela Equação (5.10).

$$bi_{cs} = \frac{B}{Cs} \quad (5.10)$$

Na Equação (5.10), B é a quantidade de cimento em kg/m³ de pasta, e Cs é a resistência à compressão do concreto aos 28 dias em MPa. Nesta equação se observa que o índice de

consumo de ligantes (B), é inversamente proporcional à ecoeficiência do concreto dado por (b_{ics}).

A ecoeficiência cresce com a redução do consumo de cimento, aumento da resistência à compressão e com a durabilidade do concreto.

Além das considerações relatadas pelos pesquisadores citados, nesse estudo, como os concretos foram produzidos com AGRC e AGRCT, foi considerado na composição da ecoeficiência dos concretos, o consumo de energia no beneficiamento do RC e dos tratamentos dos agregados.

Assim, as ecoeficiências dos concretos foram determinadas em função dos custos da energia consumida na obtenção dos AGRC e AGRCT e das resistências à compressão, tendo em vista que os consumos de cimento foram constantes para cada tipo de concreto.

5.7.1 Determinação do custo de obtenção dos concretos

A verificação dos parâmetros de ecoeficiência dos concretos desse estudo, foram realizadas considerando três aspectos: o custo de obtenção dos AGRC, os custos da energia dos tratamentos de desgaste e o custo do consumo do aglomerante por metro cúbico de concreto.

A razão entre esse somatório e a resistência à compressão média dos concretos aos 28 dias, definem o índice de ecoeficiência dos concretos usados nesse trabalho, chamado de (E_{eco}). Este índice é definido pela Equação (5.11).

$$E_{eco} = \frac{(A + B + C)}{f_{cm}} \quad (5.11)$$

Nesta Equação (5.11), as variáveis tem os seguintes significados: A representa o custo do aglomerante por metro cúbico de concreto, B o custo de obtenção dos AGRC e C representa o custo da energia consumida no tratamento dos AGRC.

Desta forma, quanto maior o valor do índice de ecoeficiência (E_{eco}) menos ecoeficiente é o concreto, porque apresenta um custo maior por unidade de resistência à compressão.

Os valores dos índices E_{eco} dos concretos estudados estão apresentados na Tabela 5.27. Para o cálculo dos dados apresentados nesta Tabela 5.27, foram usados os parâmetros determinados nos cálculos dos custos de energia na obtenção do AGRC (B), e dos tratamentos para a obtenção dos AGRCT (C).

Tabela 5. 27: Custos de energia dos concretos (US\$/m³. MPa)

Concretos	b _{ics} (kg/m ³ . MPa)	(US\$/m ³ . MPa)			
		(A) Custo	(B)	(C) Custo da Energia	E _{eco}
		b _{ics}	(Custo do beneficiamento)	(Tratamento)	US\$/m ³ .MPa
CC0	14,445	1,546	0,044	0,000	1,590
CC2	13,524	1,447	0,042	0,046	1,535
CC4	13,420	1,436	0,043	0,097	1,576
CC6	13,188	1,411	0,043	0,159	1,613
CC8	12,821	1,372	0,043	0,234	1,648
CAA 40% de pasta sem absorção					
CA0 s/a	14,704	1,573	0,026	0,000	1,600
CA2 s/a	12,653	1,354	0,023	0,024	1,401
CA4 s/a	12,736	1,363	0,024	0,055	1,442
CA6 s/a	11,991	1,283	0,023	0,085	1,391
CA8 s/a	12,065	1,291	0,024	0,128	1,443
CAA 40% de pasta com 80% de absorção					
CA0 c/a	14,759	1,579	0,026	0,000	1,605
CA2 c/a	14,726	1,576	0,023	0,024	1,622
CA4 c/a	15,686	1,678	0,024	0,055	1,757
CA6 c/a	12,916	1,382	0,023	0,085	1,490
CA8 c/a	15,562	1,665	0,024	0,128	1,817

Fonte: Autor (2020)

Os índices de ecoeficiência dos concretos, observados na Tabela 5.27, variaram entre 1,391US\$.m⁻³ MPa⁻¹ e 1,817 US\$.m⁻³ MPa⁻¹, para o CA6s/a e o CA8c/a, respectivamente.

A fim de observar melhor os parâmetros de ecoeficiência dos concretos, estes foram separados de acordo com o tipo de concreto produzido.

5.7.1.1 Concreto autoadensável sem e com o uso da água de absorção

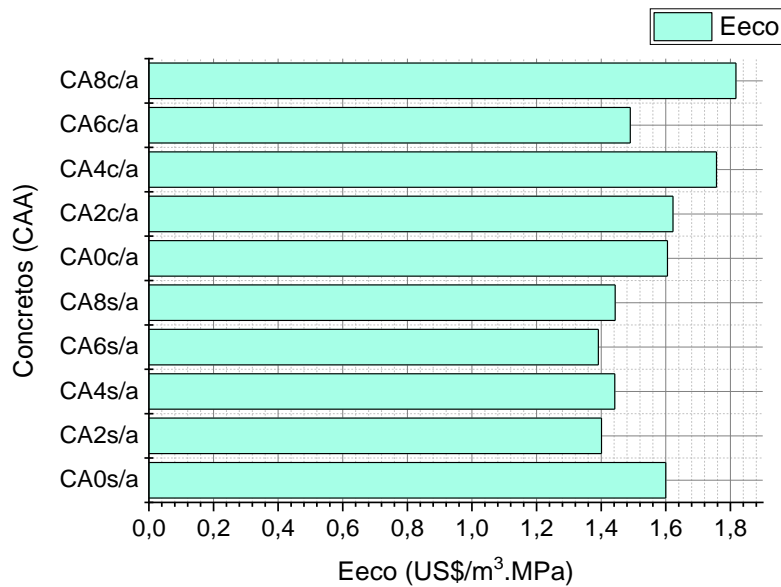
A análise dos resultados para os CAA s/a e CAAc/a do agregado graúdo reciclado de concreto apresentados na Tabela 5.27 estão ilustrados no gráfico apresentado na Figura 5.41.

Os dados ilustrados na Figura 5.41 mostram que os tratamentos do AGRC foram eficientes nos CAAs/a. Os CAAs/a apresentaram índices de ecoeficiência menores que os índices dos CAAc/a.

Isto indica que a obtenção dos CAAs/a se apresentou mais vantajosa em relação a resistência à compressão, quando comparado com os CAAc/a.

O menor índice E_{eco} foi verificado no CA6s/a, valor de 1,391US\$.m⁻³.MPa⁻¹. No entanto o CA2s/a apresentou um acréscimo de 0,72% em relação ao índice do CA6s/a.

Figura 5. 41 - Parâmetros de ecoeficiência dos CAA



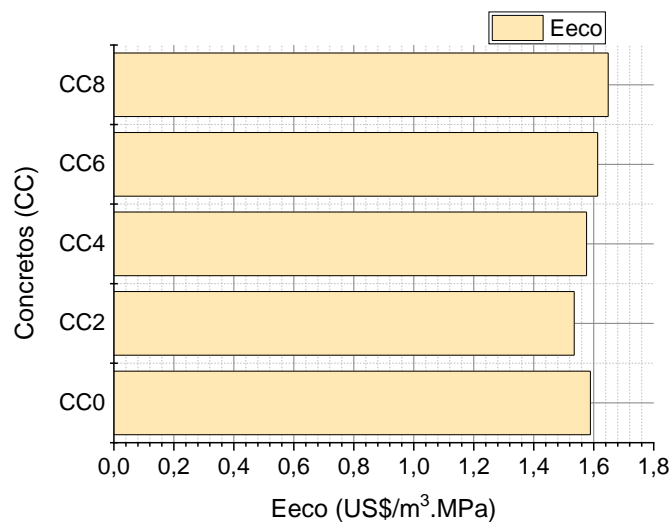
Fonte: Autor (2020)

Dando continuidade as análises de ecoeficiência dos concretos, nesse tópico foi verificada a ecoeficiência dos concretos convencionais (CC).

5.7.1.2 Concretos convencionais

Na verificação da ecoeficiência dos concretos convencionais, de forma similar aos concretos autoadensáveis, foram considerados os mesmos critérios de análise, cujos parâmetros foram apresentados na Tabela 5.26. O resumo dessa análise foi apresentado na Figura 5.42.

Figura 5. 42 - Parâmetros de ecoeficiência dos concretos convencionais



Fonte: Autor (2020)

Conforme os resultados apresentados na Tabela 5.26 e no gráfico da Figura 5.42, os CC apresentaram índice de ecoeficiência (E_{eco}) entre $1,535\text{US}\$.m^{-3}.MPa^{-1}$ e $1,648\text{US}\$.m^{-3}.MPa^{-1}$ para o CC2 e CC8, respectivamente. Isso indica uma diferença percentual de 7,43%.

Observou-se portanto, que o tempo de dois minutos de tratamento de desgaste que corresponde ao AGRC2 usado no CC2, foi suficiente para a obtenção de concreto convencional com o menor índice de eceficiencia (E_{eco}), para a composição e metodologia utilizada na obtenção desses concretos

5.7.2 Considerações finais

As análises que foram realizadas nos parâmetros de ecoeficiência, caracterizada pelos custos da energia consumida nos concretos, permitiram chegar as seguintes considerações:

- Os resultados dos parâmetros de ecoeficiência dos CAA sem o uso da água de absorção foram melhores em relação aos CAA com o uso da água de absorção, sendo o CA6 sem absorção o que apresentou maior ecoeficiência, caracterizado pela menor razão entre o custo de produção e a resistência à compressão. Entretanto a diferença entre esse CA6s/a e o CA2s/a foi insignificante;
- Entre os concretos convencionais se observou que o concreto CC2 foi o mais ecoeficiente. Dessa forma, o tempo de tratamento de dois minutos foi suficiente para proporcionar o AGRT que ofereceu melhor resposta entre o custo de produção e a resistência à compressão.

6 CONCLUSÕES

A análise da revisão bibliográfica para a elaboração desse trabalho permitiu identificar a relevância da obtenção de AGRC. Além disso permitiu verificar a importância de melhorar suas propriedades físicas e morfológicas para utilização em concretos, com resistência compatível a do concreto estrutural. Dessa forma, se percebeu a necessidade de aprofundar o conhecimento existente sobre a redução da porosidade do AGRC por meio de tratamentos e fosse possível o controle das variáveis envolvidas. Nesse sentido, foi desenvolvido um método de desgaste por abrasão com a utilização de moinho de bolas, equipamento usado para a realização de ensaios de abrasão “Los Angeles”. Isto permitiu o controle das variáveis e a criação de um modelo matemático adequado às transformações sofridas pelos AGRC em função do tempo.

O desenvolvimento desse trabalho teve como eixo principal a utilização de ferramentas matemáticas de cálculo em conjunto com método numérico computacional, baseado no método dos mínimos quadrados (MMQ), o qual foi usado para a definição dos modelos numéricos dos resultados experimentais. Nesse contexto, essa pesquisa apresentou contribuições para a compreensão da tendência do comportamento dos fenômenos estudados, com o uso das ferramentas de cálculo.

Assim, foi possível a definição de parâmetros para a determinação dos componentes de concretos, podendo ser usados como parte integrante de formulações computacionais na definição de composições de concretos especiais. Diante do que foi desenvolvido e analisado nessa pesquisa foi possível elaborar as seguintes conclusões:

- ✓ Os percentuais de perdas de argamassa presa aos AGRC, correspondente ao material com tamanho inferior a 4,75 mm, ficaram bem definidos por um modelo numérico representado por uma equação exponencial descendente;
- ✓ Foram desenvolvidas equações de caracterização do fenômeno da cinética de absorção de água dos AGRC e AGRCT que apresentaram resultados satisfatórios, quando comparados com modelo existente e com os dados experimentais.
- ✓ O estudo do escoamento de pastas de materiais cimentícios usando o cone de Marsh possibilitou o desenvolvimento de um método analítico para a determinação do ponto de

saturação do superplastificante, que se constituiu em uma contribuição na determinação da quantidade ideal desse material para a produção de concretos autoadensáveis;

- ✓ A utilização de funções parabólicas de segundo grau para descrever os comportamentos das massas unitárias e percentual de vazios das misturas de agregados, nos ensaios de “esqueleto granular”, se mostraram adequadas, se constituindo em modelo numérico para definição dos percentuais ótimos de agregados;
- ✓ O uso dos modelos numéricos atendeu aos objetivos propostos nesta tese, possibilitando a obtenção de controle e precisão na definição dos componentes dos concretos. Esses modelos permitem suas implementações como rotinas de programas para a definição da composição computacional de concretos;
- ✓ Os tratamentos se mostraram eficientes tendo em vista a redução dos percentuais de argamassa presa aos agregados, comprovados com o uso dos ensaios específicos e das análises das absorções de água e das densidades.

Em relação aos comportamentos dos concretos produzidos com AGRC e AGRCT para a verificação dos efeitos provocados pelos tratamentos, pode-se inferir as seguintes conclusões:

- ✓ Considerando os resultados obtidos no estado fresco, no conjunto de CAA com 40% de pasta, todos apresentaram parâmetros adequados de autoadensabilidade. Nos dois grupos de CAA não foi possível quantificar proporcionalidade entre os tempos de tratamentos e os parâmetros de melhora dos resultados desses parâmetros. Desta forma, foi identificado que os CAA com 40% de pasta permitiram que os AGRC e AGRCT trabalhassem com folga, não permitindo, portanto, uma identificação precisa das diferenças dos parâmetros. Entre os CAA com o uso da água de absorção, ficou evidente que os parâmetros de Slump flow, Caixa-L e Funil-V foram melhores em relação aos resultados dos concretos sem uso da água de absorção, entretanto esses concretos apresentaram indícios de exsudação.

Nos ensaios dos concretos no estado endurecido, foram observadas características que podem ser resumidas da seguinte forma:

- ✓ Os resultados obtidos nos ensaios no estado endurecido, foram compatíveis com a literatura existente. Os ensaios de resistências à compressão apresentaram valores superiores ao limite mínimo estabelecido pela norma para concretos para fins estrutural. Além disso, os CAA

com AGRC e AGRCT apresentaram resistências à compressão maiores que a do CAA com agregados naturais para o CAA com 40% de pasta com e sem o uso da água de absorção. Foi verificado ainda que, entre as variáveis estudadas a que exerceu maior influência na resistência à compressão do concreto foi o fator a/c ;

✓ Os resultados encontrados na literatura para o CAA com 100% de substituição de AGRC, de um modo geral, apresenta resistência à compressão inferior ao concreto com mesma dosagem com agregados naturais. Essa redução variou de 8% a 20%. Alguns pesquisadores, entretanto, encontraram valores equivalentes, e outros encontraram resistências superiores à do CAA com AGN, dependendo do fator a/c e da resistência do concreto que deu origem ao AGRC, além da metodologia de dosagem.

✓ As análises dos resultados do módulo de elasticidade aos 28 dias foram compatíveis com os encontrados na literatura. Entretanto, diferentemente de alguns resultados relatados, o E_{ci} dos CAA com AGRC foram superiores ao do CAA com AGN. Portanto, os resultados foram coerentes e seguiram a mesma proporcionalidade dos resultados de resistência à compressão. De modo geral, os resultados experimentais dos E_{ci} foram inferiores aos calculados pela equação proposta pela NBR6118(ABNT, 2003). No caso dos resultados de resistência à tração por compressão diametral, os valores obtidos apresentaram coerência com os encontrados na literatura.

As hipóteses formuladas nesta pesquisa, que serviram de orientação para o seu desenvolvimento, consideravam que os tratamentos produziram agregados graúdos reciclados de concreto menos porosos mais densos e mais esféricos. Que seria possível o desenvolvimento de modelos matemáticos para a análise dos ensaios usados na definição das quantidades de materiais usados nos concretos especiais, podendo fazer parte de rotinas computacionais de composição desses concretos.

Ao final desse trabalho foi possível afirmar que as hipótese formuladas foram integralmente confirmadas, no que se refere aos efeitos dos tratamentos nas propriedades físicas dos AGRC.

Em relação à influência dos AGRC e AGRCT, mesmo sendo confirmadas as hipóteses, não houve correlação de proporcionalidade entre os tempos de tratamentos dos agregados e as propriedades dos concretos nos estados fresco e endurecido. Isto pode ser entendido ao final desse trabalho, que isto ocorre devido à complexidade do concreto, material compósito particulado, onde as interações são complexas, e necessitam de uma investigação do

comportamento de cada um dos componentes. Em vista disso, diante das análises que foram realizadas nesta pesquisa, se verificou que algumas perguntas que surgiram ao longo do desenvolvimento do trabalho não foram respondidas, por fugirem ao escopo desse trabalho.

As respostas a essas perguntas serão obtidas por meio de pesquisas a ser desenvolvidas e fazem parte das sugestões para continuidade do trabalho, visando o desenvolvimento de pesquisas futuras.

6.1 Sugestões para trabalhos futuros

Os aspectos que não puderam ser contemplados nessa pesquisa, ou que necessitam serem melhor investigados estão expostos a seguir:

- Fazer comparações e análises de CAA com conteúdos de pasta diversos, como também o uso de adição de material pozolânico nas composições das misturas, para a verificação do comportamento das propriedades dos concretos com os AGRC e AGRCT;
- Estudar a utilização do AMRC proveniente dos tratamentos do desgaste de abrasão nos tempos de 2, 4, 6 e 8 minutos no sentido de um aproveitamento completo do RC;
- Utilizar o filer do RC obtido com os tratamentos em pesquisas com concretos e agarmassas, visando a redução do consumo de cimento, tendo em vista que esse material apresentou partículas de cimento não hidratado;
- Estudar os tratamentos no MB com parâmetros diferentes do que foi desenvolvido neste trabalho, para a verificação do comportamento da transformação do AGRC, como também o uso de tempos mais diversificados;
- Estudar as composições com dosagens de cimento entre 300 e 450 kg para a verificação dos comportamentos dos concretos com os AGRC e AGRCT;
- Fazer Análise aprofundada de estudos de curvas de composição de agregados (“Esqueleto granular”), visando a implementação de um modelo matemático computacional de determinação dos percentuais ótimos de agregados graúdos e miúdos;

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABDELLAOUI, M.; GAFFET, E. The physics of mechanical alloying in a planetary ball mill: mathematical treatment. *Acla metall, mater.* Vol. 43, No. 3, pp. 1087-1098, 1995.

ABRAMS, D. A.; Design of concrete mixture. Portland Cement Association. Chicago. 1919.

ABRELPE. Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2017.
http://abrelpe.org.br/pdfs/panorama/panorama_abrelpe_2017.pdf. Acesso janeiro, 2019

ABREU, V., EVANGELISTA, L.; BRITO, J. The effect of multi-recycling on the mechanical performance of coarse recycled aggregates concrete. *Construction and Building Materials.* 2018.

AGULLÓ, L.; TORALLES-CARBONARI, B.; GETTU, R.; AGUADO, A. “Fluidity of cement pastes with mineral admixtures and superplasticizer – a study based on the marsh cone test.” *Materials and Structures.* v. 32. p. 479-485, 1999.

AÏTCIN, P. C. Developments in the application of high-performance concretes. *Construction and Building Materials.* v. 9, n. 1, p. 13-17.1999.

AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C. AND MACGREGOR, J. G. “Superplasticizers: How They Work and Why They Occasionally Don’t.” *Concrete International.* v. 16, n. 5. p. 45-52, 1994.

AL-BAYATI, H. K. A.; DAS, P. K.; TIGHE, S. L., BAAJ, H. Evaluation of various treatment methods for enhancing the physical and morphological properties of coarse recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials.* March, 2016.

ANGULO, S. C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico dos concretos.** 2005. 149 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

ANGULO, S. C.; DA SILVA, R. B.; DE OLIVEIRA, V. L.; ULSEN, C. **Caracterização das Propriedades Físicas dos Agregados Graúdos de RCC Reciclados por Picnometria de Pó e Gás.** Anais do 54º Congresso Brasileiro do Concreto – IBRACON, 2012.

ANGULO, S. C.; FIGUEREDO, A. D. Concreto com agregados reciclados. *Research Gate.* <https://www.researchgate.net/publication/293811678>, 2013.

ANGULO, S. C.; MARTINS, L. A.; SILVA, R. B.; ULSEN, C.; CAMARIM, G.; Tratamento térmico e moagem de resíduos de concreto com diferentes classes de resistência. 3º Encontro nacional sobre reciclagem de resíduos na construção civil. São Leopoldo, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR NM 26 – Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro. 2009, 10p.;

_____. NBR NM 53: Agregado Graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro. 2009;

_____. NBR 15823: Concreto autoadensável: Parte 1: Classificação, controle e recebimento no estado fresco. Rio de Janeiro, 2017a, 20p;

_____. NBR 15823: Concreto autoadensável: Parte 2: Determinação da viscosidade – Método do funil-V. Rio de Janeiro: ABNT. 2017b, 9p;

_____. NBR 15823 - 4: Concreto autoadensável: Parte 4: Determinação da habilidade passante - Método da caixa – L e da caixa U. Rio de Janeiro, 2017, c, 11p;

_____. NBR 15823 5: Concreto autoadensável. Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017d, 8p;

_____. NBR NM 248: Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro. 2003;

_____. NBR 7211: Agregados para concreto - Parâmetros de CAA - Determinação dos parâmetros no estado fresco. Rio de Janeiro. 2010.

_____. NBR NM 45: Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro. 2006;

_____. NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro. 2008;

_____. NBRNM52: Agregado miúdo - Determinação de massa específica e massa específica aparente, Rio de Janeiro. 2009;

_____. NBR9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica, Rio de Janeiro. 2009;

_____. NBR7211: Agregados para concreto – especificação, Rio de Janeiro. 2009, 9p;

_____. NBR6118: Projetos de Estrutura de Concretos – Procedimentos. São Paulo, 2014;

ASTM C939 – 10 Standard Test Method for Flow of Grout. (Flow Cone Method). 2010.

AUSTIN, L.G., SHOJI, K., BELL, D., 1982. Rate equations for non-linear breakage in mills due to material effects. *Powder Technol.* 31, 127–133.

BANFILL, P. F.G; A viscosimetric study of cement pastes containing superplasticizers with a note on experimental techniques. *Magazine of Concrete Research.* v. 33. n. 114. p. 37-47. March. 1981.

BANFILL, P.F.G. The rheology of fresh cement and concrete – a review. Proc 11th International Cement Chemistry Congress, Durban, May 2003.

BASF. Ficha técnica de produto. Gleniun®51. Aditivo superplastificante de Terceira geração. Disponível em: <https://www.ntcbrasil.com.br/wp-content/uploads/2014/12/gleniun-51-especificacoes-completas.pdf>. Acessado: maio de 2020;

BELIN, P.; HABERT, G.; THIERY, M.; ROUSSEL, N. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates. *Materials and Structures*. Rilem 2013.

BRASILEIRO, L. L., MATOS, J. M. E. Literature review: reuse of construction and demolition waste in the construction industry, *Cerâmica* (61). 2015

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concreto produzido com agregado reciclado, considerando-se a variabilidade de composição do RCC**. São Carlos/SP: Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2007;

CABRAL, A. E. B.; SCHALCH, V.; DAL MOLIN, D. C.; RIBEIRO, J. L. D. Performance Estimation for Concretes Made with Recycled Aggregates of Construction and Demolition Waste of Some Brazilian Cities. *Cerâmica* 55, 336. 2012;

CAMPOS, R. S.; BARBOSA, M. P.; PIMENTEL, L. L.; MACIEL, G. F. Influência dos agregados reciclados nas propriedades reológicas e mecânicas do concreto autoadensável. *Revista Matéria*. 2018.

CARBONARI, B. M.; GETTU, R.; AGULLÓ, A.; ACEÑA, V. A Synthetic Approach for the Experimental Optimization of High Strength Concrete. 4th International Symposium on Utilization of High Strength/High Performance Concrete. p. 161-167. 1996. Paris. F. De Larrard and R. Lacroix. Laboratoire Central des Ponts e Chaussées (editores). 1999.

CASTRO, A. L.; PANDOLFELLI, V. C. Review: Concepts of particle dispersion and packing for special concretes production). *Cerâmica*. 2009.

CAVALCANTI, D. J. de H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais. 2006, 141 p**. Dissertação de Mestrado. Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2006.

CHATTOPADHYAY, P. P.; MANNA, I.; TALAPATRA, S.; PABI, S. K. A mathematical analysis of milling mechanics in a planetary ball mill. Elsevier. 2001;

CHIEREGATI, A. C. **Novo método de caracterização tecnológica para cominuição de minérios. Dissertação (Mestrado)**, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo. 2001.

COLLEPARDI, S. *et al.* Mechanisms of Action of different superplasticizers for high performance concrete. Gramado In: International Conference on High-performance Concrete. and performance and quality of Concrete Structures. 2. Proceedings. 1999. p. 503 – 523.

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n° 307, de 05 de julho de 2002: Brasília, DF, 17 jul. 2002.

DAMINELLI, B. L. **Estudo de Métodos para Caracterização de Propriedades Físicas de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados. Dissertação de mestrado**. 125p. USP São Paulo. 2007.

DAMINELLI, B. L.; KEMEID, F. M.; AGUIAR, P. S.; JOHN, V. M. Measuring the eco-efficiency of cement use. *Cement and Concrete Composites*, v. 32, p. 555-562, 2010. doi:10.1016/j.cemconcomp.2010.07.009;

DAMINELLI, B. L.; PILEGGI, R. G.; JOHN, V. M. Lower binder intensity eco – efficient concretes. Woodhead publishing limited. 2013.

DE LARRARD, F.; BOSCH, F.; CATHERINE, C.; DEFLORENNE, F. A method for optimizing the binder/superplasticizer system in high-performance concrete mixture proportioning. Proceedings. Fifth CANMET. SP-173. (Rome. Italy). USA. Supplementary papers. p. 37-52.1997.

DE LARRARD, F.; BOSCH, F.; CATHERINE, C. AND DEFLORENNE, F. “The AFREM method for the mix-design of high-performance concrete.” *Materials and Structures*. v. 30, p. 439-446, 1997.

DILBAS, H.; ÇAKIR, Ö.; ATIS, C.D. Experimental investigation on properties of recycled aggregate concrete with optimized Ball Milling Method. *Construction and Building Materials*. 716–726. 2019

EDORGAN, S. T. FOWLER, D. W. **Determination off aggregate shape proprieties using x - Ray tomografi methods and the effects of shape on concrete rheology**. The University center for Texas Austin. 2005.

EFNARC Specificacion and Guidelines for Self-Compacting Concrete. EFNARC (2002).

ESMAEILKANIAN, B.; KHAYAT, K.; YAHIA, A.; FEYS, D. Efects of mix design parameters and rheological properties on dynamic stability of self – consolidating concrete. *Cement & Concrete Composite* v. 54, 2014: 21:28;

ETXEBERRIA , M.; VÁZQUEZ, E., MARÍ, A.; BARRA, M.. Influence of amount of recycled coarse aggregates and production process on properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete Research*. v. 37, n. 5, p. 735-742, May, 2007.

FAN, C.; HUANG, R. HWANG, H. CHAO, S. Properties of concrete incorporation fine recycled aggregates from crushed concrete waste. *Construction and Building Materials*. 2016.

FRANUS, W.; HALICKA, A.; LAMORSKI, K.; JOZEFACIUK G. Microstructural Differences in Response of Thermoresistant (Ceramic) and Standard (Granite) Concretes on Heating. Studies Using SEM and Nonstandard Approaches to Microtomography and Mercury Intrusion Porosimetry Data. *Materials*. 2018

GALLOWAY, J. E. JR. Grading. Shape. and Surface Propertie. American Society for Testing and Materials Special Technical Publication No. 169C. Philadelphia. PA. 401-410. 2009.

GETTU, R.; RONCERO, J. Aditivo superfluidificante para hormogenes de lata prestaciones. IV Simposio sobre aditivos para hormigones. Madrid. 24 e 25 de nov. 1998.

GOMES, P. C. C. **Optimization and Characterization of High-Strength Self- Compacting Concrete**. 139 p. Tese de Doutorado. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universitat Politècnica de Catalunya. Barcelona. 2002.

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. de. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. Pini. São Paulo. 2009.

GOMES, P. C. C.; ULSEN, C.; PEREIRA, F. A.; QUARTONE, M.; ANGULO, S. C. Comminution and sizing processes of concrete block waste as recycled aggregates. Waste Management. 2015.

GONZALEZ, A.; ETXEBERRIA, M; Experimental analysis of properties of high performance recycled aggregate concrete; Construction and Building Materials. v. 52, n. 15, 2014.

GONZÁLEZ-TABOADA, I.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; CARRO-LÓPEZ, D. Study of recycled concrete aggregate quality and its relationship with recycled concrete compressive strength using database analysis. Mater. Construcc. 66 [323], e 089. <http://dx.doi.org/10.3989/mc.2016.06415>. 2016.

GRDIC, Z. J.. TROPICIC-CURCIC, G. A.. DESPOTOVIC, I. M.; RISTIC, N.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. Construction and Building Materials 24. p. 1129-1133, 2010.

HANSEN, T. C.; Recycled aggregates and recycled aggregates concrete, second state – of – arte report developments 1945-1985. Materiaux constructions. Rilem T C – 37.DRC 1986.

HANSEN, T. C.; Recycled of demolished concrete and masonry. London: Chapman Hall. 316p. Part one: Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. p. 1-160. (RILEM TC Report 6). 1992.

HANSEN, T. C.; NARUD, H. Streght of recycled concrete made from crushed concrete coarse aggregate. Concrete International. v. 5. n.1. p. 79-83. 1983.

HAWLISTSHEK, G.; ULSEN, C.; KALM, H.; MASINI, E. A.; WESTERMANN, J.; Análise de imagens por fluxo dinâmico de partículas – Distribuição granulométrica e morfologia das partículas. Brasil Mineral N° 329. São Paulo. Maio 2013.

HASANBEIGI, A.; PRICE, L.; LIN, E. Emerging energy-efficiency and CO2 emissionreduction technologies for cement and concrete production: A technical review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, v. 16, p. 6220-6238, 2012. doi:10.1016/j.rser.2012.07.019.

HELENE, O. Método dos mínimos quadrados com formalism matricial: Guia do usuário. 1ª ed. – São Paulo. Livraria da física, 2006;

HEMES, S.; G., DESBOIS, J.; URAI, L; CRAEN, M.; HONTY, M. Variations in the morphology of porosity in the Boom Clay Formation: insights from 2D high resolution BIB-SEM imaging and Mercury injection Porosimetry. Netherlands Journal of Geosciences — Geologie en Mijnbouw, 92 – 4. 275-300. 2013.

HENDRIKS, C. F.; JANSSEN, G. M. T. Application of construction and demolition waste. Concrete International. Heron, v. 46, n. 2 , p. 79-88, 2001.

HUDSON, B. Modification to the Fine Aggregate Angularity Test". Proceedings. Seventh Annual International Center for Aggregates Research Symposium. Austin. TX 1999.

HO KIM, K.; WOOK, M.; CHAN CHO, H., WHAN AHN, JI. Development of Complete Processing Circuit for Waste Concrete Recycling. Proceedings of the 3rd WSEAS Int. Conf. on Waste management. SOUTH KOREA 2013.

ISMAIL, S.; RAMLI, M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications. Construction and Building Materials. 464–476. 2013.

JHON, E.; GETTU. R. Effect of Temperature on Flow Properties of Superplasticized Cement Paste. ACI Materials journal. February 2014.

JUAN, M. S.; GUTIÉRREZ. P. A. – Study on the influency of attached mortar contente on the properties of recycled concrete aggregate. Constrution and Building Materials. 2009.

KATZ, A. Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete. Cement and concrete research. 2003.

KATZ, A. Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. Journal of Materials in Civil Engineering. v. 16, n. 6, p. 597-603, Nov-Dec, 2004.

KLAVER, J.; HEMES; S.; HOUBEN, M.; DESBOIS, G.; RAD, Z.; URAI, J. L. The connectivity of pore space in mudstones: insights from high-pressure Wood's metal injection, BIB-SEM imaging, and mercury intrusion porosimetry. Geofluids. 2015.

KLEIN, N. S.; AGUADO, A.; TORALLES, B. M; REAL, L. V. Prediction of the water absorption by aggregates over time: Modelling through the use of value function and experimental validation. Construction and Building Materials. 2014.

KRUMBEIN, W. C.; Measurement and geological significance of shape and roundness of sedimentary particles. Jour. Sedim. Petrol. v. 11, n. 2, p. 64-72, 1941.

KUMAR, R.; BAHATTACHARJEE, B. Study on some factors afficting the results in the use of MIP method in concrete research. Cement and Concrete Research. 2003.

LARSON, R.; FARBER, B. Estatística aplicada. Pearson Education do Brasil. SP. 2015;

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição.** 2001. 270 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia. Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2001.

LISBOA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** 2004. p1- 115. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Alagoas. 2004.

- MARSH, H. N.; Trans AIME. Properties and Treatment of Rotary Mud vol 92 pp 234. 1931.
- MENDES, E. L. S. **Caracterização e composição de agregados reciclados para a obtenção de concreto autoadensável leve com fins estruturais**. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Alagoas. 2016.120p.
- MENDES, M.; BAUER, E.; SILVA, F. Avaliação dos parâmetros de autoadensabilidade e de reologia do concreto autoadensável. Revista Matéria, V. 22n.4, 2017;
- METHA, P. K.; MONTEIRO. P. J. M. Concreto: Microestrutura. propriedades e materiais. 3ª ed. São Paulo: Ibracon. 2008.
- MODANI P. O.; MOHITKAR, V.; Self-compacting concrete with recycled aggregate: solution for sustainable development. International journal of civil and structural engineering. v. 4, n. 3, 2014.
- MONTEIRO, R.; GOMES, P. C. C.; MELO, K. A.; Composições de agregados para obtenção de concreto autoadensável – IV congress Ibero Americano sobre Betão Auto – compactável – BAC 2015, 2015, 205 – 214;
- MONTGOMERY D. C.; RUNGER C. G.; Applied Statistics and Probability for Engineers, 5ª edition; John Wiley & Sons, EUA. Inc. 2011.
- NAWA, T. Recycling of Concrete. 2010. Disponível em:
>http://www.eng.hokudai.ac.jp/COEarea/workshop/pdf/05feb4_nawa.pdf>.
- NEVILLE, A. M. Propriedades do concreto. 2.ed. São Paulo: PINI. 738p. 1997.
- NIXON, P. J. Recycled concrete as an aggregate for concrete – A review. 37 - DRC COMMITTEE Matériaux et Construtions. v. 28, n. 96, p. 130 -140, 1976.
- OKAMURA, H. Self-Compacting High-Performance Concrete. Concrete International. v. 19. n. 7. p. 50-54, 1997.
- PANDA, K. C. ; BAL, P. K. Properties of self compacting concrete using recycled coarse aggregate. Procedia Engineering. 2012.
- PAVLU, T. The utilization of recycled materials for concrete and cement production - review. IOP Conf. Ser. Eng. 2018.
- PAWLUCZUK, E.; KALINOWSKA-WICHROWSKA, K.; BOLTRYK, M.; JIMÉNEZ, J. R.; FERNÁNDEZ, J. M. The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. Materials. 2019.
- PEREIRA, P. EVANGELISTA. L. DE BRITO. J. “The effect of superplasticisers on the workability and compressive strength of concrete made with fine recycled concrete aggregates”. Construction and Building Materials. v. 28, n. 1, p. 722-729, 2012.
- POPOVICS, S. analysis of the concrete strength versus water-cement ratio relationship. ACI Materials Journal. v. 87, n. 5, p. 517-529, 1990.

POON, C. S.; KOU, S. C.; LAM, L. Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. *Materials and Structures*. v. 40, n. 9, p. 981-988, Nov, 2007.

QUATTRONE, M.; ANGULO, S. C.; JOHN, V. M. Energy and CO₂ from high performance recycled aggregate production. *Resources conservation and recycling*; v.90, p.21 – 33, Elsevier. 2014.

QUIROGA, P. N; FOWLER, D. W. **The effects of aggregate characteristics on the performance of Portland cement concrete.** Technical Report. ICAR 104-1F. University of Texas at Austin. 2004.

RAJAMANI, R. K.; HERBST, I. A. Optimal control of a ball mill grinding circuit – I. Grinding circuit modeling and dynamic simulation. *Chemical engineering Science*, vol, 46, pp.861 – 870, 1991.

RAVINDRARAJAH, R. S.; TAM, C. T. Properties of concrete made with crushed concrete as coarse aggregate. *Magazine of Concrete Research*. 2015.

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes.** Doctoral Thesis. University Polit cnica da Cataiunia. Barcelona. Spain. 2000.

SALGADO, V, G, **Proposta de indicadores de ecoeficiência para o transporte de g s natural**, Disserta o de mestrado., UFRJ, 2004.

SEARA-PAZ, S.; GONZÁLEZ-FONTEBOA, B.; MARTÍNEZ-ABELLA, F.; EIRAS-LÓPEZ, J. Flexural performance of reinforced concrete beams made with recycled concrete coarse aggregate. *Engineering Structures*. 2018

ROSENKRANZ, S.; BREITUNG-FAES, S.; KWADE, A. Experimental investigations and modelling of the ball motion in planetary ball mills. *Powder Technology*. 2011.

SHIA, C., LI, Y.; ZHANG, J., LI, W.; CHONG, L.; XIE, Z. Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production*. 2015.

SHILSTONE, J. M. SR. "Concrete Mixture Optimization." *Concrete International: Design and Construction*. v. 12, n. 6. June, p. 33-39, 1990.

SHIMA, H.; TATEYASHIKI, H.; MATSUHASHI, R.; YOSHIDA, Y. An advanced concrete recycling technology and its applicability assessment through input-output analysis. *Journal of Advanced Concrete Technology*, v. 3, n. 1, p. 53-67, 2005.

SILVA, L.R. Avalia o do concreto produzido em alagoas a partir de estudo tecnológico dos dados provenientes de controle tecnológico. TCC, UFAL/Maceió. 2014.

SILVA, N. V.; GOMES, P. C. C.; ULSEN, C.; ANGULO, S. C. Granulometria e forma de agregados reciclados por análise dinâmica de imagens. ENARC. 2015.

SMITH, J. T. **Recycled Concrete Aggregate – A viable Aggregate Source For Concrete Paviments.** Tese de doctored. 224p. Canada. 2009.

SPAETH, V.; TEGGUER, A. D. Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. *International Journal of Sustainable Built Environment*. March, 2014

STWART, J. *Cálculo diferencial e integral*, vol. 2. 7ª edição. 2017

TABSH, S. W.; ABDELFATAH, A. S. Influence of recycled concrete aggregates on strength properties of concrete. *Construction and Building Materials*. 1163-1167. 2009.

TAM, V. W.; TAM, C.; LE, K. N. Removal of cement mortar remains from Recycled Aggregates Using pré – soaking. approach resource. *Conservation and recycling* 50. 82 e 101. 2007.

TAM, V. W. Y.; GAO, X. F.; TAM, C. M. Micro-Structural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach. *Cement and concrete Research*. v. 35, n. 6, p. 1195-1203. June, 2013.

TAM, V. W. Y., SOOMRO, M.; CATARINA, A.; EVANGELISTA, J. A review of recycled aggregate in concrete applications (2000–2017). *Construction and Building Materials*. 2018.

TAVARES, L. M.; CARVALHO, R. M. Modeling brakage rates of coarse particles in ball mills. *Minerals engineering*. 2009.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção demolição visando aplicações estruturais**. Dissertação Mestrado – UFAL. Centro de Tecnologia. Maceió. 2007.

TENÓRIO, J. J.L.; GOMES, P. C. C.; RODRIGUES, C. C.; ALENCAR, T. F.F. Concrete produced with recicled aggregate. *IBRACOM structure and materials jornal*. V. 5. 2012.

TENÓRIO, M. O. **Análise de propriedades de agregados reciclados carbonatados para aplicação em concreto**. Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2016.

TEGGUER, A. D. Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. *Construction and Building Materials*. 2011.

THOMAS, J.; THAICKAVIL, N. N.; WILSON, P. M. Stenght and durability of concrete containing recycled concrete aggregate. **Journal of building engineerde**. 2018.

TORGAL, F. P.; JALALI, S. - Dossier ecoeficiência: Ecoeficiência dos Materiais de Construção. Universidade do Minho. s/d. Disponível em http://www.apcmc.pt/newsletter/newsletter_n224/imagens/Dossier_Eco-eficiencia.pdf. consultado a 21/05/2017.

TSAKIROGLOU, C.; PAYTAKES, A. C. Characterization of the pore structure of reserv rocks with the serial sectioning analiysis, Mercury porosimetry and network simulation. *Avances in Water Resources*. V. 23, n 7, p. 773 – 789, 2000.

TSENG, E. **Reciclagem total de pavimentos de concreto como agregado para a construção de novos pavimentos de concreto: O caso Rodoanel Metropolitano Mario Covas.** Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. 2010.

TSUJINO, M; NOGUCHI, T; TAMURA, M; KANEMATSU, M.; MARUYAMA, I. Application of conventionally recycled coarse aggregates to concrete structure by surface modification treatment. *J Adv Concr Technol.* v, 5, p.13–25, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis.** 2007. 162 f. Tese (Doutorado e Engenharia). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

ULSEN, C; **Caracterização e separabilidade de agregados miúdos produzidos a partir de resíduos de construção e demolição.** Tese de doutorado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2011.

ULSEN, C. KAHN. H.; HAWLITSCHKE. G.; MASINI. E. A.; ANGULO. S. C. Separability studies of construction and demolition waste recycled sand. *Waste management; Elsevier.* 2013.

VAHDANI, M.; IMAN, M.; SAEED, Y. Effect of viscosity modifying admixtures on the rheological properties and stability of self consolidating cementitious materials. 35th Conference on our world in concrete & structures: 25–27 August. Singapore. 2010.

VENKATARAMAN, K.S. NARAYANAN, K. S. Energetics of collision between grinding media in ball mills and mechanochemical effects. *Powder Technology* 96.1997.

VERHULST, P.-F.: Deuxième mémoire sur la loi d'accroissement de la population. *Mém. Acad. R. Sci. Lett. B.-Arts Belg.* 20, 142–173 (1847).

WASHBURN, E. W. Note on a method of determining the distribution of pore sizes in porous material, *Poc. Nat. ACI.* USA 1921.

WEBB, P. A.; ORR, C.; Analytical Methods in fine particle technology; micrometrics instrument Corporation; Nor Cross, Gausa, 155-191, 1997.

World Building Council for Sustainable Development (2009). *Cement Industry Energy and CO₂ Performance: Getting the Numbers Right*, 43pp., <http://www.wbcds.org/DocRoot/02fH0Bj3tZNV1RvmG2mb/CSIGNRRReportfinal.pdf> (consultado em janeiro de 2019).

ZILL, DENNIS G. *Equações Diferenciais com Aplicações em Modelagem*, São Paulo, Pioneira Thomson Learning Ltda, 2003.

ZHU, Y. G.; KOU, S. C.; POON, C. S.; DAI, J. G.; LI, Q. Y. Influence of silane-based water repellent on the durability properties of recycled aggregate concrete. *Cement and concrete Research.* v. 35, n. 6, p. 1195-1203, 2010.

ANEXO A – TABELAS DOS ENSAIOS DO CAPÍTULO 3

Tabela A 1: Resultados da granulometria do ARC - britadores de Mandíbula e Martelos

Abertura (mm)	Retido acumulado (Mandíbula)			Retido acumulado (Martelos)		
	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Média (%)	Amostra 1 (%)	Amostra 2 (%)	Média (%)
19,00	0,05	0,00	0,02	0,00	0,00	0,00
12,50	5,27	4,41	4,84	4,20	3,80	4,00
9,50	21,47	23,17	22,32	11,50	9,50	10,50
6,30	48,27	50,58	49,42	22,10	20,80	21,45
4,75	59,59	57,55	58,57	28,60	26,40	27,50
2,36	74,72	73,952	74,33	52,10	50,60	51,35
1,18	88,32	88,248	88,28	71,30	69,45	70,375
0,6	93,82	94,332	94,07	87,40	83,40	85,40
0,30	97,63	97,068	97,35	96,50	98,30	97,40
0,15	99,17	98,676	98,92	98,10	97,10	97,60
fundo	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 2: Resultados dos ensaios de granulometria do AGRC

Abertura (mm)	AGRC					
	Amostra 1		Amostra 2		Média	
	Massa retida (g)	Retido (%)	Massa retida (g)	Retido (%)	Retido (%)	Retido acumulado (%)
12,50	150,5	3,06	222,5	4,49	3,78	3,78
9,50	1220	24,80	1176	23,76	24,28	28,05
6,30	2100,5	42,69	2225,5	44,96	43,83	71,88
4,75	1150,5	23,38	964,5	19,48	21,43	93,31
2,36	143,5	2,92	186,5	3,77	3,34	96,66
Fundo	155	3,15	175	3,54	3,34	100,00
Total	4920	100	4950	100,00	100,00	

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 3: Ensaio de granulometria do AGN 12,5 mm

Abertura da peneira (mm)	Amostra 1		Amostra 2		Média	
	Massa retida (g)	Retido (%)	Massa retida (g)	Retido (%)	Retido (%)	Retido Acumulado (%)
12,5	140,0	3,00	264,0	5,00	4,16	4,16
9,5	565,0	12,00	646,0	13,00	12,45	16,61
6,3	1891,0	39,00	1950,0	40,00	39,48	56,09
4,75	1097,0	22,00	1093,0	23,00	22,50	78,59
2,36	965,0	20,00	679,0	14,00	16,89	95,47
Fundo	223,0	500	217,0	4,00	4,53	100,00
Total	4882,0	100,00	48490	100,00	100,00	

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 4: Ensaio de granulometria do AMN

Abertura da peneira (mm)	Amostra 1 Retida (%)	Amostra 2 Retida (%)	Média Retida (%)	Acumulada (%)
9,5	0	0	0	0
6,3	0	0	0	0
4,8	0,8	1,0	0,9	0,9
2,4	2,3	1,9	2,1	3,0
1,2	6,8	6,7	6,8	9,8
0,6	26,9	26,0	26,5	36,3
0,3	52,8	53,0	52,9	89,2
0,15	8,8	9,4	9,1	98,3
Fundo	1,8	1,9	1,7	100,0
Total			100,0	

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 5: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água das amostras de AGRC

tempo		1	2	3	Média	Des. Padrão	Cv
(min)	t(h)	$M_{(sub)}$ (g)	$M_{(sub)}$ (g)	$M_{(sub)}$ (g)	$M_{(sub)}$ (g)	(g)	(%)
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,33	0,006	275,3	277,6	273,3	275,40	2,15	0,78
0,83	0,014	282,10	281,1	279,2	280,80	1,47	0,52
1,83	0,031	286,51	283,47	286,66	285,55	1,80	0,63
3,83	0,064	287,30	293,3	291,3	290,63	3,06	1,05
6,83	0,114	296,4	296,8	294,2	295,80	1,40	0,47
10,83	0,181	299,85	295,84	296,4	297,36	2,17	0,73
15,83	0,264	299,5	301,5	293,5	298,17	4,16	1,40
21,83	0,364	295,10	298,1	301,8	298,33	3,36	1,12
31,83	0,531	300,70	296,9	298,7	298,77	1,90	0,64
61,83	1,031	299,80	300,2	298,1	299,37	1,12	0,37
121,83	2,031	297,80	298,7	302,89	299,80	2,72	0,91
241,83	4,031	297,90	301,9	299,8	299,87	2,00	0,67
481,83	8,031	299,50	301,5	299,2	300,07	1,25	0,42
1.469,83	24,497	298,40	302,45	299,5	300,12	2,09	0,70
1.529,83	25,497	300,50	299,5	300,3	300,10	0,53	0,18

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 6: Resultados dos percentuais de absorção das amostras 1, 2 e 3.

Tempo	Abs.1 (acu)	Abs.1 total	Abs.2 (acu)	Abs.2 total	Abs.3 (acu)	Abs.3 total	Abs. (acu) (média)	Abs. total (m)
(h)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	%	%
0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,006	1,36	23,94	0,70	13,51	1,18	19,22	1,08	18,89
0,014	2,24	39,47	1,17	22,66	2,67	43,52	2,03	35,22
0,031	2,40	42,25	3,14	60,62	3,60	58,63	3,05	53,83
0,064	4,22	74,30	3,84	74,13	4,18	68,08	4,08	72,17
0,114	4,91	86,44	3,65	70,42	4,62	75,24	4,39	77,37
0,181	4,84	85,21	4,78	92,28	4,04	65,80	4,55	81,10
0,264	3,96	69,72	4,10	79,15	5,70	92,83	4,59	80,57
0,364	5,08	89,44	3,86	74,52	5,08	82,74	4,67	82,23
0,531	4,90	86,27	4,52	87,26	4,96	80,78	4,79	84,77
1,031	4,50	79,23	4,22	81,47	5,92	96,38	4,88	85,69
2,031	4,52	79,58	4,86	93,82	5,30	86,32	4,89	86,57
4,031	4,84	85,21	4,78	92,28	5,78	94,14	5,13	90,54
8,031	5,26	92,61	4,98	96,14	5,96	97,07	5,40	95,27
24,497	5,68	100,00	5,18	100,00	6,14	100,00	5,67	100,00

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 7: Percentuais de geração do AGRCT com o tratamento proposto

Tempo (min.)	Geração AGRCT (g) - Amostras					Média (g)	Dp. (g)	Cv (%)
	1	2	3	4	5			
0	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	5000,00	0,00	0,00
2	4257,50	4302,50	4272,50	4317,50	4248,00	4279,60	29,57	0,69
4	3847,50	3847,00	3841,50	3943,00	3893,00	3874,40	43,61	1,13
6	3525,00	3516,50	3520,00	3497,50	3713,50	3554,50	89,49	2,52
8	3157,50	3181,50	3071,50	3141,50	3051,50	3120,70	56,33	1,81
15	1545,00	1575,00	1725,00	1765,00	1620,00	1646,00	95,29	5,79
30	527,50	760,00	725,00	675,00	625,00	662,50	91,10	13,75
60	21,00	15,50	20,50	16,00	17,50	18,10	2,53	14,00
Tempo (min.)	Material passante na peneira 4,75 mm - (g)					Média (g)	Dp. (g)	Cv (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5			
0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
2	742,50	697,50	727,50	682,50	752,00	720,40	29,57	4,11
4	1152,50	1153,00	1158,50	1057,00	1107,00	1125,60	43,61	3,87
6	1475,00	1483,50	1480,00	1502,50	1286,50	1445,50	89,49	6,19
8	1842,50	1818,50	1928,50	1858,50	1948,50	1879,30	56,33	3,00
15	3455,00	3425,00	3275,00	3235,00	3380,00	3354,00	95,29	2,84
30	4472,50	4240,00	4275,00	4325,00	4375,00	4337,50	91,10	2,10
60	4979,00	4984,50	4979,50	4984,00	4982,50	4981,90	2,53	0,05
Tempo (min.)	Geração AGRCT (%)					Média (%)	Dp. (%)	Cv (%)
	Ensaio 1	Ensaio 2	Ensaio 3	Ensaio 4	Ensaio 5			
0	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	0,00	0,00
2	85,15	86,05	85,45	86,35	84,96	85,59	0,59	0,69
4	76,95	76,94	76,83	78,86	77,86	77,49	0,87	1,13
6	70,50	70,33	70,40	69,95	74,27	71,09	1,79	2,52
8	63,15	63,63	61,43	62,83	61,03	62,41	1,13	1,81
15	30,90	31,50	34,50	35,30	32,40	32,92	1,91	5,79
30	10,55	15,20	14,50	13,50	12,50	13,25	1,82	13,75
60	0,42	0,31	0,41	0,32	0,35	0,36	0,05	14,00

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 8: Comparação da geração do AGRCT experimental e estimado

Tempo (minutos)	AGRCT experimental. (g)	AGRCT calculado (g)	Diferença (%)
0	5000	5000,00	0,00
2	4279,6	4416,90	-0,03
4	3874,4	3901,80	-0,01
6	3554,5	3446,77	0,03
8	3120,7	3044,81	0,02
15	1646	1972,77	-0,20
30	662,5	778,36	-0,17
60	18,1	121,17	-5,69

Fonte: Autor (2020)

Tabela A 9: Custo de energia elétrica (0,87 R\$/kwh) – (1US\$=R\$4,09)

Agregados	Energia do tratamento (KWh)	KWh/kg	R\$/kg	U\$\$/kg	Custo total U\$\$/kg
AGRC	0,000	0,000	0,000	0,000	0,0013
AGRCT2	0,031	0,039	0,034	0,008	0,0100
AGRCT4	0,060	0,048	0,042	0,010	0,0120
AGRCT6	0,091	0,057	0,049	0,012	0,0130
AGRCT8	0,120	0,057	0,050	0,012	0,0140

Fonte: Autor (2020)

ANEXO B – TABELAS DOS ENSAIOS DO CAPÍTULO 4

Tabela B 1: Ensaio de granulometria dos AGRC2 - Resultados médios

Peneiras Ø (mm)	Retido acumulado (%)			
	AGRC2	AGRC4	AGRC6	AGRC8
19	0,00	0,00	0,00	0,00
12,5	4,70	2,60	0,00	0,00
9,5	18,75	11,00	4,80	3,50
6,3	73,70	62,90	55,60	46,60
4,75	98,15	98,60	96,50	97,50
fundo	100,00	100,00	100,00	100,00

Fonte: Autor (2020)

Tabela B 2: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática

T _{acumulado} (min)	AGRC																	
	M _(sub) 1 (g)	Abs. 1 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 2 (g)	Abs. 2 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 3 (g)	Abs. 3 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 4 (g)	Abs. 4 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 5 (g)	Abs. 5 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) m (g)	Abs m (%)	Abs. (acu) m (%)
0,15	1076,5	0,00	0,00	1065,3	0,00	0,00	1085,2	0,00	0,00	1065,7	0,00	0,00	1091,2	0,00	0,00	1076,8	0,00	0,00
0,33	1109,3	1,64	1,64	1075,4	0,51	0,51	1090,5	0,26	0,26	1076,8	0,55	0,55	1095,4	0,21	0,21	1089,5	0,63	0,63
3,83	1156,0	2,34	3,98	1120,3	2,24	2,75	1146,7	2,81	3,08	1146,4	3,48	4,04	1139,2	2,19	2,40	1141,7	2,61	3,25
10,83	1196,4	2,02	5,99	1132,4	0,61	3,36	1175,4	1,44	4,51	1186,5	2,01	6,04	1170,5	1,57	3,97	1172,2	1,53	4,77
61,83	1210,7	0,72	6,71	1158,3	1,29	4,65	1180,3	0,24	4,76	1205,4	0,95	6,99	1181,4	0,55	4,51	1187,2	0,75	5,52
1640,00	1222,0	0,57	7,28	1162,4	0,21	4,86	1182,4	0,11	4,86	1214,0	0,43	7,42	1190,4	0,45	4,96	1194,2	0,35	5,87
AGRC2																		
Tempo (acumulado) (min)	M _(sub) 1 (g)	Abs. 1 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 2 (g)	Abs. 2 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 3 (g)	Abs. 3 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 4 (g)	Abs. 4 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 5 (g)	Abs. 5 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) m (g)	Abs m (%)	Abs. (acu) m (%)
0,15	1098,5	0,00	0,00	1085,3	0,00	0,00	1105,2	0,00	0,00	1110,7	0,00	0,00	1115,2	0,00	0,00	1103,0	0,00	0,00
0,33	1109,3	0,54	0,54	1095,4	0,51	0,51	1110,5	0,26	0,26	1116,8	0,30	0,30	1125,4	0,51	0,51	1111,5	0,42	0,42
3,83	1156,0	2,34	2,88	1120,3	1,24	1,75	1146,7	1,81	2,08	1146,4	1,48	1,79	1139,2	0,69	1,20	1141,7	1,51	1,94
10,83	1196,4	2,02	4,89	1132,4	0,61	2,36	1175,4	1,44	3,51	1186,5	2,01	3,79	1170,5	1,57	2,77	1172,2	1,53	3,46
61,83	1210,7	0,72	5,61	1158,3	1,29	3,65	1180,3	0,24	3,76	1205,4	0,95	4,74	1181,4	0,55	3,31	1187,2	0,75	4,21
1640,00	1222,0	0,57	6,18	1194,0	1,79	5,44	1197,2	0,85	4,60	1214,0	0,43	5,17	1218,0	1,83	5,14	1209,0	1,09	5,30
AGRC4																		
Tempo (acumulado) (min)	M _(sub) 1 (g)	Abs. 1 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 2 (g)	Abs. 2 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 3 (g)	Abs. 3 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 4 (g)	Abs. 4 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) 5 (g)	Abs. 5 (%)	Abs. acu (%)	M _(sub) m (g)	Abs m (%)	Abs. (acu) m (%)
0,15	1111,5	0,00	0,00	1119,3	0,00	0,00	1155,2	0,00	0,00	1132,7	0,00	0,00	1137,2	0,00	0,00	1131,2	0,00	0,00
0,33	1120,3	0,44	0,44	1125,4	0,31	0,31	1158,5	0,16	0,16	1140,8	0,40	0,40	1142,4	0,26	0,26	1137,5	0,31	0,31
3,83	1150,0	1,49	1,93	1128,3	0,14	0,45	1166,7	0,41	0,58	1146,4	0,28	0,69	1149,2	0,34	0,60	1148,1	0,53	0,85
10,83	1190,4	2,02	3,94	1132,4	0,21	0,66	1175,4	0,44	1,01	1186,5	2,01	2,69	1170,5	1,07	1,67	1171,0	1,15	1,99
61,83	1200,7	0,52	4,46	1158,3	1,29	1,95	1180,3	0,24	1,26	1205,4	0,95	3,64	1181,4	0,55	2,21	1185,2	0,71	2,70
1640,00	1209,6	0,45	4,91	1237,6	3,97	5,92	1200,8	1,03	2,28	1237,6	1,61	5,24	1233,6	2,61	4,82	1223,8	1,93	4,63

AGRC6																		
Tempo (acumulado)	M _(sub) 1	Abs. 1	Abs. acu	M _(sub) 2	Abs. 2	Abs. acu	M _(sub) 3	Abs. 3	Abs. acu	M _(sub) 4	Abs. 4	Abs. acu	M _(sub) 5	Abs. 5	Abs. acu	M _(sub) m	Abs m	Abs. (acu) m
(min)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)
0,15	1151,5	0,00	0,00	1179,3	0,00	0,00	1165,2	0,00	0,00	1132,7	0,00	0,00	1157,2	0,00	0,00	1157,2	0,00	0,00
0,33	1160,3	0,44	0,44	1185,4	0,31	0,31	1168,5	0,16	0,16	1140,8	0,40	0,40	1162,4	0,26	0,26	1163,5	0,31	0,31
3,83	1175,0	0,74	1,18	1188,3	0,14	0,45	1176,7	0,41	0,58	1146,4	0,28	0,69	1169,2	0,34	0,60	1171,1	0,38	0,70
10,83	1190,4	0,77	1,94	1201,4	0,66	1,11	1185,4	0,44	1,01	1186,5	2,01	2,69	1175,5	0,31	0,91	1187,8	0,84	1,53
61,83	1200,7	0,52	2,46	1218,3	0,84	1,95	1190,3	0,24	1,26	1205,4	0,95	3,64	1181,4	0,30	1,21	1199,2	0,57	2,10
1640,00	1240,8	2,01	4,47	1261,2	2,15	4,10	1228,8	1,93	3,18	1224,8	0,97	4,61	1241,2	2,99	4,20	1239,4	2,01	4,11
AGRC8																		
Tempo (acumulado)	M _(sub) 1	Abs. 1	Abs. acu	M _(sub) 2	Abs. 2	Abs. acu	M _(sub) 3	Abs. 3	Abs. acu	M _(sub) 4	Abs. 4	Abs. acu	M _(sub) 5	Abs. 5	Abs. acu	M _(sub) m	Abs m	Abs. (acu) m
(min)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)	(g)	(%)	(%)
0,15	1181,5	0,00	0,00	1189,3	0,00	0,00	1175,2	0,00	0,00	1152,7	0,00	0,00	1157,2	0,00	0,00	1171,2	0,00	0,00
0,33	1190,3	0,44	0,44	1195,4	0,31	0,31	1179,5	0,21	0,21	1160,8	0,40	0,40	1162,4	0,26	0,26	1177,7	0,32	0,32
3,83	1195,0	0,24	0,68	1199,3	0,19	0,50	1186,7	0,36	0,58	1186,4	1,28	1,69	1169,2	0,34	0,60	1187,3	0,48	0,81
10,83	1198,4	0,17	0,84	1201,4	0,11	0,61	1185,4	-0,06	0,51	1192,5	0,30	1,99	1175,5	0,31	0,91	1190,6	0,17	0,97
61,83	1210,7	0,62	1,46	1218,3	0,84	1,45	1190,3	0,24	0,75	1205,4	0,65	2,64	1181,4	0,30	1,21	1201,2	0,53	1,50
1640,00	1240,8	1,51	2,97	1260,8	2,13	3,58	1216,4	1,31	2,06	1280,8	3,77	6,41	1196,8	0,77	1,98	1239,1	1,90	3,40

Fonte: Autor (2020)

Tabela B 3: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática - AGRC

t	In(t)	M _(sub)	M _{água(abs)}	M _{água(abs)acu.}	A _(seca)	A _(seca. acu.)	A _(t)			Klein <i>et al</i>	Klein <i>et al</i>	Proposto	Proposto
(s)	(s)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	Log(t) - s	In(t)	A (%) -Klein	A _t (%)	A (%) -por.	A _t (%)
1	0,00	271,75	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
20	3,00	275,50	3,75	3,75	0,75	0,75	13,22	1,3	3	1,14	20,07	0,45	7,83
50	3,91	280,79	5,29	9,04	1,06	1,81	31,88	1,7	3,91	1,76	30,99	1,54	26,93
110	4,70	285,55	4,76	13,8	0,95	2,76	48,66	2,04	4,7	2,47	43,58	2,88	50,36
230	5,44	290,65	5,10	18,9	1,02	3,78	66,64	2,36	5,44	3,27	57,62	3,98	69,5
410	6,02	295,78	5,13	24,03	1,03	4,81	84,73	2,61	6,02	3,93	69,27	4,58	80,06
650	6,48	297,35	1,57	25,6	0,31	5,12	90,27	2,81	6,48	4,43	78,14	4,91	85,93
950	6,86	298,18	0,83	26,43	0,17	5,29	93,19	2,98	6,86	4,8	84,64	5,12	89,45
1.310,00	7,18	298,33	0,15	26,58	0,03	5,32	93,72	3,12	7,18	5,06	89,3	5,25	91,73
1.910,00	7,55	298,78	0,45	27,03	0,09	5,41	95,31	3,28	7,55	5,31	93,61	5,36	93,77
3.710,00	8,22	299,39	0,61	27,64	0,12	5,53	97,46	3,57	8,22	5,56	98,1	5,5	96,22
7.310,00	8,90	299,79	0,40	28,04	0,08	5,61	98,87	3,86	8,9	5,65	99,68	5,59	97,76
14.510,00	9,58	299,89	0,10	28,14	0,02	5,63	99,22	4,16	9,58	5,67	99,98	5,65	98,72
28.910,00	10,27	300,05	0,16	28,3	0,03	5,66	99,79	4,46	10,27	5,67	100	5,68	99,34
88.190,00	11,39	300,11	0,06	28,36	0,01	5,67	100	4,95	11,39	5,67	100	5,72	99,92
91.790,00	11,43	300,11	0	28,36	0	5,67	100	4,96	11,43	5,67	100	5,72	99,94
			28,36		5,67								

Fonte: Autor (2020)

Tabela B 4: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC2

t (min)	t (s)	In (t) (s)	M _(sub) (g)	M _{água(abs)} (g)	M _{água(abs)acu.} (g)	A _(seca) (%)	A _(seca. acu.) (%)	A _(t) (%)	Ln(t) - s	Klein <i>et al</i>	proposto	Klein et al A _t (%)	Proposto A _t (%)
0	1	0,00	270,85	0	0	0	0,00	0	0	0	0	0,00	0,00
0,33	20	3,00	273,65	2,8	2,8	0,56	0,56	9,63	3	1,13	0,58	19,42	9,95
0,83	50	3,91	279,79	6,14	8,94	1,23	1,79	30,74	3,91	1,68	1,67	28,87	28,64
1,83	110	4,70	284,55	4,76	13,7	0,95	2,74	47,11	4,7	2,31	2,89	39,69	49,57
3,83	230	5,44	290,65	6,1	19,8	1,22	3,96	68,09	5,44	3,01	3,89	51,72	66,72
6,83	410	6,02	292,78	2,13	21,93	0,43	4,39	75,41	6,02	3,62	4,48	62,20	76,84
10,83	650	6,48	295,35	2,57	24,5	0,51	4,9	84,25	6,48	4,11	4,83	70,62	82,85
15,83	950	6,86	296,18	0,83	25,33	0,17	5,07	87,1	6,86	4,5	5,06	77,32	86,79
21,83	1.310,00	7,18	297,33	1,15	26,48	0,23	5,3	91,06	7,18	4,8	5,21	82,47	89,37
31,83	1.910,00	7,55	297,78	0,45	26,93	0,09	5,39	92,61	7,55	5,11	5,35	87,80	91,77
61,83	3.710,00	8,22	298,09	0,31	27,24	0,06	5,45	93,67	8,22	5,51	5,52	94,67	94,68
121,83	7.310,00	8,90	298,89	0,8	28,04	0,16	5,61	96,42	8,9	5,72	5,64	98,28	96,74
241,83	14.510,00	9,58	299,49	0,6	28,64	0,12	5,73	98,49	9,58	5,8	5,72	99,66	98,11
481,83	28.910,00	10,27	299,93	0,44	29,08	0,09	5,82	100	10,27	5,82	5,78	100,00	99,14
1.469,83	88.190,00	11,39	299,93	0	29,08	0	5,82	100	11,39	5,82	5,83	100,00	100,00
1.529,83	91.790,00	11,43	299,93	0	29,08	0	5,82	100	11,43	5,82	5,83	100,00	100,00

Fonte: Autor (2020)

Tabela B 5: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC4

t	t	In(t)	M _(sub)	M _{água(abs)}	M _{água(abs)acu.}	A _(seca)	A _(seca. acu.)	A _(t)				Klein et al	Proposto
(min)	(s)	(s)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	In(t) - (s)	Klein <i>et al</i>	proposto	A _t (%)	A _t (%)
0	1	0,00	272,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
0,33	19,8	2,99	273,5	1,45	1,45	0,29	0,29	5,21	2,99	1,22	0,44	21,90	7,84
0,83	49,8	3,91	280,79	7,29	8,74	1,46	1,75	31,38	3,91	1,88	1,53	33,75	27,27
1,83	109,8	4,70	285,55	4,76	13,5	0,95	2,7	48,47	4,7	2,62	2,86	47,04	50,98
3,83	229,8	5,44	290,65	5,1	18,6	1,02	3,72	66,79	5,44	3,42	3,93	61,40	70,05
6,83	409,8	6,02	295,78	5,13	23,73	1,03	4,75	85,21	6,02	4,07	4,52	73,07	80,57
10,83	649,8	6,48	296,35	0,57	24,3	0,11	4,86	87,25	6,48	4,54	4,84	81,51	86,27
15,83	949,8	6,86	297,18	0,83	25,13	0,17	5,03	90,23	6,86	4,87	5,03	87,43	89,66
21,83	1.309,80	7,18	297,83	0,65	25,78	0,13	5,16	92,57	7,18	5,11	5,16	91,74	91,98
31,83	1.909,80	7,55	298,78	0,95	26,73	0,19	5,35	95,98	7,55	5,31	5,27	95,33	93,94
61,83	3.709,80	8,22	299,39	0,61	27,34	0,12	5,47	98,17	8,22	5,5	5,41	98,74	96,43
121,83	7.309,80	8,90	299,45	0,06	27,4	0,01	5,48	98,38	8,9	5,56	5,49	99,82	97,86
241,83	14.509,80	9,58	299,65	0,2	27,6	0,04	5,52	99,1	9,58	5,57	5,54	100,00	98,75
481,83	28.909,80	10,27	299,85	0,2	27,8	0,04	5,56	99,82	10,27	5,57	5,58	100,00	99,47
1.469,83	88.189,80	11,39	299,9	0,05	27,85	0,01	5,57	100	11,39	5,57	5,61	100,00	100,00
1.529,83	91.789,80	11,43	299,9	0	27,85	0	5,57	100	11,43	5,57	5,61	100,00	100,00
				27,85									

Fonte: Autor (2020)

Tabela B 6: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC6

t (min)	t(s)	In(t) (s)	M _(sub) (g)	M _{água(abs)} (g)	M _{água(abs)acu.} (g)	A _(seca) (%)	A _(seca. acu.) (%)	A _(t) (%)	Ln(t) - s	Klein <i>et al</i>	proposto	Klein <i>et al</i> A _t (%)	Proposto A _t (%)
0	1	0,00	273,65	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00	0,00
0,33	19,8	2,99	280,5	6,85	6,85	1,37	1,37	27,08	2,99	1,11	1,64	21,94	31,97
0,83	49,8	3,91	288,79	8,29	15,14	1,66	3,03	59,84	3,91	1,71	2,62	33,79	51,07
1,83	109,8	4,70	290,55	1,76	16,9	0,35	3,38	66,8	4,7	2,38	3,33	47,04	64,91
3,83	229,8	5,44	291,65	1,1	18	0,22	3,6	71,15	5,44	3,11	3,83	61,46	74,66
6,83	409,8	6,02	292,78	1,13	19,13	0,23	3,83	75,61	6,02	3,7	4,13	73,12	80,51
10,83	649,8	6,48	295,35	2,57	21,7	0,51	4,34	85,77	6,48	4,13	4,32	81,62	84,21
15,83	949,8	6,86	295,58	0,23	21,93	0,05	4,39	86,68	6,86	4,43	4,45	87,55	86,74
21,83	1.309,80	7,18	296,33	0,75	22,68	0,15	4,54	89,64	7,18	4,64	4,55	91,70	88,69
31,83	1.909,80	7,55	297,78	1,45	24,13	0,29	4,83	95,38	7,55	4,82	4,65	95,26	90,64
61,83	3.709,80	8,22	297,89	0,11	24,24	0,02	4,85	95,81	8,22	5	4,79	98,81	93,37
121,83	7.309,80	8,90	298,79	0,9	25,14	0,18	5,03	99,37	8,9	5,05	4,89	99,80	95,32
241,83	14.509,80	9,58	298,89	0,1	25,24	0,02	5,05	99,76	9,58	5,06	4,98	100,00	97,08
481,83	28.909,80	10,27	298,9	0,01	25,25	0	5,05	99,8	10,27	5,06	5,05	100,00	98,44
1.469,83	88.189,80	11,39	298,95	0,05	25,3	0,01	5,06	100	11,39	5,06	5,13	100,00	100,00
1.529,83	91.789,80	11,43	298,95	0	25,3	0	5,06	100	11,43	5,06	5,13	100,00	100,00
				25,3		5,06							

Fonte: Autor (2020)

Tabela B 7: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGRC8

t (min)	t (s)	ln(t) (s)	M _(sub) (g)	M _{água(abs)} (g)	M _{água(abs)acu.} (g)	A _(seca) (%)	A _(seca. acu.) (%)	A _(t) (%)	Ln(t) - s	Modelo Klein <i>et al</i>	Modelo proposto	Klein <i>et al</i> A _t (%)	Proposto A _t (%)
0	1,00	0,00	274,25	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
0,33	19,8	2,99	278,5	4,25	4,25	0,85	0,85	21,46	2,99	0,87	1,24	21,97	30,85
0,83	49,8	3,91	285,49	6,99	11,24	1,4	2,25	56,77	3,91	1,34	1,98	33,84	49,25
1,83	109,8	4,70	287,55	2,06	13,3	0,41	2,66	67,17	4,7	1,86	2,52	46,97	62,69
3,83	229,8	5,44	288,65	1,1	14,4	0,22	2,88	72,73	5,44	2,43	2,92	61,36	72,64
6,83	409,8	6,02	288,78	0,13	14,53	0,03	2,91	73,38	6,02	2,89	3,16	72,98	78,61
10,83	649,8	6,48	289,15	0,37	14,9	0,07	2,98	75,25	6,48	3,23	3,32	81,57	82,59
15,83	949,8	6,86	290,18	1,03	15,93	0,21	3,19	80,45	6,86	3,47	3,43	87,63	85,32
21,83	1.309,80	7,18	291,33	1,15	17,08	0,23	3,42	86,26	7,18	3,63	3,51	91,67	87,31
31,83	1.909,80	7,55	292,78	1,45	18,53	0,29	3,71	93,59	7,55	3,77	3,6	95,20	89,55
61,83	3.709,80	8,22	293,39	0,61	19,14	0,12	3,83	96,67	8,22	3,91	3,72	98,74	92,54
121,83	7.309,80	8,90	293,79	0,4	19,54	0,08	3,91	98,69	8,9	3,95	3,81	99,75	94,78
241,83	14.509,80	9,58	293,89	0,1	19,64	0,02	3,93	99,19	9,58	3,96	3,89	100,00	96,77
481,83	28.909,80	10,27	294,05	0,16	19,8	0,03	3,96	100	10,27	3,96	3,95	100,00	98,26
1.469,83	88.189,80	11,39	294,05	0	19,8	0	3,96	100	11,39	3,96	4,02	100,00	100,00
1.529,83	91.789,80	11,43	294,05	0	19,8	0	3,96	100	11,43	3,96	4,02	100,00	100,00
				19,8		3,96							

Fonte: Autor (2020)

Tabela B 8: Resultados dos ensaios de cinética de absorção de água com o uso da balança hidrostática – AGN 12,5 mm

t	In(t)	M _(sub)	M _{água(abs)}	M _{água(abs)acu.}	A _(seca)	A _(seca. acu.)	(%) A _(t)	Klein <i>et al</i>	Modelo proposto	Klein <i>et al.</i> (2014)	Klein <i>et al</i>	Modelo prop.
(s)	(s)	(g)	(g)	(g)	(%)	(%)	(%)	(%)	(%)	A _t (%)	A _{total} (%)	A _{total} (%)
1	0	307,9	0	0	0	0	0	0	0,00	0	0	0
15	2,71	309,02	1,12	1,12	0,22	0,22	13,68	0,06	0,20	0,07	6,4	22,5
45	3,81	311,37	2,35	3,47	0,47	0,69	42,37	0,07	0,62	0,14	12,9	37,5
105	4,65	312,49	1,12	4,59	0,22	0,92	56,04	0,07	0,97	0,21	19,4	48,8
225	5,42	313,59	1,1	5,69	0,22	1,14	69,47	0,07	1,23	0,29	26	58,1
405	6	314,89	1,3	6,99	0,26	1,4	85,35	0,07	1,37	0,36	32,6	64,7
645	6,47	315,09	0,2	7,19	0,04	1,44	87,79	0,07	1,45	0,43	39,3	69,4
945	6,85	315,59	0,5	7,69	0,1	1,54	93,89	0,07	1,50	0,5	45,9	73,1
1305	7,17	315,99	0,4	8,09	0,08	1,62	98,78	0,07	1,54	0,58	52,6	76
1905	7,55	316,09	0,1	8,19	0,02	1,64	100	0,07	1,57	0,65	59,3	79,2
7305	8,9	316,09	0	8,19	0	1,64	100	0,07	1,65	0,8	72,8	88,9
14505	9,58	316,09	0	8,19	0	1,64	100	0,07	1,67	0,87	79,6	93
91785	11,43	316,09	0	8,19	0	1,64	100	0,07	1,70	1,1	100	100
			8,19		0							

Fonte: Autor (2020)

ANEXO C – TABELAS DOS ENSAIOS DO CAPÍTULO 5

Tabela C 1 Resultados das composições com AGN, AGRCe AGRCT

AGN						AGRC					AGRC2				
AMN	M. unit.	Dp	Cv	*M.E.A	I. vazios	M.unt	Dp	Cv	*M.E.A	I. vazios	M.unt	Dp	Cv	*M.E.A	I. vazios
(%)	kg/m ³	kg/m ³	(%)	(kg/m3)	(%)	kg/m ³	kg/m ³	(%)	(kg/m3)	(%)	kg/m ³	kg/m ³	(%)	(kg/m3)	(%)
0	1431,2	0,2	1,8	2.750,0	47,2	1.198,6	31,0	2,6	2.180,0	45,0	1.281,3	18,1	1,4	2.240,0	42,8
10	1512	0,1	0,4	2.740,0	44,1	1.342,7	7,1	0,5	2.227,0	39,7	1.363,1	9,0	0,7	2.281,0	40,2
20	1620	0,4	3,5	2.730,0	40	1.444,6	5,7	0,4	2.274,0	36,5	1.458,1	8,9	0,6	2.322,0	37,2
30	1712,6	0,4	2,9	2.720,0	36,4	1.525,7	8,3	0,5	2.321,0	34,3	1.531,3	12,3	0,8	2.363,0	35,2
40	1767,6	0,4	3,1	2.710,0	34,2	1.575,3	5,1	0,3	2.368,0	33,5	1.606,3	22,2	1,4	2.404,0	33,2
50	1785,1	0,2	1,3	2.700,0	33,4	1.609,2	5,7	0,4	2.415,0	33,4	1.618,8	7,3	0,5	2.445,0	33,8
60	1761	0,2	1,2	2.690,0	34,1	1.613,5	29,5	1,8	2.462,0	34,5	1.611,3	11,7	0,7	2.486,0	35,2
70	1741,4	0,2	1,3	2.680,0	34,7	1.598,1	11,1	0,7	2.509,0	36,3	1.600,0	13,3	0,8	2.527,0	36,7
80	1640,6	0,2	1,2	2.670,0	38,4	1.589,4	5,6	0,4	2.556,0	37,8	1.597,5	10,4	0,7	2.568,0	37,8
90	1575,2	0,2	1,9	2.660,0	40,7	1.541,1	9,5	0,6	2.603,0	40,8	1.546,8	9,9	0,6	2.609,0	40,7
100	1535,1	0,1	1	2.650,0	42,1	1.535,1	22,9	1,5	2.650,0	42,1	1.535,1	22,9	1,5	2.650,0	42,1
AGRC4						AGRC6					AGRC8				
AMN	M. unit.	Dp	Cv	*M.E.A	I. vazios	M.unt	Dp	Cv	*M.E.A	I. vazios	M.unt	Dp	Cv	*M.E.A	I. vazios
(%)	kg/m ³	kg/m ³	(%)	(kg/m3)	(%)	kg/m ³	kg/m ³	(%)	(kg/m3)	(%)	kg/m ³	kg/m ³	(%)	(kg/m3)	(%)
0	1.324,2	13,2	1,0	2.370,0	44,1	1.324,2	8,7	0,7	2.370,0	44,1	1.356,8	10,0	0,7	2.400,0	43,5
10	1.437,8	11,5	0,8	2.398,0	40,0	1.437,8	10,9	0,8	2.398,0	40,0	1.456,1	33,4	2,3	2.425,0	40,0
20	1.547,5	10,9	0,7	2.426,0	36,2	1.547,5	17,1	1,1	2.426,0	36,2	1.557,7	9,6	0,6	2.450,0	36,4
30	1.583,2	4,4	0,3	2.454,0	35,5	1.583,2	4,4	0,3	2.454,0	35,5	1.580,3	20,1	1,3	2.475,0	36,2
40	1.628,1	6,6	0,4	2.482,0	34,4	1.628,1	13,4	0,8	2.482,0	34,4	1.658,3	15,8	1,0	2.500,0	33,7
50	1.655,8	13,2	0,8	2.510,0	34,0	1.655,8	14,1	0,9	2.510,0	34,0	1.675,3	13,2	0,8	2.525,0	33,7
60	1.640,1	13,2	0,8	2.538,0	35,4	1.640,1	18,0	1,1	2.538,0	35,4	1.688,3	9,9	0,6	2.550,0	33,8
70	1.611,7	16,0	1,0	2.566,0	37,2	1.611,7	25,0	1,6	2.566,0	37,2	1.660,5	14,4	0,9	2.575,0	35,5
80	1.607,4	29,1	1,8	2.594,0	38,0	1.607,4	29,1	1,8	2.594,0	38,0	1.617,7	14,5	0,9	2.600,0	37,8
90	1.557,1	6,2	0,4	2.622,0	40,6	1.557,1	6,2	0,4	2.622,0	40,6	1.574,6	12,5	0,8	2.625,0	40,0
100	1.535,1	22,9	1,5	2.650,0	42,1	1.535,1	22,9	1,5	2.650,0	42,1	1.535,1	22,9	1,5	2.650,0	42,1

*MEA – Massa específica aparente

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 2: Resistências à compressão (f_c) aos 28 dias (MPa)

f_c - 1ª moldagem						
Amostras	CAR	CA0	CA2	CA4	CA6	CA8
1	24,01	27,25	31,67	30,7	32,67	32,89
2	24,23	27,1	31,48	30,37	31,25	30,15
3	23,57	24,71	28,71	30,37	33	33,55
4	26,86	27,96	32,48	30,26	33,99	34,54
5	25,66	26,1	30,32	31,19	31,8	32,24
6	24,97	26,86	31,21	31,8	33,44	31,58
f_{cm}	24,88	26,66	30,98	30,78	32,69	32,49
Dp (MPa)	1,22	1,13	1,31	0,6	1,02	1,54
Cv (%)	4,9	4,24	4,24	1,96	3,12	4,74
f_c - Réplica						
1	23,76	27,6	29,7	31,8	32,8	33,4
2	24,56	26,85	31,8	30,86	31,85	34,5
3	25,6	28,25	31,5	31,65	30,76	31,2
4	26,8	25,60	32,5	29,8	30,95	30,8
5	26,07	25,60	30,61	31,8	33,85	31,58
f_{cm}	25,36	26,78	31,22	31,16	32,03	32,3
Dp (MPa)	1,21	1,19	1,09	0,86	1,3	1,58
Cv (%)	4,76	4,43	3,48	2,78	4,06	4,9
f_{ck} (MPa)	23,16	24,88	29,17	29,77	30,51	29,96

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 3: Comparação entre os resultados dos fatores a/c efetivos dos CAA e a resistência à compressão

CAA	a/c (efet.)	f_{cm} (MPa)
CA0	0,42	26,66
CA2	0,43	30,98
CA2	0,44	30,78
CA6	0,44	32,69
CA8	0,45	32,49
CAR	0,50	24,88

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 4: Resultados dos módulos de elasticidade E_{ci} - 28 dias (GPa) – CAAs/a

E_{ci} - 1ª Moldagem						
Ensaio	CAR	CA0	CA2	CA4	CA6	CA8
1	21,93	28,88	26,59	28,70	28,08	30,44
2	24,16	28,04	29,37	29,39	28,61	27,84
3	23,79	27,02	28,64	27,46	29,25	28,50
$E_{ci(m)}$	23,29	27,98	28,20	28,52	28,65	28,93
Dp	1,20	0,93	1,44	0,98	0,59	1,35
C V	5,13	3,33	5,11	3,43	2,05	4,67
E_{ci} Réplica						
1	22,50	27,50	27,00	29,50	28,30	31,00
2	23,40	26,60	28,90	27,80	27,80	28,40
3	24,60	25,50	27,60	27,50	28,90	28,50
$E_{ci(m)}$	23,50	26,53	27,83	28,27	28,33	29,30
Dp	1,05	1,00	0,97	1,08	0,55	1,47
C V	4,48	3,78	3,49	3,82	1,94	5,03

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 5: Resultados dos ensaios à tração (f_{ct}) dos CAAs/a aos 28 dias (MPa)

f_{ct} (MPa)						
Amostras	CAR	CA0	CA2	CA4	CA6	CA8
1	4,80	4,26	3,68	3,84	3,00	4,20
2	4,90	4,50	3,35	3,32	3,30	3,85
3	4,78	4,17	3,28	3,50	3,18	3,78
f_{ctm}	4,83	4,31	3,44	3,55	3,16	3,94
Dp	0,06	0,17	0,21	0,26	0,15	0,23
C v (%)	1,33	3,96	6,22	7,43	4,78	5,71

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 6: Resultados dos ensaios de absorção de água CAAs/a

CAA	M_{sss}	M_s	M_{sub}	M_a	A (%)	ρ_a	ρ_{sss}	ρ_r	Iv (%)	Dp (Iv) (%)	Cv (Iv) (%)
	(g)					(g/cm ³)					
CA0	3664,6	3485,0	2030,4	179,6	5,15	2,13	2,24	2,40	11,25	1,1	9,70
CA2	3672,4	3515,0	2048,0	157,4	4,48	2,16	2,26	2,40	10,00	0,8	8,00
CA2	3553,0	3400,0	2009,2	153,0	4,50	2,20	2,30	2,44	9,84	1,2	12,19
CA6	3576,0	3430,0	2017,6	146,0	4,26	2,20	2,29	2,43	9,47	0,9	9,50
CA8	3580,7	3440,0	2028,3	140,7	4,09	2,22	2,31	2,44	9,02	0,6	6,65
CAR	3567,7	3410,0	2032,6	157,7	4,62	2,22	2,32	2,48	10,48	0,7	6,67

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 7: Resistência à compressão dos CAA c/ 80% da água de absorção

Ensaio	CA0	CA2	CA2	CA6	CA8	CAR
1	22,93	28,92	28,15	32,42	24,84	24,01
2	23,18	24,84	23,57	30,06	20,57	24,23
3	29,68	29,55	24,84	26,75	25,10	23,57
4	27,77	28,03	21,66	32,29	28,85	26,86
5	27,13	25,73	25,61	29,36	27,2	25,66
6	28,66	22,68	26,11	31,21	24,59	24,97
f_{cm}	26,56	26,62	24,99	30,35	25,19	24,88
Dp	2,85	2,66	2,23	2,14	2,8	1,22
Cv	10,72	9,99	8,91	7,04	11,12	4,9
f_{ck}	24,91	24,97	23,34	28,7	23,54	22,87

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 8: Resultado do fator a/c efetivo do CAA c/a e do CAAs/a

CAA	(c/abs) f_{cm} (MPa)	a/c (efet. c/a)	(s/abs) f_{cm} (MPa)	a/c (efet. s/a)
CA0	26,56	0,49	26,66	0,42
CA2	26,62	0,49	30,98	0,43
CA4	24,99	0,49	30,78	0,44
CA6	30,35	0,49	32,69	0,44
CA8	25,19	0,49	32,49	0,45
CAR	24,88	0,50	24,88	0,50

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 9: Resultados dos ensaios de absorção de água e índice de vazios dos CAAC/a

CAA	Msss	Ms	Msub	Ma	A	ρ_a	ρ_{sss}	ρ_r	Iv(m)	Dp (Iv)	Cv (Iv)
	(g)				(%)	g/cm ³			(%)	(%)	(%)
CA0	3760,6	3545	2020,4	275,6	6,08	2,04	2,16	2,38	12,39	1,2	9,7
CA2	3702,4	3495	2048	207,4	5,93	2,11	2,24	2,42	12,54	1,1	8,8
CA2	3650	3445	2049,2	205	5,95	2,15	2,28	2,47	12,81	0,9	7,0
CA6	3656	3460	2027,6	196	5,66	2,12	2,25	2,42	12,04	1,1	9,1
CA8	3650,7	3469	2036,3	181,7	5,24	2,15	2,26	2,42	11,25	0,9	8,0
CAR	3567,7	3410	2032,6	157,7	4,62	2,22	2,32	2,48	10,27	0,8	7,8

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 10: Resultados dos ensaios de resistência à compressão dos CC

Concretos	Ensaio f_{cm} (MPa)	Réplica f_{cm} (MPa)	f_{cm} (MPa)	Pasta (%)	AM (%)	AG (%)	fator a/c (eft.)
CC0	24,94	25,06	25,00	23	38	39	0,42
CC2	24,89	23,56	24,23	22	38	40	0,42
CC4	25,71	26,04	25,88	22	37	41	0,42
CC6	25,9	26,25	26,08	22	37	41	0,43
CC8	25,86	27,21	26,54	22	37	41	0,43
CCR	26,44	28,15	27,3	21	35	44	0,44

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 11: Módulo de elasticidade dos concretos convencionais (GPa)

Ensaio	E_{ci} (GPa)					
	CC0	CC2	CC4	CC6	CC8	CCR
1	24,47	25,07	24,27	25,94	24,57	23,82
2	23,25	22,73	25,68	24,07	25,22	23,60
3	22,78	24,17	24,12	23,85	25,52	24,50
Média	23,50	23,99	24,69	24,62	25,10	23,64
Dp	0,87	1,18	0,86	1,15	0,49	0,96
C. V(%)	3,71	4,92	3,49	4,66	1,95	4,07

Fonte: Autor (2020)

Tabela C 12: Resultados dos ensaios de tração dos concretos convencionais

Ensaio	CC0	CC2	CC4	CC6	CC8	CCR
1	2,91	2,56	2,58	2,87	2,75	3,01
2	2,44	2,48	2,57	3,17	3,33	2,74
3	2,69	2,39	2,52	2,93	2,99	2,48
f_{ctm}	2,68	2,48	2,55	2,99	3,03	2,74
Dp	0,24	0,088	0,03	0,16	0,29	0,26
C. V	8,92	3,54	1,32	5,34	9,52	9,57

Fonte: Autor (2020)

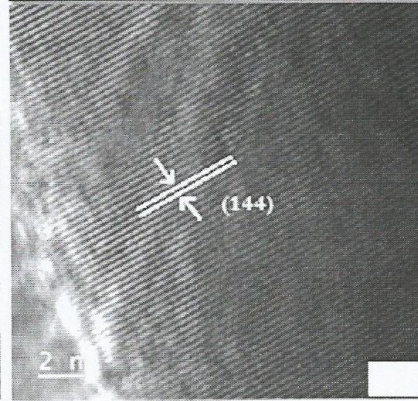
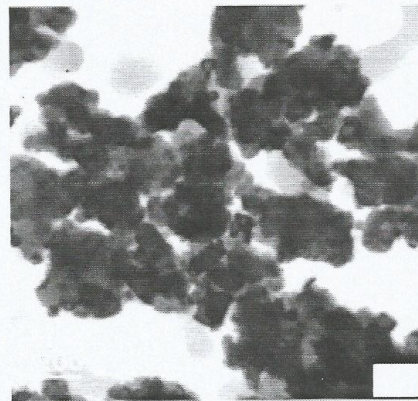
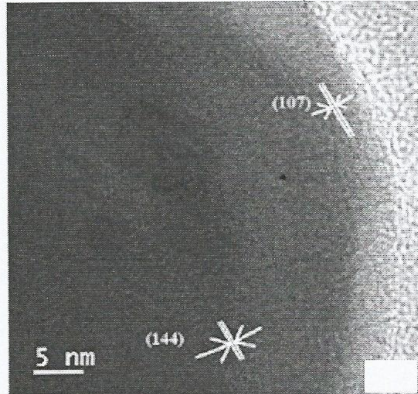
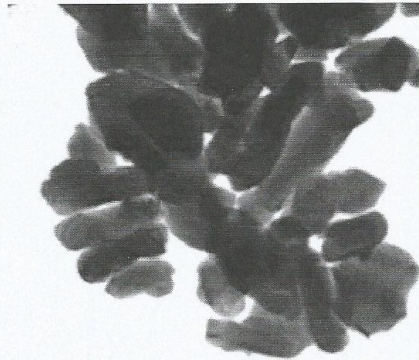
ANEXO D – ARTIGO PUBLICADO EM PERÓDICO

Cerâmica

ISSN-0366-6913

ÓRGÃO OFICIAL DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CERÂMICA - ANO LXV - VOL. 65, 374 - MAI/juN/juL 2019

A S S O C I A Ç Ã O
B R A S I L E I R A



D E C E R Â M I C A

Analytical method for determining the saturation point of superplasticizers in cement pastes using the Marsh cone

(Método analítico de determinação do ponto de saturação de superplastificantes em materiais cimentícios usando o cone de Marsh)

O. F. da Silva^{1*}, P. C. C. Gomes^{1,2}, K. A. M. Morais²

¹Federal University of Alagoas, PPG-Materiais, Maceió, AL, Brazil

²Federal University of Alagoas, CTEC/LEMA, Maceió, AL, Brazil

Abstract

The optimum dosage of superplasticizer (SP) additives is determined by the saturation point of SP (SPS), obtained on cement paste by the utilization of the Marsh cone. Obtaining the SPS is important because it defines the amount of SP that should be used in concrete dosages when it is necessary the reduction of water demand and the improvement of the workability. The SPS is determined by methods that use the angles defined by the slope of the flow curve, which are obtained through geometric and visual resources. However, depending on the curve shape, these methods can provide inaccurate results. For this reason, this study analyzed the utilization of the existent geometric methods and proposed a new analytic method of SPS determination. It is noteworthy that the proposed analytical method (PAM) was developed by a numerical implementation to obtain the representative function of paste flow. The SPS is determined from the solution of the phenomenon differential equation and can be used linked to a computational environment in concrete composition calculation. PAM was applied and evaluated in different flow curves obtained by several authors.

Keywords: superplasticizer, saturation point, Marsh cone, analytical method.

Resumo

A dosagem ótima dos aditivos superplastificantes (SP) é determinada pelo ponto de saturação do SP (PSP), obtido na pasta de cimento pela utilização do cone de Marsh. A obtenção do PSP é importante, pois define a quantidade de SP que deve ser utilizada em dosagens de concretos, quando são necessárias a redução da demanda de água e a melhoria da trabalhabilidade. O PSP é determinado por métodos que usam os ângulos definidos pela inclinação da curva de fluxo, que são obtidos através de recursos geométricos e visuais. No entanto, dependendo da forma da curva, esses métodos podem fornecer resultados imprecisos. Por este motivo, este estudo analisou a utilização dos métodos geométricos existentes e propôs um novo método analítico de determinação do PSP. Ressalta-se que o método analítico proposto (MAP) foi desenvolvido por implementação numérica para obter a função representativa do fluxo das pastas. O SPS é determinado a partir da solução da equação diferencial do fenômeno, e pode ser utilizado ligado ao ambiente computacional no cálculo da composição do concreto. O MAP foi aplicado e avaliado em diferentes curvas de fluxo obtidas por diversos autores.

Palavra-chave: superplastificante, ponto de saturação, cone de Marsh, método analítico.

INTRODUCTION

The use of superplasticizer (SP) additives is common in the concrete production, especially when the following are required: an increase of workability and resistance to compression, and a reduction of the water/cement (w/c) ratio [1-3]. It is verified that to obtain special concretes, such as high-performance concrete (HPC) and self-compacting

concrete (SCC), the utilization of SP is indispensable [1, 4, 5]. In the literature, it is observed that the SP utilization and research are not new and has been studied since the '80s [2, 3, 5, 6]. Aïtcin [6] asserts that when in contact with water, the cement particles have a strong tendency to flocculation. Consequently, part of the water is trapped among the grains of cement, reducing the water availability and the particle lubrication. Therefore, the mixture viscosity is increased, reducing the specific area of cement grains and diminishing the water available for hydration reactions [7].

The SP dosage depends on several factors: type of

*osvaldofer@gmail.com

© <https://orcid.org/0000-0001-7126-5311>

cement, shape and dimension of fines, w/c ratio, type of SP, compatibility between cement and SP, as well as the temperature and humidity of the materials and the environment [4-8]. In the SP literature, it can be seen that there is an optimum dosage of SP for each kind of composition, and for many times, there are differences from those ones purposed by the manufacturer [9, 10]. It is verified, that the determination of optimum dosage of SP is usually carried out in tests with cement pastes, considering that the main action is on the particles of cement and additions. This determination influences directly the fluidity and fresh concrete properties [4, 6]. Moreover, from these tests, information about the cement incompatibility, mineral additions, and other chemical additives, quality and efficiency of SP can be collected [9-12]. The test methods used for obtaining the SP dosages are those that are based on rheological properties by the rheometer [13, 14], from the flow curves using the Marsh cone [3, 4, 6, 7, 11, 12], and from spreading tests by mini-slump [4, 5, 15]. Due to the simplicity of apparatus and procedures, Marsh cone test of the pastes and mortar has become a widely used method. It is used to determine the flow curve for different points that represents the sample fluidity time versus the SP content, determined in percentage terms [16]. The Marsh cone used in tests has a relation of 2:1, between the height and the top opening diameter (Fig. 1).

Saturation point of superplasticizer (SPS): the SP dosages are calculated by the relationship between the amount of cement and the solid content of the superplasticizer, defined in percentage terms (% SP/c) [1, 4, 6]. The SPS is defined as the percentage of superplasticizer from which, even adding more SP, the improvement in paste flow characteristics is insignificant and may even be impaired [3-5, 8, 17]. The graphs representing the flow test of the pastes and mortar using the Marsh cone generally have well-defined behavior and approximate to a decreasing exponential curve, where the x-axis is the percentage of SP and the y-axis is the flow time (Fig. 2). The SPS is located at the point near the horizontal asymptote of the flow curve [8, 7, 10]. It is

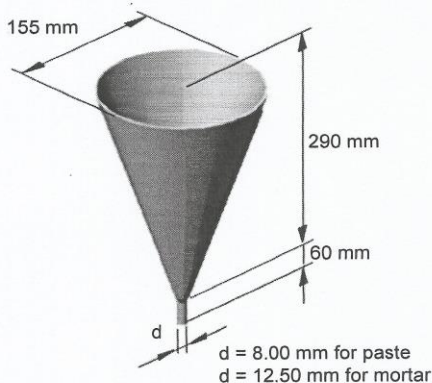


Figure 1: Details of Marsh cone. [Figura 1: Detalhes do cone de Marsh.]

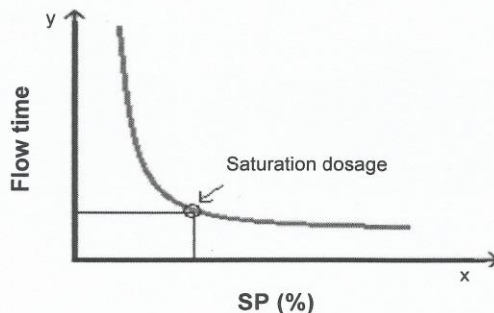


Figure 2: Location point of saturation of the superplasticizer (SPS). [Figura 2: Localização do ponto de saturação do superplastificante (PSP).]

verified that the SPS is a reference point that can be found in the interval of the change of direction of the flow curve, and it can be considered as any point within this region.

The concrete dosage is defined by fix amount of materials, and for this reason, the determination of a single reference point for the SPS is important. Therefore, to determine the SPS location in the curve, it is necessary an accurate methodology. For this reason, some methods were proposed and can be found in the literature: Aitcin [6], AFREM De Larrard [7], Gomes [10], and that suggested by ASTM C939/2010 [18] (Fig. 3). The method of Aitcin [6] consists of the repetition of the Marsh cone test in times of 5 to 30 min. The intersection point of the lines that represent the tests in these times determines the SPS (Fig. 3a). This method is characterized for analyzing the paste fluidity loss, which is important when a longer time of applications is required, mainly, on the compatibility analyses among the paste's constituent materials. It was observed that this method does not consider any mathematical model that defines the SPS objectively. The AFREM De Larrard method (1997) deals the phenomena of the cement material flow using the Marsh cone; the results are analyzed by a graphic that shows the SP/c ratio (%) - x, versus the flow time logarithm, logT - y (Eq. A). The SPS is defined as the abscissa point that is tangent of a right triangle of sides 2 and 5, for the flow curve (Fig. 3b).

$$\log T = f(\%SP/c) \tag{A}$$

The ASTM C939 method [18], similarly to the AFREM De Larrard method [7], recommends that SPS be the tangent point to the hypotenuse of a triangle rectangle with angles of 30° and 60° (Fig. 3c). It can be observed that the use of the method proposed by ASTM C939 [18] provides values lower than those proposed by De Larrard [7] for SPS. This is because the method proposed by ASTM [18] defines a higher angle of inclination with respect to the horizontal. The method of Gomes [10] defines to plot the flow curve in the graph for the logT - y, as a function of the SP/c (%) - x, and

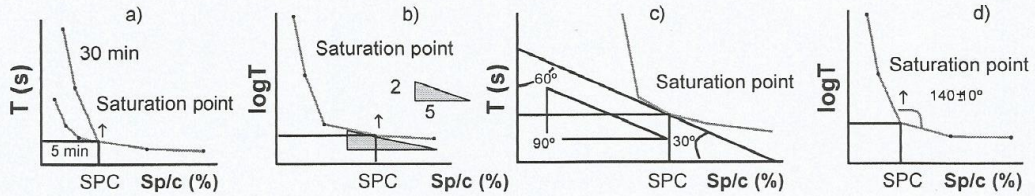


Figure 3: Determination of SPS by: a) Aitcin [6]; b) AFREN [7]; c) ASTM C939/2002 [18]; and d) Gomes [10].
 [Figura 3: Determinação do PSP por: a) Aitcin [6]; b) AFREN [7]; c) ASTM C939/2002 [18]; e d) Gomes [10].]

from the union of the points by line segments the SPS should be the first point that forms an angle $\alpha=140\pm 10^\circ$ (Fig. 3d). In this method, the lines converge to the point considered (SPS) creating an angle, which the tangent must be $-0.577 \geq \text{tg}\alpha \geq -1.192$. The angles that can be identified as SPS are shown in Fig. 4. The α angles obtained from the results of flow curves can be calculated by Eq. B. Moreover, in this equation, the θ angles are determined by Eq. C.

$$\alpha_n = (\theta_{n+1} - \theta_n) + 180^\circ \quad (B)$$

$$\theta_n = \arctg\left(\frac{y_n - y_{n+1}}{x_{n+1} - x_n}\right) \quad (C)$$

The SPS determination through the shown methods, in general, uses geometric and visual resources to define this reference point. In some cases, these geometric methods are not accurate and can identify more than one SPS inside the transition region of the flow curve; generally, the smallest value of dosage is chosen. It is noteworthy the flow curve shape may not be suitable to apply these geometric methods and is necessary to find another way to measure the SPS. Moreover, another disadvantage of applying these methods is related to the difficulty of implementation on the computational environment. In this sense, this study proposes an analytical method for determining a single

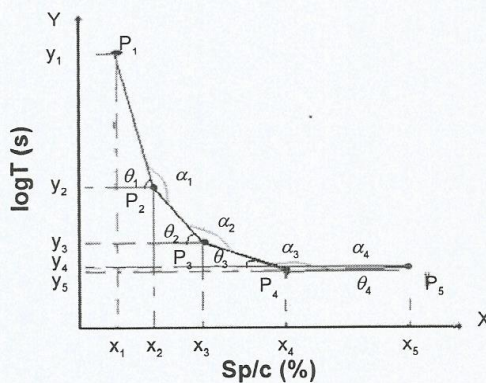


Figure 4: Determination of SPS using the method of Gomes [10]; adapted from [10].
 [Figura 4: Determinação do PSP usando o método de Gomes [10]; adaptado de [10].]

point of reference for the SPS, from the flow curve of cementitious materials obtained by the Marsh cone. This method uses the differential equation of the phenomenon and has the ease of computational implementation as an advantage.

PROPOSED ANALYTICAL METHOD

The proposed analytical method (PAM) was developed from the study of the flow curves, obtained from results of pastes using Marsh cone tests. This analysis allowed obtaining an analytical method for the determination of the SPS using basics concepts of infinitesimal calculus, and computational implementation by the utilization of software's based on the least squares method (LSM). This resource is widely used to solve engineering problems [19] and it was used in this work, allied with the commercial software's Origin Pro 8 and MAPLE. From the analysis of SP/c (%) versus logT for the flow curves of pastes using the Marsh cone, it was observed that the curves behavior can be described by a descendant exponential function, given by Eq. D. It is verified that the coefficients A_1 and y_0 are units of time, and t_1 is the percentage of SP solids divided by the cement mass (%SP/c). In this equation, A_1 , t_1 and y_0 are constants parameters for each test curve. Moreover, from the function of the phenomenon (Eq. D), it is possible to calculate its derivative given by Eq. E. The SPS is determined by solving the Eq. F, the derivate value equal to $\text{tg}150^\circ = -\text{tg}30^\circ = -0.57$, slope defined by the ASTM C939 [18] as shown in Fig. 5. Moreover, this reference point to obtain the SPS is identified by a unique form and it gives values that are within the values proposed by Gomes [10] and the ASTM C939 [18]. It is observed that the values provided by PAM are lower than those obtained for the AFREM De Larrard (1997) method, for the same material. It is verified that the PAM provides the possibility to identify points with angles of tangency lower than those proposed by the geometric methods. In this case, a reference point is the lower limit proposed by Gomes [10], $\text{tg}\alpha = \text{tg}140^\circ = -0.83$, which can be chosen. If used, it creates the possibility of obtaining lower values for the SPS. On the other hand, it is observed that using the value proposed by AFREM De Larrard [7], $\text{tg}\alpha = -0.40$, the obtained SPS is higher.

$$f(x) = A_1 \cdot e^{-\frac{x}{t_1}} + y_0 \quad (D)$$

$$\frac{dy}{dx} = -A \cdot \frac{e^{-\frac{x}{t_1}}}{t_1} \quad (E)$$

$$\frac{dy}{dx} = -A \cdot \left(\frac{e^{-\frac{x}{t_1}}}{t_1} \right) = -0.57 \quad (F)$$

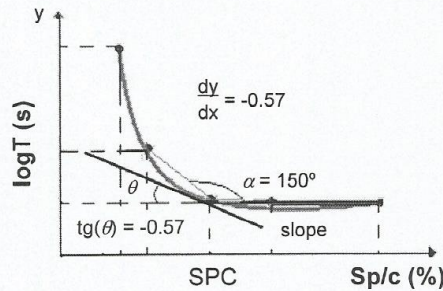


Figure 5: SPS of PAM according to the adjustment of the decreasing exponential curve.

[Figura 5: PSP do MAP de acordo com o ajuste da curva exponencial decrescente.]

MATERIALS AND METHODS

The materials with their characteristics and compositions, used in the preparation of the pastes used for PAM verification, are presented in Table I. The pastes produced with the presented materials are important for obtaining special concretes like the self-compacting concrete (SCC). In the SCC it is common to use filler to improve its viscosity. In this study, the residue of marble and granite processing (RMGP) was used with a maximum particle diameter of 0.15 mm as a filler.

Method of sample preparation: the pastes were produced

in a 5 L capacity mortar mixer, producing a constant volume of 1.20 L of paste, with the following procedure: the mixer and blade were wetted, then the cement and the mineral additions were mixed at slow speed for 30 s. It was placed 80% of the water and mixed at slow speed for 60 s. The mixer was cleaned for 30 s, afterward the SP and the rest of the water was mixed at slow speed for 30 s, then at rapid speed for 150 s.

Test method: the tests were carried out with the same paste volume of 1.00 L; the time of flowing through the Marsh cone of a constant volume of 500 mL was determined. The tests were performed with the temperature between 27 and 29 °C and relative humidity between 65% and 70%.

RESULTS AND DISCUSSION

Besides test data, other results from the literature were used in the PAM application. Table II presents the results obtained from one of the tests, for an initial and detailed demonstration of PAM. Using the data of Table II, it was possible to represent the phenomenon of flow curve, shown in Fig. 6. From the showed methods to obtain the SPS (Fig. 3), it was observed that the value found by AFREM DeLarrard [7] was between the SP dosages of 0.40% and 0.50%. On the other hand, from the Eqs. B and C using the Gomes method [10], it was possible to obtain the α angles of the flow curve and the θ inclinations of the lines with the corresponding horizontal axis (Table III). It was observed from the results of Table III that the angle which determined the SPS within the gap of $140^\circ \pm 10^\circ$ cannot be found. However, it was reasonable to accept that SPS can be considered in the range of 0.45% to 0.50%. According to the ASTM C939 [18], the SPS can be determined within the gap between 0.45% and 0.50%. Thus, it is verified that the existing geometric methods converge to a SPS value in the gap between 0.40% and 0.50%.

Applying the PAM using the data from Table II, the curve of Fig. 7 was obtained together with the function

Table I - Characteristics of materials and parameters considered.

[Tabela I - Características dos materiais e parâmetros considerados.]

Ratio w/c	RMGP (%)	Cement (CPII-F-32) ρ (g/cm ³)	RMGP ρ (g/cm ³)	Water ρ (g/cm ³)
0.50	0.50	3.15	2.65	1.00
Characteristics of SP				
Color	ρ (g/cm ³)	Solid fraction (%)	Chemical base	Viscosity η (cps)
Cloudy white	1.08	30.00	Carboxylate ether	<125
Quantity of materials used to obtain 1.5 L of paste				
SP/c (%)	SP (g)	Cement (kg)	RMGP (kg)	Water (kg)
0.20	10.14	1.52	0.76	0.75
0.40	20.29	1.52	0.76	0.74
0.60	30.43	1.52	0.76	0.73
0.80	40.58	1.52	0.76	0.72

Table II - Results of the tests in the Marsh cone applied to determine the flow curve.
 [Tabela II - Resultados dos testes no cone Marsh aplicados para determinar a curva de fluxo.]

SP/c (%)	Time (s)	LogT
0.20	118.00	2.07
0.40	16.00	1.20
0.60	14.00	1.15
0.80	13.95	1.14

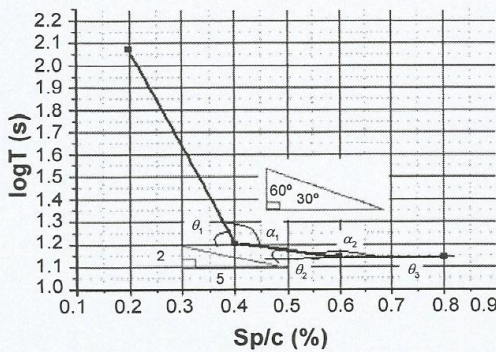


Figure 6: Flow curve to the SP using the results of Table II.
 [Figura 6: Curva de fluxo para o SP usando os resultados da Tabela II.]

Table III - Results of the Gomes method [10] application.
 [Tabela III - Resultados da aplicação do método de Gomes [10].]

SP/c (%)	LogT	tgθ	θ (degree)	α (degree)
0.20	2.071	-	-	-
0.40	1.204	-4.335	77.05	119.13
0.60	1.146	-0.290	16.18	164.68

parameters suggested to the problem modeling. According to the parameters A_1 , t_1 and y_0 calculated by LSM and from the application of the function proposed by PAM, the Eq. G was obtained. PAM identifies the SPS as the percentage of SP/c ratio, and the point which the derivative function of flowing phenomenon for the cementitious material dy/dx is equal to -0.57 (Eq. H). It was observed that the SPS is a solution of Eq. H. Therefore, the x value calculated by SPS was equal to 0.43% . This value of SPS was near to the values obtained by the geometric methods, showing that PAM was successfully used. Analyzing the Eq. G, from dimensional and physical aspects, for the values of $x=0$ and $y=1.38 \times 10^{15}$ s, it was verified that this paste does not flow through the Marsh cone considering a percentage of SP equal to 0 . On the other hand, considering a high amount of SP, it was observed that there is a trend of flowing time so that the

paste reaches a minimum limit. For this case, according to Eq. I, $T=13.86$ s, provided that segregation of paste does not occur, this may cause a slight increase in flow time. It was observed that this value was very close to the experimental flow time of $T=13.95$ s.

$$y = 13.999 \cdot e^{\left(\frac{-x}{0.073}\right)} + 1.142 \quad (G)$$

$$\frac{dy}{dx} = -189.883 \cdot e^{-13.565 \cdot x} = -0.57 \text{ g } x = 0.43\% \quad (H)$$

$$\lim_{x \rightarrow \infty} (y) = 1.142 \text{ g } \log y = 1.142 \text{ g } y = 13.86 \text{ s} \quad (I)$$

The verification of the applicability and efficiency of PAM was carried out from the analysis of several cement materials (pastes and mortars) manufactured in the laboratory (LEMA/UFAL), as well as data obtained from the analysis of studies of the existing literature, as presented in Tables IV to VII. From Fig. 8, it is observed that the flow behavior of cementitious material by using the Marsh cone was well defined. The curves created by downward straight lines had the slope dependent on SP dosages, which in turn depended on the w/c ratio and the additions. It is noteworthy that the curves obtained from the fit of test points showed an elongated shape behavior, with bigger curvature radius, or upright with a smaller curvature. The most elongated shape of the curve makes it difficult to identify the SPS by geometric methods, and it may not be possible to determine it, as seen in the curve behavior of paste test data 3 and 4. Thus, it was verified that more than one point could be identified for the SPS, which may generate an inaccurate result for this reference point.

For the PAM application in the test data of the cementitious materials indicated in Tables IV to VII, the parameters A_1 , t_1 and y_0 were initially calculated. These function parameters are shown in Table VIII. It was observed that the function defined for modeling the problem showed a correlation coefficient (r^2) higher than 0.979 , showing great

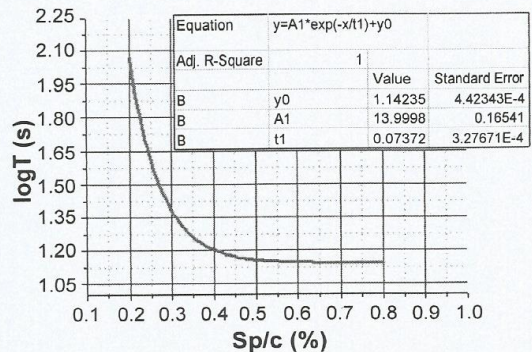


Figure 7: Function and representative curve of the phenomenon.
 [Figura 7: Função e curva representativa do fenômeno.]

Table IV - Results of Marsh cone tests of the pastes 1 to 4 (LEMA/UFAL).
 [Tabela IV - Resultados dos ensaios de cone de Marsh das pastas 1 a 4 (LEMA/UFAL).]

Paste 1		Paste 2		Paste 3		Paste 4	
SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT
0.15	1.331	0.25	1.279	0.15	1.335	0.05	0.955
0.25	1.225	0.60	1.068	0.25	1.265	0.10	0.903
0.30	1.221	0.80	1.061	0.30	1.235	0.15	0.878
0.35	1.220	1.00	1.064	0.35	1.215	0.20	0.863
0.45	1.215	-	-	0.40	1.205	0.25	0.858

Table V - Results of Marsh cone tests of the pastes 5 to 8 [12].
 [Tabela V - Resultados dos ensaios de cone de Marsh das pastas 5 a 8 [12].]

Paste 5		Paste 6		Paste 7		Paste 8	
SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT
0.075	1.25	0.08	1.43	0.075	1.73	0.10	1.59
0.12	1.18	0.10	1.32	0.10	1.53	0.13	1.34
0.20	1.13	0.25	1.15	0.25	1.15	0.15	1.25
0.50	1.11	0.50	1.05	0.45	1.06	0.20	1.08
1.00	1.11	1.00	1.03	1.00	1.05	0.50	1.03

Table VI - Results of Marsh cone tests of the mortars 9 to 12 [7].
 [Tabela VI - Resultados dos ensaios de cone de Marsh de argamassas 9 a 12 [7].]

Paste 9		Paste 10		Paste 11		Paste 12	
SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT
0.18	1.58	0.08	1.73	0.20	1.45	0.30	1.75
0.20	1.43	0.10	1.54	0.22	1.33	0.35	1.35
0.23	1.30	0.12	1.16	0.25	1.20	0.45	1.23
0.25	1.13	0.20	1.10	0.30	1.15	0.50	1.20
0.34	1.03	0.25	1.08	0.36	1.10	0.60	1.15
0.50	1.03	1.00	1.07	1.00	1.09	1.00	1.14

Table VII - Results of Marsh cone tests of the pastes 13 to 16 [10].
 [Tabela VII - Resultados dos ensaios de cone de Marsh das pastas 13 a 16 [10].]

Paste 13		Paste 14		Paste 15		Paste 16	
SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT	SP/c (%)	LogT
0.90	2.36	0.60	2.12	0.30	1.78	0.20	2.04
1.00	2.29	0.70	2.03	0.40	1.64	0.30	1.50
1.20	2.26	0.80	2.02	0.50	1.63	0.50	1.42
1.50	2.24	1.00	2.01	0.80	1.61	0.80	1.40
2.00	2.24	-	-	-	-	-	-

compatibility with the studied phenomenon. The curves obtained with the functions with parameters presented in Table VIII are presented in Fig. 9.

From this study, it was verified that regardless of the curve shapes it was always possible to determine a single reference

point for the SPS using PAM (Table IX). The values obtained with the use of the PAM, in general, were close to those found by the methods of Gomes [10] and ASTM C939 [18]. Depending on the shape of the curve it was not possible to identify the angle predicted by the Gomes method [10], and

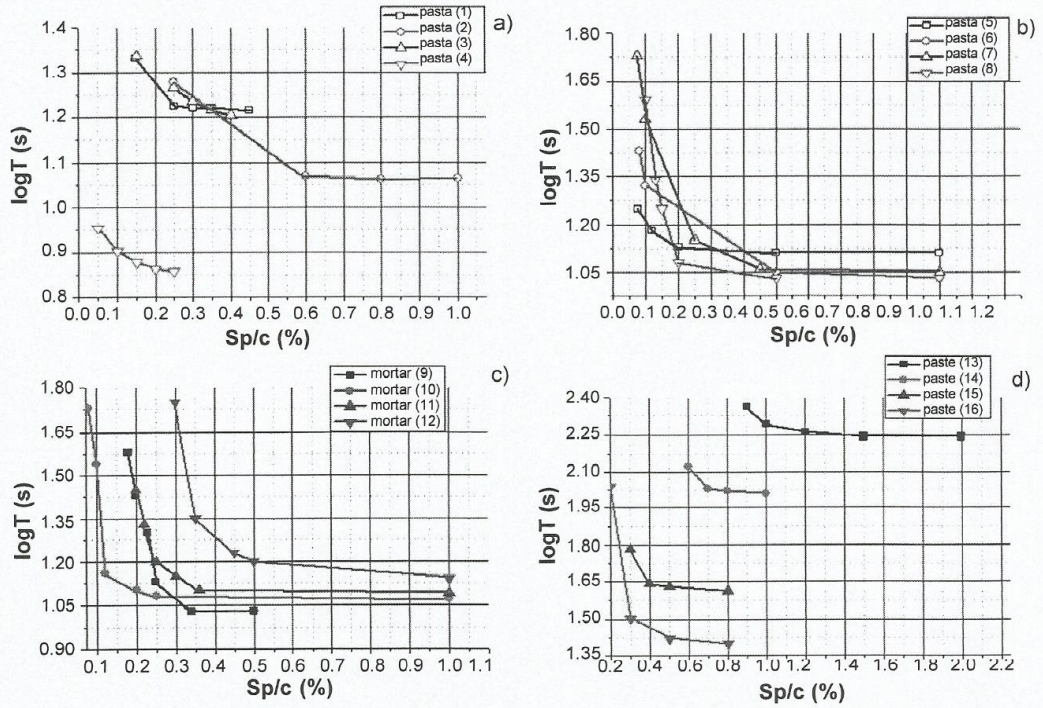


Figure 8: Flow curves of tests 1 to 16.
 [Figure 8: Curvas de fluxo dos ensaios 1 a 16.]

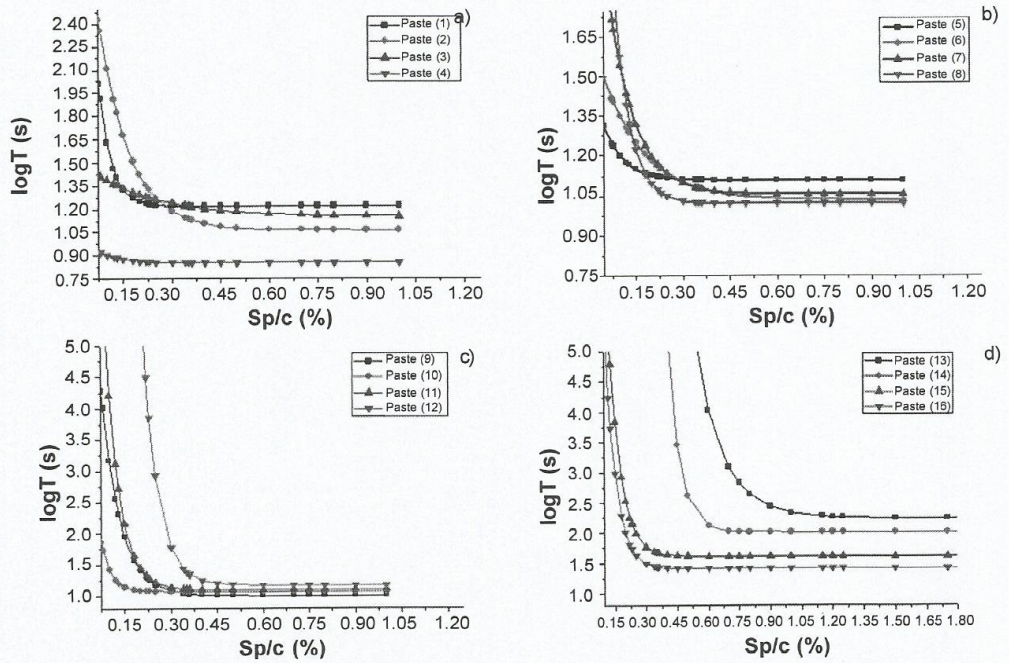


Figure 9: Curves defined by PAM of paste tests 1 to 16.
 [Figure 9: Curvas definidas pelo MAP dos ensaios das pastas 1 a 16.]

Table VIII - Parameters of the flow curves by PAM to different cementitious materials.

[Tabela VIII - Parâmetros das curvas de escoamento determinado pelo MAP para diferentes materiais cimentícios.]

² Paste	A (s)	t (%)	y (s)	n	r
1	5.716	0.038	1.217	0.998	
2	3.033	0.094	1.062	0.999	
3	0.395	0.196	1.150	0.995	
4	0.206	0.073	0.850	0.999	
5	0.446	0.064	1.109	0.999	
6	0.674	0.133	1.033	0.969	
7	1.650	0.082	1.055	0.999	
8	4.081	0.050	1.021	0.992	
9	11.423	0.060	1.006	0.968	
10	8.753	0.031	1.072	0.995	
11	27.444	0.046	1.093	0.999	
12	357.620	0.047	1.168	0.985	
13	157.957	0.124	2.241	0.982	
14	3880.060	0.057	2.012	0.989	
15	32.570	0.056	1.612	0.979	
16	29.821	0.051	1.408	0.998	

generated doubts in the definition using the other geometric methods. It was observed that the SPS values obtained by AFREM De Larrard [7] were generally higher than those determined by the other methods. This occurred because the AFREM De Larrard method [7] indicated for the SPS a tangency point to the nearest flow curve from the horizontal asymptote. It was noteworthy that for some curves equal values of SPS could be identified using different geometric methods.

CONCLUSIONS

The paste fluidity tests of cement matrices using the Marsh cone are simple and fast, providing identification parameters of the paste quality for using in SCC, HPC and pumpable concretes. The existing methods for determining the saturation point of superplasticizer (SPS) were used successfully, however, they had some limitations. In general, the existing methods propose dosing intervals. According to the results obtained by proposed analytical method (PAM), it was verified that it is possible to establish an equation that characterizes the phenomenon of the Marsh cone flow, correlating the percentage of superplasticizer to cement ratio - SP/c (x-axis), and the decimal logarithm of flow time, logT (y-axis). The Aitcin method, although is

Table IX - Results of SPS values defined by different methods - SP/c (%).

[Tabela IX - Resultados dos valores de PSP definidos por diferentes métodos - SP/c (%).]

Paste	Differential equation	PAM	Gomes [10]	ASTM C939 [18]	AFREM De Larrard [7]
1	$\frac{dy}{dx} = -149.336.e^{-26.126.x} = -0.57$	0.21	0.25	0.25	0.35
2	$\frac{dy}{dx} = -32.004.e^{-10.552.x} = -0.57$	0.38	0.60	0.60	0.60
3	$\frac{dy}{dx} = -2.007.e^{-5.081.x} = -0.57$	0.24	0.30	0.30	0.35
4	$\frac{dy}{dx} = -2.829.e^{-13.734.x} = -0.57$	0.12	0.15	0.20	0.20
5	$\frac{dy}{dx} = -0.446.e^{-15.455.x} = -0.57$	0.18	0.20	0.20	0.20
6	$\frac{dy}{dx} = -0.674.e^{-7.518.x} = -0.57$	0.33	0.10	0.20	0.35
7	$\frac{dy}{dx} = -1.650.e^{-12.195.x} = -0.57$	0.32	0.25	0.25	0.35
8	$\frac{dy}{dx} = -4.081.e^{-20.000.x} = -0.57$	0.26	nd	0.20	0.30
9	$\frac{dy}{dx} = -188.76.e^{-16.528.x} = -0.57$	0.37	nd	0.25	0.35
10	$\frac{dy}{dx} = -282.354.e^{-32.258.x} = -0.57$	0.20	0.12	0.12	0.12
11	$\frac{dy}{dx} = -596.608.e^{-21.739.x} = -0.57$	0.33	0.25	0.25	0.35
12	$\frac{dy}{dx} = -7774.347.e^{-21.739.x} = -0.57$	0.45	0.35	0.35	0.55
13	$\frac{dy}{dx} = -1273.79.e^{-8.064.x} = -0.57$	0.95	nd	1.50	1.50
14	$\frac{dy}{dx} = -68071.22.e^{-17.543.x} = -0.57$	0.66	0.70	0.70	0.80
15	$\frac{dy}{dx} = -707.815.e^{-18.518.x} = -0.57$	0.38	0.40	0.45	0.45
16	$\frac{dy}{dx} = -68071.22.e^{-17.543.x} = -0.57$	0.35	0.30	0.30	0.40

nd - not defined (angle not found with test data).

advantageous to verify the paste workability, presents a longer time of execution than the others. In addition, its use may not be possible when there is an incompatibility between the cementitious materials and SP. The methods of Gomes and AFREN, as well as the ASTM C939, need visual and geometric resources, which may hinder an accurate SPS identification or turns it impossible to be determined. On the other hand, the decreasing exponential defines adequately the flow behavior of cementitious materials using the Marsh cone. It was verified that PAM provides a satisfactory result to define the SP's optimum point, improving the accuracy of SPS reference value. Moreover, PAM allows a numerical model implementation and may be part of a programmable model for the concrete dosage.

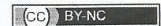
ACKNOWLEDGMENTS

The authors thank LEMA, CTEC, UFAL, PPG Materials, CAPES, CNPq and FAPEAL, for their support to the study.

REFERENCES

- [1] H. Okamura, *Concr. Int.* **19**, 7 (1997) 50.
- [2] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, *Concreto: microestrutura, propriedades e materiais*, Ibracon, S. Paulo (2008).
- [3] A.M. Neville, J.J. Brooks, *Tecnologia do concreto*, 2^a ed., Bookman, Porto Alegre (2013).
- [4] R. Gettu, J. Roncero, P.C.C. Gomes, in 42^o Congr. Bras. Concr., Recife (2000).
- [5] K.A. Melo, A.M.P. Carneiro, *Constr. Build. Mater.* **24**, 8 (2010) 1529.
- [6] P.C. Aitcin, *Constr. Build. Mater.* **9**, 1 (1995) 13.
- [7] F. De Larrard, F. Bosc, C. Catherine, F. Deflorenne, *Mater. Struct.* **30** (1997) 439.
- [8] J. Roncero, "Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: implications for high performance concretes", Dr. Thesis, Un. Polit. Cataluña, Barcelona (2000).
- [9] C. Chakkamalath, R. Gettu, *Mater. Struct.* **41** (2008) 1581.
- [10] P.C.C. Gomes, R. Gettu, L.A. Fité, C. Bernad, *Cem. Hormigón* **832** (2002) 30.
- [11] B. Toralles-Carbonari, R. Gettu, L.A. Fité, A. Aguado, *Cem. Hormigón* **774** (1997) 932.
- [12] E. Jhon, R. Gettu, *ACI Mater. J.* **111**, 1 (2014) 67.
- [13] P.F.G. Banfill, *Mag. Concr. Res.* **33**, 114 (1981) 37.
- [14] R.G. Pileggi, F.A.C. Betioli, V.M. John, in Proc. 12th Int. Congr. Chem. Cem., Montreal (2007).
- [15] D.L. Kantro, *Cem. Concr. Compos.* **2** (1980) 95.
- [16] P.C. Aitcin, C. Jolicoeur, J.G. Macgregor, *Concr. Int.* **16**, 5 (1994) 45.
- [17] L. Agulló, B. Toralles-Carbonari, R. Gettu, A. Aguado, *Mater. Struct.* **32** (1999) 479.
- [18] ASTM C939-10, "Standard test method for flow of grout (flow cone method)" (2010).
- [19] D.C. Montgomery, C.G. Runger, *Applied statistics and probability for engineers*, 5th ed., John Wiley Sons, USA (2011).

(Rec. 17/10/2018, Rev. 07/01/2019, Ac. 08/01/2019)



Cerâmica

Ano LXV - Vol 65, 374 ABR/MAI/jun 2019 - ISSN-0366-6913

Synthesis of ordered mesoporous silica MCM-41 with controlled morphology for potential application in controlled drug delivery systems (Síntese de sílica mesoporosa ordenada tipo MCM-41 com controle morfológico para potencial aplicação em sistemas de liberação controlada de fármacos) D. M. Oliveira ¹ , A.S. Andrada.....	170
Study of ZnAl ₂ O ₄ spinel nanoparticles synthesized using gelatin as organic precursor (Estudo de nanopartículas de espinélio de ZnAl ₂ O ₄ sintetizadas utilizando gelatina como precursor orgânico) H. P. Macedo, R. L. B. A. Medeiros, R. A. B. Nascimento, A. A. Oliveira, G. P. Figueredo, R. M. Braga, D. M. A. Melo.....	180
Factorial design applied to sodium activation of a Brazilian bentonite (Planejamento fatorial aplicado a ativação sódica de uma bentonita brasileira) J. A. do Rosário, R. F. Miguel, D. A. do Rosário, N. C. Kuhnen, H. G. Riella.....	185
Synthesis and characterization of alumina fibers using solution blow spinning (Síntese e caracterização de fibras de alumina por fiação por sopro em solução) M. F. Moita, A. M. C. Santos, R. M. C. Farias, G. A. Neves, R. R. Menezes.....	190
Synthesis and characterization of asphalt composite precursors using amorphous rice husk silica (Síntese e caracterização de precursores de compósitos asfálticos utilizando sílica de casca de arroz amorfa) S. Sembiring, R. Situmeang, Z. Sembiring.....	194
Síntese e avaliação de nanopartículas de sílica mesoporosas na liberação controlada de feromônios repelentes de abelha (Síntesis and evaluation of mesoporous silica nanoparticles in the controlled release of bee repellent pheromones) E. T. Zanoni, G. D. Savi, M. F. Valadares, E. Angioletto.....	200
Desempenho balístico de estruturas multicamadas à base de alumina/epóxi (Ballistic performance of multilayer structures based on alumina/epoxy) M. B. Polla, D. C. N. Fabris, A. De Noni Jr., O. R. K. Montedo.....	207
Influence of Ca ²⁺ in the rheological properties and filtration of bentonitic clay dispersions in aqueous drilling fluids (Influência do Ca ²⁺ nas propriedades reológicas e de filtração de dispersões de argilas bentoníticas em fluidos de perfuração aquosos) I. A. Silva, D. S. Silva, B. M. A. B. Buriti, R. R. Menezes, G. A. Neves, H. C. Ferreira.....	216
Dielectric and Raman spectroscopy studies of (Na _x Bi _{1-x})TiO ₃ lead-free ceramic (Estudos de espectroscopia dielétrica e Raman de cerâmica (Na _x Bi _{1-x})TiO ₃ isenta de chumbo) S. Zeroul, H. Lidjici, W. Chatta, H. Khemakhem.....	222
Thermal behavior (TG-DTA-TMA), sintering and properties of a kaolinitic clay from Buenos Aires Province, Argentina (Comportamento térmico (TG-DTA-TMA), sinterização e propriedades de uma argila caulinitica da Provincia de Buenos Aires, Argentina) M. S. Conconi, M. Morosi, J. Maggi, P. E. Zalba, F. Cravero, N. M. Rendtorff.....	227
Synthesis of nano-alumina powder via recrystallization of ammonium alum (Síntese de nanopó de alumina via recristalização de alúmen de amônio) A. N. Saud, H. Sh. Majidi, S. N. Saud.....	236
Microstructure and Weibull distribution of rupture strength of clay-talc ceramics (Microestrutura e distribuição de Weibull da resistência à ruptura de cerâmicas de argila-talco) L. Zerbo, M. Seynou, B. Sorgho, G. Lecomte-Nana, M. Gomina, P. Blanchart.....	240
Mechanical and bioactivity assessment of wollastonite/PVA composite synthesized from bentonite clay (Avaliação mecânica e de bioatividade do compósito wollastonita/PVA sintetizado a partir de argila bentonítica) L. A. Adams, E. R. Essien, E. E. Kaufmann.....	246
Analytical method for determining the saturation point of superplasticizers in cement pastes using the Marsh cone (Método analítico de determinação do ponto de saturação de superplastificantes em materiais cimentícios usando o cone de Marsh) O. F. da Silva, P. C. C. Gomes, K. A. M. Moraes.....	252
Brushite cement containing gelatin: evaluation of mechanical strength and in vitro degradation (Cimentos de brushita contendo gelatina: avaliação da resistência mecânica e degradação in vitro) L. P. Silva, M. D. P. Ribeiro, E. S. Trichês, M. Motisuke.....	261
Characterization of Algerian kaolins for utilization as a raw material in electrical insulators (Caracterização de caulins argelinos para utilização como matéria-prima em isolantes elétricos) M. Laraba.....	267
Y ³⁺ substituted Sr-hexaferrites: sol-gel synthesis, structural, magnetic and electrical characterization (Hexaferritas de Sr com Y ³⁺ : síntese sol-gel, caracterização estrutural, magnética e elétrica) S. S. Satpue, S. R. Wadgane, S. R. Kadam, D. R. Mane, R. H. Kadam.....	274
A brief review on hydroxyapatite production and use in biomedicine (Uma breve revisão sobre a obtenção de hidroxiapatita e aplicação na biomedicina) D. S. Gomes, A. M. C. Santos, G. A. Neves, R. R. Menezes.....	282
Resistência de aderência de revestimentos de argamassa - contribuição por meio de mapeamento e revisão sistemática de literatura para futuras pesquisas no tema (Bond strength of renderings - contribution through mapping and systematic literature review for future research on the subject) F. H. B. Vaz, H. Carasek.....	303
Chemical characterization of archaeological pottery of the Lower Paraná River (Caracterização química da cerâmica arqueológica do Baixo Rio Paraná) D. Loponte, J. Morales, A. Gogichashvili, A. Acosta.....	319

