



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ESTRUTURAL E CONSTRUÇÃO CIVIL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL:
ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

KELVYA MARIA DE VASCONCELOS MOREIRA

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS
DE CONCRETO

FORTALEZA

2012

KELVYA MARIA DE VASCONCELOS MOREIRA

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS
DE CONCRETO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de Concentração: Construção Civil.

Orientador: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral

FORTALEZA

2012

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca de Pós-Graduação em Engenharia - BPGE

-
- M837c Moreira, Kelvya Maria de Vasconcelos.
 Concreto autoadensável com agregados graúdos reciclados de concreto / Kelvya Maria de Vasconcelos Moreira. – 2012.
 150 f. : il. color., enc. ; 30 cm.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2012.
 Área de Concentração: Construção Civil.
 Orientação: Prof. Dr. Antônio Eduardo Bezerra Cabral.
1. Engenharia Estrutural. 2. Concreto – Materiais de construção. 3. Agregados (Materiais de construção). 4. Modelagem matemática - Estimação. I. Título.

KELVYA MARIA DE VASCONCELOS MOREIRA

CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM AGREGADOS GRAÚDOS RECICLADOS DE
CONCRETO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil. Área de concentração: Construção Civil.

Aprovada em 06 / 06 / 2012.

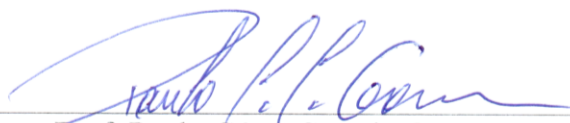
BANCA EXAMINADORA



Prof. Antônio Eduardo Bezerra Cabral (Orientador)
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Alexandre Araújo Bertini, Dr.
Universidade Federal do Ceará – UFC



Prof. Paulo César Correia Gomes, Dr.
Universidade Federal de Alagoas – UFAL

Dedico este trabalho aos meus pais, Moreira e Enedina, aos meus irmãos, Francielery e Ana Kécya, aos meus sobrinhos, Vítor, Arthur e Sofia, e ao meu amor, Kemmison Luiz.

AGRADECIMENTOS

À Deus por me conceder equilíbrio espiritual e determinação para prosseguir nesta jornada.

Aos meus amados pais, Moreira e Enedina, por me apoiarem incondicionalmente e tornarem possível a concretização de mais uma etapa acadêmica.

À minha querida avó, Maria Inês, que sempre reza por minha proteção.

Aos meus irmãos, Francielery e Ana Kécya, por torcerem pela irmã caçula.

Aos meus sobrinhos, Vítor, Arthur e Sofia, por me proporcionarem momentos de descontração maravilhosos.

À minha prima, Alinne Maria, por me ajudar a manter a serenidade nos dias difíceis longe da terrinha.

Ao meu amor, Kemmison Luiz, pelo apoio, carinho, dedicação e paciência.

Ao professor e orientador Dr. Eduardo Cabral pelo aprendizado, confiança e compreensão nas mudanças ocorridas durante esta jornada.

Aos professores do mestrado, em geral, por me proporcionarem enriquecimento intelectual.

A todos meus estimados amigos de mestrado pelo carinho e companhia prazerosa.

Ao Prof. MSc. Aldo de Almeida Oliveira pela liberação do Laboratório de Materiais de Construção da UFC para desenvolvimento do trabalho de pesquisa.

Ao Prof. Dr. José Marcos Sasaki e seu bolsista Édipo Silva pela realização dos ensaios de fluorescência de raios X e difração de raios X da adição mineral no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da UFC.

Ao Helder Vasconcelos, gerente administrativo da Transágua, pelo fornecimento do entulho de concreto.

Ao Dr. Flávio, engenheiro do DNIT, pela permissão do uso do britador do departamento.

Ao Sr. Francisco Ednilson Leite Tavares, coordenador de Vendas N/NE da BASF, pelo fornecimento do aditivo superplastificante GLENIUM 51.

À Edineuda Soares, coordenadora do controle de qualidade da Indústria de Pré-Fabricados T&A, pelo fornecimento da adição mineral e do cimento CPII-F-32-RS.

Ao Eng. Sérgio Lima, chefe de produção da Companhia Industrial de Cimento Apodi S/A, pela realização dos ensaios de massa específica e de granulometria a laser.

Ao Anderson Luiz, laboratorista do Laboratório de Materiais de Construção da UFC, pela participação direta nos ensaios tecnológicos.

Aos bolsistas de Iniciação Científica do Curso de Engenharia Civil da UFC, Diego Duarte e Bruno Barbosa Linhares, pela participação direta nos ensaios tecnológicos.

Ao Alexandre Menezes, aluno de graduação do Curso de Engenharia Civil da UFC, pela ajuda na realização do ensaio de índice de atividade pozolânica da adição mineral.

Ao Frâncio e Manoel, laboratoristas do Laboratório de Materiais de Construção da UFC, pelo apoio na realização dos ensaios tecnológicos.

Aos laboratoristas do NUTEC, Marquinhos e Daurenice, e ao assistente, Valdemir, pela participação direta nos ensaios tecnológicos de resistência à compressão axial e de módulo de elasticidade.

Aos amigos do Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual Vale do Acaraú e ao Prof. Dr. Francisco Carvalho pelo incentivo no transcorrer desta jornada.

À CAPES pelo financiamento da bolsa de estudos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da UFC pela oportunidade concedida.

Enfim, a todos que colaboraram, direta ou indiretamente, para a realização deste trabalho.

Muito Obrigada!

“O começo da sabedoria é encontrado na dúvida: duvidando começamos a questionar, e procurando podemos achar a verdade.”

(Pierre Abelard)

RESUMO

O Concreto Autoadensável (CAA) possui propriedades intrínsecas que o distingue do atual concreto convencional. São fatores como capacidade de autoadensamento, grande quantidade de finos e uso obrigatório de aditivo superplastificante que tornam o CAA um material de elevado desempenho, favorável para a durabilidade, sendo considerado uma evolução na tecnologia do concreto e propenso a se tornar o concreto convencional do futuro. Por outro lado, o resíduo originário da própria indústria da construção civil tem despertado sérias preocupações para a comunidade, pois se trata de um resíduo de difícil descarte e gerado em volumes cada vez mais crescentes, dado o crescimento econômico do País com consequente aumento do poder aquisitivo da população. Sob esta ótica, analisou-se o potencial de produção do CAA com substituição do agregado graúdo natural (AGN) por agregados reciclados oriundos da reciclagem de concreto, chamado de agregado graúdo reciclado (AGR), nas porcentagens de 0%, 10%, 20% e 30%. Sabendo que o agregado reciclado, em geral, possui características distintas do agregado natural, a metodologia empregada iniciou com o tratamento do AGR e caracterização física de todos os agregados (convencionais e reciclados). Efetuou-se, então, o estudo de dosagem para as relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55. Após, estudaram-se um total de 12 traços de CAA para avaliação de suas propriedades no estado fresco e no estado endurecido. Os ensaios no estado endurecido foram: resistência à compressão axial aos 28 e 56 dias, módulo de elasticidade aos 56 dias, absorção de água por imersão aos 28 dias, índice de vazios aos 28 dias, massa específica real aos 28 dias e profundidade de carbonatação natural aos 200 dias. Procedeu-se ao tratamento estatístico dos resultados pela análise de variância (ANOVA) com posterior modelagem matemática e ANOVA do modelo proposto. Ao final, concluiu-se que o alto teor de aditivo superplastificante resultante do estudo de dosagem da relação a/c mais baixa pode ter influenciado para a obtenção de concretos mais trabalháveis e menos suscetíveis à incorporação de um agregado mais poroso do que o agregado natural. Também se concluiu que as propriedades dos CAA manufaturados foram afetadas mais significativamente pela relação a/c, indicando a possibilidade de substituição de maiores teores de AGN por AGR.

Palavras-chave: concreto autoadensável; agregado reciclado; estado fresco e endurecido; ANOVA; modelagem matemática.

ABSTRACT

The self-compacting concrete (SCC) has intrinsic properties that distinguish it from known current conventional concrete. Its factors like self-compacting capacity, high amount of fines and mandatory use of superplasticizer that make the SCC a material of high performance, favorable to the durability and is considered an evolution in concrete technology and prone to become the future conventional concrete. On the other hand, the residue originated in the construction industry itself has aroused serious concern to the community, because it is a residue difficult to discard. It is generated in ever-increasing volumes due to economic growth in the country with consequent increase in power population's purchasing. From this perspective, we analyzed the production of SCC with replacement of natural coarse aggregate (NCA) for recycled aggregates from concrete recycling, called recycled coarse aggregate (RCA), in the percentages of 0%, 10%, 20% and 30%. Knowing that recycled aggregate, in general, has distinct characteristics of natural aggregate, the methodology started with the treatment of RCA and physical characterization of all aggregates (conventional and recycled). Then, it was done the dosage study with the w/c ratio of 0.35, 0.45 and 0.55. After, we studied a total of 12 mixtures of SCC to evaluate its properties in fresh and hardened state. The tests in the hardened state were: compressive strength at 28 and 56 days, modulus of elasticity at 56 days, water absorption by immersion at 28 days, content of voids at 28 days, specific gravity at 28 days and the depth of natural carbonation at 200 days. We proceeded to statistical processing of results by analysis of variance (ANOVA) followed by mathematical modeling and model's ANOVA. Finally, it was concluded that the high content of superplasticizer results from the dosage study of lower w/c ratio can be influenced to achieve concretes more workable and less sensitive to the incorporation of an aggregate more porous than the natural aggregate. It was also found that the properties of the SCC manufactured were affected more significantly by the w/c ratio, indicating the possibility of substitution of higher levels of NCA by RCA.

Keywords: self-compacting concrete; recycled aggregate; fresh and hardened state; ANOVA; mathematical modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Composição média do RCC de Fortaleza/CE.....	32
Figura 2	Etapas do PGRCC a ser elaborado pela empresa privada.....	35
Figura 3	(a) Agregado reciclado de concreto e (b) agregado reciclado misto.....	41
Figura 4	Produção de agregados reciclados.....	43
Figura 5	Aplicação do CAA na indústria de pré-fabricados.....	47
Figura 6	Equipamentos utilizados na determinação das propriedades no estado fresco do CAA.....	52
Figura 7	Exemplo de análise visual do CAA após o ensaio de espalhamento pelo cone de Abrams.....	53
Figura 8	Exemplo de análise visual do CAA após os ensaios de habilidade passante pela caixa L e pelo anel J.....	54
Figura 9	Passo-a-passo proposto por Tutikian (2004) para dosagem do CAA.....	56
Figura 10	Passo-a-passo proposto por Tutikian e Dal Molin (2007) para dosagem do CAA.....	57
Figura 11	Passo-a-passo proposto por Repette-Melo (2005) para dosagem do CAA.....	59
Figura 12	Passo-a-passo proposto por Gomes (2002) para a dosagem do CAA.....	60
Figura 13	(a) Cone de Marsh e (b) medidas do equipamento.....	63
Figura 14	Gráfico log (T) versus sp/c para definição do ponto de saturação do superplastificante.....	63
Figura 15	(a) <i>Mini-slump</i> para o estudo da pasta e (b) medidas do equipamento.....	64
Figura 16	(a) Tronco de cone para o estudo da argamassa e (b) medidas do equipamento	65
Figura 17	Difratograma da adição mineral.....	72
Figura 18	(a) Detalhe do resíduo de concreto antes da britagem; (b) Britador de mandíbulas.....	75
Figura 19	Agregado graúdo reciclado de concreto obtido entre as peneiras # 25 mm e #4,75 mm.....	75
Figura 20	Distribuição granulométrica da areia.....	76
Figura 21	Distribuição granulométrica do pedrisco natural.....	77
Figura 22	Distribuição granulométrica da brita natural e do agregado graúdo reciclado...	77
Figura 23	Ponto de saturação do aditivo superplastificante para a relação a/c = 0,35.....	85

Figura 24	Ponto de saturação do aditivo superplastificante para a relação $a/c = 0,45$	85
Figura 25	Ponto de saturação do aditivo superplastificante para a relação $a/c = 0,55$	85
Figura 26	Ensaio com o tronco de cone mostrando (a) o espalhamento final e (b) a não-segregação da argamassa com relação $a/c = 0,55$ e $sp/c = 0,20\%$	86
Figura 27	Comportamento dos vazios da mistura 1 (brita natural + pedrisco).....	87
Figura 28	Comportamento dos vazios da mistura 2 (brita natural + pedrisco + areia).....	87
Figura 29	Proporcionamento dos materiais secos.....	88
Figura 30	(a) Equipamento e (b) execução do ensaio de módulo de elasticidade.....	93
Figura 31	Ensaio da caixa L dos CAA com relação $a/c = 0,45$ (a) com 10% e AGR, (b) com 20% de AGR e (c) com 30% de AGR.....	96
Figura 32	Ensaio do anel J com o CAA da relação $a/c = 0,55$ (a) referencial e (b) com 10% de AGR.....	98
Figura 33	Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de resistência axial aos 28 dias.....	102
Figura 34	Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre a resistência axial dos CAA aos 28 dias.....	102
Figura 35	Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de resistência axial aos 56 dias.....	104
Figura 36	Efeito da relação a/c sobre a resistência axial dos CAA aos 56 dias.....	106
Figura 37	Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de módulo de elasticidade aos 56 dias.....	108
Figura 38	Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre o módulo de elasticidade dos CAA aos 56 dias.....	108
Figura 39	Efeitos da interação entre a relação a/c e a porcentagem de AGR sobre o módulo de elasticidade dos CAA aos 56 dias.....	109
Figura 40	Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias.....	111
Figura 41	Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre a absorção de água dos CAA aos 28 dias.....	112
Figura 42	Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de índice de vazios dos CAA aos 28 dias.....	114
Figura 43	Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre o índice de vazios dos CAA aos 28 dias.....	115

Figura 44	Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de carbonatação dos CAA aos 200 dias.....	118
Figura 45	Efeito da relação a/c sobre a frente de carbonatação dos CAA aos 200 dias.....	118

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Geração de RCC em algumas cidades brasileiras.....	29
Tabela 2	Composição do RCC de algumas cidades brasileiras.....	31
Tabela 3	Normas técnicas da ABNT sobre a reciclagem de RCC.....	36
Tabela 4	Requisitos gerais para agregados reciclados em concreto sem função estrutura.....	46
Tabela 5	Características químicas do cimento utilizado.....	70
Tabela 6	Características físicas e mecânicas do cimento utilizado.....	71
Tabela 7	Fluorescência de raios X da adição mineral.....	72
Tabela 8	Exigências químicas para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992) e resultados dos ensaios com a adição mineral.....	73
Tabela 9	Exigências físicas para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992) e resultados dos ensaios com a adição mineral.....	74
Tabela 10	Diâmetro máximo e módulo de finura dos agregados naturais e reciclado.....	78
Tabela 11	Massa específica, massa unitária solta e compactada dos agregados naturais e reciclado.....	79
Tabela 12	Absorção de água dos agregados naturais e reciclado.....	80
Tabela 13	Teor de material fino, passante na peneira de malha # 75 μm , dos agregados naturais e reciclado.....	81
Tabela 14	Características do aditivo superplastificante.....	82
Tabela 15	Enumeração dos traços dos CAA com porcentagens de substituição da brita natural pelo agregado graúdo reciclado.....	83
Tabela 16	Requisitos no estado fresco desejáveis para os CAA produzidos.....	89
Tabela 17	Traços, para 1 m^3 de concreto, aprovados no estudo do volume de pasta dos CAA com relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55 ($f/c = 0,40$ e $V_p = 40\%$).....	89
Tabela 18	Resistência média obtida aos 28 dias para os CAA com relações a/c iguais a 0,35, 0,45 e 0,55.....	90
Tabela 19	Traços unitários dos CAA.....	91
Tabela 20	Resultados dos ensaios com os CAA no estado fresco.....	94

Tabela 21	Resultados dos ensaios realizados com os CAA no estado endurecido.....	98
Tabela 22	Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias.....	100
Tabela 23	Análise de variância do modelo matemático da resistência à compressão axial aos 28 dias.....	101
Tabela 24	Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial aos 56 dias.....	104
Tabela 25	Análise de variância do modelo matemático da resistência à compressão axial aos 56 dias.....	104
Tabela 26	Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade aos 56 dias.....	106
Tabela 27	Análise de variância do modelo matemático do módulo de elasticidade aos 56 dias.....	107
Tabela 28	Análise de variância dos resultados de absorção de água por imersão aos 28 dias.....	110
Tabela 29	Análise de variância do modelo matemático da absorção de água por imersão aos 28 dias.....	111
Tabela 30	Análise de variância dos resultados de índice de vazios aos 28 dias.....	113
Tabela 31	Análise de variância do modelo matemático de índice de vazios aos 28 dias...	114
Tabela 32	Análise de variância dos resultados de massa específica real aos 28 dias.....	116
Tabela 33	Análise de variância dos resultados de carbonatação aos 200 dias.....	117
Tabela 34	Análise de variância do modelo matemático de carbonatação aos 200 dias.....	117

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AGR	Agregado Graúdo Reciclado
AGN	Agregado Graúdo Natural
ANOVA	Análise de Variância
ARC	Agregado Reciclado de Concreto
ARM	Agregado Reciclado Misto
BIBM	European Federation for Precast Concrete (from the French acronym "Bureau International du Béton Manufacturé")
CAA	Concreto Autoadensável
CAD	Concreto de Alto Desempenho
CCAA	<i>Cement Concrete & Aggregates Australia</i>
CEMBUREAU	European Cement Association
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CP	Cimento Portland
C-S-H	Silicato de Cálcio Hidratado
COOPERCON-CE	Cooperativa da Construção Civil do Estado do Ceará
EFCA	European Federation of Concrete Admixture Associations
EFNARC	European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems
EMLURB	Empresa Municipal de Limpeza e Urbanização (Fortaleza)
EN	<i>European Norm</i>
ERMCO	European Ready-mix Concrete Organization
GDL	Grau de Liberdade
IAP	Índice de Atividade Pozolânica
IPT/EPUSP	Instituto de Pesquisas Tecnológicas/Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
M.A.R.	Massa do Agregado Reciclado
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MQ	Média Quadrada
NBR	Norma Brasileira Registrada
NM	Norma Mercosul

NS	Não Significativo
OECD	<i>Organization for Economic Cooperation and Development</i>
PMGRCC	Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
PGRCC	Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil
prEN	<i>product ruling European Norm</i>
RCC	Resíduos da Construção Civil
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
RS	Resistente à Sulfato
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Significativo
SCC	<i>Self-Compacting Concrete</i>
SEMAM	Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Controle Urbano (Fortaleza)
SISNAMA	Sistema Nacional de Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SQ	Soma Quadrada
SRHU	Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano
SUASA	Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária
UFC	Universidade Federal do Ceará
WPPPC	<i>Working Party Pollution Prevention and Control of the Environment Policy Committee</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

%	porcentagem
a/c	relação água/cimento
sp/c	relação superplastificante/cimento
f/c	relação fíler/cimento
C	massa do cimento
Varg	volume de argamassa
ρ_{ar}	massa específica da areia
ρ_c	massa específica do cimento
ρ_a	massa específica da água
ρ_f	massa específica do fíler
Tsp	teor de sólidos do superplastificante
ρ_{sp}	massa específica do superplastificante
Pf	massa de fíler
Par	massa de areia
Parc	massa de areia corrigida
Har	umidade da areia
Pa	massa de água
Pac	massa de água corrigida
Pasp	massa de água do superplastificante
Aar	absorção da areia
Psp	massa do superplastificante sólido
Pspl	massa do superplastificante líquido
α	ângulo interno
MunitAB	massa unitária da mistura de agregados
γ_{AB}	massa específica da mistura de agregados
γ_A	massa específica do agregado A
γ_B	massa específica do agregado B
%A	porcentagem de agregado A
%B	porcentagem de agregado B
VaziosAB	índice de vazios da mistura de agregados
fc	resistência média à compressão axial

μm	micrômetro
#	malha da peneira
θ	theta
V_p	volume de pasta
M_{AGR}	massa do agregado graúdo reciclado
M_{AGN}	massa do agregado graúdo natural
γ_{AGR}	massa específica do agregado graúdo reciclado
γ_{AGN}	massa específica do agregado graúdo natural
m	relação agregados secos/cimento em massa
a	relação agregado miúdo seco/cimento em massa
p	relação agregado graúdo seco/cimento em massa
pH	potencial hidrogeniônico
Eci	módulo de elasticidade
Abs56	absorção do concreto aos 28 dias
Vazios28	índice de vazios do concreto aos 28 dias
Carb200	profundidade de carbonatação do concreto aos 200 dias
CO ₂	dióxido de carbono

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	Justificativa	20
1.2	Objetivos	24
1.2.1	<i>Geral</i>	24
1.2.2	<i>Específicos</i>	24
1.3	Limitações	24
1.4	Estrutura de apresentação da pesquisa	25
2	RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL	26
2.1	Definição e origem	26
2.2	Classificação	27
2.3	Estimativas da geração	28
2.4	Composição	30
2.5	Problemas ambientais devido à deposição inadequada	33
2.6	Instrumentos legais para a gestão dos resíduos de construção	34
2.6.1	<i>Resolução N° 307/2002 do CONAMA</i>	34
2.6.2	<i>Normas Técnicas da ABNT</i>	36
2.6.3	<i>Lei Federal N° 12.305/2010</i>	37
2.6.4	<i>Decreto N° 7.404/2010</i>	38
2.6.5	<i>Outros instrumentos</i>	39
3	AGREGADOS RECICLADOS	41
3.1	Beneficiamento dos resíduos de construção	42
3.2	Características dos agregados reciclados	44
4	CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)	47
4.1	Introdução	47
4.2	Requisitos do CAA no estado fresco	51
4.3	Metodologias de dosagem de CAA	55
4.3.1	<i>Filosofia de dosagem com determinação da pasta e agregados em conjunto</i>	56
4.3.2	<i>Filosofia de dosagem com estudo da pasta ou argamassa em separado do estudo do esqueleto granular</i>	58
4.4	CAA com agregados reciclados	67
5	PROGRAMA EXPERIMENTAL	70

5.1 Caracterização dos materiais	70
5.1.1 Cimento	70
5.1.2 Adição mineral	71
5.1.3 Agregados naturais e reciclados	74
5.1.4 Água	81
5.1.5 Aditivo superplastificante	82
5.2 Dosagem dos CAA	82
5.2.1 Estudo da composição da argamassa	84
5.2.2 Estudo do esqueleto granular	86
5.2.3 Estudo do volume de pasta do CAA	88
5.2.4 Traços dos CAA	90
5.3 Produção dos concretos e execução dos ensaios	91
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES	94
6.1 Resultados e discussões dos CAA no estado fresco	94
6.2 Resultados dos CAA no estado endurecido	98
6.3 Análise estatística dos resultados dos CAA no estado endurecido	99
6.3.1 Resistência à compressão axial aos 28 dias	100
6.3.2 Resistência à compressão axial aos 56 dias	103
6.3.3 Módulo de elasticidade	106
6.3.4 Absorção de água por imersão	110
6.3.5 Índice de vazios	113
6.3.6 Massa específica real	116
6.3.7 Frente de carbonatação	116
7 CONCLUSÕES	120
8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	124
REFERÊNCIAS	125
APÊNDICES	137
ANEXOS	145

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativa

A necessidade de se obter estruturas mais duráveis, com economia e menor tempo de execução, somado aos problemas ocorridos durante a concretagem de peças com formas complexas e estruturas muito armadas fez surgir a necessidade de se produzir um concreto que não necessitasse de vibração durante seu adensamento. Estes problemas eram refletidos na formação de ninhos de pedra e pontos de mais fácil acesso de substâncias deletérias, afetando substancialmente a durabilidade das estruturas.

Em 1986, foi desenvolvido na Universidade de Tóquio, no Japão, por Okamura, o Concreto Autoadensável (CAA), cuja principal característica é a capacidade de se moldar nas fôrmas por conta própria e preencher, sem necessidade nenhuma de vibração ou compactação externa de qualquer natureza, os espaços destinados a ele, ao mesmo tempo em que mantém a homogeneidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; EFNARC, 2002).

Para alcançar a principal característica do CAA é necessário avaliar sua trabalhabilidade no estado fresco, especificamente quanto ao comportamento reológico do concreto que, segundo Castro (2007), está definido por duas constantes principais: tensão de escoamento e viscosidade plástica. O primeiro parâmetro está relacionado com o espalhamento, de forma que quanto maior a tensão de escoamento, menor a fluidez e vice-versa; enquanto que o segundo faz a diferença entre um concreto facilmente trabalhável e um tendo um comportamento demasiado coeso, difícil de ser bombeado e apresentando vazios na superfície quando a fôrma é retirada.

No que diz respeito às propriedades do CAA no estado endurecido, não são verificadas diferenças com relação ao concreto convencional que apresente similar composição básica, desde que o CAA seja adensado adequadamente.

A *European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems* (EFNARC) descreveu o CAA, na década de 2000, como o acontecimento mais revolucionário das últimas décadas no ramo da construção com concreto. Ele foi originalmente projetado para compensar a crescente escassez de pessoal qualificado, mas demonstrou ser benéfico economicamente, devido a fatores como (EFNARC, 2002):

- a) rapidez na construção;
- b) redução da mão-de-obra necessária para a obra;
- c) um melhor acabamento superficial;

- d) maior facilidade de lançamento;
- e) melhoria da durabilidade;
- f) maior liberdade e possibilidades no projeto;
- g) menores seções de concreto;
- h) redução dos níveis de ruído e ausência de vibração;
- i) ambiente de trabalho mais seguro.

Cavalcanti (2006) afirma que o CAA representa uma evolução na tecnologia do concreto, podendo ser utilizado em qualquer tipo de estrutura, e capaz de apresentar benefícios econômicos, como o aumento da produtividade e redução de custos; benefícios tecnológicos, como a possibilidade de desenvolvimento de estruturas com formas mais complexas e altas taxas de armaduras; e benefícios ambientais, como a melhora do ambiente de trabalho e a contribuição para a diminuição do impacto ambiental.

Ainda que o número de componentes do CAA seja maior do que o concreto convencional, pode-se utilizar a matéria-prima disponível na região, desde que sejam efetuados os estudos dos seus constituintes, proporções e efeitos. Considerando que esta matéria-prima vem sendo gradativamente mais escassa ao longo dos anos, também pode ser viável a utilização de materiais alternativos que apresentem desempenho similar aos comumente utilizados.

Esta possibilidade reflete a situação atual da área da tecnologia do concreto quanto à preocupação com as questões ambientais. Mehta e Monteiro (2008) entendem que, para reduzir o impacto ambiental da indústria do concreto, a melhor abordagem de longo prazo seria buscar a redução de seu consumo, assim como é feito com a energia. Porém, admitindo que esta seja uma realidade ainda distante, os autores acreditam que para adotar uma abordagem holística visando o desenvolvimento industrial sustentável, deve-se começar praticando ecologia industrial. Esta prática implica reciclar os resíduos produzidos por uma indústria para que substituam a matéria-prima *in natura* da própria indústria e de outras objetivando, assim, reduzir o impacto ambiental de ambas.

Seguindo a tendência de sustentabilidade para o CAA, vários estudos científicos, a nível mundial, já foram desenvolvidos a fim de avaliar a utilização de resíduos industriais, como cinza de casca de arroz, cinza volante, fíler calcário, resíduos de mármore e granito, pó de carnaúba, para compor os finos necessários ao concreto (LISBÔA, 2004; MELO, 2005; MELEIRO, PIOVEZAM, ISA, 2007; MESQUITA, 2011; VALDEZ, et al, 2011; KHATIB, 2008). Nos tempos atuais, há uma tendência de estudos sobre o potencial de substituição da matéria-prima natural do CAA (agregados miúdo e graúdo) por resíduos industriais, tal como

ocorreu com o concreto convencional, notadamente no exterior (SAFIUDDIN et al., 2011; KOU; POON, 2009; GRDIC et al, 2010; TU, 2005).

Em especial, o resíduo originário da própria indústria da construção civil constitui um passivo ambiental preocupante no Brasil. Segundo John (2001), o macrocomplexo da indústria da construção civil é responsável por 40% dos resíduos gerados na economia.

Ângulo et al. (2002) ressaltam que, no Brasil, é necessário desenvolver outros mercados para garantir a reciclagem em grande escala dos resíduos da construção civil (RCC), também denominados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD), pois no atual estágio de conhecimento, a utilização de agregados reciclados de RCC como base de pavimentação é a única alternativa tecnologicamente consolidada.

Segundo Addis (2010), enormes quantidades de agregados são utilizadas na construção de edifícios, embora esta seja apenas uma fração da quantidade utilizada na construção de engenharia civil. Para o autor, utilizar resíduos de materiais para substituir materiais naturais leva a uma redução na procura de recursos não renováveis, bem como no impacto ambiental da exploração de pedreiras e de atividades de processamento. Outros benefícios do uso de materiais reciclados em vez de agregados novos estão relacionados aos aspectos social e econômico:

- a) menos materiais são enviados para aterros;
- b) os materiais reciclados são geralmente mais baratos do que os materiais novos;
- c) a utilização de materiais reciclados em substituição a agregados naturais evita o pagamento de taxas sobre a extração de matéria-prima natural;
- d) a quantidade de energia incorporada/carbono no prédio tende a ser inferior ao equivalente em um prédio construído com materiais novos;
- e) é provável que materiais reciclados sejam gerados localmente, reduzindo assim as necessidades de transporte.

Sob esta ótica, pode-se inferir que a possibilidade de produzir um concreto em que a matéria-prima natural seja substituída por agregado reciclado de RCC, sem afetar drasticamente as características mecânicas e de durabilidade necessárias ao seu bom desempenho, pode favorecer para a disseminação desta tecnologia no mercado brasileiro aliada a correta reutilização do resíduo de construção, garantindo, ao final, baixo custo do produto, bom desempenho e viabilidade social.

Esta proposição tem forte caráter inovador, pois, no Brasil, ainda há carência de estudos abordando a utilização do agregado reciclado de RCC no CAA, embora existam diversos trabalhos científicos sobre a utilização de resíduos industriais como finos (LISBÔA,

2004, MANUEL, 2005, CALMON et al., 2005, BARROS, 2008, MESQUITA, 2011) e sobre diferentes métodos de dosagem a serem adotados para a produção deste concreto (GOMES, 2002, TUTIKIAN, 2004, MELO, 2005, TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008, ALENCAR, 2008).

Também, uma vez que se pretende estudar concretos com substituição do agregado gráudo natural por agregado reciclado de RCC, pode-se ter um considerável aproveitamento do resíduo da construção, garantindo uma destinação final adequada ao rejeito que vem sendo objeto de resoluções e leis por causar sério impacto negativo ao ambiente.

Com a aprovação da Lei Federal Nº 12.305 (BRASIL, 2010a), que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), as construtoras também se tornaram responsáveis pelos resíduos gerados em suas atividades, devendo elaborar planos de gerenciamento de seus resíduos, além de fiscalizar a correta destinação final destes pelos centros de coleta contratados, tal como já preconizava a Resolução Nº 307 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (MMA, 2002).

Outro ponto importante que justifica o desenvolvimento da pesquisa é a possibilidade de redução do custo do CAA que, segundo Tutikian e Dal Molin (2008), ainda é caracterizado pelos profissionais de engenharia como um entrave ao uso desta tecnologia. Uma vez que as jazidas para extração da matéria-prima dos agregados é escassa em certas regiões brasileiras, o preço final (incluindo o transporte) da matéria-prima pode ficar onerado. Ao substituir esta matéria-prima por agregado de RCC, podem-se alcançar preços menores para o CAA.

Por fim, de acordo com Werle (2010), o uso de agregados reciclados no concreto convencional altera de tal forma suas propriedades mecânicas e de durabilidade que pode limitar a aplicação do concreto com este material para peças não estruturais. Pretende-se analisar se as propriedades do CAA também são afetadas ao ponto de limitar sua aplicação, dado que seus constituintes lhe proporcionam características intrínsecas distintas do concreto convencional.

Diante de tais justificativas, acredita-se que a proposição da pesquisa é certamente plausível e contribuirá, sobremaneira, para o desenvolvimento de tecnologias alternativas que tornem este tipo de concreto mais sustentável, atendendo às exigências da atualidade.

1.2 Objetivos

1.2.1 Geral

Avaliar as propriedades no estado fresco e no estado endurecido de concretos autoadensáveis produzidos com substituição parcial dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto.

1.2.2 Específicos

- a) Avaliar a fluidez de CAA produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto;
- b) Avaliar a coesão de CAA produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto;
- c) Avaliar a capacidade passante de CAA produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto;
- d) Avaliar as propriedades mecânicas resistência à compressão axial e módulo de elasticidade de CAA produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto;
- e) Avaliar a durabilidade por meio da absorção de água, índice de vazios e carbonatação de CAA produzidos com agregados graúdos reciclados de concreto;
- f) Determinar modelos matemáticos de comportamento dos concretos para cada propriedade mecânica e de durabilidade.

1.3 Limitações

O trabalho de pesquisa desenvolvido possui como limitações os seguintes fatores:

- a) Os materiais utilizados (convencionais e reciclados) possuem características particulares. Para efeito de comparação em próximos estudos, deve-se atentar para a origem do material e a composição adotada;
- b) O resíduo de construção e demolição tem a característica de possuir alta porosidade que varia em decorrência de sua composição. No estudo foi utilizado exclusivamente o resíduo oriundo de reformas e demolições de

edificações em concreto armado e pavimentação, portanto não se conhece a origem exata destes concretos;

- c) O método de dosagem utilizado foi o proposto por Gomes (2002). Futuras comparações devem atentar para este fato.

1.4 Estrutura de apresentação da pesquisa

O capítulo 1 apresenta uma introdução ao estudo do concreto autoadensável com agregado reciclado de RCC, citando as vantagens deste tipo de concreto e a situação atual dos resíduos gerados pela construção civil, além dos objetivos e limitações da pesquisa.

O capítulo 2 explana sobre os resíduos da construção civil, discorrendo sobre sua origem, classificação, estimativas de geração, composição, os problemas ambientais da deposição inadequada e os instrumentos legais brasileiros para a gestão destes resíduos.

O capítulo 3 versa sobre os tipos de beneficiamento dos agregados reciclados e as características deste material alternativo.

O capítulo 4 trata do concreto autoadensável com a descrição de sua origem, evolução, critérios de aceitação segundo a NBR 15.823 (ABNT, 2010) e metodologias de dosagem, dividindo-as em duas filosofias: cálculo direto dos componentes; e estudo separado da pasta e do esqueleto granular. Neste capítulo é descrito o método de dosagem adotado na pesquisa. Também é abordada a incorporação de agregados reciclados no CAA.

O capítulo 5 apresenta o programa experimental do estudo, sendo apresentadas as características das matérias-primas e do agregado reciclado para compor os CAA, o estudo de dosagem para cada relação água/cimento e os métodos de ensaio de cada propriedade mecânica e de durabilidade analisada.

O capítulo 6 mostra os resultados alcançados para os CAA no estado fresco e endurecido, fazendo-se a análise de variância e a proposição de modelos matemáticos de comportamento para cada propriedade estudada no estado endurecido.

O capítulo 7 traz as considerações finais obtidas do estudo e sugestões para futuras pesquisas.

Ao final, estão elencadas as referências bibliográficas usadas na pesquisa; os apêndices, contendo o estudo do volume de pasta dos CAA, os traços de concreto do programa experimental, os resultados dos ensaios no estado endurecido e as análises dos resíduos padronizados para estes resultados; e os anexos, contendo a classificação do CAA no estado fresco e os requisitos para as aplicações do CAA da NBR 15.823 (ABNT, 2010).

2 RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL

2.1 Definição e origem

A NBR 10.004 (ABNT, 2004) define resíduos sólidos como sendo os “resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição”. No que diz respeito aos resíduos oriundos das atividades da indústria da construção civil, ainda que não estejam explicitamente citados, estes estão inclusos nas atividades industriais ou mesmo nas atividades de serviços.

A Resolução específica que dispõe sobre a gestão dos resíduos da construção civil é a Resolução Nº 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (MMA, 2002), que define claramente que:

Os resíduos da construção civil são os provenientes de construções, reformas, reparos e demolições de obras de construção civil, e os resultantes da preparação e da escavação de terrenos, tais como: tijolos, blocos cerâmicos, concreto em geral, solos, rochas, metais, resinas, colas, tintas, madeiras e compensados, forros, argamassa, gesso, telhas, pavimento asfáltico, vidros, plásticos, tubulações, fiação elétrica etc., comumente chamados de entulhos de obras, caliça ou metralha.

Devido à grande maioria dos resíduos da construção civil ser originária das atividades dos canteiros de obras e de demolição, estes também podem ser denominados de Resíduos de Construção e Demolição (RCD) (PINTO, 1999).

Leite (2001) afirma que as causas da geração destes resíduos são diversas, mas podem-se destacar:

- a) a falta de qualidade dos bens e serviços, podendo isto dar origem às perdas de materiais, que saem das obras na forma de entulho;
- b) a urbanização desordenada que faz com que as construções passem por adaptações e modificações gerando mais resíduos;
- c) o aumento do poder aquisitivo da população e as facilidades econômicas que impulsionam o desenvolvimento de novas construções e reformas;
- d) estruturas de concreto mal concebidas que ocasionam a redução de sua vida útil e necessitam de manutenção corretiva, gerando grandes volumes de resíduos;
- e) desastres naturais, como avalanches, terremotos e tsunamis;
- f) desastres provocados pelo homem, como guerras e bombardeios.

De modo geral, os níveis tecnológicos disponíveis na região e na empresa influenciam diretamente no volume e na composição dos resíduos gerados, pois estes fatores

estão relacionados com a qualidade dos materiais e componentes, com a qualificação da mão-de-obra, com a existência de procedimentos operacionais e mecanismos de controle do processo construtivo.

2.2 Classificação

A classificação dos resíduos sólidos pela NBR 10.004 (ABNT, 2004) está relacionada com a atividade que lhes deu origem e com seus constituintes. Desta forma, os resíduos sólidos são classificados em:

- a) resíduos classe I – Perigosos;
- b) resíduos classe II – Não perigosos;
 - resíduos classe II A – Não inertes.
 - resíduos classe II B – Inertes.

Usualmente os RCC são considerados inertes (classe II B) pela grande maioria dos pesquisadores, ou seja, não têm os seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade da água (LIMA, 2012). Entretanto, Zordan (2001) afirma que, dependendo da origem e da composição do RCC, este pode apresentar elementos que o torne não inerte (classe II A) ou perigoso (classe I). Portanto, a composição química e o risco de contaminação ambiental estão diretamente relacionados com os materiais das obras que originou o RCC (CASSA et al., 2001).

Outra classificação é dada pela Resolução N° 307 (MMA, 2002), que classifica os resíduos da construção civil em 4 classes de acordo com o potencial de reciclabilidade. Em 16 de agosto de 2004, a Resolução N° 348 (MMA, 2004) inseriu o amianto como material perigoso (classe D); e, em 24 de maio de 2011, a Resolução N° 431 (MMA, 2011) mudou a classificação do gesso de Classe C para a Classe B. Assim, a classificação atualizada dos resíduos da construção civil de acordo com a Resolução N° 307 (MMA, 2002) é a seguinte:

- a) **Classe A** - são os resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados:
 - de construção, demolição, reformas e reparos de pavimentação e de outras obras de infraestrutura, inclusive solos provenientes de terraplanagem;
 - de construção, demolição, reformas e reparos de edificações: componentes cerâmicos (tijolos, blocos, telhas, placas de revestimento etc.), argamassa e concreto;
 - de processo de fabricação e/ou demolição de peças pré-moldadas em concreto (blocos, tubos, meios-fios, etc) produzidas nos canteiros de obras;
- b) **Classe B** - são os resíduos recicláveis para outras destinações, tais como: plásticos, papel/papelão, metais, vidros, madeiras e gesso;
- c) **Classe C** - são os resíduos para os quais não foram desenvolvidas tecnologias ou aplicações economicamente viáveis que permitam a sua reciclagem/recuperação;

- d) **Classe D** - são os resíduos perigosos oriundos do processo de construção, tais como: tintas, solventes, óleos e outros, ou aqueles contaminados oriundos de demolições, reformas e reparos de clínicas radiológicas, instalações industriais, telhas e demais objetos que contenham amianto.

Embora o gesso tenha sido reclassificado como resíduo de classe B, este ainda necessita ser depositado em recipiente próprio, não sendo permitido a sua mistura com os demais resíduos classe B, nem com os das outras classes.

2.3 Estimativas da geração

O macrocomplexo da indústria da construção civil é a principal geradora de resíduos da economia. Estima-se que o *construbusiness*¹ seja responsável por cerca de 40% dos resíduos de toda a economia (JOHN, 2001).

Oliveira (2002) relata que a construção de edifícios envolve o consumo de grandes quantidades de recursos físicos do planeta, dado que um metro quadrado de construção utiliza cerca de uma tonelada de materiais. Como resultado deste consumo elevado, tem-se um volume de resíduos também elevado e que necessitará de locais adequados para sua disposição final.

Ainda que os resíduos produzidos nas atividades de construção, manutenção e demolição tenham estimativa de geração muito variável, admite-se que os valores típicos encontram-se entre 0,40 e 0,50 t/hab.ano, valor igual ou superior à massa de lixo urbano (JOHN, 2001).

Cabral (2007) fez um compêndio de diversos estudos sobre a geração de RCC em cidades brasileiras, conforme pode ser visualizado na Tabela 1. Nota-se grande variação da porcentagem de RCC em relação aos resíduos sólidos urbanos (RSU), com valores variando de 34% até 70%. Quanto à taxa de geração, se for calculada uma média dos valores apresentados na Tabela 1 será alcançado um valor de 0,49 t/hab.ano, que se encaixa na faixa de estimativa de geração admitida por John (2001).

¹ A cadeia produtiva da construção civil também é denominada *construbusiness* e engloba setores desde a extração da matéria-prima e consequente produção dos materiais até a execução da construção em si.

Tabela 1 – Geração de RCC em algumas cidades brasileiras.

Município	RCC (t/dia)	RCC/ RSU	Taxa de geração (t/hab.ano)
Jundiaí/SP ^(a)	712	62%	0,89
São José dos Campos/SP ^(a)	733	67%	0,55
Ribeirão Preto/SP ^(a)	1.043	70%	0,83
São José do Rio Preto/SP ^(a)	687	58%	0,77
Santo André/SP ^(a)	1.013	54%	0,59
Vitória da Conquista/BA ^(a)	310	n.d.	0,47
São Paulo/SP ^(b)	5.260	34%	0,18
São Carlos/SP ^(c)	381	n.d.	0,70
Campinas/SP ^(c)	1.258	n.d.	0,54
Salvador/BA ^(d)	2.746	50%	0,39
Feira de Santana/BA ^(d)	276	50%	0,21
Belo Horizonte/MG ^(e)	1.200	51%	0,22
Maceió/AL ^(f)	1.100	45%	0,57
Porto Alegre/RS ^(g)	1.000	n.d.	0,31
Florianópolis/SC ^(h)	636,12	n.d.	0,81
Blumenau/SC ⁽ⁱ⁾	331,51	n.d.	0,45

a) PINTO (1999)

b) PMSP (2005)

c) MARQUES NETO (2005)

d) FREITAS et al (2003)

e) LEITE (2001)

f) VIEIRA (2003)

g) LOVATO (2007)

h) XAVIER (2000)

i) SARDÁ; ROCHA (2003)

n.d. – não disponível

Fonte: Cabral (2007).

No que diz respeito aos RCC da cidade de Fortaleza/CE, dados de 2008 da Empresa Municipal de Limpeza e Urbanização (EMLURB) apontam uma geração mensal de cerca de 92 mil toneladas de lixo urbano, sendo a construção civil responsável por 53% desse total, ou seja, 49 mil toneladas por mês (NOVAES; MOURÃO, 2008).

Estudos de Oliveira et al (2011) sobre a geração e composição de RCC em Fortaleza/CE, nos períodos de março/2008 a fevereiro/2009, apontaram que a cidade produz 702 t/dia de RCC, com uma taxa de geração de 0,11 t/hab.ano. Estes valores estão bem abaixo da média nacional já mencionada de 0,40 a 0,50 t/hab.ano, possivelmente, devido a não detecção dos resíduos que são gerados pelos pequenos geradores e depositados irregularmente em locais não licenciados. Foram avaliados somente os resíduos transportados por empresas licenciadas na prefeitura, que usualmente atendem somente às empresas construtoras, bem como os resíduos coletados pelo órgão municipal responsável pelo pequeno gerador.

Schneider e Philippi Jr. (2004) comentam que a maioria das ferramentas usadas nas políticas públicas de minimização destes resíduos pode ser implantada em vários estágios do processo de construção, projeto, demolição e manejo dos resíduos. Os autores detalham

alguns exemplos de políticas resultantes de uma pesquisa realizada em 1999 pelo *Working Party Pollution Prevention and Control of the Environment Policy Committee* (WPPPC) integrante da *Organization for Economic Cooperation and Development* (OECD), quais sejam:

- a) limitação de componentes perigosos em materiais de construção;
- b) incentivo à durabilidade de materiais de construção;
- c) incentivo ao uso de materiais de construção reciclados e recicláveis;
- d) cobrança de preços elevados para a deposição de RCC em aterros;
- e) triagem obrigatória de RCC em obras e entrega obrigatória em unidades de reciclagem;
- f) demolição controlada;
- g) taxação de matérias-primas oriundas da atividade de mineração;
- h) subsídios financeiros para unidades de tratamento de RCC;
- i) padrões para o uso de materiais reciclados.

A tecnologia construtiva normalmente aplicada no Brasil favorece o desperdício na execução das novas edificações quando comparadas com as empregadas em países mais desenvolvidos em função dos processos de racionalização e de modulação na construção lá empregados e da maior industrialização desse setor nesses países (IBAM, 2001).

2.4 Composição

Existe uma grande diversidade de matérias-primas e técnicas construtivas que afeta, de modo significativo, as características dos resíduos gerados, principalmente quanto à composição e à quantidade. Outros aspectos, como o desenvolvimento econômico e tecnológico da região, as técnicas de demolição empregadas, e a estação do ano também podem interferir indiretamente na composição dos RCC.

De modo geral, podem existir componentes inorgânicos e minerais, como concretos, argamassas e cerâmicas, e componentes orgânicos, plásticos, materiais betuminosos, entre outros. A variação da composição (em massa) é estimada, em geral, em termos de seus materiais (ANGULO; JOHN, 2002).

Souza et al. (1999), em pesquisa sobre as perdas de materiais de construção em quase cem canteiros de obras do Brasil, concluiu que cerca de 9% do concreto usinado, 17% dos blocos e tijolos, 85,5% do cimento no serviço de emboço, 79% do cimento no serviço de contrapiso, 22% das placas cerâmicas aplicadas no piso, 16% das placas cerâmicas aplicadas

na parede e 12% das placas cerâmicas aplicadas na fachada são desperdiçados, em geral tornando-se entulhos de obra.

Esses resultados demonstram que os principais constituintes dos resíduos de construção são o concreto, a argamassa e os materiais cerâmicos, caracterizados como resíduos de Classe A.

Cabral (2007) apresenta a composição dos RCC de algumas cidades brasileiras (Tabela 2). Observa-se que o somatório dos percentuais de argamassa, concreto e material cerâmico, para cada cidade apresentada, corresponde a mais de 60% do total de resíduos gerados, cujo resultado é análogo ao encontrado por Souza et al. (1999).

Tabela 2 – Composição do RCC de algumas cidades brasileiras.

Município	Argamassa (%)	Concreto (%)	Material cerâmico (%)	Cerâmica polida (%)	Rochas e solos (%)	Outros (%)
São Paulo/SP ^(a)	25,2	8,2	29,6	n.d.	32	5
Porto Alegre/RS ^(b)	44,2	18,3	35,6	0,1	1,8	n.d.
Ribeirão Preto/SP ^(c)	37,4	21,1	20,8	2,5	17,7	0,5
Salvador/BA ^(d)	53		9	5	27	6
Campina Grande/PB ^(e)	28	10	34	1	9	18
Maceió/AL ^(f)	27,82	18,65	48,15	3,06	n.d.	2,32

a) BRITO FILHO (1999)

b) LOVATO (2007)

c) ZORDAN (1997)

d) QUADROS; OLIVEIRA (2001)

e) NÓBREGA (2002)

f) VIEIRA (2003)

n.d. – não disponível

Fonte: Cabral (2007).

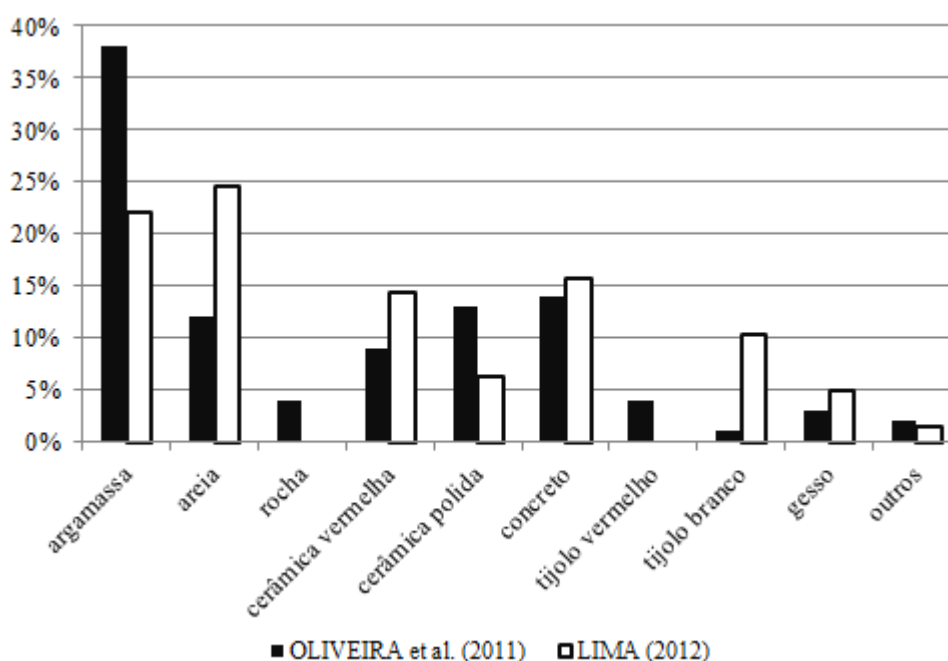
Quanto à composição do RCC da cidade de Fortaleza/CE, em 2008 a Cooperativa da Construção Civil do Estado do Ceará (COOPERCON-CE) divulgou dados dos percentuais de resíduos, por classe, produzidos em obras verticais cadastradas na cooperativa, apontando para uma produção de 74% de resíduos da classe A, 10% da classe B, 15% da classe C e 1% da classe D (NOVAES; MOURÃO, 2008). Ressalta-se que não estão inclusos os resíduos de escavação e demolição.

Em outro estudo, Oliveira et al. (2011) identificaram que a argamassa é o principal constituinte, correspondendo, em média, a 38% da massa do RCC. Em seguida, têm-se os resíduos de concreto e de cerâmica polida, com 14% e 13%, em média, respectivamente, conforme visualizado na Figura 1. A cerâmica vermelha apresentou apenas 9%. A soma do

percentual de argamassa, concreto e cerâmica vermelha atinge 61% do total do RCC de Fortaleza/CE, coadunando com os dados expostos na Tabela 2.

Já a autora Lima (2012) identificou a areia como principal componente do RCC de Fortaleza/CE, com uma média de 24,65% (Figura 1), seguida de 22% de argamassa e 15,65% de concreto. A cerâmica polida apresentou apenas 6,3% e a cerâmica vermelha apresentou 14,38%. O somatório do percentual de argamassa, concreto e cerâmica vermelha é 52%, um pouco abaixo dos dados da Tabela 2 e do resultado obtido por Oliveira et al. (2011).

Figura 1 – Composição média do RCC de Fortaleza/CE.



Fonte: Oliveira et al (2011) e Lima (2012).

Em face do exposto, confirma-se que as maiores perdas, em Fortaleza/CE, ocorrem nas fases de concretagem, alvenaria, emboço/reboco e revestimento, indicando que grande parcela dos RCC produzidos em Fortaleza/CE tem elevado potencial de reciclabilidade. Estes resíduos podem ser reciclados como agregados e retornar à cadeia da construção como agregados.

2.5 Problemas ambientais devido à deposição inadequada

Atualmente já é reconhecido que os RCC são um dos responsáveis pelo esgotamento de áreas de aterros de RSU, uma vez que correspondem a mais de 50% dos resíduos sólidos urbanos (massa/massa) (ANGULO et al, 2003).

Estes resíduos da construção podem vir acompanhados de materiais indesejáveis, tais como cimento amianto, gesso de construção e alguns resíduos químicos que, se depositados inadequadamente, podem provocar graves impactos ao meio ambiente e prejuízos para a sociedade (MOREIRA, 2010).

Há significativa geração de RCC em serviços classificados como construção informal, abrangendo atividades de reforma e ampliação, em que seus geradores ou os pequenos coletores que os atendem dispõem estes resíduos em áreas não regularizadas pelo poder público local. Como resultado, essas áreas se tornam sorvedouros dos RCC e acabam atraindo todo e qualquer tipo de resíduo para o qual não se tenha solução de captação rotineira. Nestes casos, a administração pública fortuitamente faz a limpeza da área, contudo o problema da deposição inadequada persiste formando um verdadeiro ciclo vicioso sem solução.

A deposição inadequada do RCC compromete a paisagem do local; o tráfego de pedestres e de veículos; provoca o assoreamento de rios, córregos e lagos; o entupimento da drenagem urbana, acarretando em enchentes; além de servirem de pretexto para o depósito irregular de outros resíduos não-inertes, propiciando o aparecimento e a multiplicação de vetores de doenças, arriscando a saúde da população vizinha.

Elevados custos são dispendidos para a limpeza dos locais de bota-fora, principalmente em virtude dos equipamentos utilizados no recolhimento dos mesmos serem totalmente inadequados (equipamentos pesados, caminhões basculantes, pás carregadeiras, entre outros) a esse tipo de serviço (PINTO, 2001). Além disso, essa prática não promove a sustentabilidade, uma vez que não incentiva a redução, reutilização ou reciclagem desses resíduos. Infelizmente, um grande número de cidades brasileiras se encontra nesta situação de promoção da gestão dos resíduos de maneira emergencial.

O Art. 4 da Resolução N° 307 (MMA, 2002) enfatiza que os RCC não podem ser dispostos em aterros de resíduos domiciliares, em áreas de bota-fora, em encostas, corpos d'água, lotes vagos e em áreas protegidas por Lei. Portanto, a disposição final adequada para estes resíduos é exclusivamente em aterro de inertes, sendo que estes devem, preferencialmente, ser reciclados.

A situação ideal seria a redução do uso de matérias-primas, o que reduziria o volume de resíduos gerados. John (2010) enfatiza que é preciso construir mais usando menos materiais. A redução das perdas de materiais, associadas tanto à qualidade e grau de industrialização, quanto a questões gerenciais da obra é uma boa estratégia. Adicionalmente, a seleção do material mais adequado para cada solicitação (mecânica, ambiental, necessidade do usuário e outros) é uma forma eficiente de reduzir o consumo de materiais.

2.6 Instrumentos legais para a gestão dos resíduos de construção

Atualmente existem diversos instrumentos legais no âmbito municipal, estadual e federal que norteiam o setor público e privado sobre o gerenciamento dos resíduos sólidos em geral, incluindo os resíduos da construção civil. Nos tópicos a seguir estão detalhados alguns que a autora julga mais relevantes.

2.6.1 Resolução Nº 307/2002 do CONAMA

Como principal instrumento para o gerenciamento dos RCC, esta Resolução prevê a implementação de um Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil, a ser elaborado pelos Municípios e pelo Distrito Federal, devendo incorporar um Programa Municipal de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PMGRCC) e Projetos de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil (PGRCC) (MMA, 2002). A cidade de Fortaleza/CE, a título de exemplo, já possui este Plano Integrado desde 2008.

De acordo com a Resolução,

O PMGRCC deve ser elaborado, implementado e coordenado pelos Municípios e pelo Distrito Federal, e deve estabelecer diretrizes técnicas e procedimentos para o exercício das responsabilidades dos pequenos geradores, em conformidade com os critérios técnicos do sistema de limpeza urbana local (MMA, 2002).

Os PGRCC devem ser elaborados e implementados pelos grandes geradores e devem estabelecer os procedimentos necessários para o manejo e destinação ambientalmente adequados dos resíduos (MMA, 2002).

A classificação em pequenos e grandes geradores, para o caso particular da cidade de Fortaleza/CE, é especificada na Lei Municipal Nº 8.408, de 24 de dezembro de 1999:

O produtor de resíduos sólidos cuja quantidade produzida exceda 50 kg/dia, e que seja proveniente de estabelecimentos domiciliares públicos, comerciais, industriais e de serviços, será denominado grande gerador e este será responsável pelos serviços de acondicionamento, coleta, armazenamento, transporte, tratamento e destinação final dos seus resíduos, devendo custeá-los. Por conseguinte, a produção diária inferior a 50 kg de resíduos é caracterizada como pequena geração e será gerenciada pelo sistema de limpeza urbana municipal (FORTALEZA, 1999).

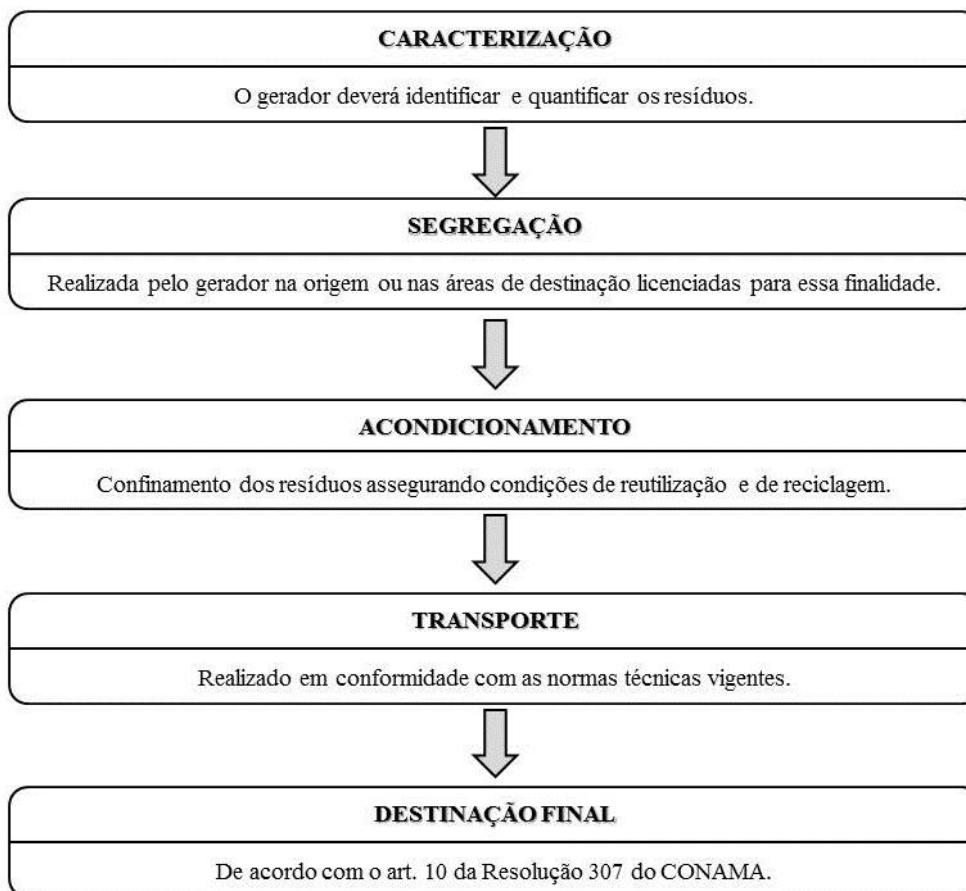
Entende-se que em uma residência unifamiliar podem ser produzidos mais do que 50 kg de resíduos sólidos por dia. De acordo com a Lei Municipal citada acima, os moradores desta residência serão caracterizados como grandes geradores e deverão se responsabilizar pelo gerenciamento e custeio do tratamento e da destinação final de seus resíduos.

No caso de empreendimentos e atividades que não sejam enquadrados na legislação como objeto de licenciamento ambiental, o PGRCC deverá ser apresentado juntamente com o projeto do empreendimento para análise pelo órgão competente do poder público municipal, em conformidade com o PMGRCC (MMA, 2002).

Para empreendimentos e atividades sujeitos ao licenciamento ambiental, o PGRCC deverá ser analisado dentro do processo de licenciamento, junto ao órgão ambiental competente (MMA, 2002).

O conteúdo do PGRCC deve contemplar as etapas constantes na Figura 2: caracterização, segregação, acondicionamento, transporte e destinação final.

Figura 2 – Etapas do PGRCC a ser elaborado pela empresa privada.



Fonte: da autora.

Levy (2010) enfatiza que a possibilidade de grande parcela dos municípios não estarem aptas a atender a esta Resolução não desobriga os geradores de desenvolverem o projeto e a gestão dos resíduos, pois o descumprimento desta Resolução prevê punições baseadas em leis ambientais.

2.6.2 Normas técnicas da ABNT

A homologação da Resolução Nº 307 (MMA, 2002), citada no tópico anterior, provocou uma mudança no cenário da reciclagem de RCC nos canteiros de obras, pois estes passaram a se preocupar com a implantação de planos de gerenciamento. Com isso, normas técnicas foram sendo elaboradas por Comitês Técnicos e publicadas pela ABNT em 2004, conforme sintetizado na Tabela 3 (MIRANDA; ÂNGULO; CARELI, 2009).

Tabela 3 – Normas técnicas da ABNT sobre a reciclagem de RCC.

Norma	Título
NBR 15.112	Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.113	Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.114	Resíduos sólidos da construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação.
NBR 15.115	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação - Procedimentos.
NBR 15.116	Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural - Requisitos.

Fonte: da autora.

Estas normas envolvem as diretrizes para implantação de áreas de transbordo e triagem, de aterros de inertes e de reciclagem dos RCC, além de procedimentos para a execução da pavimentação com agregados reciclados e de concreto sem função estrutural. No Brasil, ainda há carência de normatização para o uso de agregados reciclados na produção de concreto para fins estruturais.

Todavia, Ângulo (2005), mesmo reconhecendo ser viável o emprego dos agregados reciclados em concreto, inclusive da fração miúda, julga que as normas para uso destes agregados reciclados em concretos não sejam facilmente aplicáveis em usinas de reciclagem de entulho devido à:

- a) heterogeneidade da composição do RCC e variabilidade das propriedades dos agregados reciclados;
- b) falta de controle das operações de processamento;
- c) quantificação de fases no material por análise visual que, por ser subjetiva, não garante a homogeneidade do material e não apresenta uma relação clara com seu desempenho.

No entanto, entende-se que os fatores citados por Ângulo (2005) não sejam impeditivos para o uso do agregado reciclado de RCC nos concretos, já que será a aplicação deste concreto que determinará as propriedades exigidas dos agregados reciclados ou mesmo a porcentagem de incorporação deste material no concreto, de tal forma a não afetar os requisitos técnicos estabelecidos para o concreto.

2.6.3 Lei Federal Nº 12.305/2010

Após duas décadas de discussões, em 02 de agosto de 2010, foi sancionada a Lei Federal Nº 12.305, que institui a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS). A Lei dispõe sobre os princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos (incluídos os resíduos da construção civil), às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis (BRASIL, 2010a).

Quanto às empresas e empreendimentos privados, a PNRS prevê a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos, considerando como responsáveis não só os fabricantes, mas também os importadores, distribuidores, comerciantes e até os consumidores e titulares dos serviços de limpeza urbana ou manejo (BRASIL, 2010a).

O sistema de logística reversa é também tratado como instrumento na PNRS, juntamente com a coleta seletiva, para a implementação da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Este sistema é caracterizado por um “conjunto de ações, procedimentos e meios destinados a viabilizar a coleta e a restituição dos resíduos sólidos ao

setor empresarial, para reaproveitamento, em seu ciclo ou em outros ciclos produtivos, ou outra destinação final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010a).

Outro ponto impactante da PNRS é que a partir de quatro anos após a data de sua publicação, portanto a partir de 02 de agosto de 2014, a prefeitura e os geradores de resíduos só poderão dispor nos aterros sanitários os rejeitos e não mais os resíduos passíveis de reciclagem como ocorre atualmente. A PNRS considera como rejeitos os resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada (BRASIL, 2010a).

Especificamente quanto aos resíduos da construção civil, a PNRS deixa claro que as empresas de construção civil estão sujeitas à elaboração de plano de gerenciamento de resíduos sólidos, nos termos do regulamento ou de normas estabelecidas pelos órgãos do Sistema Nacional de Meio Ambiente (SISNAMA). Este plano de gerenciamento deve atender ao disposto no plano municipal de gestão integrada de resíduos sólidos do respectivo município, estando coerente com o que já determina a Resolução N° 307 (MMA, 2002), conforme já mencionado no subitem 2.6.1.

Um dos objetivos da Lei é a “não geração de resíduos, seguida da redução, reutilização, reciclagem e tratamento dos mesmos, bem como a sua disposição final ambientalmente adequada”. Para atingir seus objetivos, dentre os instrumentos utilizados pela PNRS, destaca-se a pesquisa científica e tecnológica, reforçando o papel da academia na solução ou minimização dos problemas ambientais (BRASIL, 2010a).

2.6.4 Decreto Federal N° 7.404/2010

O Decreto Federal N° 7.404, de 23 de dezembro de 2010, regulamenta a Lei Federal N° 12.305 e cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa (BRASIL, 2010b).

O Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos tem a finalidade de “apoiar a estruturação e implementação da PNRS, por meio da articulação dos órgãos e entidades governamentais, de modo a possibilitar o cumprimento das determinações e das metas previstas na Lei N° 12.305” (BRASIL, 2010b). Dentre as responsabilidades deste Comitê tem-se:

[...] a instituição e avaliação da PNRS; a promoção de estudos para desoneração tributária de produtos recicláveis e reutilizáveis, para difusão de tecnologias limpas e para a criação, modificação e extinção de condições para a utilização de linhas de financiamento ou creditícias de instituições financeiras federais; e a contribuição, por meio de estudos específicos, para o estabelecimento de mecanismos de cobrança dos serviços de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos urbanos pelos seus respectivos titulares (BRASIL, 2010b).

Já o Comitê Orientador para a Implantação dos Sistemas de Logística Reversa, dentre outras competências, deve:

[...] definir as diretrizes metodológicas para avaliação dos impactos sociais e econômicos dos sistemas de logística reversa; aprovar os estudos de viabilidade técnica e econômica; e definir a forma de realização da consulta pública relativa a proposta de implementação de sistemas de logística reversa (BRASIL, 2010b).

Entende-se que, enquanto o Comitê Interministerial da PNRS atuará como um instrumento de cobrança para a aplicação das diretrizes da Lei Nº 12.305, o Comitê de Logística Reversa permitirá uma melhor implementação destes sistemas de logística reversa pelas empresas.

2.6.5 Outros instrumentos

Atualmente, o Brasil conta com um arcabouço legal que estabelece diretrizes para a gestão dos resíduos sólidos, por meio da PNRS (Lei Nº 12.305) (BRASIL, 2010) já comentada, e para a prestação dos serviços públicos de limpeza urbana e manejo de resíduos sólidos por meio da Lei Federal de Saneamento Básico (Lei Nº 11.445) (BRASIL, 2007). Também conta, desde 2005, com a Lei de Consórcios Públicos (Lei Nº 11.107) (BRASIL, 2005) que permite estabelecer relações de cooperação federativa para a prestação desses serviços. Diretrizes e metas sobre resíduos sólidos também estão presentes no Plano Nacional sobre Mudança do Clima (Lei nº 12.187) (BRASIL, 2009).

Recentemente, a Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano do Ministério do Meio Ambiente (SRHU/MMA) elaborou um documento intitulado “Planos de gestão de resíduos sólidos: manual de orientação” (MMA, 2012) com o objetivo de subsidiar o poder público, os profissionais e os representantes da sociedade civil na elaboração dos planos de resíduos sólidos, estabelecendo os procedimentos necessários para o manejo e destinação ambientalmente adequados de resíduos e rejeitos admitidos pelos órgãos competentes do SISNAMA, do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária (SUASA), entre elas a disposição final,

observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos.

No âmbito do município de Fortaleza/CE, a Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Controle Urbano (SEMAM) elaborou a Portaria N° 48, de 31 de maio de 2011 (FORTALEZA, 2011), estabelecendo que todos os procedimentos construtivos da indústria da construção civil adotados em construções, reformas, demolições, obras de terraplenagem, pavimentações e quaisquer obras que gerem resíduos sólidos deverão implementar o sistema de logística reversa para esses resíduos, segregando-os na origem, por classe, nos termos da Resolução CONAMA N° 307 (MMA, 2002) e destinando-os a usinas de reciclagem.

Conforme definido na Portaria, os planos de gerenciamento de resíduos sólidos da construção civil e os cadastros de obras para fins de controle dos resíduos gerados deverão informar as quantidades de agregados que serão utilizados, onde serão e não serão utilizados agregados reciclados, com justificativa técnica pela não utilização dos agregados reciclados.

3 AGREGADOS RECICLADOS

A NBR 15.116 (ABNT, 2004), que dispõe sobre os requisitos para utilização de agregados reciclados de RCC em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural, define agregado reciclado como um material granular proveniente do beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis que apresenta características técnicas para a aplicação em obras de edificação e infraestrutura.

O Art. 10º da Resolução Nº 307 do CONAMA, ao tratar da destinação dos resíduos da construção civil, determina que os resíduos de Classe A deverão ser reutilizados ou reciclados na forma de agregados (MMA, 2002), tornando-se os agregado reciclados conhecidos.

Para Carneiro et al (2001), este agregado reciclado é uma mistura de agregado graúdo e miúdo, gerado pela operação de britagem, em geral com britador de mandíbulas. A porcentagem de cada agregado depende basicamente da granulometria e da composição do entulho, bem como do diâmetro máximo do agregado graúdo reciclado, produzido pelo equipamento de cominuição. A granulometria desejada pode ser obtida mediante pequenos ajustes na abertura do britador.

A NBR 15.116 (ABNT, 2004) divide os agregados reciclados em dois tipos, de acordo com a porcentagem de fragmentos de concreto na sua fração graúda:

Agregado Reciclado de Concreto (ARC): mínimo de 90%, em massa, de fragmentos de concreto (Figura 3a);

Agregado Reciclado Misto (ARM): menos de 90%, em massa, de fragmentos de concreto (Figura 3b).

Figura 3 – (a) Agregado reciclado de concreto e (b) agregado reciclado misto.



(a)



(b)

Addis (2010) acredita que o agregado reciclado de concreto seja mais adequado como um substituto para o agregado graúdo e não para o miúdo por duas razões: primeiro, a maior área de superfície do material secundário leva à inaceitável lixiviação de sais do concreto triturado; e, segundo, é difícil, demorado e caro atingir uma gama adequada de tamanhos de partículas porque o processo de trituração cria também uma grande proporção de partículas finas (pó).

Contudo, em geral, a aplicação preferencial do agregado reciclado é definida em função de sua composição, sendo necessária a caracterização sistemática dos agregados produzidos, buscando evitar a sua utilização em aplicações que possam comprometer o desempenho do material e prejudicar a aceitação da sociedade ou do meio técnico sobre o uso do agregado reciclado (CARNEIRO et al, 2001).

3.1 Beneficiamento dos agregados reciclados

A reciclagem da fração mineral dos resíduos de construção e demolição, basicamente, envolve as seguintes etapas (CARRIJO, 2005):

- a) britagem, que reduz as partículas por meio de ação mecânica externa como força de compressão (britagem por mandíbulas) ou impacto (britagem por impacto);
- b) peneiramento, utilizado para separar as partículas por seus tamanhos, podendo ser utilizado também classificadores que separam as partículas leves e finas (<0,15 mm) dos agregados reciclados;
- c) catação, geralmente manual e visual, que separa a fração mineral da não-mineral (retirada de contaminantes) e também a mineral em suas diferentes espécies, podendo esta ser realizada antes ou após a britagem.

Para a viabilização destas etapas são necessários diversos equipamentos, como pá carregadeira, alimentador vibratório, britador, eletroímã para separação das ferragens, peneiras, mecanismos transportadores e, eventualmente, sistemas para eliminação de contaminantes. No geral, os equipamentos necessários para a instalação de uma usina de reciclagem são similares aos utilizados na produção de agregados naturais (Figura 4).

Figura 4 – Produção de agregados reciclados.



Fonte: adaptado de Sim e Park (2011).

O número de micropartículas soltas entre os grãos do agregado reciclado e o surgimento de microfissuras em sua superfície oriundas do processo de britagem são efeitos que prejudicam e comprometem o desempenho dos mesmos (KATZ, 2004).

Concreto reciclado a partir da britagem de pavimentos de concreto e estruturas massivas pode vir a ser uma fonte economicamente viável de agregado onde há escassez de agregado de boa qualidade e quando o custo de disposição do entulho de concreto é elevado (MEHTA; MONTEIRO, 2008). Estes autores citam como exemplo o caso do *Michigan State Department of Transportation* que reciclou 9 km de pavimento de concreto deteriorado e usou o agregado graúdo produzido da reciclagem na construção do novo pavimento com custo menor do que se apenas agregado novo tivesse sido usado.

Leite (2001) acredita que, se forem computados os valores gastos no gerenciamento dos resíduos, a menor velocidade de esgotamento dos aterros sanitários ou de inertes, os menores gastos com transporte, entre outros, a economia conseguida com a reciclagem é ainda maior. Além disso, pode haver um barateamento dos insumos básicos de construção (areia e brita).

Os agregados miúdos e graúdos provenientes da reciclagem de RCC já são perfeitamente utilizados em elementos que não requerem função estrutural, tais como os exemplos citados abaixo (KARPINSKI et al, 2009):

- a) aterramento de valas e reconstituição de terreno;
- b) execução de estacas ou sapatas para muros com pequena cargas;
- c) lastro e contrapiso em áreas comuns externas e passeio público;
- d) contrapiso e piso em abrigo de automóveis de passeio;
- e) contrapiso em ambientes internos nas unidades habitacionais;
- f) contrapiso ou enchimento em casa de máquinas e áreas comuns internas;
- g) sistema de drenagem em estacionamentos, poços de elevador e jardineiras;
- h) vergas e pequenas colunas de concreto com baixa solicitação;
- i) assentamento de blocos e tijolos;
- j) enchimentos, em geral, em alvenarias, lajes desniveladas e escadarias;
- k) chumbamento das instalações elétricas, hidráulicas e de telefonia;
- l) chumbamento de batentes, contramarcos e esquadrias;
- m) revestimentos internos e externos em alvenarias.

Faz-se necessário, portanto, o aprofundamento de estudos que englobem o uso destes materiais alternativos em elementos com função estrutural, considerando, por exemplo, a variabilidade de sua composição e os teores de substituição dos agregados naturais.

3.2 Características dos agregados reciclados

Para que os concretos com agregados reciclados apresentem qualidade similar a de um concreto apenas com agregados naturais é imprescindível conhecer as características físicas e químicas deste tipo de agregado e o seu comportamento dentro do concreto. Quiçá estas ações possam dirimir o receio do uso deste agregado pelo meio técnico e contribuir decisivamente para a valorização do resíduo reciclado na própria construção civil.

As características dos agregados reciclados que necessitam ser avaliadas para otimização das propriedades dos concretos são a granulometria, a forma e textura das partículas, a massa unitária, a massa específica, a absorção, o teor de material fino e a resistência à compressão (LEITE, 2001; TENÓRIO, 2007).

A granulometria do agregado reciclado tende a ser menos contínua do que a do natural, tanto para o miúdo como para o graúdo, devido à dificuldade de controle durante o processo de britagem. Além disso, obtém-se um maior teor de partículas de diâmetro inferior a 0,15 mm, especialmente quando é efetuada a britagem para obtenção do agregado miúdo. O tipo de britagem também condiciona a forma e a textura das partículas (LOVATO, 2007).

Diversos autores acreditam que as características do agregado reciclado estão diretamente relacionadas com o seu processo de produção. Por exemplo, o tipo de britador influencia na qualidade final do agregado reciclado, notadamente na granulometria, na forma e na textura das partículas (CABRAL, 2007; LEITE, 2001; CARRIJO, 2005; LOVATO, 2007; CAVALCANTI et al, 2001). De maneira geral, as principais características do agregado reciclado afetadas são a composição, o teor de impurezas, a granulometria, a forma e resistência (LIMA, 1999).

No uso do britador de impacto, por exemplo, a ruptura das partículas ocorre exatamente nas linhas naturais de ruptura, trazendo como consequências melhores características mecânicas do agregado produzido. Contudo, este equipamento tem maior desgaste e manutenção notadamente mais cara do que o britador de mandíbulas, o que dificulta o seu uso em usinas de reciclagem (LIMA, 1999).

Quanto à massa unitária e à massa específica, sabe-se que estas serão inferiores para o agregado reciclado em comparação ao natural porque o primeiro possui maiores índices de vazios advindos da composição original. Por esta mesma razão, o valor de absorção do reciclado normalmente é superior ao do natural (CARRIJO, 2005).

Tratando-se de agregado reciclado exclusivamente de concreto, a argamassa de origem pode influenciar na aderência da matriz de cimento com este tipo de agregado quando se produz concreto, podendo interferir na resistência do concreto. Além disso, esta argamassa de origem remanescente da trituração do agregado reciclado agirá como material fino no concreto novo e afetará sua trabalhabilidade. Para o estudo de dosagem deve-se considerar esta influência (GONÇALVES, 2001).

Chiu (2006) explica que o agregado reciclado tende a ser mais áspero e com maior área superficial do que o agregado natural (este mais liso e arredondado). Isso afeta muito a qualidade do concreto. Os agregados naturais podem se compactar mais intimamente, resultando concreto com maior resistência à compressão e menor absorção de água. Já as partículas dos agregados reciclados tendem a não se encaixar tão bem deixando mais vazios no compósito, o que resulta em maior absorção de água.

Os requisitos gerais impostos pela NBR 15.116 (ABNT, 2004) aos agregados reciclados destinados ao preparo de concreto sem função estrutural estão sintetizados na Tabela 4. Enquanto para o agregado graúdo reciclado (de concreto e misto) o teor máximo de material passante na peneira #75 μ m é 10%, a NBR 7.211 (ABNT, 2005) que estabelece os requisitos dos agregados naturais para concreto indica um teor máximo de 1%. Já o teor máximo desta propriedade para o agregado miúdo natural é 5%, segundo a NBR 7.211

(ABNT, 2005), e para os agregados reciclados de concreto e misto é 15% e 20%, respectivamente (Tabela 4).

Tabela 4 – Requisitos gerais para agregados reciclados em concreto sem função estrutural.

Propriedades	Agregado reciclado			
	ARC		ARM	
	Gr	Mi	Gr	Mi
Fragmentos à base de cimento e rocha (%)	≥ 90	-	≥ 90	-
Absorção de água (%)	≤ 7	≤ 12	≤ 12	≤ 17
Material passante na #75µm (%)	≤ 10	≤ 15	≤ 10	≤ 20
Teor máx. de cloreto em relação à M.A.R. (%)			1	
Teor máx. de sulfatos em relação à M.A.R. (%)			1	
Teor máx. de torrões de argila em relação à M.A.R. (%)			2	
Teor total máx de contaminante em relação à M.A.R. (%)			3	

Gr - graúdo; Mi - miúdo; M.A.R - massa agregado reciclado
 Fonte: NBR 15.116 (ABNT, 2004).

É necessário fazer uma ressalva quanto às características dos agregados reciclados: a possibilidade da presença de faces polidas em materiais cerâmicos, como pisos e azulejos, pode interferir negativamente na resistência à compressão do concreto. Assim, sua viabilidade é condicionada ao uso como agregado para concreto não estrutural, conforme indica a NBR 15.116 (ABNT, 2004), em substituição parcial aos agregados convencionais.

Em síntese, as características dos agregados reciclados que mais os diferenciam dos agregados naturais são a heterogeneidade, a resistência à compressão e a porosidade. Essa diferenciação acaba por afetar algumas propriedades dos concretos produzidos com estes agregados reciclados, tais como a trabalhabilidade, as resistências à compressão e à tração, a absorção de água e o módulo de elasticidade.

4 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

4.1 Introdução

O guia europeu de recomendações para a especificação, o uso e a produção do Concreto Autoadensável (CAA) (*European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*) (ERMCO, 2005) define o concreto autoadensável como um concreto inovador que não necessita de vibração para o adensamento e compactação, sendo capaz de fluir sob o seu próprio peso, enchendo completamente a fôrma e alcançando compactação completa, mesmo na presença de alta taxa de armadura, tal como exemplificado na Figura 5. Já o CAA no estado endurecido é um concreto denso, homogêneo e tem as mesmas propriedades físico-químicas e de durabilidade de um concreto vibrado tradicional.

Figura 5 – Aplicação do CAA na indústria de pré-fabricados.



Fonte: ERMCO (2005).

Em face de o concreto autoadensável ter sido desenvolvido praticamente na mesma época em que o Concreto de Alto Desempenho (CAD) foi classificado como um concreto cuja característica principal é a baixa relação a/c , o termo alto desempenho passou a ser destinado aos concretos com elevada durabilidade. Tendo em vista que a durabilidade é uma característica forte do CAA no estado endurecido e a autoadensabilidade no estado fresco, Okamura e Ouchi (2003) passaram a classificá-lo como um concreto autoadensável de alto desempenho.

Para Ozawa, Sakata e Okamura (1995) o concreto, então denominado de concreto autoadensável de alto desempenho, desenvolvido na Universidade de Tokyo, é caracterizado como segue: no estado fresco, ele não apresenta apenas autoadensabilidade, mas também suficiente fluidez, resistência à segregação e coesão, permitindo a passagem pelas armaduras sem bloqueio ou segregação. Nas idades iniciais, ele gera limitado calor devido à hidratação e sua retração por endurecimento e secagem também são limitadas, fazendo com que os defeitos iniciais sejam reduzidos. Depois de endurecido, ele apresenta microestrutura densa e alta resistência aos íons cloretos e ao gás dióxido de carbono.

Quanto aos materiais empregados na produção do CAA, usam-se os mesmos empregados nos concretos convencionais. Para se apontarem as possíveis maiores diferenças, na composição do CAA empregam-se mais materiais finos do que no concreto convencional e aditivos dispersantes de grande eficiência, conhecidos como superplastificante de terceira geração. Pode, ainda, haver a necessidade de aumentar a viscosidade da pasta do concreto empregando-se, por vezes, aditivo modificador de viscosidade (REPETTE, 2011).

Estes aditivos modificadores de viscosidade e as adições minerais conferem elevada resistência à segregação do CAA, apesar da alta fluidez ou deformabilidade no estado fresco, pois tendem a aumentar a coesão da mistura e evitar a segregação do agregado graúdo (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

As adições minerais, além de responsáveis pela resistência à segregação da mistura, podem desempenhar um papel importante para a resistência e durabilidade do concreto, tanto física quanto quimicamente (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Neste contexto, os autores classificam as adições minerais, de acordo com sua ação físico-química, em quimicamente ativas, tais como a cinza volante, a sílica ativa e a cinza de casca de arroz; e sem atividade química, tais como o calcário, a areia fina e o pó granítico.

O uso dos aditivos modificadores de viscosidade visa melhorar a resistência à segregação quando há falta de materiais finos ou objetivando corrigir as composições cujo suprimento de materiais constituintes é muito variável, em particular quanto à forma e distribuição granulométrica dos agregados miúdos e quanto à inconstância na quantidade de água empregada na fabricação do CAA, conforme sinaliza Repette (2011).

Domone (2006), ao realizar uma análise de 11 anos de estudos de caso com o CAA, verificou que o conteúdo de agregado graúdo deve ser suficientemente baixo para permitir que as partículas do agregado, individualmente, sejam lubrificadas por uma camada de pasta/argamassa, aumentando assim a fluidez com redução do risco de colmatação dos

agregados e, portanto, de bloqueio do concreto quando for passar por aberturas estreitas, ou seja, aumentando a habilidade passante.

Tutikian (2007) ressalta que o CAA só é diferente do convencional até que a mistura passe do estado fresco para o endurecido e, a partir daí, suas propriedades mecânicas e de durabilidade serão o efeito da proporção dos materiais constituintes.

Quanto à difusão da utilização do CAA, Cavalcanti (2006) afirma que vários países já adotaram esta tecnologia, principalmente o Japão e países da Europa. No Brasil, apesar de alguns questionamentos de ordem econômica, a utilização do CAA vem crescendo exponencialmente tanto para a produção de estruturas complexas e obras com maior rigor de acabamento como para peças pré-fabricadas (LISBÔA, 2004).

Acredita-se que, mesmo que o custo da produção do CAA seja efetivamente superior ao convencional, outros fatores tornam a utilização deste tipo de concreto mais barata no cálculo final dos custos, como a redução de mão-de-obra necessária para a concretagem, a rapidez na execução do serviço, a menor quantidade de equipamentos necessários, a não-necessidade de mão-de-obra especializada, apenas para citar alguns (CAMARGOS, 2002).

Alencar (2008) frisa que esta tecnologia acelera o ritmo da concretagem, podendo haver um ganho de tempo da ordem de 20% a 25%.

No ano de 2005, quando o CAA ainda era uma novidade tecnológica no Brasil, Geyer (2005) desenvolveu um trabalho de comparação dos custos da utilização de concreto autoadensável e concreto convencional em estruturas de edifícios. Segundo o autor, a ideia era apenas realizar uma análise comparativa entre os dois materiais e verificar até que ponto o preço do autoadensável desestimularia o seu uso em edificações. No entanto, o pesquisador verificou que, a partir das mesmas condições oferecidas para o uso de concreto convencional com resistência mecânica característica de 20 MPa, a aplicação de CAA solucionava os problemas de aparecimento de ninhos de concretagem ou acabamento não satisfatório. Além disso, houve redução da mão-de-obra, desmobilização de equipamentos e menor consumo de energia elétrica. Por ter maior trabalhabilidade, o CAA aumentou a velocidade de execução da estrutura. Para o concreto convencional levou-se em média quatro horas para concretar uma laje e com o autoadensável esse tempo caiu para uma hora e meia.

No entanto, o custo final da obra ficou 8% acima daquele que seria dispensado com os métodos tradicionais. Constatou-se que, com resistência de 20 MPa, esse material não tinha boa viabilidade econômica por causa do custo dos aditivos. Segundo o referido autor, para concretos com resistência acima de 25 MPa, com maior quantidade de cimento e menor consumo de aditivos, pode-se observar uma melhor relação custo-benefício.

De acordo com a pesquisa de Geyer (2005), com resistência de 40 MPa a diferença de preço entre os concretos cairia para 1,8% e o custo final da estrutura ficaria, aproximadamente, 5% mais vantajoso para o uso do CAA. O pesquisador acreditava que devido a tendência de adoção da resistência característica igual a 30 MPa para adequação à NBR 6.118 (ABNT, 2007), haveria um favorecimento para o uso do CAA, além de muitos aditivos não serem mais importados e sim fabricados no Brasil e com preços mais acessíveis. De fato, o que se observa hoje é uma aceitação maior por parte das empresas para a aplicação do CAA.

Levando em consideração que, via de regra, as obras da construção civil não obedecem ao cronograma físico previamente estabelecido, o uso do CAA pode se tornar uma ferramenta essencial para as empresas que normalmente têm dificuldades de cumprir seus prazos ou àquelas que tenham prazo reduzido. A título de exemplo, a revista Guia da Construção (2010) apresenta o estudo de caso que faz um comparativo entre o uso do concreto convencional e do concreto autoadensável num empreendimento. Notou-se que, embora o preço do material favorecesse o uso do primeiro, a economia de tempo, pessoal e fôrmas levou a construtora a optar pelo uso do CAA. Estimou-se que, com a diminuição do tempo de concretagem, a construtora tenha encurtado em cerca de um mês o cronograma físico do empreendimento.

Neste exemplo, o construtor reconheceu que a simplificação das etapas do lançamento permitiu também à empresa diminuir a quantidade de funcionários envolvidos no serviço e as horas de trabalho necessárias. Paralelamente, o menor número de funcionários envolvidos na concretagem reduziu os riscos de amassamento e deslocamento das ferragens no momento da execução dos serviços, assegurando maior qualidade à laje. Outra vantagem verificada foi a economia de fôrmas, pois, mesmo aplicando desmoldantes em ambos os sistemas comparados, durante a desforma as fôrmas se soltam com mais facilidade quando se usa concreto autoadensável, já que as superfícies ficam com acabamento mais liso. Além disso, durante o lançamento, o esforço em cima das fôrmas de laje foi menor: há menos movimento, menos trabalhadores e não há vibração. Isso ajudou a preservar as fôrmas e aumentar o seu reaproveitamento. O construtor acrescenta, ainda, que o concreto autoadensável preencheu melhor os espaços vazios na hora da concretagem e reduziu imperfeições nas peças estruturais depois de prontas.

Silva Filho (2012), em reportagem sobre o futuro da construção, acredita que o concreto autoadensável será o componente de praxe e deverá virar o novo "convencional".

4.2 Requisitos do CAA no estado fresco

O CAA difere do concreto convencional no sentido de suas propriedades no estado fresco serem vitais para determinar se é satisfatória ou não a sua aplicação em determinado projeto. Os diferentes aspectos da trabalhabilidade que controlam a sua capacidade de preenchimento, a sua habilidade passante e a resistência à segregação devem ser cuidadosamente estudados para assegurar que sua utilização seja aceitável (EFNARC, 2002).

O nível de fluidez do CAA é regulado basicamente pela dosagem de superplastificante. Assim, se a quantidade de superplastificante for baixa não será atingida a autoadensabilidade requerida para se caracterizar o concreto como autoadensável. Por outro lado, uma quantidade excessiva pode provocar o risco de segregação e de bloqueio. Esta tendência à segregação pode ser reduzida pelo uso de uma quantidade suficiente de material fino ou por um aditivo modificador de viscosidade. Também, o tempo em aberto do concreto, ou seja, o período durante o qual o CAA mantém as suas propriedades reológicas desejadas, é muito importante para alcançar bons resultados no lançamento do concreto. Este período pode ser ajustado pela seleção do tipo de superplastificante ou pelo uso combinado de retardadores. Os vários tipos de aditivos têm efeitos diferentes sobre o tempo aberto e podem ser empregados em função do tipo de cimento, tempo de transporte e lançamento do CAA (EFNARC, 2002).

Desde 2005 já existem publicações orientadoras sobre o CAA, tais como o documento “*European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use*”, publicado pela ERMCO² em conjunto com outras organizações europeias (BIBM³, CEMBUREAU⁴, EFCA⁵ e EFNARC⁶). No Brasil, em 2010, foi publicada a norma NBR 15.823 (ABNT, 2010) que detalha os critérios de aceitação do CAA para cada tipo de aplicação. Tal norma descreve cinco métodos de ensaio no estado fresco para aceitação do CAA em obra. Quais sejam (Figura 6):

- a) determinação do espalhamento e do tempo de escoamento pelo método do cone de Abrams;
- b) determinação da habilidade passante pelo método do anel J;

² ERMCO – *European Ready-mix Concrete Organization*

³ BIBM – *European Federation for Precast Concrete*

⁴ CEMBUREAU – *European Cement Association*

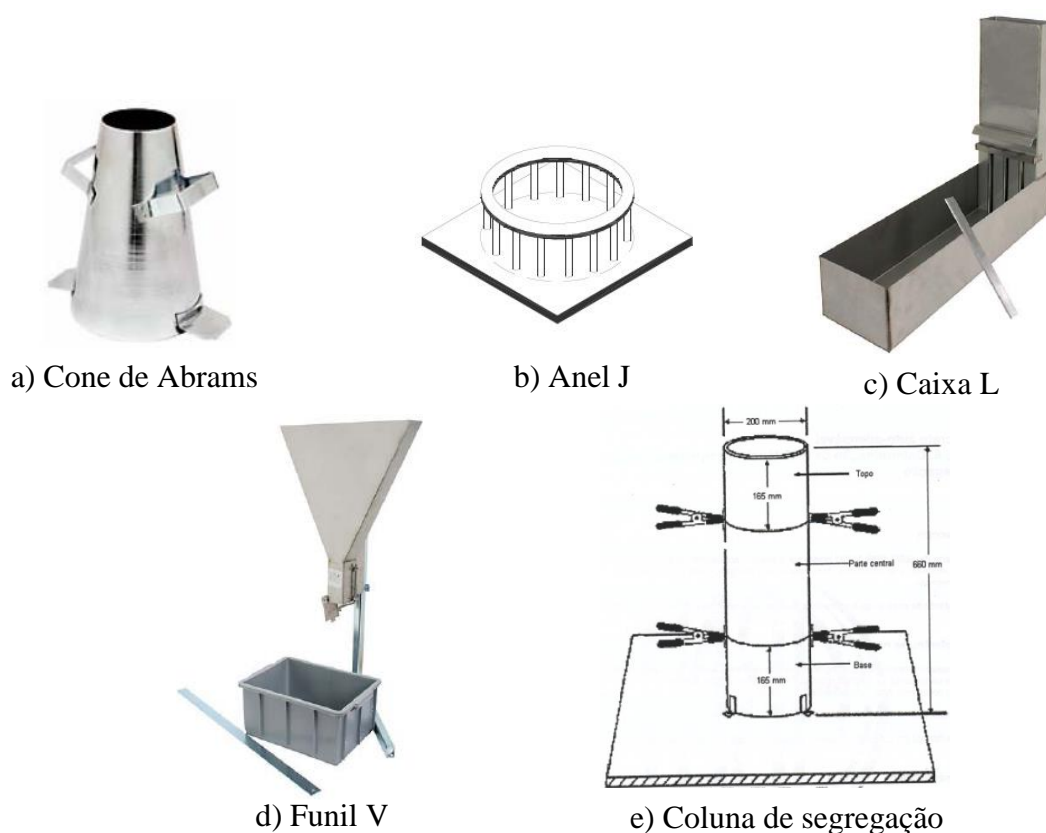
⁵ EFCA – *European Federation of Concrete Admixture Associations*

⁶ EFNARC – *European Federation of Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems*

- c) determinação da habilidade passante pelo método da caixa L;
- d) determinação da viscosidade pelo método do funil V;
- e) determinação da resistência à segregação pelo método da coluna de segregação.

O anexo A contém a classificação do CAA em função das propriedades no estado fresco e o anexo B contém os requisitos necessários para o CAA no estado fresco em função de sua aplicação requerida, ambos retirados da norma.

Figura 6 - Equipamentos utilizados na determinação das propriedades no estado fresco do CAA.

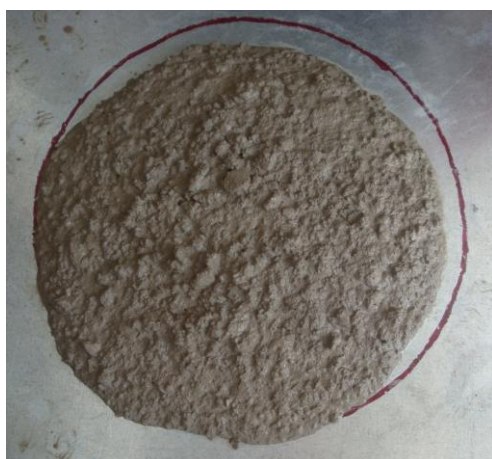


Fontes: a), b), c) e d) da autora, e) NBR 15.823 (ABNT, 2010).

A determinação do espalhamento e do tempo de escoamento pelo método do cone de Abrams, ou *slump flow test*, é imprescindível para avaliar quantitativamente a autocompactação do CAA. Pelo ensaio pode-se observar visualmente se o concreto está segregando ou não, conforme exemplificado na Figura 7. Espalhamentos muito pequenos, como o visualizado na Figura 7a, indicam que o concreto está pouco fluido, fazendo-se necessário fluidificar o material com água ou aditivos superplastificantes. Se a medida estiver elevada, como visualizado na Figura 7b, deve-se tornar o concreto mais coeso, porque estará

muito fluido e, provavelmente, segregando. O aspecto almejado do CAA após a execução do ensaio está ilustrado na Figura 7c, ou seja, sem pontos de segregação nas bordas, sem acúmulo de agregado graúdo no centro e apresentando coesão da mistura.

Figura 7 - Exemplo de análise visual do CAA após o ensaio de espalhamento pelo cone de Abrams.



a) CAA muito coeso.



b) CAA segregado.



c) CAA sem segregação e com boa coesão.

Fonte: a), b) e c) da autora.

A determinação da habilidade passante pelos métodos do anel J e da caixa L visa verificar se o concreto, sob a força de seu próprio peso, consegue passar por obstáculos, como armaduras, por exemplo, sem que ocorra bloqueio. Pode-se, ainda, verificar visualmente a ocorrência de segregação, como ilustrado na Figura 8. Se o agregado graúdo se separar da argamassa do concreto quando fluir completamente ou logo após passar pelas barras da caixa L ou do anel J significa que a mistura não está coesa suficiente, necessitando de ajustes

(Figura 8a). O aspecto almejado do CAA após a execução dos ensaios com a caixa L e com o anel J está ilustrado nas Figuras 8b e 8c, respectivamente.

O anel J mede a habilidade de passagem sob fluxo livre e é uma extensão ao método de ensaio com o cone de Abrams. A NBR 15.823-3 (ABNT, 2010) prescreve seu método de ensaio. Já a caixa L mede a habilidade de passagem sob fluxo confinado, cuja prescrição do método de ensaio é dada pela NBR 15.823-4 (ABNT, 2010).

Figura 8 - Exemplo de análise visual do CAA após os ensaios de habilidade passante pela caixa L e pelo anel J.



a) CAA com bloqueio dos agregados.



b) CAA sem bloqueio na caixa L.



c) CAA sem bloqueio no anel J.

Fonte: a), b) e c) da autora.

A determinação da viscosidade do concreto pelo método do funil V visa simular a capacidade de passagem do CAA (fluidez) através do estreitamento de uma seção, apenas sob a ação de seu próprio peso, sendo que este método é mais apropriado para CAA produzidos

com agregados graúdos de diâmetro máximo de 20 mm, segundo a NBR 15.823 (ABNT, 2010). O ensaio também é utilizado para verificar a presença de segregação, quando o concreto é impedido de escorrer pela saída do funil.

EFNARC (2002) informa que o cone invertido faz com que qualquer tendência do concreto ao bloqueio se reflita no resultado, tal como, por exemplo, a grande quantidade de agregado graúdo. O tempo de fluxo elevado também pode ser associado a uma escassa deformabilidade devido à alta viscosidade da pasta e ao elevado atrito entre as partículas.

A NBR 15.823-5 (ABNT, 2010) prescreve o método de ensaio para determinação da viscosidade do CAA pela medida do tempo de escoamento de uma massa de concreto pelo funil V.

Sabendo que a resistência à segregação significa que a distribuição dos agregados graúdos deve ser uniforme em todos os lugares e níveis, a determinação desta característica é realizada pelo método da coluna de segregação.

A NBR 15.823-6 (ABNT, 2010) prescreve o método de ensaio para determinação da resistência à segregação do CAA pela diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna de segregação. Contudo, por ser um ensaio bastante laborioso não é realizado nos canteiros de obra, sendo mais difundido nos laboratórios de pesquisa.

O ensaio do funil V e o ensaio de espalhamento com o cone de Abrams são os mais utilizados nos laboratórios e nos canteiros de obra para verificar a fluidez do concreto.

4.3 Metodologias de dosagem de CAA

Em termos gerais, pode-se dizer que existem duas filosofias de dosagem do CAA. A primeira se baseia no cálculo dos componentes do CAA para sua produção direta, tal como ocorre com o concreto convencional. A segunda se baseia no estudo da pasta (ou argamassa) separado do estudo dos materiais secos com produção de concretos-teste para definição do volume de pasta da mistura.

Para cada filosofia existe uma gama de metodologias de dosagem propostas por pesquisadores nacionais e internacionais. Não há uma metodologia que seja melhor ou pior, mas sim aquela que corresponde mais adequadamente às características dos materiais locais.

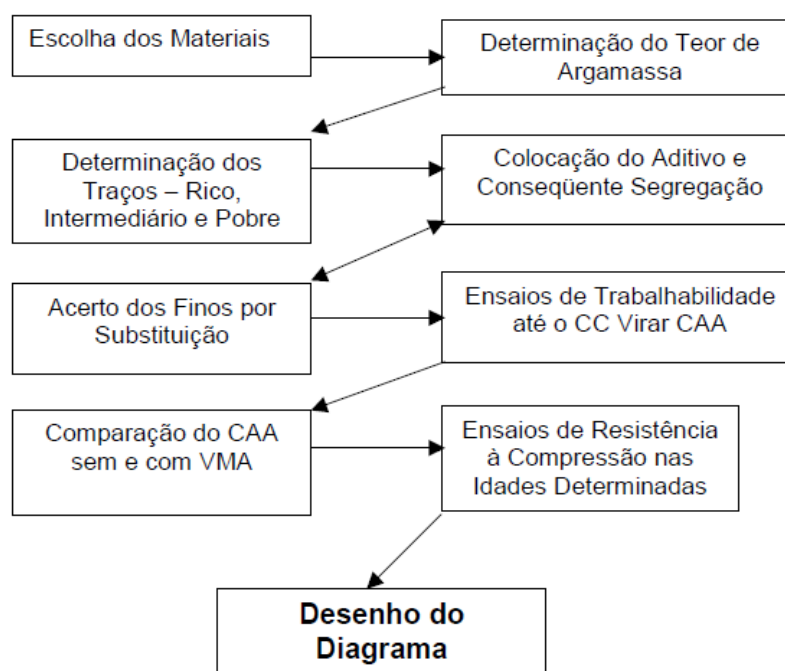
Abaixo foram comentadas algumas metodologias de dosagem para cada filosofia, incluindo a metodologia adotada na pesquisa.

4.3.1 Filosofia de dosagem com determinação da pasta e agregados em conjunto

É uma metodologia experimental e prática que possui passos a serem seguidos para alcançar a mistura de três traços de concreto e poder desenhar o diagrama de dosagem.

Nesta proposta, o teor de argamassa obtido para um concreto convencional é mantido constante e seus componentes são alterados para que se torne autoadensável a partir da incorporação de aditivo superplastificante e materiais finos. Assim, a dosagem é iniciada apenas com cimento, agregado miúdo, agregado graúdo e água; posteriormente, são adicionados os aditivos e os finos. À medida que se realizam os ajustes são efetuados os ensaios de trabalhabilidade do CAA para conferência das propriedades de autoadensabilidade do novo concreto. Após a obtenção do CAA, são moldados corpos-de-prova e realizados ensaios de resistência à compressão axial para compor o diagrama de dosagem. Um método de dosagem que segue esta filosofia é o de Tutikian (2004), conforme resumido na Figura 9.

Figura 9 – Passo-a-passo proposto por Tutikian (2004) para dosagem do CAA.



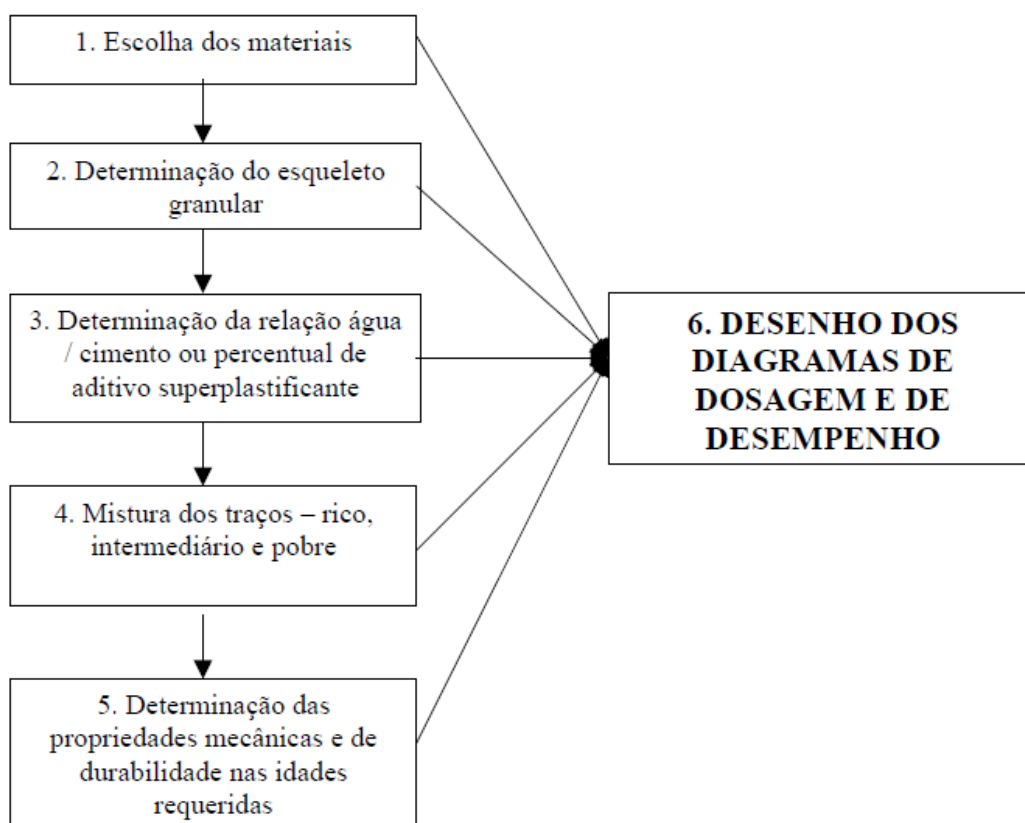
Fonte: Tutikian (2004).

Após ser testado e utilizado em aplicações reais, observou-se que alguns pontos do método de Tutikian (2004) poderiam ser melhorados, como o teor de argamassa ideal, que pode ser considerado baixo em algumas aplicações para que a mistura flua e passe por

obstáculos facilmente; e o fato de o método não contemplar o estudo prévio dos agregados, fazendo com que se determine aleatoriamente a proporção entre duas classes de agregados graúdos. Por isso, outro método foi proposto e ficou conhecido como Tutikian e Dal Molin (2007).

Este novo método, baseado no procedimento de Tutikian (2004), envolve a escolha dos materiais, a determinação do empacotamento granular máximo, o acerto do teor de aditivo e da relação água/cimento, o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP e o teor de argamassa variável, além de incluir a curva de custo no diagrama de dosagem e o diagrama de desempenho. O passo-a-passo do método Tutikian e Dal Molin (2007) está resumido na Figura 10.

Figura 10 – Passo-a-passo proposto por Tutikian e Dal Molin (2007) para dosagem do CAA.



Fonte: Tutikian (2007).

Outro método de dosagem baseado no cálculo direto dos componentes foi proposto por Su, Hsu e Chai (2001). A consideração principal deste método é preencher os vazios da estrutura dos agregados dispostos no estado solto com pasta de cimento. Para isso,

os dados primordiais para o cálculo da dosagem são as massas unitárias no estado solto e as massas específicas de todos os agregados. De acordo com os autores, geralmente o volume ocupado pelo agregado é cerca de 52% a 58%, ou seja, os vazios deixados pelo agregado solto é cerca de 42% a 48% e devem ser ocupados pela pasta.

A resistência do CAA é fornecida pela interface entre os agregados e a pasta de cimento no estado endurecido, enquanto que a trabalhabilidade do concreto é alcançada pela ligação da pasta no estado fresco. Portanto, o conteúdo de agregados miúdos e graúdos, ligantes e a mistura de água e aditivo superplastificante são os principais fatores que influenciam nas propriedades do CAA. De acordo com Su, Hsu e Chai (2001), o que se precisa fazer é selecionar os materiais qualificados, efetuar os cálculos, realizar as misturas-testes e fazer alguns ajustes para se obter um CAA com boa fluidez e resistência à segregação pela capacidade de auto-compactação.

4.3.2 Filosofia de dosagem com estudo da pasta ou argamassa em separado do estudo do esqueleto granular

Esta filosofia visa realizar testes iniciais em pasta e argamassa a fim de examinar as propriedades e compatibilidade entre o aditivo superplastificante, o cimento, os agregados finos e os materiais pozolânicos para posterior produção da mistura-teste do CAA. Ela traz como vantagem evitar a repetição do mesmo tipo de teste de controle de qualidade em concreto, o que consome tempo e trabalho. Esta filosofia foi a base do método de dosagem proposto por Okamura, Maekawa e Ozawa (1993).

Gomes e Barros (2009) relatam que os procedimentos aplicados no método de Okamura e seus colegas para determinação das dosagens dos componentes da mistura podem ser descritos como segue:

- a) fixar os volumes de agregados;
- b) assumir a relação água/materiais finos (cimento, pozolanas, fíler), em volume, de 0,9 a 1,0, dependendo das propriedades dos materiais finos;
- c) determinar a dosagem de superplastificante e a relação água/materiais finos, em argamassa, que atendam às propriedades de fluidez e viscosidade;
- d) testar a autoadensabilidade do concreto, uma vez definida a proporção da mistura, em ensaios de segregação, espalhamento e funil V.

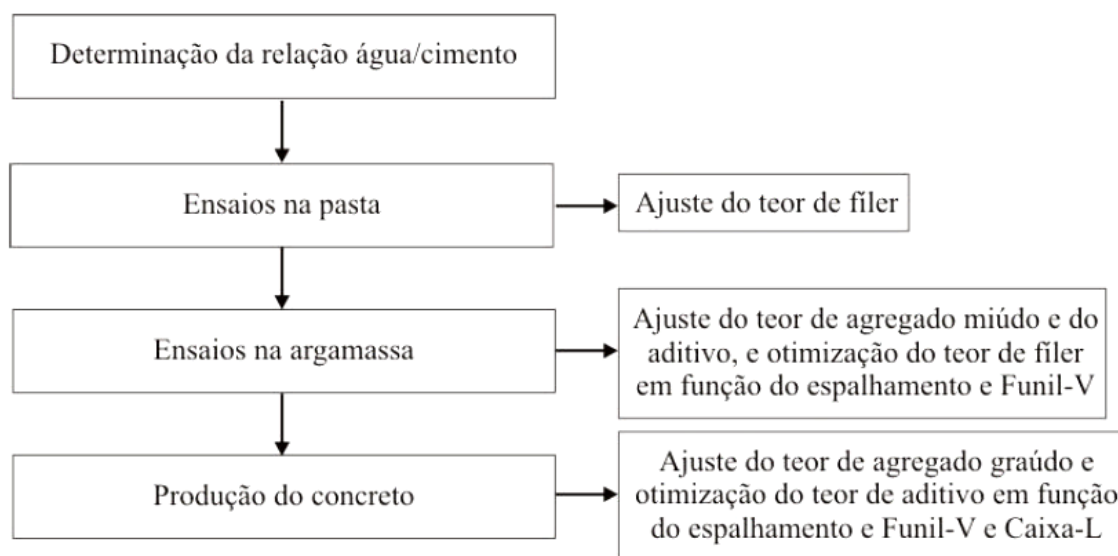
Um método de dosagem com base nesta filosofia também foi proposto por Repette-Melo (2005), visando o estabelecimento de composições de CAA para resistências à

compressão variando de 20 MPa a 45 MPa. Neste método, a relação água/cimento é determinada pela sua interrelação com as resistências conhecidas para o cimento utilizado na mistura; já a relação fíler/cimento é determinada em misturas de pasta produzidas a partir da relação água/cimento anteriormente definida, a fim de que não haja indícios de segregação ou exsudação nas misturas.

Determina-se, então, a relação volumétrica agregado miúdo/argamassa pelas medidas de espalhamento e fluidez nas argamassas, variando-se o teor de aditivo. Após a definição do teor de agregado miúdo, o teor de fíler nas argamassas é aumentado com base no valor inicial definido na pasta e, a partir da incorporação de aditivo, determina-se a quantidade de fíler ideal para cada relação água/cimento, avaliando-se a economia e a autocompactação das misturas.

Por fim, o volume de agregado graúdo é definido pelo volume total de concreto, de forma a se obterem misturas adequadas em função dos ensaios de espalhamento, fluidez e caixa L, além de se verificar sua estabilidade e a distribuição dos agregados. Com estes mesmos ensaios, faz-se o ajuste final do teor de aditivo no concreto (MELO, 2005). O passo-a-passo do método Repette-Melo (2005) está resumido na Figura 11.

Figura 11 – Passo-a-passo proposto por Repette-Melo (2005) para dosagem do CAA.



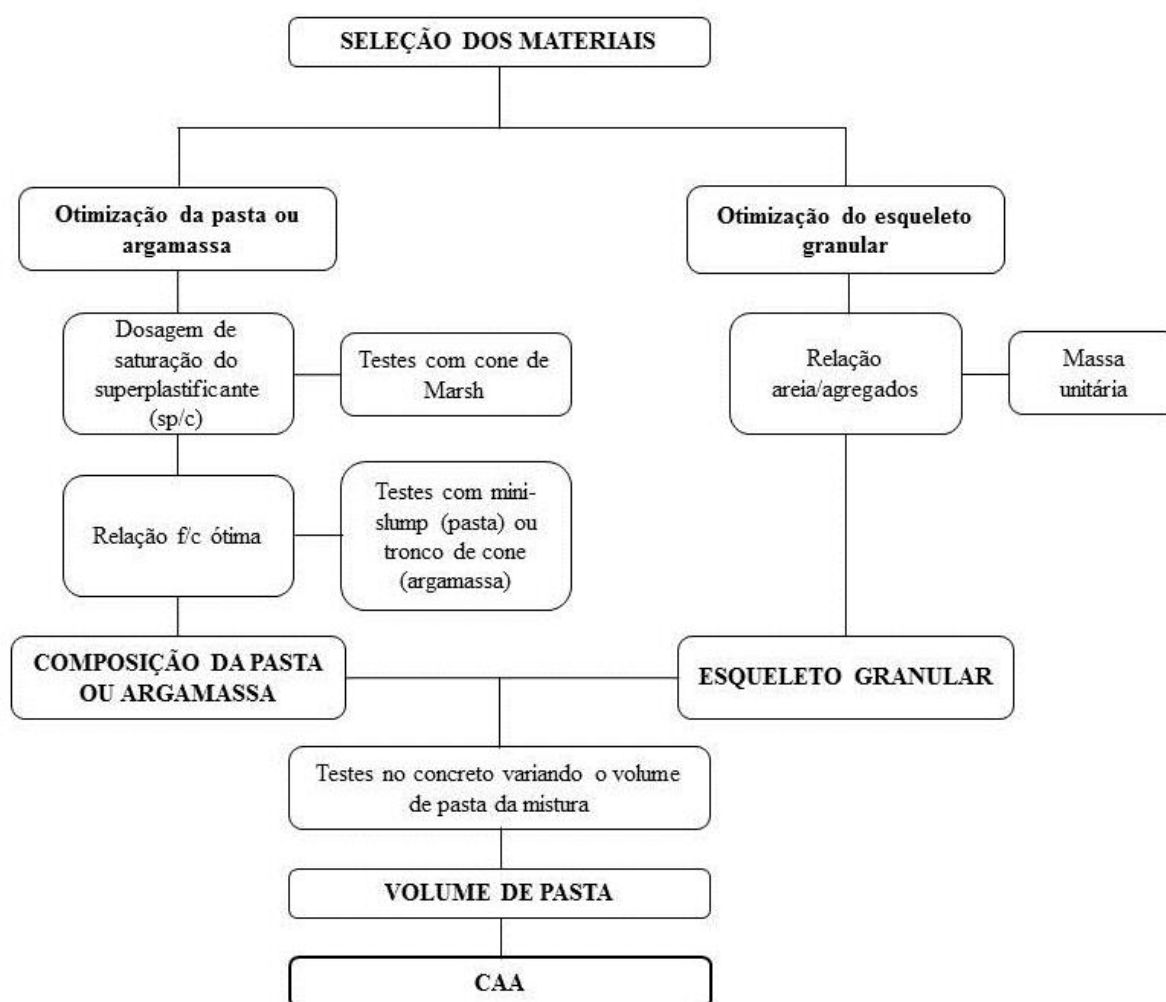
Fonte: Melo (2005).

Um método de dosagem similar a de Okamura, Maekawa e Ozawa (1993) foi proposto por Gomes (2002) para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência. Assume-se que o concreto pode ser obtido otimizando a composição da pasta (ou argamassa)

e o esqueleto granular separadamente. A composição final do concreto é obtida buscando-se o conteúdo de pasta necessário para que o concreto apresente as características de um CAA (GOMES; BARROS, 2009).

Desta forma, o método é executado em três fases: obtenção da composição da pasta (ou argamassa), determinação da proporção de mistura dos agregados e seleção do volume de pasta da mistura. O passo-a-passo do método de dosagem com os ensaios necessários ao longo do estudo está resumido na Figura 12.

Figura 12 – Passo-a-passo proposto por Gomes (2002) para a dosagem do CAA.



Fonte: adaptado de Gomes; Barros (2009).

Um vez que este foi o método utilizado na pesquisa, descreveu-se, a seguir, o desenvolvimento das fases para a obtenção da dosagem do CAA com seus respectivos métodos de ensaio.

a) Estudo da composição da pasta ou argamassa

- *Determinação da quantidade de materiais da argamassa e procedimento de preparo da mesma*

O estudo da pasta ou argamassa consiste na determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante utilizando o cone de Marsh descrito na norma europeia EN 445 (1996) para teste de fluidez de graute; e na posterior determinação da porcentagem ótima de fíler (ou pozolana) utilizando o *mini-slump*, um molde em forma de tronco de cone que é uma miniatura do ensaio do abatimento (*slump test*), no caso da pasta, e o tronco de cone da mesa de consistência exposto na norma brasileira NBR 7.215 (ABNT, 1996) para teste do índice de consistência normal do cimento Portland, no caso da argamassa.

O autor da metodologia ressalta que para relações água/cimento muito baixas é mais aconselhável fazer o estudo da argamassa (traço 1:2), ao invés da pasta, para obter a dosagem de saturação do aditivo superplastificante sólido (sp/c). Assim, visando à compreensão da metodologia exposta abaixo, deve-se eliminar o cálculo da areia, caso o estudo realizado seja da pasta.

O primeiro passo consiste na dosagem dos materiais componentes da argamassa: cimento, fíler (ou pozolana), areia, água e aditivo superplastificante. O cálculo da massa de cimento está representado pela Equação 1.

$$C = \frac{V_{arg}}{\frac{2}{\rho_{ar}} + \frac{1}{\rho_c} + \frac{a/c}{\rho_a} + \frac{f/c}{\rho_f} + \frac{(sp/c) * (100/T_{sp})}{\rho_{sp}} - \frac{(sp/c) * [(100/T_{sp}) - 1]}{\rho_a}} \quad (1)$$

Onde: C = massa do cimento (kg); V_{arg} = volume de argamassa (L); ρ_{ar} = massa específica da areia (kg/m³); ρ_c = massa específica do cimento (kg/m³); a/c = relação água/cimento (adimensional); ρ_a = massa específica da água (kg/m³); f/c = relação fíler/cimento (adimensional); ρ_f = massa específica do fíler (kg/m³); sp/c = relação superplastificante sólido/cimento (adimensional); T_{sp} = teor de sólidos do superplastificante (%); ρ_{sp} = massa específica do superplastificante (kg/m³).

A partir da massa de cimento definem-se as massas do fíler (ou pozolana), da areia, da água e do aditivo superplastificante pelas equações 2 a 9, sucessivamente:

$$P_f = f/c * C \quad (2)$$

$$P_{ar} = 2 * C \text{ (para areia seca)} \quad (3)$$

$$P_{arc} = P_{ar} * (1 + Har/100) \text{ (para areia úmida)} \quad (4)$$

$$P_a = a/c * C \quad (5)$$

$$P_{ac} = P_a - P_{asp} + [P_{ar} * (Aar - Har)/100] \quad (6)$$

$$P_{asp} = P_{sp} * [(100/Tsp) - 1] \quad (7)$$

$$P_{spl} = P_{sp} / (Tsp/100) \quad (8)$$

$$P_{sp} = sp/c * C \quad (9)$$

Onde: P_f = massa de fíler (kg); P_{ar} = massa de areia (kg); P_{arc} = massa de areia corrigida (kg); Har = umidade da areia (%); P_a = massa de água (kg); P_{ac} = massa de água corrigida (kg); P_{asp} = massa de água do superplastificante (kg); Aar = absorção da areia (%); P_{sp} = massa do superplastificante sólido (kg); P_{spl} = massa do superplastificante líquido (kg).

De posse das quantidades dos materiais, inicia-se a produção da argamassa. Gomes (2002) recomenda que esta produção siga as etapas detalhadas abaixo:

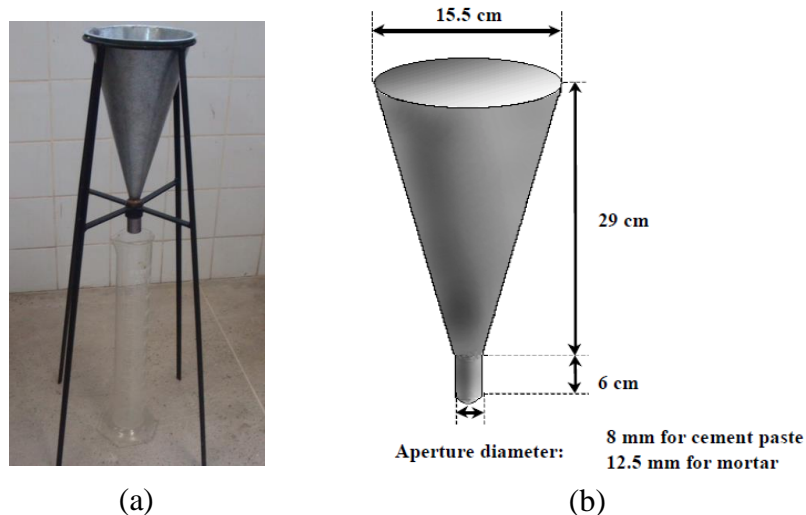
- a) adicionar areia e parcela de água no misturador, depois misturar na velocidade baixa por 30s;
- b) adicionar cimento e fíler, depois misturar na velocidade baixa por 60s;
- c) desligar o equipamento por 30s e limpar as bordas do copo;
- d) adicionar outra parcela de água e misturar em velocidade baixa por 60s;
- e) desligar o equipamento por 30s e limpar as bordas do copo;
- f) ligar o equipamento e adicionar o aditivo com o restante da água, depois misturar por 30s em velocidade baixa;
- g) mudar para a velocidade alta durante 150s.

▪ *Determinação do ponto de saturação do aditivo superplastificante*

O cone de Marsh utilizado no estudo do aditivo superplastificante consiste de um equipamento cônico invertido, produzido de metal ou plástico, com orifício superior

apresentando um diâmetro de 15,5 cm e o orifício inferior variando de 8 mm para estudo de pasta e 12,5 mm para estudo de argamassa, conforme proposta de Gomes (2002) (Figura 13).

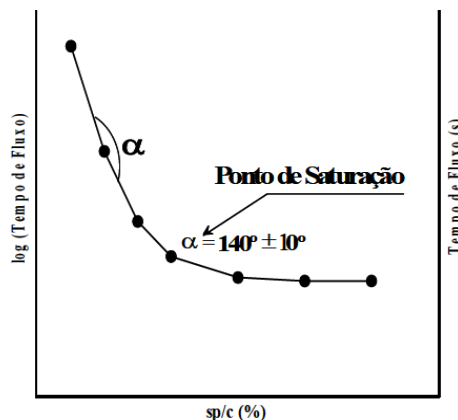
Figura 13 – (a) Cone de Marsh e (b) medidas do equipamento.



Fonte: a) da autora; b) Gomes (2002).

O método de ensaio para determinação da relação superplastificante sólido/cimento (sp/c) se baseia em adicionar 1 (um) litro de pasta ou argamassa no cone e medir o tempo (T) para que o material alcance a marca de 500 ml na proveta graduada. Então, variam-se apenas os teores de aditivo superplastificante repetidas vezes e mantêm-se fixas as quantidades dos demais componentes. Após, traça-se um gráfico $\log(T)$ versus sp/c para definição do ponto de saturação do superplastificante (Figura 14), caracterizado como a porcentagem ótima de aditivo, que corresponde a um ângulo interno (α) de $140^\circ \pm 10^\circ$ na curva. O ponto de saturação indica que qualquer acréscimo de aditivo além deste valor não implica em melhoria nas características do material, mas sim na sua possível segregação.

Figura 14 – Gráfico $\log(T)$ versus sp/c para definição do ponto de saturação do superplastificante.

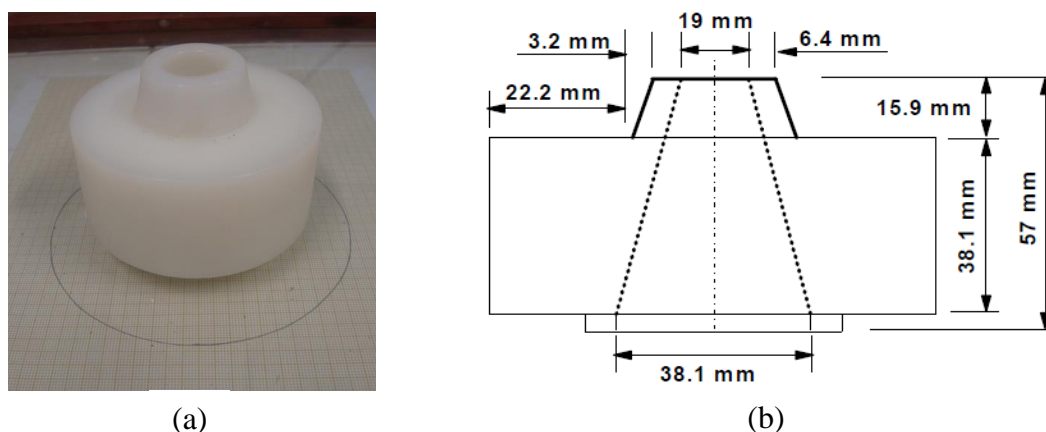


Fonte: Cavalcanti (2006).

- *Porcentagem ótima de fíler (ou pozolana)*

Para a determinação da porcentagem de fíler (f/c) ou pozolana ideal em pasta e em argamassa são utilizados equipamentos diferentes. No estudo da pasta, utiliza-se o *mini-slump* proposto por Kantro (1980) ilustrado na Figura 15. No ensaio, mede-se o diâmetro da extensão final da pasta, em paralelo com o tempo que ela leva para alcançar um diâmetro de 115 mm, denominado T_{115} . O ensaio pode ser realizado em diferentes pastas, cada uma com a relação f/c e sp/c correspondente ao ponto de saturação, já determinado anteriormente. A pasta com relação f/c adequada é aquela que atende aos seguintes requisitos: um diâmetro de extensão final de $180 \text{ mm} \pm 10 \text{ mm}$ e um tempo T_{115} no intervalo de 2 s a 3,5 s.

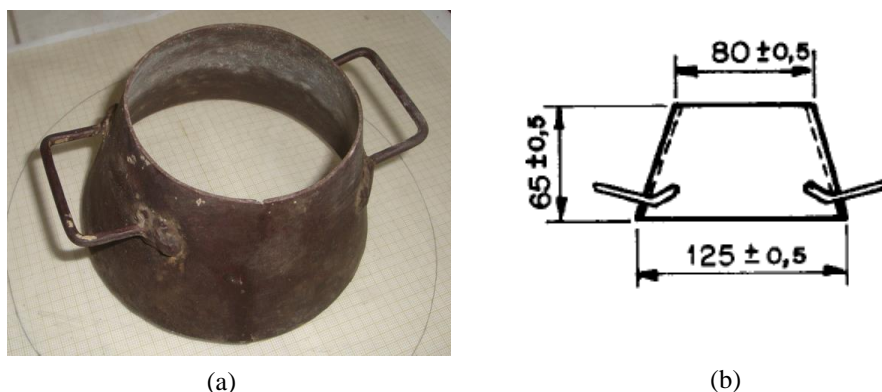
Figura 15 – (a) *Mini-slump* para o estudo da pasta e (b) medidas do equipamento.



Fonte: a) da autora; b) Gomes (2002).

No estudo da argamassa, utiliza-se o tronco de cone da mesa de consistência, que é um molde rígido de metal não corrosível e com as dimensões indicadas na Figura 16. O ensaio consiste em posicionar o tronco de cone úmido sobre uma placa de vidro lisa e úmida, preenchê-lo com a argamassa cuja quantidade de materiais já foi definida pelo ensaio com o cone de Marsh e levantar rapidamente o equipamento. Após cessar o fluxo da argamassa, medem-se dois diâmetros perpendiculares. A média ideal dos diâmetros deve obedecer a faixa de 200 mm a 300 mm, conforme preconiza o método. Este ensaio também pode ser realizado com diferentes argamassas contendo f/c e sp/c de saturação distintos, tal como no estudo da pasta.

Figura 16 – (a) Tronco de cone para o estudo da argamassa e (b) medidas do equipamento.



Fonte: a) da autora; b) NBR 7.215 (1996).

Durante o estudo da porcentagem de fíler ou pozolana é possível verificar a formação de pontos de segregação, especialmente nas bordas do círculo formado, que podem indicar possível segregação do CAA produzido com tais teores.

b) Estudo do esqueleto granular

A determinação do esqueleto granular consiste em definir a proporção de agregados que possua o menor índice de vazios pela realização do ensaio de massa unitária no estado solto, com posterior cálculo da massa específica e índice de vazios da mistura.

A determinação do menor índice de vazios permite uma redução no volume de pasta necessária para envolver os agregados e garantir a coesão e trabalhabilidade do CAA que, por suas características especiais, já demanda maior volume de pasta comparado a um concreto convencional.

Para isso, devem ser empacotados todos os agregados do CAA, dois a dois, em ordem decrescente de diâmetro das partículas. O empacotamento consiste em executar o ensaio de massa unitária no estado solto, de acordo com a NBR NM 45 (ABNT, 2006), com proporções diferentes entre uma dupla de agregados. De posse da massa unitária da mistura efetua-se o cálculo da massa específica e índice de vazios desta mistura por meio das Equações 10 e 11, respectivamente.

$$\gamma_{AB} = \frac{(\gamma_A * \%A) + (\gamma_B * \%B)}{100} \quad (10)$$

Onde: γ_{AB} é a massa específica da mistura de agregados (kg/m^3); γ_A e γ_B são as massas específicas dos agregados A e B, respectivamente (kg/m^3); e %A e %B são as porcentagens de agregados A e B, respectivamente, incorporadas na mistura.

$$\text{Vazios}_{AB} = \frac{\gamma_{AB} - \text{Munit}_{AB}}{\gamma_{AB}} * 100 \quad (11)$$

Onde: Vazios_{AB} é o índice de vazios da mistura de agregados (%) e Munit_{AB} é a massa unitária da mistura obtida pelo ensaio (kg/m^3).

De posse do menor índice de vazios da primeira dupla de agregados, efetua-se o empacotamento desta dupla com o agregado de granulometria subsequente menor e deve-se seguir os mesmos passos comentados anteriormente. Procede-se desta forma até que todos os agregados tenham sido empacotados. Ao final, obtém-se o proporcionamento dos materiais secos (agregados) componentes do CAA.

c) Estudo do volume de pasta da mistura

Conhecidas as proporções de agregados e as relações a/c, sp/c e f/c, procede-se a execução de CAA com diferentes volumes de pasta da mistura.

Gomes (2002) sugere que a produção dos concretos siga a sequência abaixo. O tempo total de mistura é de 4 ½ minutos, necessário para assegurar uma mistura homogênea.

- a) adicionar a areia, a brita e uma parcela de água na betoneira. Misturar por 30s;
- b) adicionar o cimento, o fíler (ou pozolana) e misturar por 30s;
- c) adicionar outra parcela da água e misturar por 90s;
- d) adicionar o superplastificante com o restante da água e misturar por 120s.

Efetua-se os ensaios preconizados na NBR 15.823 (ABNT, 2010) para avaliar as propriedades de cada mistura no estado fresco e definir aquela que apresente as características mais satisfatórias com o menor volume de pasta.

Moldam-se corpos-de-prova (no mínimo 3) para realização do ensaio de resistência à compressão axial, segundo a NBR 5.739 (ABNT, 2007), aos 7 dias de idade de produção dos concretos a fim de estimar a resistência média (f_c) dos CAA, uma vez este método de dosagem não estabelece o “ f_c ” requerido, apenas que o concreto seja de alta

resistência. A moldagem dos corpos-de-prova não requer nenhuma forma de compactação, somente a ação do peso próprio do CAA.

Definido o volume ideal de pasta da mistura e conhecido o seu “ f_c ”, pode-se calcular o traço unitário do CAA.

4.4 CAA com agregados reciclados

Os diversos trabalhos já desenvolvidos sobre a incorporação de agregados provenientes de RCC no concreto convencional indicam que ocorrem mudanças sensíveis nas propriedades do concreto, tanto no estado fresco como no endurecido (WERLE, 2010, ETXEBERRIA et al., 2007, GÓMEZ-SOBERÓN, 2002, LEVY; HELENE, 2004, SCHUBERT et al., 2012, KOU; POON, 2012, KUMAR; DHINAKARAN, 2012). Contudo, estas mudanças podem ser perfeitamente controláveis a partir da consideração de fatores como, por exemplo, o estudo de dosagem, o conhecimento das características e da composição do agregado reciclado, a porcentagem máxima de substituição do agregado natural pelo reciclado, entre outros.

Mehta e Monteiro (2008) comentam que o entulho de construções de concreto demolidas sem controle da separação deste entulho produz fragmentos em que o agregado é contaminado com pasta de cimento hidratada, gipsita e menores quantidades de outras substâncias.

Os autores anteriormente citados acreditam, ainda, que a fração que corresponde ao agregado miúdo pode conter grandes quantidades de cimento hidratado e gipsita, tornando-se inadequado para a produção de misturas de concreto. No entanto, a fração que corresponde ao agregado graúdo, apesar de coberto de pasta de cimento, tem sido usada com sucesso em vários estudos de laboratório e de campo. Tais autores fizeram uma revisão de vários estudos que indicou que, comparadas às dosagens de concreto que contêm agregados naturais, as dosagens que contêm agregados de concreto reciclado geralmente apresentam pelo menos dois terços da resistência à compressão e do módulo de elasticidade dos concretos sem agregados reciclados e apresentam trabalhabilidade e durabilidade satisfatórias. Além disso, eles chegaram à conclusão que, com métodos adequados de processamento do agregado de concreto reciclado, não há perda na qualidade do concreto com esse tipo de agregado.

Gonçalves (2001) estudou as propriedades de resistência à compressão axial, massa específica e módulo de elasticidade de concretos com 4 dosagens distintas: concreto apenas com agregados naturais; concreto com 100% de agregado miúdo natural e 100% de

agregado graúdo reciclado de concreto; concreto com 50% de agregado miúdo natural, 50% de agregado miúdo reciclado de concreto e 100% de agregado graúdo reciclado de concreto; e concreto com 50% de agregado miúdo natural, 50% de agregado miúdo reciclado de concreto e 100% de agregado graúdo natural.

O autor verificou que as dosagens com agregados reciclados tiveram uma perda de trabalhabilidade em relação ao do concreto natural com mesmas características, acentuada quando foram usados ambos agregados reciclados, miúdo e graúdo. Também constatou que as propriedades mais afetadas foram a massa específica e o módulo de elasticidade. O valor da resistência à compressão não foi muito influenciado quando se usou somente a fração graúda do material reciclado, mas quando existiu a utilização da fração miúda ocorreu uma diminuição deste valor.

Vieira e Dal Molin (2004) produziram concretos com relações água/cimento (a/c) iguais a 0,40, 0,60 e 0,80, e com substituições variando entre 50% e 100% dos agregados miúdo e graúdo naturais por agregados reciclados mistos. As autoras concluíram que, para as relações a/c de 0,40 e 0,60 houve uma redução apenas nos concretos feitos com 100% de substituição dos agregados miúdo e graúdo utilizados conjuntamente num mesmo traço. Nos traços com esse mesmo percentual de substituição e relação a/c igual a 0,80 os valores situaram-se no mesmo patamar que os de referência.

As autoras também constataram que o melhor desempenho da atuação conjunta dos agregados miúdo e graúdo reciclados se deu nos concretos com 50% de substituição de graúdo reciclado e 100% de miúdo reciclado, e com 50% de ambos, porque não houve perda de resistência.

A organização australiana *Cement Concrete & Aggregates Australia* (CCAA), em sua publicação sobre o uso de agregados reciclados na construção (CCAA, 2008), afirma que o impacto da alta absorção de água do agregado miúdo reciclado no aumento da retração e permeabilidade a gás do concreto tem sido destaque para estudos naquele país. Este fato se deve à migração da água absorvida pelo agregado para a pasta ao redor das partículas de agregados, influenciando assim o volume de água e poros na pasta. O agregado miúdo reciclado apresenta alta absorção de água devido à grande quantidade de pasta de cimento hidratado do concreto demolido.

Segundo a organização CCAA, uma redução da quantidade de argamassa aderida às partículas de agregado reciclado favorece na melhoria da trabalhabilidade, da massa específica e da resistência à compressão do concreto, bem como uma redução no teor de ar.

No que diz respeito ao uso de agregado reciclado de RCC no concreto autoadensável, verifica-se que esta inovação já vem sendo estudada por pesquisadores internacionais.

Fakitsas et al. (2012) produziram CAA com agregado reciclado de concreto saturado e realizaram os ensaios, no estado fresco, de espalhamento, tempo de escoamento, caixa L e anel J e o ensaio, no estado endurecido, de resistência à compressão axial aos 28, 35 e 90 dias. Os resultados dos ensaios que avaliam o estado fresco não apresentaram reduções significativas em relação ao CAA de referência e não apresentaram aspecto de segregação ou coesão elevada. Quanto ao ensaio de resistência, os autores verificaram que os CAA com agregado reciclado de concreto apresentaram resistências 4% e 7,6% maiores, aos 28 e 90 dias, respectivamente, do que o CAA de referência, indicando uma melhor cura interna do concreto.

Rahal (2007) também desenvolveu um estudo sobre a avaliação do tempo de cura do CAA com agregado reciclado de concreto sobre a resistência à compressão axial e verificou que esta propriedade cresce com idades mais elevadas do CAA, tal como ocorre com o concreto convencional.

Grdic et al. (2010) estudaram as propriedades de absorção de água, permeabilidade e resistência à compressão de CAA com 0%, 50% e 100% de agregado reciclado de concreto. Para os autores, o conhecimento da origem do agregado reciclado deve ser levado em conta durante o estudo de dosagem, pois quanto maior a qualidade do concreto original, melhores serão as propriedades do novo CAA com este agregado reciclado.

Os últimos autores encontraram valores de resistência menores quanto maior a porcentagem de incorporação de agregado reciclado e absorções de água maiores quanto maior a porcentagem de incorporação de agregado reciclado.

Corinaldesi e Moriconi (2004) produziram CAA com substituição de 100% do agregado miúdo e graúdo natural por agregado reciclado de RCC e obtiveram resultados de resistência à compressão sensivelmente menores do que o CAA de referência, mas aceitáveis para aplicações específicas.

Diante do sucesso das pesquisas internacionais sobre o uso de agregado reciclado de RCC no concreto autoadensável e da carência desta abordagem no Brasil, optou-se por desenvolver esta pesquisa, cujo programa experimental está exposto a seguir.

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 Caracterização dos materiais

Previamente ao estudo de dosagem dos CAA foi efetuada a caracterização físico-química dos materiais. Os subitens seguintes expõem os ensaios realizados, os métodos de ensaio seguidos e os resultados alcançados. A caracterização de alguns materiais foi obtida diretamente do fabricante.

5.1.1 Cimento

Utilizou-se o cimento Portland CP II-Z-32-RS, por ser o mais comercializado na região. A NBR 11.578 (ABNT, 1991) classifica-o como Cimento Portland composto com pozolana, possuindo adição de 6% a 14% de material pozolânico e 0% a 10% de material carbonático. As características químicas do cimento estão apresentadas na Tabela 5 e as características físicas e mecânicas na Tabela 6, todas fornecidas pelo fabricante.

Tabela 5 – Características químicas do cimento utilizado.

Ensaio	Resultado	Método de Ensaio	Limites NBR 11578 (ABNT, 1991)
Óxido de Magnésio - MgO (%)	2,85	NM 11-2 (ABNT, 2004)	≤ 6,5
Anidrido Sulfúrico - SO ₃ (%)	3,07	NM 16 (ABNT, 2004)	≤ 4,0
Resíduo Insolúvel - RI (%)	11,40	NM 22 (ABNT, 2004)	≤ 16,0
Equivalente Alcalino (%)	1,02	-	não aplicável
CaO Livre (%)	1,37	NM 13 (ABNT, 2004)	não aplicável
Perda ao Fogo - PF (%)	5,67	NM 18 (ABNT, 2004)	≤ 6,5

Fonte: Votorantim Cimentos - Relatório de ensaio, período janeiro/2011.

Tabela 6 – Características físicas e mecânicas do cimento utilizado.

Ensaio	Resultado	Método de Ensaio	Limites NBR 11578 (ABNT, 1991)
Área Específica - Blaine (cm ² /g)	4599	NM 76 (ABNT, 1998)	≥1260 m ² /kg
Massa Específica (g/cm ³)	3,00	NM 23 (ABNT, 2001)	não aplicável
Finura - # 200 (%)	1,7	NBR 11.579 (ABNT, 1991)	≤ 12,0
Finura - # 325 (%)	8,1	NBR 12.826 (ABNT, 1993)	não aplicável
Consistência Normal (%)	28,4	NM 43 (ABNT, 2003)	não aplicável
Início de Pega (min)	193	NM 65 (ABNT, 2003)	≥ 60
Fim de Pega (min)	251		≤ 600
Expansibilidade a Quente (mm)	0,0	NBR 11.582 (ABNT, 1991)	≤ 5
Resistência à Compressão (MPa)			
3 dias	26,7	NBR 7.215 (ABNT, 1996)	≥ 10
7 dias	31,3		≥ 20
28 dias	38,1		≥ 32

Fonte: Votorantim Cimentos - Relatório de ensaio, período janeiro/2011.

5.1.2 Adição mineral

Utilizou-se uma adição mineral industrializada, fornecida em sacos plásticos de 20 kg, de coloração branca. Realizou-se a determinação da distribuição dos grãos por meio da granulometria a laser executada com o equipamento Mastersizer 2000-E⁷. Como resultado obteve-se um diâmetro médio de 23,087 µm, com valores de D10%, D50% e D90% iguais a 1,194 µm, 5,555 µm e 62,511 µm, respectivamente.

O ensaio de massa específica⁷, realizado seguindo a NBR NM 23 (ABNT, 2001), apresentou um valor de 2,68 g/cm³. Já o ensaio para determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)⁷, normatizado pela NBR NM 76 (ABNT, 1998), apresentou um resultado de 6230 cm²/g.

Efetuar-se também os ensaios para determinação do teor de umidade⁷, utilizando a NBR NM 24 (ABNT, 2003), e de perda ao fogo⁷, por meio da NBR NM 18 (ABNT, 2004), cujos resultados alcançados foram 0,09% e 42,87%, respectivamente.

⁷ Ensaio realizado pela Companhia Industrial de Cimento Apodi S/A.

Para identificar se a adição mineral era um material pozolânico⁸, realizou-se uma análise de sua composição química pelo ensaio de espectroscopia por fluorescência de raios X⁹. A composição química da adição mineral está apresentada na Tabela 7.

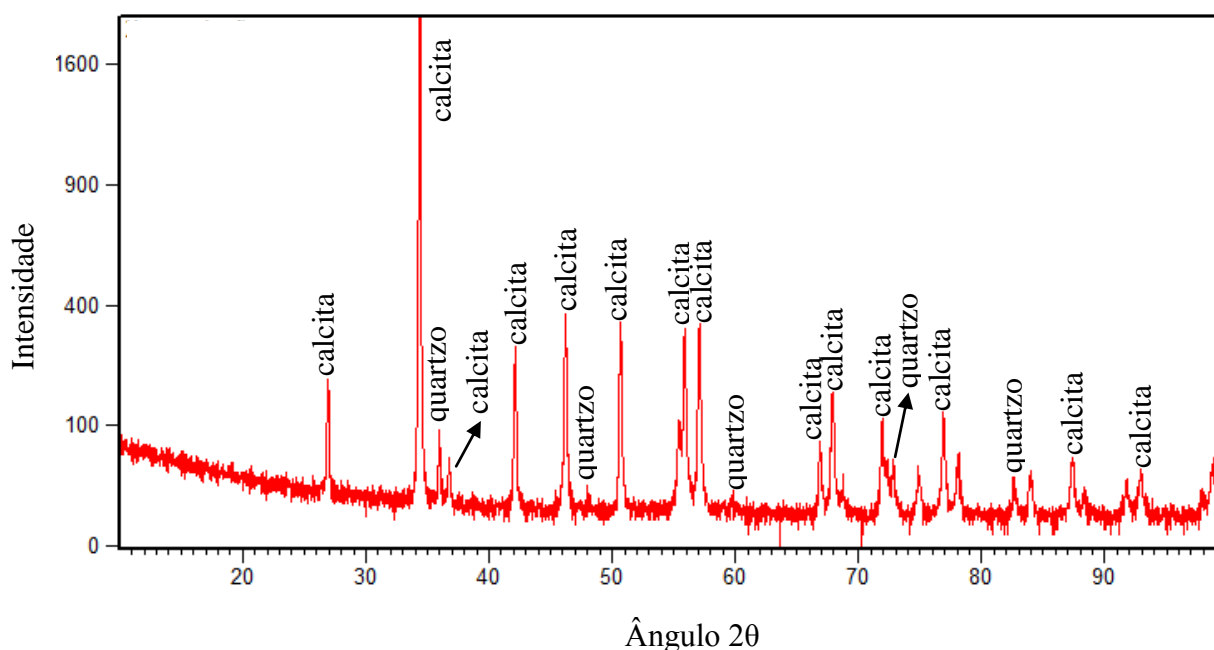
Tabela 7 - Fluorescência de raios X da adição mineral.

Elemento	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	SO ₃	Ag ₂ O	In ₂ O ₃	Perda ao fogo
Concentração (%)	0,52	0,17	0,42	55,30	0,11	0,083	0,04	0,12	0,31	42,87

Fonte: da autora.

Efetuuou-se, ainda, uma análise qualitativa do material por meio do ensaio de difração dos raios X⁹ que permite identificar os elementos cristalinos e se há um halo amorfo na amostra. O difratograma da adição mineral utilizada está demonstrado na Figura 17.

Figura 17 – Difratograma da adição mineral.



Onde: calcita – CaCO₃ e quartzo – SiO₂.

Fonte: da autora.

⁸ Os materiais pozolânicos são definidos pela NBR 12.653 (ABNT, 1992) como materiais silicosos ou silicoaluminosos que, por si só, possuem pouca ou nenhuma atividade aglomerante, mas que, quando finamente divididos e na presença da água, reagem com o hidróxido de cálcio à temperatura ambiente para formar compostos com propriedades aglomerantes.

⁹ Ensaio realizado no Laboratório de Raios X do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará.

Na Tabela 7 verifica-se que o material é essencialmente composto por calcário (55,30% de CaO), podendo-se inferir que este material não é pozolânico porque a soma dos teores de óxido de silício (SiO₂), óxido de alumínio (Al₂O₃) e óxido de ferro (Fe₂O₃) foi bem inferior a 50% (obteve-se 0,70%), valor mínimo exigido pela NBR 12.653 (ABNT, 1992) para que um material seja classificado como uma pozolana de Classe E¹⁰.

Na Figura 17 é possível verificar que os principais compostos cristalinos presentes na adição mineral são a calcita (CaCO₃) e o quartzo (SiO₂), condizendo com os resultados alcançados no ensaio de fluorescência de raios X (Tabela 7).

Realizou-se, também, o ensaio de índice de atividade pozolânica¹¹ com base na NBR 5.752 (ABNT, 1992), obtendo-se um índice de 64,07%.

As exigências químicas e físicas para que um material seja considerado uma pozolana bem como os resultados obtidos dos ensaios realizados com a adição mineral foram sintetizados nas Tabelas 8 e 9, respectivamente.

Pelos resultados obtidos, confirma-se que a adição mineral é um fíler calcário, portanto sem atividade pozolânica.

Dal Molin (2011) afirma que o fíler é uma adição mineral finamente dividida sem atividade química, ou seja, sua ação se resume a um efeito físico de empacotamento granulométrico e ação como pontos de nucleação para a hidratação dos grãos de cimento.

Tabela 8 – Exigências químicas para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992) e resultados dos ensaios com a adição mineral.

Propriedades	Classes de material pozolânico			Resultados da adição mineral
	N	C	E	
SiO ₂ + Al ₂ O ₃ + Fe ₂ O ₃ , % mín.	70	70	50	1,54
SO ₃ , % máx.	4,0	5,0	5,0	0,04
Teor de umidade, % máx.	3,0	3,0	3,0	0,09
Perda ao fogo, % máx.	10,0	6,0	6,0	42,87
Álcalis disponíveis em Na ₂ O, % máx.	1,5	1,5	1,5	0,083

Classe N: pozolanas naturais e artificiais; Classe C: cinza volante; Classe E: qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Fonte: NBR 12.653 (ABNT, 1992) e da autora.

¹⁰ Segundo a NBR 12.653 (ABNT, 1992) será classificada como Classe E qualquer pozolana cujos requisitos diferem da Classe N, que é para as pozolanas naturais, e Classe C que é para a cinza volante.

¹¹ Ensaio realizado no Laboratório de Materiais de Construção do Departamento de Engenharia da Universidade Federal do Ceará.

Tabela 9 – Exigências físicas para materiais pozolânicos de acordo com a NBR 12.653 (ABNT, 1992) e resultados dos ensaios com a adição mineral.

Propriedades	Classes de material pozolânico			Resultados da adição mineral
	N	C	E	
Material retido na peneira 45 μ m, % máx.	34	34	34	1,93
Índice de atividade pozolânica:				
- com cimento aos 28 dias, em relação ao controle, % mín.	75	75	75	64,07
- com o cal aos 7 dias, em MPa	6,0	6,0	6,0	-
- água requerida, % máx.	115	110	110	94,28

Classe N: pozolanas naturais e artificiais; Classe C: cinza volante; Classe E: qualquer pozolana cujos requisitos diferem das classes anteriores.

Fonte: NBR 12.653 (ABNT, 1992) e da autora.

5.1.3 Agregados naturais e reciclados

Utilizou-se como agregado miúdo natural uma areia quartzosa lavada proveniente de leito de rio. Antes de seu uso foi efetuada uma prévia secagem e peneiramento na peneira de malha # 4,75 mm para retirada de qualquer grão superior a este limite, considerado o diâmetro máximo estabelecido pela NBR 7.211 (ABNT, 2005) para um agregado miúdo. Esta norma especifica os requisitos exigíveis para recepção e produção dos agregados miúdos e grãos destinados à produção de concretos de cimento Portland.

Os agregados grãos naturais eram de origem granítica e apresentavam dois diâmetros máximos. Para uma melhor distinção será denominado de pedrisco o agregado grão natural de menor diâmetro máximo, e de brita o de maior diâmetro máximo. Antes do uso foi efetuada uma lavagem para remoção do material fino, passante na peneira de malha #75 μ m, com posterior secagem e peneiramento na peneira de malha # 4,75 mm para retirada de qualquer grão inferior a este limite, considerado o diâmetro mínimo estabelecido pela NBR 7.211 (ABNT, 2005) para um agregado grão.

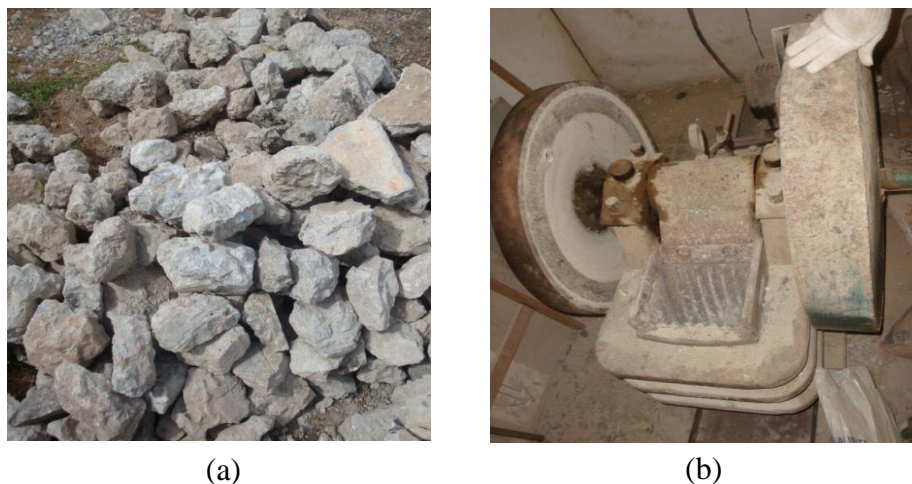
O agregado grão reciclado foi proveniente da britagem de resíduos de demolição de uma série de edificações em concreto armado e pavimentos da cidade de Fortaleza/CE. Estes resíduos eram constituídos somente de concretos e estão ilustrados na Figura 18a.

Para obtenção do agregado grão reciclado, primeiramente, britou-se o resíduo de concreto em um britador de mandíbulas (equipamento disponível para o estudo) (Figura 18b), sendo o material britado posteriormente peneirado na peneira de malha # 25 mm. Retornou-se ao triturador os grãos que ficavam retidos nesta malha. Os grãos que passavam

na malha # 25 mm foram peneirados em peneira de malha # 4,75 mm. Os grãos que passavam na peneira de malha # 4,75mm foram descartados, pois representavam a fração miúda que não era objeto de pesquisa.

O agregado graúdo reciclado passante na malha # 25 mm e retido na malha # 4,75 mm pode ser visualizado na Figura 19.

Figura 18 - (a) Detalhe do resíduo de concreto antes da britagem; (b) Britador de mandíbulas.



Fonte: da autora.

Figura 19 - Agregado graúdo reciclado de concreto obtido entre as peneiras # 25 mm e # 4,75 mm.



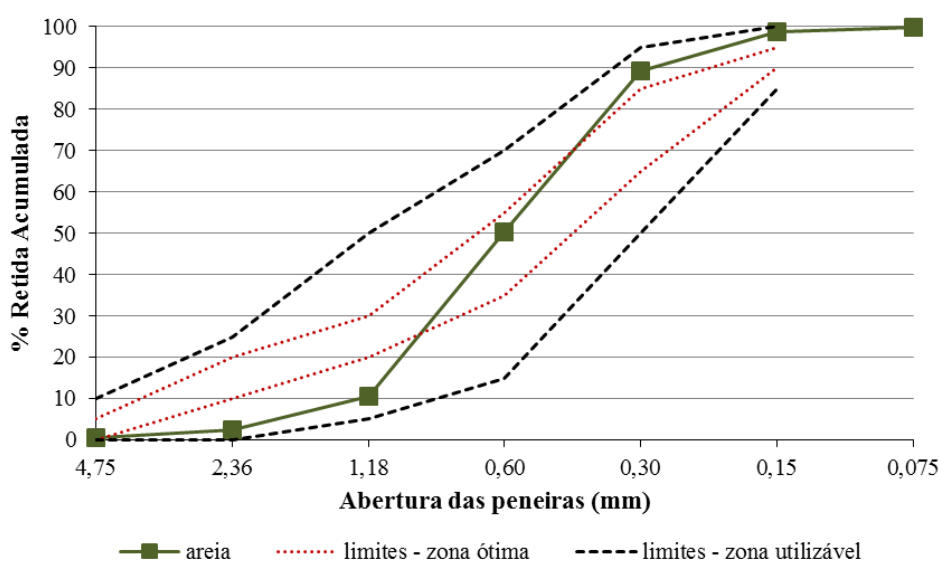
Fonte: da autora.

Os tópicos abaixo detalham os ensaios efetuados para caracterização dos agregados naturais e reciclados, conforme as normas pertinentes. Antes da realização destes ensaios foi efetuado o quartejamento das amostras pela NBR NM 27 (ABNT, 2001), que estabelece as condições exigíveis na redução da amostra de agregado formada no campo, para ensaio de laboratório.

a) Granulometria

O ensaio para determinação da composição granulométrica dos agregados seguiu a norma NBR NM 248 (ABNT, 2003). A curva granulométrica da areia está apresentada na Figura 20, a curva do pedrisco natural está apresentada na Figura 21, e as curvas da brita natural e do agregado reciclado estão apresentadas na Figura 22.

Figura 20 - Distribuição granulométrica da areia.

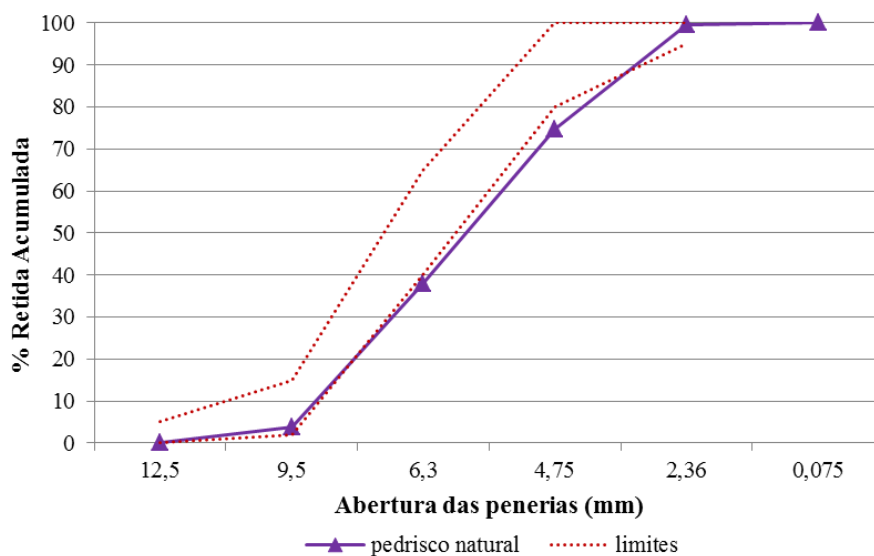


Fonte: da autora.

Conforme a Figura 20 constata-se que, embora a areia não tenha se enquadrado nos limites da zona ótima (indicada pela linha pontilhada) estabelecido pela NBR 7.211 (ABNT, 2005), esta se enquadrou nos limites da zona utilizável (indicada pela linha tracejada) e apresentou uma curva contínua, considerada ideal para produção de concretos por permitir um bom ordenamento das partículas.

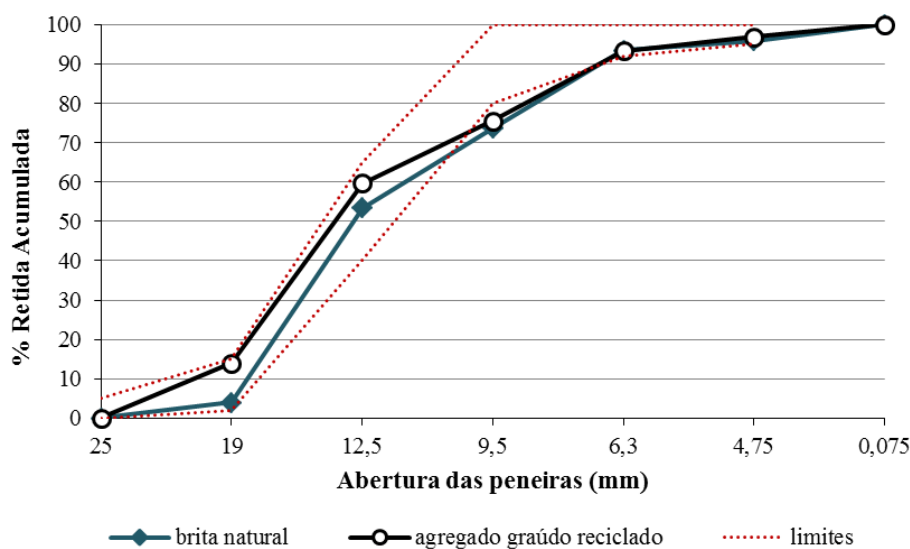
Mehta e Monteiro (2008) afirmam que agregados de granulometria contínua, ou seja, que não apresentam grande deficiência ou excesso de qualquer dimensão de partícula produzem as misturas de concreto mais trabalháveis e econômicas.

Figura 21 - Distribuição granulométrica do pedrisco natural.



Fonte: da autora.

Figura 22 - Distribuição granulométrica da brita natural e do agregado gráudo reciclado.



Fonte: da autora.

Nas Figuras 21 e 22, verifica-se que as curvas granulométricas obtidas para o pedrisco natural, a brita natural e o agregado gráudo reciclado não se encaixaram completamente nos limites estabelecidos pela NBR 7.211 (ABNT, 2005) (linha pontilhada). Contudo, optou-se por não enquadrar os agregados gráudos naturais (pedrisco e brita) porque a comercialização dos materiais na região é feita desta forma e não era pretensão fazer nenhum tipo de beneficiamento dos agregados. Quanto ao agregado gráudo reciclado, embora não tenha se encaixado nos limites, este apresentou uma curva granulométrica muito próxima

à encontrada para a brita natural, condição já almejada, pois quando fosse efetuada a substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado não era pretensão que a distribuição das partículas fosse uma variável no estudo.

Os valores do diâmetro máximo característico e do módulo de finura dos agregados naturais e reciclado estão apresentados na Tabela 10.

Tabela 10 – Diâmetro máximo e módulo de finura dos agregados naturais e reciclado.

Índice físico	Areia	Pedrisco natural	Brita natural	Agregado graúdo reciclado	Método de ensaio
Diâmetro máximo (mm)	2,40	9,50	19,00	19,00	NBR NM 248 (ABNT, 2003)
Módulo de finura (adimensional)	2,52	5,78	6,74	6,86	NBR NM 248 (ABNT, 2003)

Fonte: da autora.

O diâmetro máximo de 2,40 mm da areia, visualizado na Tabela 10, representa a areia comumente utilizada na região, caracterizada como uma areia média.

O diâmetro máximo de 9,50 mm do pedrisco natural é favorável para a produção de CAA porque possibilita um melhor empacotamento granular, reduzindo o teor de vazios e o volume de pasta de cimento para a mistura, tornando o CAA mais econômico.

Constata-se, também, que o diâmetro máximo da brita natural igual a 19,00 mm está de acordo com diversos autores (SILVA; BRITO, 2009; TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; FENATO, 2007; LEITE, 2001; SAFIUDDIN, 2011; FILHO, 2008), quando recomendam que o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado para a produção de CAA seja limitado a 20,00 mm a fim de que seja garantida a coesão da mistura durante o lançamento do CAA e possibilitada a concretagem de estruturas densamente armadas.

O agrupamento da brita 19,00 mm com o pedrisco 9,50 mm e a areia 2,40 mm é favorável para a redução do volume da pasta de cimento ocasionada pelo menor índice de vazios, como já mencionado anteriormente. Especialmente para o CAA, a redução do consumo de cimento, sem reduzir a resistência e a trabalhabilidade, torna-o mais atrativo para os construtores e clientes finais.

Na Tabela 10, verifica-se que o diâmetro máximo do agregado graúdo reciclado igual ao da brita natural faz com que não haja a necessidade de correção da curva granulométrica.

b) Massa específica e massa unitária

Os resultados da massa específica, massa unitária solta e massa unitária compactada dos agregados naturais e reciclado, com suas respectivas normas, são demonstrados na Tabela 11. Conforme os dados da Tabela 11 pode-se afirmar que a massa específica, massa unitária solta e massa unitária compactada do agregado graúdo reciclado é 14,23%, 12% e 12% menor do que a da brita natural, respectivamente.

Tabela 11 – Massa específica, massa unitária solta e compactada dos agregados naturais e reciclado.

Índice físico	Areia	Pedrisco natural	Brita natural	Agregado graúdo reciclado	Método de ensaio
Massa específica (g/cm ³)	2,54	2,46	2,74	2,35	NBR NM 52 (ABNT, 2003) - areia NBR NM 53 (ABNT, 2003) - graúdo
Massa unitária solta (g/cm ³)	1,25	1,35	1,48	1,30	NBR NM 45 (ABNT, 2006)
Massa unitária compactada (g/cm ³)	1,37	1,46	1,59	1,40	NBR NM 45 (ABNT, 2006)

Fonte: da autora.

Cabral (2007) comenta que, em geral, os agregados reciclados apresentam massa unitária e massa específica menores que as dos agregados naturais. Para a massa específica, esta redução ocorre em função das características das matérias-primas dos reciclados, pois são menos densos que os agregados graúdos naturais. Já para a massa unitária, além da redução pela própria densidade do material e da alta porosidade característica dos agregados reciclados, a forma irregular das partículas contribui para a redução da mesma. Entretanto, essas reduções são dependentes também da granulometria dos agregados reciclados.

Assim, o agregado graúdo reciclado deste estudo apresentou massa específica e massa unitária similares às relatadas por diversas bibliografias (LEITE, 2001; DIAS, 2004; CABRAL, 2007; CARRIJO, 2005; LOVATO, 2007; SAFIUDIN, 2011).

c) Absorção de água

A absorção de água da areia foi medida seguindo a norma NBR NM 30 (ABNT, 2001) e a absorção de água do pedrisco natural, da brita natural e do agregado graúdo

reciclado foi medida seguindo a norma NBR NM 53 (ABNT, 2003). Os resultados obtidos para cada material estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 12 – Absorção de água dos agregados naturais e reciclado.

Índice físico	Areia	Pedrisco natural	Brita natural	Agregado graúdo reciclado	Método de ensaio
Absorção de água (%)	1,05	0,48	0,17	3,92	NBR NM 30 (ABNT, 2001) - miúdo NBR NM 53 (ABNT, 2003) - graúdo

Fonte: da autora.

Leite (2001) relata que a taxa de absorção dos agregados naturais normalmente utilizados nas misturas de concreto tem índices muito baixos e sua influência para produção de concretos convencionais não é considerada. Para a autora, mesmo para os agregados miúdos naturais, cujos valores de taxa de absorção variam de 1% a 2,5%, o efeito da absorção geralmente não é considerado, pois o processo se dá de forma mais lenta devido a sua baixa porosidade. Entretanto, quando se utiliza agregados mais porosos, tal como ocorre com os agregados reciclados, cuidados devem ser tomados pra minimizar os efeitos da absorção, fazendo com que sua quantificação mereça atenção especial.

A NBR 15.116 (ABNT, 2004), que estabelece os requisitos para o emprego de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil em obras de pavimentação viária e em concretos sem função estrutural, determina um teor máximo de absorção de água igual a 7% para o agregado graúdo reciclado de concreto destinado ao preparo de concreto sem função estrutural. Pela tabela 12, confirma-se que o agregado reciclado deste estudo não ultrapassou o limite máximo aceitável pela norma.

Já era esperado que o agregado graúdo reciclado apresentasse uma taxa de absorção bastante superior à da brita natural já que ele apresenta, em sua composição, argamassa proveniente do concreto original, tornando-o mais poroso do que a brita natural.

d) Material fino

Realizou-se o ensaio para determinação do teor de material fino seguindo a norma NBR NM 46 (ABNT, 2003) que estabelece o método para a determinação por lavagem, em

agregados, da quantidade de material mais fino que a abertura de malha da peneira # 75 μm . Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 13.

Tabela 13 – Teor de material fino, passante na peneira de malha # 75 μm , dos agregados naturais e reciclado.

Índice físico	Areia	Pedrisco natural	Brita natural	Agregado graúdo reciclado	Método de ensaio
Material fino (%)	1,16	0,31	0,19	0,64	NBR NM 46 (ABNT, 2003)

Fonte: da autora.

A NBR NM 7.211 (ABNT, 2005) estabelece uma quantidade máxima de material fino igual a 3% para o agregado miúdo a ser utilizado em concreto submetido a desgaste superficial e uma quantidade máxima de 1% para o agregado graúdo a ser utilizado em concreto submetido a qualquer condição. De acordo com os dados da Tabela 13, constata-se que os agregados naturais utilizados no estudo obedeceram satisfatoriamente aos valores estabelecidos pela norma.

Para o agregado graúdo reciclado de concreto, a norma NBR 15.116 (ABNT, 2004) estabelece uma quantidade máxima de material fino igual a 10% para o agregado reciclado destinado ao preparo de concreto sem função estrutural.

Constata-se que o agregado reciclado deste estudo apresentou teor de material fino bastante inferior ao limite máximo admitido pela norma. Por outro lado, ele foi três vezes superior ao teor encontrado para a brita natural, provavelmente devido ao fato do agregado reciclado de concreto conter restos de argamassa em sua composição.

5.1.4 Água

Utilizou-se a água do sistema de abastecimento público da cidade de Fortaleza, Ceará, durante toda a pesquisa.

5.1.5 Aditivo superplastificante

O aditivo utilizado foi um superplastificante de terceira geração à base de éter policarboxílico com 30% de sólidos. As informações referentes ao aditivo constantes na Tabela 14 foram fornecidas pelo fabricante.

Tabela 14 – Características do aditivo superplastificante.

Característica	Especificação	Método BASF
pH	5 - 7	TM 112 B
Densidade (g/cm ³)	1,067 - 1,107	TM 103 B
Sólidos (%)	28,5 - 31,5	TM 613 B
Viscosidade (cps)	< 150	TM 117

Fonte: www.basf.com.br. Acesso em: 30 nov 2011.

5.2 Dosagem dos CAA

Sabe-se que a finalidade principal da pesquisa foi efetuar uma avaliação técnica de concretos autoadensáveis produzidos com substituição parcial do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado de concreto e verificar as propriedades mecânicas e de durabilidade comparadas ao desempenho dos concretos com agregado natural. Também se desejava saber a influência da variação da relação água/cimento nestas propriedades, considerando a presença ou não dos agregados reciclados.

Para a realização da dissertação dosaram-se CAA com três relações água/cimento (0,35, 0,45 e 0,55), sendo que para cada a/c, definiram-se três porcentagens de substituição dos agregados graúdos naturais pelos agregados graúdos reciclados (10%, 20% e 30%, em volume). Produziram-se ainda CAA composto apenas com agregados naturais.

A determinação das relações água/cimento baseou-se na NBR 6.118 (ABNT, 2007), que estabelece uma relação água/cimento máxima igual a 0,55 para concretos armados a serem aplicados em ambientes com agressividade ambiental forte (zona marinha), caso da cidade de Fortaleza/CE.

Os 12 traços de concretos objetos da pesquisa foram sintetizados na Tabela 15.

Tabela 15 – Enumeração dos traços dos CAA com porcentagens de substituição da brita natural pelo agregado graúdo reciclado.

Traço	a/c	% AGN	% AGR
1	0,35	100%	0%
2	0,35	90%	10%
3	0,35	80%	20%
4	0,35	70%	30%
5	0,45	100%	0%
6	0,45	90%	10%
7	0,45	80%	20%
8	0,45	70%	30%
9	0,55	100%	0%
10	0,55	90%	10%
11	0,55	80%	20%
12	0,55	70%	30%

AGN - Agregado Graúdo Natural (brita natural); AGR - Agregado Graúdo Reciclado.
Fonte: da autora.

Para a dosagem dos concretos, a princípio, foi aplicada a metodologia de dosagem proposta por Tutikian e Dal Molin (2007), já comentada anteriormente, que se baseia na obtenção inicial de um concreto convencional com incorporações gradativas de aditivos para torná-lo autoadensável.

Dessa maneira, determinou-se a proporção de agregados do esqueleto granular, considerando a adição mineral como um agregado, conforme recomenda o método. Depois, já sabendo a relação água/cimento desejada, calculou-se um traço rico (1:3), intermédio (1:5) e pobre (1:7) para concreto convencional.

Então, executou-se o concreto convencional com traço intermediário e realizou-se o ensaio de abatimento do tronco de cone pela NBR NM 67 (ABNT, 1998) a fim de alcançar abatimento entre 60 mm e 90 mm. Como este resultado não foi alcançado efetuou-se a incorporação de aditivo plastificante para correção, fato também previsto no método.

Definido o concreto convencional, partiu-se para o incremento gradativo de aditivo superplastificante até a obtenção de um CAA. Para cada incremento de aditivo, efetuavam-se os ensaios de espalhamento pelo cone de Abrams, de habilidade passante pela

caixa L e de viscosidade plástica pelo funil V, sendo que o teor ideal de aditivo era definido pela adequação aos limites da NBR 15.823 (ABNT, 2010).

Ao final, o método demandou duas classes de aditivos, plastificante e superplastificante, com elevados teores cada para obtenção do CAA e, ainda assim, não foi possível alcançar todos os parâmetros exigidos pela norma.

Acredita-se que o método não logrou êxito devido à lacuna granulométrica existente entre os agregados, especificamente entre o agregado miúdo e a adição mineral, formando um vazio, uma vez que o agregado miúdo possui diâmetro máximo de 2,40 mm e o fíler calcário possui um D90% de 62,5 μm . Como o método de Tutikian e Dal Molin (2007) é baseado essencialmente no estudo do esqueleto granular, provavelmente a inserção de um agregado com granulometria intermediária poderia corrigir esta lacuna. No entanto, não se tinha a pretensão de incluir mais componentes no estudo, de tal forma que se optou por adotar outro método de dosagem, tendo em vista a gama de metodologias existentes.

Partiu-se, então, para a metodologia de dosagem proposta por Gomes (2002) para a obtenção de concreto autoadensável de alta resistência. Como esta metodologia já foi aplicada para a obtenção de CAA com resistência normal nos estudos de Lisbôa (2004) e Cavalcanti (2006) e explicada sucintamente no capítulo anterior, será dada ênfase aos resultados obtidos em cada fase do método, considerando o uso das matérias-primas já analisadas.

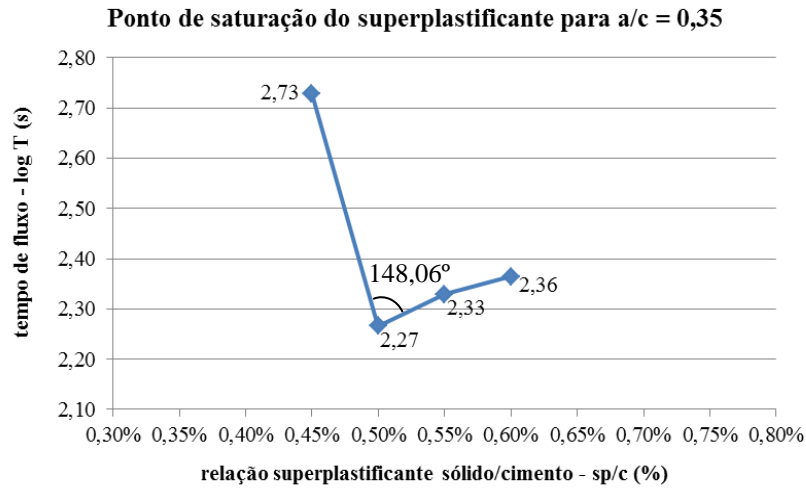
5.2.1 Estudo da composição da argamassa

Decidiu-se por realizar o estudo da argamassa, ao invés da pasta, para as três relações a/c, pois duas das relações a/c apresentavam valores pequenos, conforme orienta Gomes (2002).

No primeiro momento, calculou-se a quantidade de materiais necessários para a produção de 1000 mL de argamassa. Foi estabelecida uma relação fíler/cimento (f/c) igual a 0,40, inferior a adotada por Lisbôa (2004), Cavalcanti (2006) e Barros (2009) que usaram f/c=0,50, e uma relação areia/cimento igual a 2,00, conforme recomenda o método, para cada relação a/c, fazendo-se a variação nas relações superplastificante sólido/cimento (sp/c) de 0,05% em 0,05%.

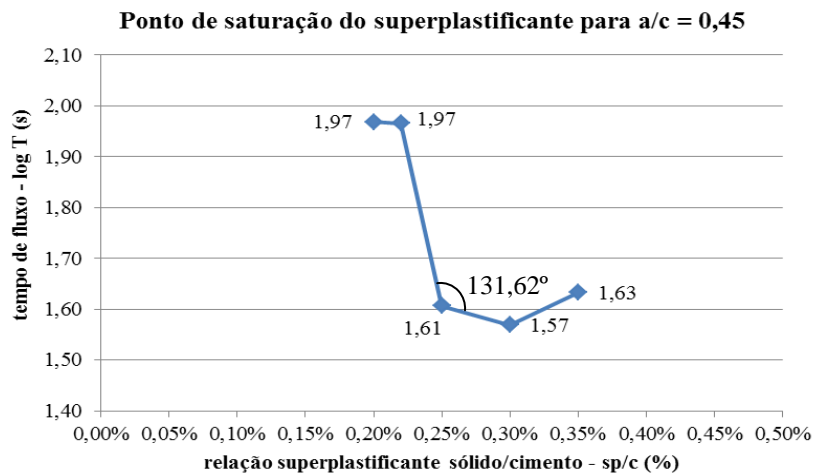
Para cada relação sp/c foi efetuado o ensaio com o cone de Marsh para definição do ponto de saturação do aditivo. Os resultados das relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55 estão exibidos nas Figuras 23, 24 e 25, respectivamente.

Figura 23 - Ponto de saturação do aditivo superplastificante para a relação $a/c = 0,35$.



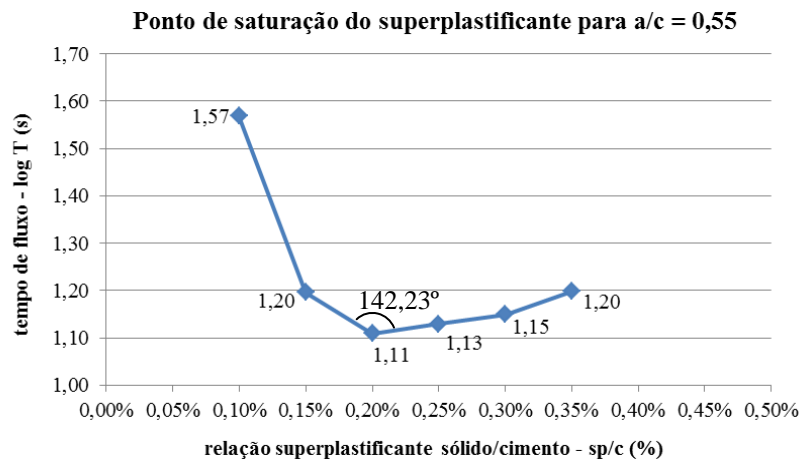
Fonte: da autora.

Figura 24 - Ponto de saturação do aditivo superplastificante para a relação $a/c = 0,45$.



Fonte: da autora.

Figura 25 - Ponto de saturação do aditivo superplastificante para a relação $a/c = 0,55$.



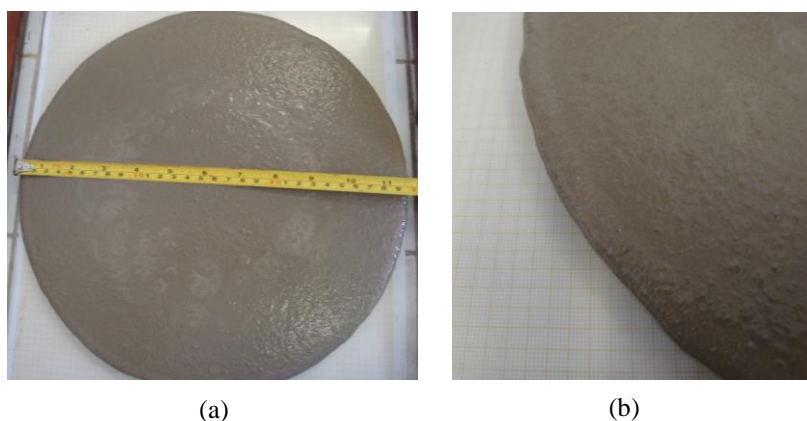
Fonte: da autora.

Nas Figuras 23 a 25 identifica-se que o ponto de saturação do superplastificante sólido (sp/c), definido pelo ângulo interno de $140^\circ \pm 10^\circ$ na curva, para a relação a/c igual a 0,35 foi de 0,50% (148,06°); para a relação a/c igual a 0,45 foi de 0,25% (131,62°); e para a relação a/c igual a 0,55 foi de 0,20% (142,23°).

Após definida a relação sp/c, avaliou-se o comportamento de cada argamassa quanto à coesão, fluidez e segregação pelo tronco de cone da mesa de consistência (*mini-slump*).

Conforme preconiza o método, a média dos diâmetros deve estar entre 200 mm e 300 mm. Constatou-se que a relação f/c igual a 0,40 é aceitável, pois os diâmetros médios alcançados para as relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55 foram 289 mm, 205 mm e 297 mm, respectivamente. Também os teores de aditivo superplastificante ficaram dentro da faixa de dosagem recomendada pelo fabricante (0,2% a 1,0%). Como exemplo, mostra-se na Figura 26 o aspecto da argamassa da relação a/c igual a 0,55 após o espalhamento com o tronco de cone.

Figura 26 – Ensaio com o tronco de cone mostrando (a) o espalhamento final e (b) a não-segregação da argamassa com relação a/c = 0,55 e sp/c = 0,20%.



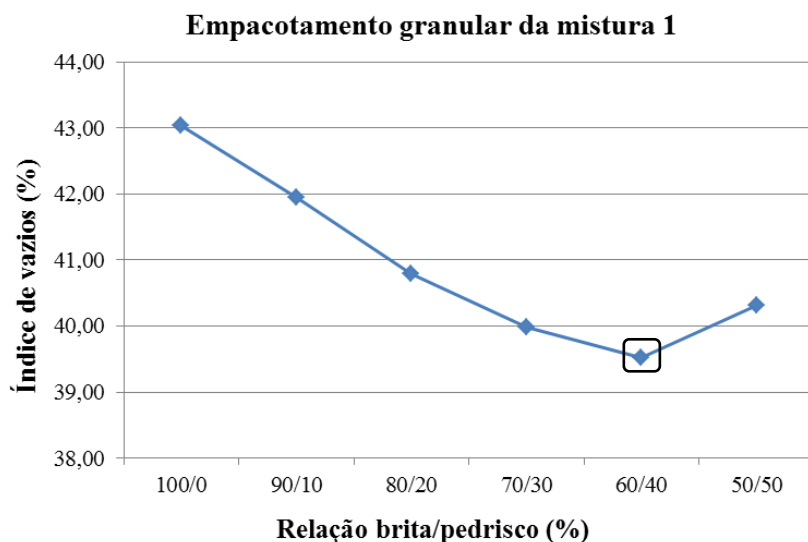
Fonte: da autora.

5.2.2 Estudo do esqueleto granular

De posse dos índices físicos dos materiais secos naturais componentes da pesquisa (areia, pedrisco e brita), procedeu-se ao estudo do empacotamento granular pela obtenção do menor índice de vazios do conjunto de agregados. Para isso, foram efetuados os ensaios de massa unitária no estado solto segundo a NBR NM 45 (ABNT, 2006), com posterior cálculo da massa específica e índice de vazios, com base nas Equações 10 e 11, mencionadas anteriormente, para duas misturas de agregados: mistura 1, composta por brita e pedrisco; e mistura 2, composta por brita, pedrisco e areia. O comportamento dos vazios das misturas 1 e

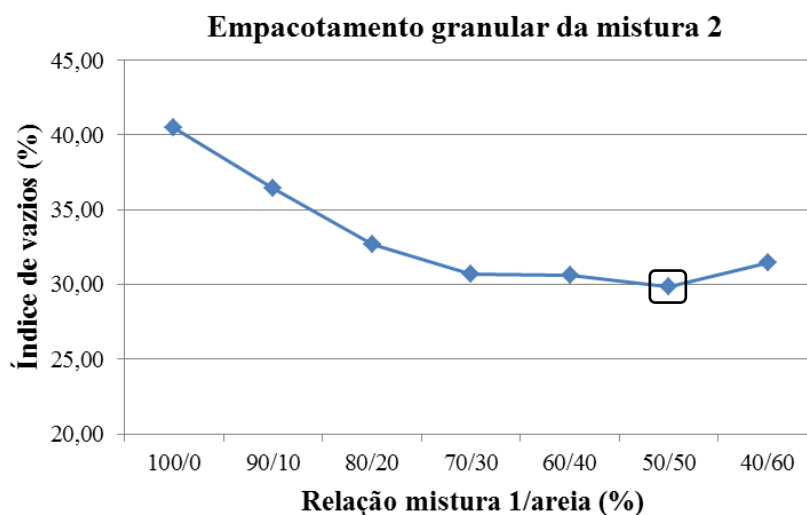
2 à medida que a proporção entre os materiais secos era modificada está demonstrado nas Figuras 27 e 28, respectivamente.

Figura 27 – Comportamento dos vazios da mistura 1 (brita natural + pedrisco).



Fonte: da autora.

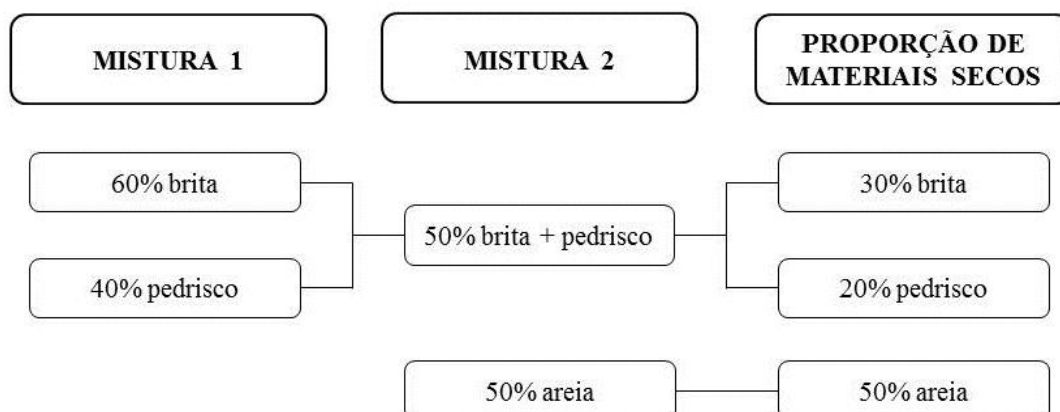
Figura 28 – Comportamento dos vazios da mistura 2 (brita natural + pedrisco + areia).



Fonte: da autora.

De acordo com a Figura 27, verifica-se que o menor índice de vazios obtido para a mistura 1 foi igual a 39,53%, para a proporção de 60% de brita e 40% de pedrisco. Já para a mistura 2, conforme a Figura 28, o menor índice de vazios foi igual a 29,87%, para a proporção de 50% de mistura 1 e 50% de areia. Ao final, obteve-se o proporcionamento dos materiais secos exposto na Figura 29.

Figura 29 – Proporcionalamento dos materiais secos.



Fonte: da autora.

5.2.3 Estudo do volume de pasta do CAA

Para definir o volume de pasta (V_p) a ser estudado, baseou-se nas considerações de Su, Hsu e Chai (2001) que afirmam que o volume ideal ocupado pelo agregado no CAA é cerca de 52% a 58% e os vazios deixados pelo agregado solto devem estar entre 42% e 48%, devendo estes serem ocupados pela pasta.

Gomes (2002) relata que para obter escoamento elevado, boa estabilidade e baixo bloqueio do CAA fresco são necessárias algumas características, como elevada fluidez e viscosidade e coesão moderadas. Para isso, a correta escolha dos componentes e suas proporções na mistura são fundamentais. O autor sugere, então, um volume de pasta entre 35% e 40% do volume do concreto.

Visando trabalhar com o menor volume de pasta possível, para reduzir os custos do concreto, e cumprir as recomendações dos autores, decidiu-se testar um volume de 40%.

Desta forma foram produzidos os traços constantes no Apêndice A e verificado o espalhamento e tempo de escoamento pelo método do cone de Abrams, indicado pela NBR 15.823-2 (ABNT, 2010), a habilidade passante pela caixa L, conforme NBR 15.823-4 (ABNT, 2010), e a viscosidade pelo funil V, de acordo com a NBR 15.823-5 (ABNT, 2010), com o intuito de se confirmar a viabilidade de produção de tais concretos.

As propriedades almejadas para o CAA no estado fresco referiam-se a sua utilização para a maioria das aplicações correntes, como paredes, vigas e pilares, de acordo com os requisitos da NBR 15.823-1 (ABNT, 2010) expostos na Tabela 16. O Anexo B detalha os requisitos para todas as aplicações.

Tabela 16 – Requisitos, no estado fresco, desejáveis para os CAA produzidos.

Propriedade	Método	Classe	Limite
Espalhamento (mm)	cone de Abrams	SF 2	660 a 750
Viscosidade plástica aparente (s)	T500	VS 2	> 2
Viscosidade plástica aparente (s)	funil V	VF 2	9 a 25
Habilidade passante (mm)	caixa L	PL 2	≥ 0,80 (3 barras)
Habilidade passante (mm)	anel J	PJ 2	25 a 50 (16 barras)

Fonte: NBR 15.823-1 (ABNT, 2010).

Os traços aprovados, para cada relação a/c, ao final do estudo do volume de pasta do concreto estão detalhados na Tabela 17.

Tabela 17 – Traços, para 1 m³ de concreto, aprovados no estudo do volume de pasta dos CAA com relações a/c de 0,35, 0,45 e 0,55 (f/c = 0,40 e V_p = 40%).

a/c	sp/c (%)	Cimento (kg)	Areia (kg)	Pedrisco natural (kg)	Brita natural (kg)
0,35	0,55	478,11	762,00	295,20	493,20
0,45	0,275	427,99	762,00	295,20	493,20
0,55	0,20	386,83	762,00	295,20	493,20

Fonte: da autora.

Conforme a Tabela 17, fica claro que durante o estudo do volume de pasta para o concreto com relação água/cimento (a/c) igual a 0,35 foi necessário alterar a relação superplastificante sólido/cimento, anteriormente definida em sp/c = 0,50%, para sp/c = 0,55%, devido a relação a/c ser muito baixa. De maneira análoga, o concreto com relação a/c igual a 0,45 alterou a relação superplastificante sólido/cimento de sp/c = 0,25% para sp/c = 0,275%.

No Apêndice A pode-se verificar as características e as propriedades no estado fresco de todos os concretos produzidos para cada relação a/c para definição do volume ideal de pasta. Vale ressaltar que a relação f/c de 0,40 foi mantida fixa em todos os concretos e que foram produzidos 20 litros de CAA.

Em termos gerais, as propriedades no estado fresco dos concretos produzidos com o volume de pasta igual a 40% para as três relações a/c se enquadraram nos limites expostos na Tabela 16. Assim, entende-se que a metodologia de dosagem de CAA adotada foi adequada aos materiais locais utilizados na pesquisa.

Partiu-se para a determinação da resistência média (f_c) dos CAA aprovados. Realizou-se o ensaio de resistência à compressão axial em três corpos-de-prova cilíndricos com 10 cm de diâmetro por 20 cm de altura aos 28 dias de idade de produção dos concretos, seguindo a NBR 5.739 (ABNT, 2007). O “ f_c ” obtido para cada relação a/c encontra-se na Tabela 18.

Tabela 18 – Resistência média obtida aos 28 dias para os CAA com relações a/c iguais a 0,35, 0,45 e 0,55.

Relação a/c	f_c médio (MPa)
0,35	45,00
0,45	35,00
0,55	29,00

Fonte: da autora.

5.2.4 Traços dos CAA

Os traços dos concretos de referência para cada relação a/c foram calculados pelas Equações 1 a 11 do item 4.3.2 utilizando-se os teores das relações a/c, f/c, sp/c e V_p obtidos pelo estudo de dosagem e os índices físicos das matérias-primas obtidos pelo estudo da caracterização física.

Os traços dos concretos com agregados graúdos reciclados foram determinados a partir dos traços dos concretos de referência, levando-se em consideração o percentual de substituição do agregado graúdo natural por reciclado (10%, 20% e 30%, em volume) e a compensação das massas pela menor massa específica dos agregados graúdos reciclados. Esta compensação foi efetuada com base nas massas específicas dos materiais e o cálculo seguiu a Equação 12. Os traços unitários definidos para os concretos estão apresentados na Tabela 19.

$$M_{AGR} = M_{AGN} * \frac{\gamma_{AGR}}{\gamma_{AGN}} \quad (12)$$

Onde: M_{AGR} é a massa do agregado graúdo reciclado (kg); M_{AGN} é a massa do agregado graúdo natural (kg); γ_{AGR} é a massa específica do agregado graúdo reciclado (kg/m^3) e γ_{AGN} é a massa específica do agregado graúdo natural (kg/m^3).

Tabela 19 – Traços unitários dos CAA.

Traço	a/c	% AGR	Traço unitário		
			m	a	p
1	0,35	0%	3,24	1,59	1,65
2	0,35	10%	3,14	1,59	1,55
3	0,35	20%	3,04	1,59	1,45
4	0,35	30%	2,93	1,59	1,34
5	0,45	0%	3,62	1,78	1,84
6	0,45	10%	3,51	1,78	1,73
7	0,45	20%	3,39	1,78	1,61
8	0,45	30%	3,28	1,78	1,50
9	0,55	0%	4,00	1,97	2,03
10	0,55	10%	3,88	1,97	1,91
11	0,55	20%	3,75	1,97	1,78
12	0,55	30%	3,62	1,97	1,65

m: relação agregados secos/cimento em massa (kg/kg); a: relação agregado miúdo seco/cimento em massa (kg/kg); p: relação agregado graúdo seco/cimento em massa (kg/kg).

Nota: (1) Para a relação a/c = 0,35, tem-se a relação sp/c = 0,55%; para a relação a/c = 0,45, tem-se a relação sp/c = 0,275%; e para a relação a/c = 0,55, tem-se a relação sp/c = 0,20%.

(2) Para todos os traços, tem-se a relação f/c = 0,40 e Vp = 40%.

Fonte: da autora.

5.3 Produção dos concretos e execução dos ensaios

Inicialmente, determinou-se a massa de água a ser adicionada aos agregados graúdos reciclados para que estes ficassem pré-umedecidos ao serem postos na betoneira, a fim de evitar que parcela da água de amassamento fosse absorvida por eles, o que poderia influenciar negativamente no processo de hidratação do cimento e nas propriedades dos CAA no estado fresco.

A NBR 15.116 (ABNT, 2004), que dispõe sobre os agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil, determina que seja efetuada uma pré-molhagem (10 minutos antes da mistura) dos agregados reciclados com uma massa de água correspondente a 80% da absorção de água do agregado reciclado.

A sequência de adição e o tempo de mistura dos materiais na betoneira seguiu a recomendação de Gomes (2002), já detalhado no item 4.3.2. As quantidades de materiais utilizadas para a produção de 27 litros de CAA para cada traço estão relacionadas no Apêndice B.

Foram executados os seguintes ensaios no estado fresco: espalhamento e tempo de escoamento pelo método do cone de Abrams, indicado pela NBR 15.823-2 (ABNT, 2010); habilidade passante pelo anel J, segundo a NBR 15.823-3 (ABNT, 2010), e pela caixa L, conforme NBR 15.823-4 (ABNT, 2010); e viscosidade pelo funil V, de acordo com a NBR 15.823-5 (ABNT, 2010).

Objetivou-se alcançar as propriedades no estado fresco para a utilização do CAA em estruturas correntes, obedecendo aos requisitos da NBR 15.823-1 (ABNT, 2010), já citados na Tabela 16 durante o estudo do volume de pasta.

Após, moldaram-se 14 corpos-de-prova cilíndricos (10 cm x 20 cm) para cada concreto, sem efetuar nenhum tipo de vibração e/ou adensamento. Passadas 24 horas, os corpos-de-prova foram desmoldados e imersos em tanque para cura saturada em hidróxido de cálcio até as idades dos ensaios no estado endurecido, conforme preconiza a NBR 5.738 (ABNT, 2007). Os ensaios executados no estado endurecido foram: resistência à compressão axial, módulo de elasticidade, absorção por imersão, índice de vazios, massa específica e carbonatação. Os subitens a seguir relatam estes ensaios.

a) Resistência à compressão axial

Para este ensaio, baseou-se nos procedimentos da NBR 5.739 (ABNT, 2007), sendo que, antes da execução do ensaio, os corpos-de-prova foram capeados com enxofre para regularização das superfícies de aplicação da carga. O ensaio foi executado aos 28 e 56 dias de idade, utilizando-se dois corpos-de-prova para cada idade e para cada traço.

b) Módulo de elasticidade

Este ensaio foi executado com base na NBR 8.522 (ABNT, 2003). Inicialmente, utilizaram-se dois corpos-de-prova para cada traço a fim de determinar o módulo de elasticidade aos 28 dias de idade dos concretos, contudo os resultados se apresentaram incoerentes devido a um equívoco durante a realização do ensaio. Desta forma, utilizaram-se mais dois corpos-de-prova para determinar o módulo de elasticidade aos 56 dias.

O equipamento utilizado para capturar as deformações e enviar as informações ao software está apresentado na Figura 30(a) e na Figura 30(b) verifica-se este equipamento já conectado ao corpo-de-prova com o ensaio em andamento.

Figura 30 – (a) Equipamento e (b) execução do ensaio de módulo de elasticidade.



Fonte: da autora.

c) Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica real

Estas propriedades foram determinadas pela execução dos procedimentos da NBR 9.778 (ABNT, 2005). Foram utilizados dois corpos-de-prova para cada traço a fim de determinar as propriedades relacionadas com a durabilidade aos 28 dias de idade.

d) Frente de carbonatação

Este ensaio seguiu as recomendações da norma CPC 18 (RILEM, 1988), que recomenda o uso de uma solução de fenolftaleína a 1% para indicar mudança de cor entre valores de pH de 8,3 a 9,5. Para regiões carbonatadas de pH inferior a 8,3 o indicador é incolor, sendo de cor vermelho-carmim para valores de pH superiores a 9,5, caracterizando áreas não carbonatadas.

Depois de imersos em água saturada até os 28 dias de idade, os dois corpos-de-prova de cada traço objeto do ensaio foram postos num ambiente a céu aberto para sofrerem as ações das intempéries até completarem 56 dias. Na data determinada, preparou-se a solução de fenolftaleína e aspergiu-a no corpo-de-prova já partido ao meio para medir, com o uso do paquímetro, a frente de carbonatação ocasionalmente formada pelo acesso de monóxido/dióxido de carbono pelos poros da proveta.

Inicialmente, utilizaram-se dois corpos-de-prova para determinar a carbonatação aos 56 dias, mas não foi verificada frente de carbonatação em nenhum traço. Assim, utilizaram-se os dois corpos-de-prova que eram reservas de cada traço para medir a frente de carbonatação aos 200 dias de exposição às intempéries.

6 RESULTADOS E DISCUSSÕES

6.1 Resultados e discussões dos CAA no estado fresco

Os resultados médios obtidos nos ensaios realizados para os CAA no estado fresco, com suas respectivas classes de enquadramento, estão apresentados na Tabela 20. No Anexo A verifica-se a relação das classes de enquadramento definidas pela NBR 15.823-1 (ABNT, 2010) para cada método de ensaio.

Tabela 20 – Resultados dos ensaios com os CAA no estado fresco.

Tr.	a/c	% AGR	Espalhamento (mm)			T500 (s)			Anel J (mm)			Caixa L (adimens.)			Funil V (s)		
			Res.	%	Clas.	Res.	%	Clas.	Res.	%	Clas.	Res.	%	Clas.	Res.	%	Clas.
1	0,35	0%	750,0		SF 2	5,27		VS 2	46,0		PJ 2	0,93		PL 2	17,25		VF 2
2	0,35	10%	757,0	+0,9	SF 2	4,94	-6,3	VS 2	27,5	-40,2	PJ 2	0,93	-	PL 2	15,28	-11,4	VF 2
3	0,35	20%	750,0	-	SF 2	7,59	+44	VS 2	25,5	-44,6	PJ 2	0,87	-6,4	PL 2	25,63	+48,6	-
4	0,35	30%	731,5	-2,5	SF 2	5,75	+9,1	VS 2	25,0	-45,6	PJ 2	0,88	-5,4	PL 2	16,46	-4,6	VF 2
5	0,45	0%	745,0		SF 2	2,87		VS 2	37,5		PJ 2	0,85		PL 2	9,60		VF 2
6	0,45	10%	552,5	-25,8	SF 1	3,72	+29,6	VS 2	6,50	-82,7	PJ 1	0,42	-50,6	-	7,06	-26,5	VF 1
7	0,45	20%	645,0	-13,4	SF 1	2,75	-4,2	VS 2	35,0	-6,7	PJ 2	0,56	-34,1	-	6,84	-28,7	VF 1
8	0,45	30%	615,0	-17,4	SF 1	2,84	-1,0	VS 2	55,0	+46,7	-	0,50	-41,2	-	5,37	-44,1	VF 1
9	0,55	0%	692,5		SF 2	2,00		VS 1	42,5		PJ 2	0,84		PL 2	12,62		VF 2
10	0,55	10%	635,0	-8,3	SF 1	1,50	-25	VS 1	85,0	+100	-	0,40	-52,4	-	3,97	-68,5	VF 1
11	0,55	20%	640,0	-7,6	SF 1	1,50	-25	VS 1	95,0	+123	-	0,56	-33,3	-	3,10	-75,4	VF 1
12	0,55	30%	627,5	-9,4	SF 1	1,50	-25	VS 1	37,5	-11,8	PJ 2	0,64	-23,8	-	4,02	-68,1	VF 1

Tr.: traço; Res.: resultado médio; Clas.: classe de enquadramento; %: comparação entre o resultado em questão e o resultado do CAA referencial.

Fonte: da autora.

Conforme dados da Tabela 20, constata-se que os CAA de referência das três relações água/cimento (a/c) atenderam às classes de enquadramento almeçadas para cada método de ensaio (SF 2, VS 2, PJ 2, PL 2 e VF 2). Apenas o CAA referencial da relação a/c=0,55 apresentou o T500 na classe VS 1, mas o seu valor (2,00s) é o limite entre a classe VS 1 e VS 2. Entende-se, com isso, que a repetitividade da produção dos CAA de referência

para um volume um pouco superior (27 litros) ao adotado no estudo do Vp (20 litros) confirmou o enquadramento dos concretos para os limites aceitáveis apresentados para cada parâmetro, demonstrando que os estudos de dosagens foram realizados corretamente e que há confiabilidade para uma produção em maior escala.

Ainda de acordo com os dados da Tabela 20, todo o grupo de CAA da relação $a/c=0,35$ se enquadrou nas classes almejadas. A substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado não influenciou negativamente nas propriedades ligadas à trabalhabilidade dos CAA, ainda que o resultado do funil V para o CAA com 20% de AGR não tenha se enquadrado em nenhuma classe. As pequenas alterações entre os resultados para os concretos deste grupo podem ser advindas das peculiaridades dos ensaios como, por exemplo, na marcação do tempo do escoamento do concreto pelo funil V com o cronômetro, que é altamente influenciada pelo poder de reação do profissional ao iniciar e finalizar a cronometragem.

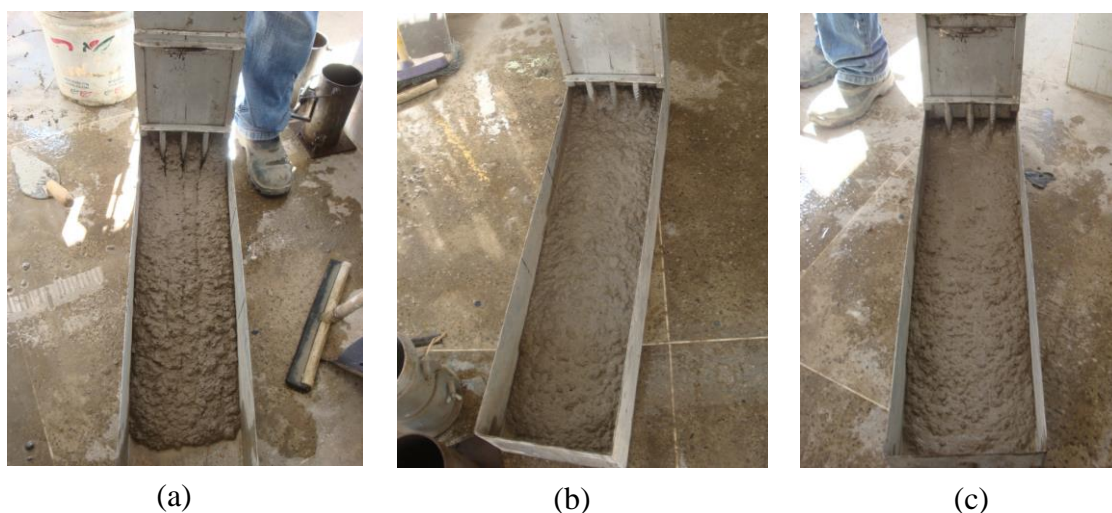
Provavelmente o elevado teor de aditivo do grupo de CAA da relação $a/c=0,35$, comparado aos outros dois grupos, influenciou para que este grupo tenha se apresentado mais trabalhável, pois enquanto a relação $a/c=0,35$ possuía uma relação superplastificante sólido/cimento ($sp/c=0,55\%$), as relações $a/c=0,45$ e $a/c=0,55$ tinham a metade ($sp/c=0,275\%$) e quase um terço a menos ($sp/c=0,20\%$), respectivamente.

Para o grupo de CAA da relação $a/c=0,45$, com relação à propriedade espalhamento, apenas o concreto sem o AGR permaneceu na classe escolhida. Os CAA com 10%, 20% e 30% de AGR apresentaram espalhamentos 25,8%, 13,4% e 17,4% menores do que o concreto referencial, resultando no enquadramento em uma classe menos trabalhável para este método de ensaio (SF 1), de acordo com a NBR 15.823-1 (ABNT, 2010). Analisando os resultados do tempo T500 obtidos para os concretos com agregados reciclados da relação $a/c=0,45$, verifica-se que todos permaneceram na mesma classe que o concreto referencial se enquadrou (VS 2). Para a propriedade viscosidade pelo funil V, a introdução dos agregados reciclados na mistura proporcionou uma menor viscosidade. Os CAA com 10%, 20% e 30% de AGR apresentaram viscosidade 26,5%, 28,7% e 44,1% menores, respectivamente, do que a alcançada pelo concreto referencial, todos se enquadrando na classe VF1.

Os resultados alcançados para a propriedade habilidade de passagem pelas barras de aço dos concretos com agregados reciclados da relação $a/c=0,45$ (tanto no anel J como na caixa L), independente da porcentagem de substituição, indicam uma necessidade de ajuste de dosagem para o uso destes concretos em estruturas armadas, em caso de aplicação real. Na

Figura 31 está ilustrado o ensaio da caixa L para os concretos da relação $a/c=0,45$ com 10%, 20% e 30% de AGR, cujos valores obtidos foram inferiores ao do concreto referencial, na ordem de 50,6%, 34,1% e 41,2%, respectivamente.

Figura 31 – Ensaio da caixa L dos CAA com relação $a/c = 0,45$ (a) com 10% e AGR, (b) com 20% de AGR e (c) com 30% de AGR.



Fonte: da autora.

Acredita-se que a quantidade de água acrescida nos concretos de relação $a/c=0,35$ em relação aos concretos de relação $a/c=0,45$ pode não ter sido suficiente para compensar a redução de 50% no teor de aditivo e manter as propriedades de trabalhabilidade definidas no estudo para os concretos com agregados reciclados. Desta forma, as propriedades no estado fresco dos concretos com agregados reciclados da relação $a/c=0,45$ foram mais afetadas do que as dos concretos com agregados reciclados da relação $a/c=0,35$, possivelmente, porque a escolha da pré-molhagem correspondente a 80% da absorção do AGR pode não ter sido suficiente para limitar que este agregado poroso absorvesse a água destinada à manutenção das condições de fluidez, coesão e viscosidade impostas ao concreto referencial.

O grupo de CAA da relação $a/c=0,55$ teve comportamento semelhante ao grupo da relação $a/c=0,45$, uma vez que apenas o concreto referencial se enquadrou nas classes almejadas, enquanto que os concretos com agregados reciclados se enquadraram em uma classe menos trabalhável.

Acredita-se que esta produção de concretos da relação $a/c=0,55$ mais coesos e menos viscosos, comparado aos concretos dos outros dois grupos de relações a/c , foi devida a um baixo teor de aditivo utilizado no traço de referência, pois este não apresentou

espalhamento similar aos demais CAA de referência (± 750 mm), e também devida à alta absorção dos agregados reciclados dos CAA com 10%, 20% e 30% de AGR.

Okamura (1997) afirma que a água aumenta a fluidez do concreto e diminui consideravelmente sua viscosidade, ao contrário do aditivo superplastificante que tem por característica aumentar a fluidez com desprezível diminuição da viscosidade.

Fazendo uma comparação entre os concretos com 10%, 20% e 30% de AGR da relação $a/c=0,55$ não houve uma variação considerável nas propriedades de um concreto para outro nos ensaios de espalhamento, T500 e funil V. Por exemplo, o espalhamento do CAA com 20% de AGR foi 0,79% maior do que o espalhamento do CAA com 10% de AGR e o espalhamento do CAA com 30% de AGR foi 1,18% menor do que o espalhamento do CAA com 10% de AGR.

A propriedade mais afetada para os concretos com agregados reciclados do grupo da relação $a/c=0,55$ foi a habilidade de passagem pelas armaduras, tal como ocorreu com os concretos modificados da relação $a/c=0,45$. Não foi possível enquadrar os concretos com agregados reciclados da relação $a/c=0,55$ em nenhuma classe definida pela NBR 15.823-1 (ABNT, 2010) para os métodos de ensaios com o anel J e com a caixa L.

Seguindo o mesmo raciocínio usado para a relação $a/c=0,45$, acredita-se que a quantidade de água usada para a pré-molhagem dos agregados reciclados (80% da capacidade de absorção) não foi suficiente para evitar grandes modificações nas propriedades medidas no estado fresco. Portanto, a água disponível para a manutenção das condições de trabalhabilidade similares às obtidas pelo concreto referencial foi reduzida por conta da alta absorção dos agregados reciclados e estes passaram a sofrer mais atrito entre eles, o qual pode ter dificultado a passagem do concreto pelas barras de aço, resultando em uma inclinação maior entre o ponto inicial e final da caixa L e um espalhamento menor no anel J.

Na Figura 32 observa-se o ensaio do anel J com o CAA referencial da relação $a/c=0,55$ (Figura 32a) e com o CAA com 10% de AGR da mesma relação a/c (Figura 32b). Percebe-se uma maior coesão do CAA com 10% de AGR, especialmente verificado no entorno das barras de aço e pela formação de uma marca no concreto ao passar pelas barras (Figura 32b).

Para um melhor entendimento da influência conjunta das duas variáveis testadas (relação a/c e AGR) sobre os vários ensaios realizados no estado fresco seria interessante realizar uma análise estatística dos resultados obtidos e produzir modelos matemáticos que expliquem tais propriedades. Entretanto, não foi possível realizar esta análise dada a grande variabilidade apresentada nos resultados.

Figura 32 – Ensaio do anel J com o CAA da relação a/c = 0,55 (a) referencial e (b) com 10% de AGR.



Fonte: da autora.

6.2 Resultados dos CAA no estado endurecido

Os resultados dos ensaios no estado endurecido realizados com os corpos-de-prova cilíndricos dos CAA produzidos estão sintetizados na Tabela 21.

Tabela 21 – Resultados dos ensaios realizados com os CAA no estado endurecido.

Traço	a/c	% AGR	fc (MPa)		Eci (GPa) 56 dias	Abs. imersão (%) 28 dias	Índ. vazios (%) 28 dias	Massa esp. (g/cm ³) 28 dias	Carb. (mm) 200 dias
			28 dias	56 dias					
1	0,35	0%	48,48	50,71	61,23	2,88	6,71	2,50	0,00
2	0,35	10%	50,10	53,95	66,88	2,40	5,54	2,44	0,00
3	0,35	20%	63,80	59,90	73,42	3,73	8,60	2,51	0,00
4	0,35	30%	60,47	57,21	64,37	3,91	8,89	2,49	0,00
5	0,45	0%	32,14	38,02	61,19	4,66	10,39	2,48	2,96
6	0,45	10%	41,98	43,85	43,92	4,85	10,71	2,47	2,73
7	0,45	20%	41,91	37,53	58,56	5,87	12,79	2,50	2,79
8	0,45	30%	36,45	34,05	48,20	5,39	11,76	2,47	3,10
9	0,55	0%	30,46	32,32	52,67	5,92	13,00	2,52	2,77
10	0,55	10%	27,19	32,01	36,63	7,37	15,67	2,52	1,70
11	0,55	20%	33,10	33,49	45,65	7,33	15,61	2,52	3,33
12	0,55	30%	32,67	31,72	46,08	7,59	16,02	2,51	3,23

Fonte: da autora.

Ressalta-se que os resultados de resistência à compressão axial são os maiores valores entre dois corpos-de-prova cilíndricos e os resultados dos demais ensaios são os valores médios. No apêndice C podem ser visualizados os resultados individuais de cada corpo-de-prova.

Conforme dados da Tabela 21, pode-se observar que os agregados reciclados exercem influência sobre as propriedades avaliadas. Assim, para um melhor entendimento da influência conjunta das duas variáveis testadas (relação *a/c* e AGR) sobre as propriedades em questão, optou-se por realizar uma análise estatística dos resultados e produzir modelos matemáticos que expliquem tais propriedades.

6.3 Análise estatística dos resultados dos CAA no estado endurecido

Para a análise estatística utilizou-se o *software* Statistica 7.0, indicando como fatores controláveis a relação água/cimento (*a/c*) e a porcentagem de agregado graúdo reciclado (AGR); e como variáveis de resposta as resistências à compressão axial aos 28 dias (*fc28*) e 56 dias (*fc56*), o módulo de elasticidade aos 56 dias (*Eci56*), a absorção por imersão aos 28 dias (*Abs28*), o índice de vazios aos 28 dias (*Vazios28*), a massa específica aos 28 dias (γ_{28}) e a carbonatação aos 200 dias (*Carb200*). Realizou-se a análise de variância (ANOVA) de todos os resultados, com nível de significância de 5%, para constatar se os fatores controláveis e suas interações são significativos ou não.

Montgomery (2001) defende que a abordagem estatística para um projeto experimental é necessário quando se quer chegar a conclusões significativas a partir dos dados obtidos. Segundo o autor, os métodos estatísticos devem ser usados para analisar os dados de modo que os resultados e as conclusões sejam objetivos.

Também foi efetuada a análise dos resíduos padronizados para os resultados de todos os ensaios, pois, segundo Ribeiro e Caten (2010), devem-se desconsiderar os resultados cujos valores dos resíduos padronizados sejam maiores do que o módulo de 1,96, para um intervalo de confiança de 95%. No Apêndice D foram elencadas as análises, sendo que nenhum resultado dos ensaios teve resíduo padronizado fora do módulo de 1,96.

Posteriormente, e tendo como base a ANOVA, foram definidos modelos matemáticos de comportamento para cada variável de resposta por meio da Análise de Regressão Linear Múltipla realizada no mesmo *software*. Após, cada modelo matemático também foi submetido à análise de variância para revelar sua significância.

Esta Análise de Regressão Linear Múltipla é uma metodologia estatística de previsão de valores de uma ou mais variáveis de resposta (dependentes) através de um conjunto de variáveis explicativas (independentes). Sua aplicação é especialmente importante, pois permite que se estime o valor de uma variável com base num conjunto de outras variáveis. Quanto mais significativo for o peso de uma variável isolada, ou de um conjunto de variáveis explicativas, tanto mais se poderá afirmar que alguns fatores afetam mais o comportamento de uma variável de resposta especificamente procurada do que outros (KASZNAR; GONÇALVES, 2007).

Para uma análise mais aprofundada dos modelos matemáticos propostos foram estudados os efeitos isolados dos fatores controláveis. Assim, enquanto os valores de um fator eram variados, mantinha-se o outro fator no ponto médio do seu intervalo. O ponto médio da relação a/c foi 0,45 e o ponto médio da porcentagem de AGR foi 15%.

Para todos os modelos os percentuais de substituição dos agregados graúdos naturais por reciclados foram informados na escala de 0 (0%) a 30 (30%), e a relação a/c foi expressa na escala usual, de 0,35, 0,45 e 0,55. Além disso, estes modelos servem, exclusivamente, para os materiais naturais e reciclados utilizados na pesquisa e para a dosagem de CAA estudada.

Os subitens a seguir detalham a análise estatística de cada propriedade estudada.

6.3.1 Resistência à compressão axial aos 28 dias

A análise de variância dos resultados obtidos no ensaio de resistência à compressão axial nos corpos-de-prova cilíndricos aos 28 dias de idade está apresentada na Tabela 22.

Tabela 22 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	1976,71	2	988,36	85,590	0,000000	S
AGR	317,37	3	105,79	9,161	0,001987	S
a/c x AGR	188,77	6	31,46	2,724	0,065859	NS
Erro	138,57	12	11,55			
Total	2621,421	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

S – significativo; NS – não significativo

Fonte: da autora.

Por meio da Tabela 22 verifica-se que tanto a relação água/cimento (a/c) quanto a porcentagem de agregado reciclado (AGR) são significativos sobre a resistência à compressão axial aos 28 dias (fc28), porém a interação destes fatores não tem influência sobre esta propriedade. Propôs-se um modelo matemático, apresentado na Equação 13, para descrever o comportamento dos concretos. Este modelo apresentou um coeficiente de determinação (R²) igual a 0,83 e sua análise de variância está apresentada na Tabela 23.

$$fc28 = - 12,75 + \frac{21,14}{a/c} + 0,27 * AGR \quad (13)$$

Onde: fc28 = resistência à compressão axial aos 28 dias (MPa); a/c = relação água/cimento (adimensional); AGR = porcentagem de agregado graúdo reciclado (%).

Tabela 23 – Análise de variância do modelo matemático da resistência à compressão axial aos 28 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	40589,76	3,00000	13529,92	659,4410	0,000000
Resíduos	430,86	21,00000	20,52		
Total	41020,62	24,00000			
Total Corrigido	2621,42	23,00000			

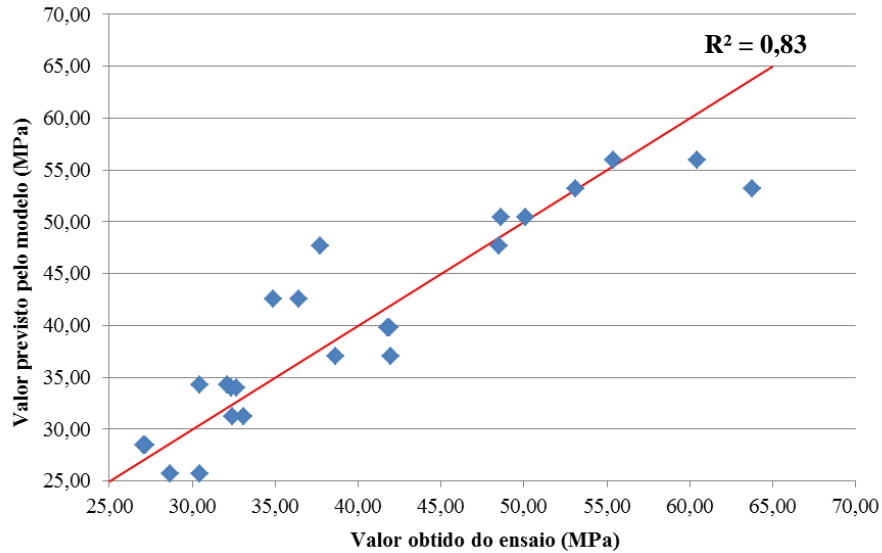
Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada
Fonte: da autora.

Por meio da Tabela 23 constata-se que o modelo matemático proposto é significativo, dado que o valor “p” ficou abaixo do nível de significância (0,05) e que o coeficiente de determinação apresentou uma porcentagem satisfatória (83%).

Por meio da Equação 13 verifica-se que a relação a/c é o principal interveniente da resistência axial aos 28 dias, sendo que, para relações a/c maiores serão obtidas resistências menores, o que indica coerência com a literatura. Ainda que a porcentagem de agregado reciclado interfira nesta propriedade, pelo modelo apresentado pode-se observar que esta influência é baixa. O baixo coeficiente do AGR no modelo é coerente com o resultado do teste F apresentado na Tabela 22, em que a relação a/c apresenta um teste F nove vezes maior do que o do AGR. Este resultado tem congruência com o apresentado por Cabral (2007) e Liu et al. (2004) quando deduziram que a relação a/c é o fator que mais influi no comportamento da resistência à compressão axial dos concretos com agregados reciclados.

Fez-se uma comparação entre os valores obtidos da realização do ensaio e os valores previstos pela Equação 13 (Figura 33), ficando atestado que o modelo é válido pois os valores se aproximaram da linha de tendência e obteve-se o mesmo R² do modelo.

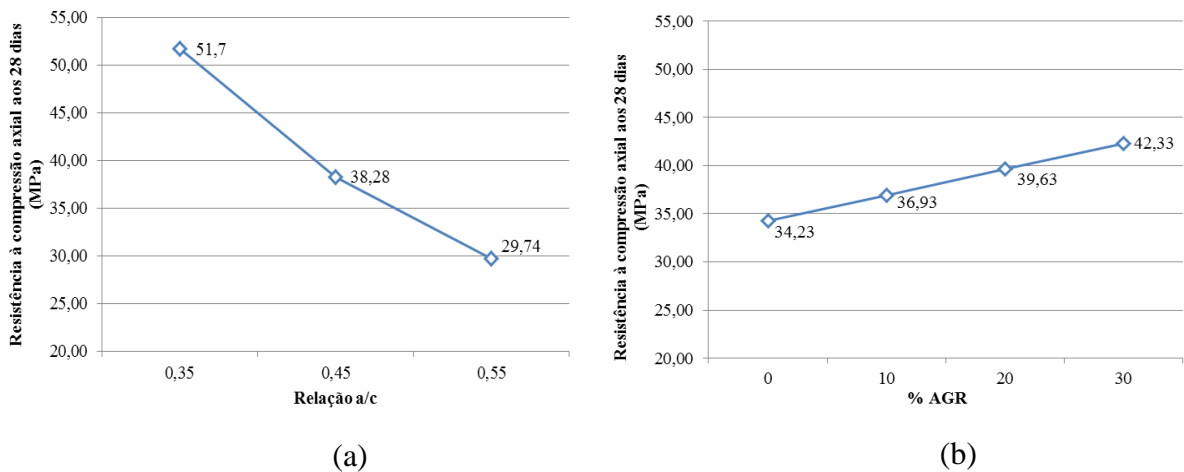
Figura 33 – Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de resistência axial aos 28 dias.



Fonte: da autora.

Os efeitos isolados da relação a/c e da porcentagem de AGR sobre a resistência axial aos 28 dias estão apresentados na Figura 34a e Figura 34b, respectivamente.

Figura 34 – Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre a resistência axial dos CAA aos 28 dias.



Fonte: da autora.

Conforme a Figura 34a, observa-se que na medida em que se aumenta a relação a/c tem-se uma diminuição da resistência. Para a relação a/c=0,45 tem-se uma resistência aos 28 dias 26,0% menor do que a da relação a/c=0,35; por sua vez, para a relação a/c=0,55 tem-se uma resistência aos 28 dias 42,5% menor do que a da relação a/c=0,35. De fato, Mehta e Monteiro (2008) relatam que a relação a/c interfere diretamente sobre a resistência do concreto, apresentando resistências maiores os concretos com relações a/c menores, que possuem menor quantidade de água livre. Domone (2007), Domone (2006), Holschemacher (2004) e Felekoglu (2007) encontraram resultados similares quando estudaram as propriedades mecânicas do CAA.

Também foi observado pela Figura 34b que ocorre um incremento suave na resistência com o aumento da porcentagem de substituição de agregado natural por reciclado. Para 10%, 20% e 30% de AGR tem-se um ganho, respectivamente, de 7,9%, 15,8% e 23,7% da resistência aos 28 dias comparados a 0% de AGR. Esta ocorrência, segundo Leite (2001), pode ser devida a capacidade que o agregado reciclado tem de absorver a pasta de cimento, fazendo com que cristais de hidratação precipitem nos poros entre o agregado e a pasta, propiciando um maior fechamento da zona de transição e melhorando a resistência do concreto na zona. Neste caso, a ruptura do concreto pode ocorrer no agregado e se o agregado reciclado de concreto for proveniente de concreto de alta resistência, pode-se ter uma maior resistência do concreto novo.

Poon et al. (2004) produziram concretos com substituição de 20%, 50% e 100% dos agregados graúdos naturais por agregados graúdos reciclados de concreto para estudo da trabalhabilidade e da resistência à compressão axial aos 28 dias. Os autores concluíram que os concretos produzidos com até 50% de substituição de agregados naturais por agregados reciclados apresentaram as resistências superiores ao concreto de referência. Sagoe-Crentsil et al. (2001) e Li et al. (2006) também obtiveram resultados semelhantes.

6.3.2 Resistência à compressão axial aos 56 dias

A análise de variância dos resultados do ensaio de resistência à compressão axial aos 56 dias está apresentada na Tabela 24.

Tabela 24 – Análise de variância dos resultados de resistência à compressão axial aos 56 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	2306,95	2	1153,48	56,905	0,000001	S
AGR	35,10	3	11,70	0,577	0,640934	NS
a/c x AGR	269,16	6	44,86	2,213	0,113826	NS
Erro	243,24	12	20,27			
Total	2854,461	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada
S – significativo; NS – não significativo

Fonte: da autora.

Os dados da Tabela 24 revelam que, embora aos 28 dias a resistência axial tenha sofrido influência tanto da relação a/c como do AGR, aos 56 dias esta influência passou a ser apenas da relação a/c. Salem e Burdette (1998) acreditam que a principal característica do AGR sobre a resistência é a sua porosidade, de tal forma que aos 28 dias ainda é possível existirem partículas que absorvam a água livre remanescente do concreto, mas aos 56 dias esta água já foi consumida.

Na Equação 14 do modelo matemático proposto aparece apenas o termo que exerce influência significativa sobre a propriedade avaliada. Seu coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 0,79 e sua ANOVA encontra-se na Tabela 25.

$$fc_{56} = \left(\frac{6,71}{a/c} \right)^{1,34} \quad (14)$$

Onde: fc_{56} = resistência à compressão axial aos 56 dias (MPa); a/c = relação água/cimento (adimensional).

Tabela 25 – Análise de variância do modelo matemático da resistência à compressão axial aos 56 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	39659,10	2,00000	19829,55	737,3933	0,000000
Resíduos	591,61	22,00000	26,89		
Total	40250,71	24,00000			
Total Corrigido	2854,46	23,00000			

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

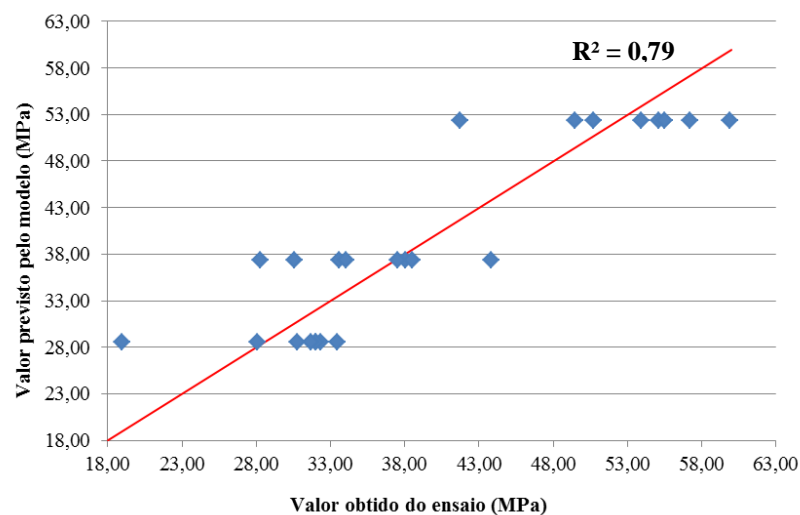
Fonte: da autora.

Analisando a ANOVA apresentada na Tabela 25, tem-se que a Equação 14 expressa bem a influência da relação a/c sobre a resistência axial aos 56 dias, dado que o valor “p” foi bem inferior a 0,05 e o teste F foi bastante representativo.

O modelo matemático dado pela Equação 14 expressa claramente o quanto a relação a/c afeta a resistência axial aos 56 dias. A compreensão deste modelo segue a mesma adotada para o modelo exposto na Equação 13: quanto maior a relação a/c, menor será a resistência. Ainda, Mehta e Monteiro (2008) afirmam que para uma dada relação a/c, quanto mais longo o período de cura, maior será a resistência, pois ainda estará ocorrendo a hidratação de partículas de cimento.

Também foi feita uma comparação entre os valores obtidos da realização do ensaio e os valores previstos pela Equação 14, sendo mostrada na Figura 35. Tendo em vista que a única variável independente do modelo (relação a/c) possui apenas três pontos que são 0,35, 0,45 e 0,55, os valores previstos serão 52,37 MPa, 37,39 MPa e 28,58 MPa, respectivamente.

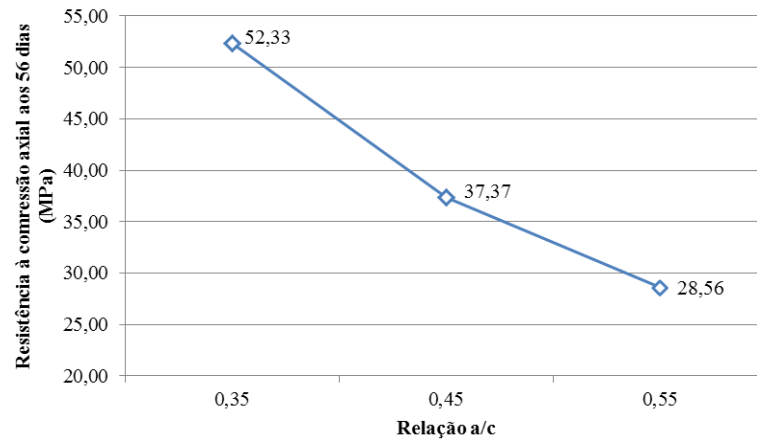
Figura 35 – Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de resistência axial aos 56 dias.



Fonte: da autora.

O efeito da relação a/c sobre a resistência axial aos 56 dias está apresentado na Figura 36.

Figura 36 – Efeito da relação a/c sobre a resistência axial dos CAA aos 56 dias.



Fonte: da autora.

Tal como ocorreu para a propriedade de resistência aos 28 dias, observa-se pela Figura 36 que a resistência aos 56 dias será maior quanto menor for a relação a/c. Para a relação a/c=0,45 tem-se uma resistência aos 56 dias 28,6% menor do que a da relação a/c=0,35; por sua vez, para a relação a/c=0,55 tem-se uma resistência aos 56 dias 45,4% menor do que a da relação a/c=0,35. Os estudos de Oliveira e Vazquez (1996) indicaram a mesma tendência.

Percebe-se que as resistências para as relações a/c aos 56 dias foram similares às obtidas aos 28 dias, indicando que, neste caso, o tempo de cura não acarretou em aumento de resistência axial.

6.3.3 Módulo de elasticidade

A análise de variância dos resultados do ensaio de módulo de elasticidade realizado aos 56 dias de idade dos corpos-de-prova está apresentada na Tabela 26.

Tabela 26 – Análise de variância dos resultados de módulo de elasticidade aos 56 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	1845,85	2	922,93	40,105	0,000005	S
AGR	406,62	3	135,54	5,890	0,010369	S
a/c x AGR	421,69	6	70,28	3,054	0,047211	S
Erro	276,15	12	23,01			
Total	2950,313	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

S – significativo; NS – não significativo

Fonte: da autora.

Pela análise de variância da Tabela 26 fica evidenciado que os dois fatores controláveis e sua interação tiveram efeito significativo sobre o módulo de elasticidade.

Pela Equação 15, cujo coeficiente de determinação (R^2) foi de 0,64, visualiza-se a proposição do modelo matemático baseado na ANOVA da Tabela 26. A ANOVA do modelo encontra-se na Tabela 27.

$$Eci56 = 41,50 + \left(\frac{1,13}{a/c} \right)^{2,70} + 0,57 * AGR - 1,41 * a/c * AGR \quad (15)$$

Onde: Eci56 = módulo de elasticidade aos 56 dias (GPa); a/c = relação água/cimento (adimensional); AGR = porcentagem de agregado graúdo reciclado (%).

Tabela 27– Análise de variância do modelo matemático do módulo de elasticidade aos 56 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	74234,17	5,00000	14846,83	266,6587	0,000000
Resíduos	1057,87	19,00000	55,68		
Total	75292,04	24,00000			
Total Corrigido	2950,31	23,00000			

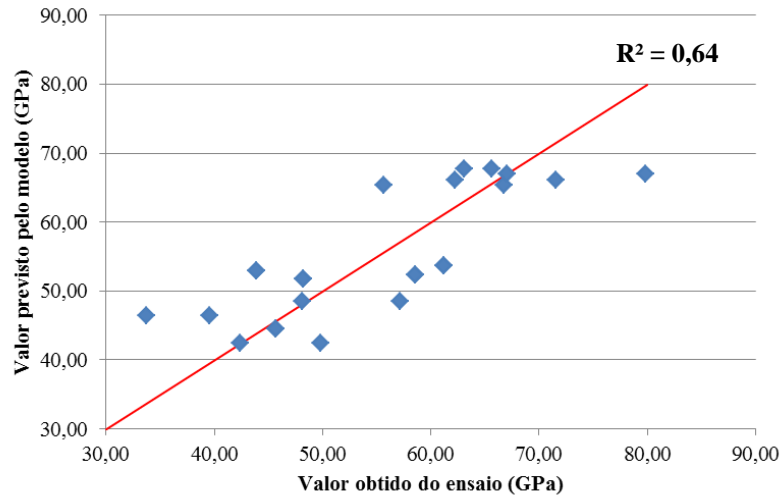
Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

Fonte: da autora.

Por meio da Tabela 27 tem-se que o modelo proposto é significativo quanto à consideração dos efeitos das variáveis isoladas a/c e AGR e a interação entre elas. No entanto, o coeficiente de determinação encontrado foi baixo (0,64), sendo refletido na comparação realizada para os valores obtidos do ensaio e previstos pelo modelo (Figura 37).

Analisando a Equação 15 juntamente com a Tabela 26 tem-se que a relação a/c é a principal interveniente na determinação do módulo de elasticidade, já que o teste F obtido para a relação a/c representa oito vezes o do AGR e treze vezes o da interação deles. A observação pode significar que quanto maior a relação a/c menor será o módulo do concreto. Os resultados estão coerentes com os encontrados por Leite (2001), que indicaram uma influência negativa na determinação do módulo de elasticidade quando se avaliou a interação entre a relação a/c e o agregado graúdo reciclado de RCC.

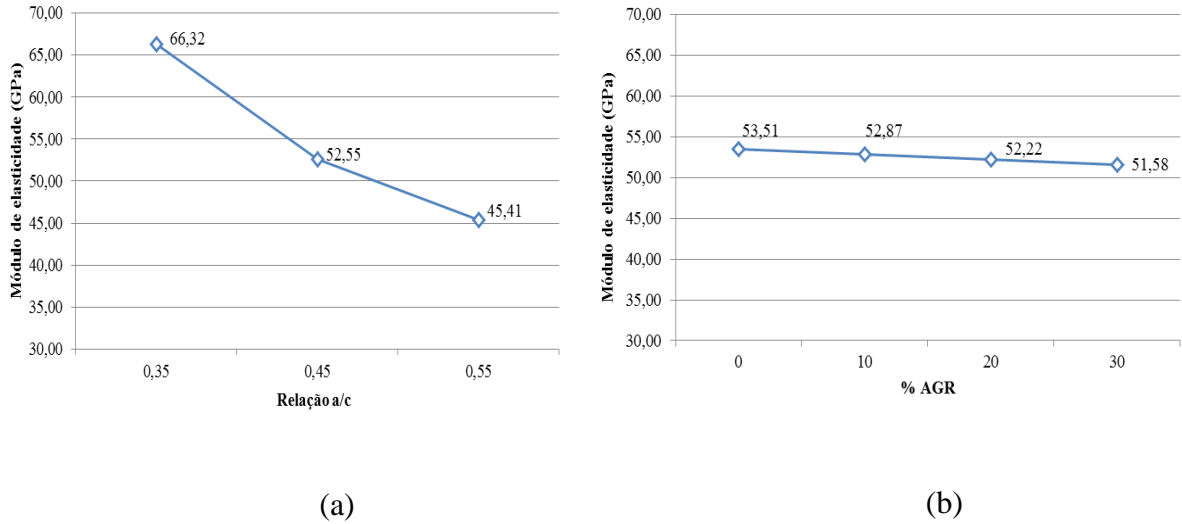
Figura 37 – Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de módulo de elasticidade aos 56 dias.



Fonte: da autora.

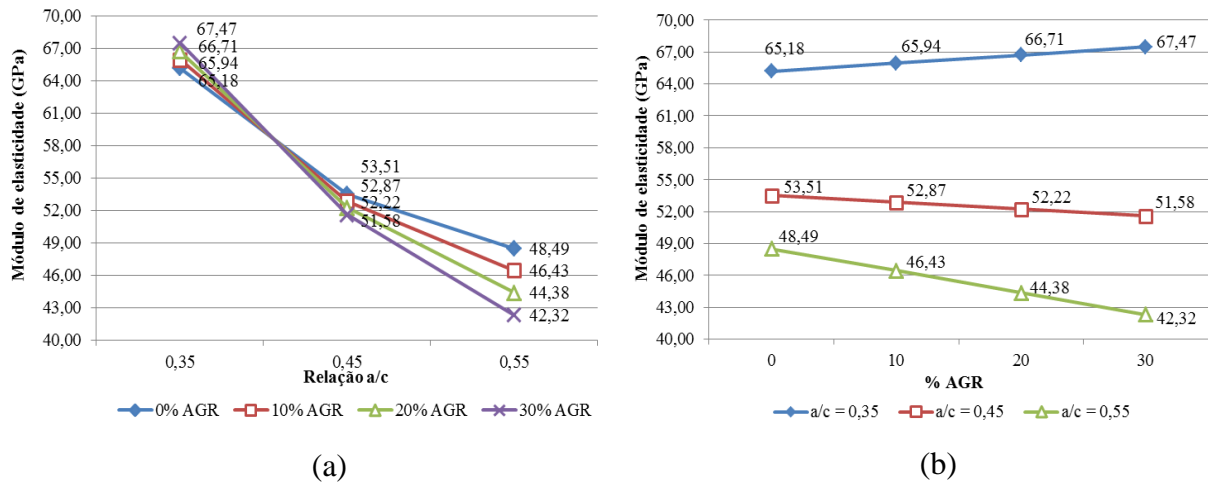
Os efeitos isolados da relação a/c e da porcentagem de AGR sobre o módulo de elasticidade aos 56 dias estão apresentados nas Figuras 38a e Figura 38b, respectivamente; enquanto que o efeito da interação destes fatores estão apresentados nas Figuras 39a e 39b.

Figura 38 – Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre o módulo de elasticidade dos CAA aos 56 dias.



Fonte: da autora.

Figura 39 – Efeitos da interação entre a relação a/c e a porcentagem de AGR sobre o módulo de elasticidade dos CAA aos 56 dias.



Fonte: da autora.

Conforme a Figura 38a, tem-se que à medida que a relação a/c aumenta, o módulo de elasticidade vai diminuindo. Para a relação a/c=0,45 tem-se um módulo 20,8% menor do que o da relação a/c=0,35; por sua vez, para a relação a/c=0,55 tem-se um módulo 31,5% menor do que o da relação a/c=0,35. Esta condição é coerente com o relato de Helene e Andrade (2010), quando afirmam que um aumento na relação a/c implica na diminuição da resistência do concreto e, portanto, do seu módulo. Este resultado é similar aos obtidos por Persson (1999), Persson (2001), Erik e Pentti (1999) e Felekoglu (2007).

Na Figura 38b pode-se observar que, em termos gerais, o módulo de elasticidade dos CAA com agregados reciclados decresce suavemente com o aumento da porcentagem de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Para 10%, 20% e 30% de AGR tem-se um decréscimo, respectivamente, de 1,2%, 2,4% e 3,6% do módulo comparados a 0% de AGR. Safiuddin et al. (2011) encontraram valores similares quando estudaram concretos com alta trabalhabilidade produzidos com substituição de 0%, 30%, 50%, 70% e 100% de agregado gráudo natural por agregado gráudo reciclado de concreto, em massa. Os autores entenderam que, devido o agregado reciclado ser mais poroso do que o agregado natural, obtém-se concretos com menores módulos de elasticidade à medida que se aumenta o teor de agregado reciclado utilizado. Autores como Hu et al. (2009), Kou et al. (2007) e Padmini et al. (2009) também obtiveram resultados parecidos.

De acordo com Hansen (1986), citado por Safiuddin et al. (2011), o módulo de elasticidade do concreto com agregado reciclado de concreto pode ser 15% a 50% menor do que o módulo de elasticidade do concreto sem este tipo de agregado.

Por meio das Figuras 39a e 39b, pode-se observar que para a relação $a/c = 0,35$, o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da porcentagem de AGR, enquanto que para relações a/c maiores tem-se o comportamento inverso: módulo do concreto diminuindo com o aumento da porcentagem de AGR. Esta combinação pode ser explicada porque com relações a/c muito baixas tem-se uma maior restrição da elasticidade da matriz de concreto provocada pela limitação do número de poros da pasta (HELENE; ANDRADE, 2010).

6.3.4 Absorção de água por imersão

A análise de variância dos resultados do ensaio de absorção de água por imersão dos corpos-de-prova aos 28 dias está apresentada na Tabela 28.

Tabela 28 – Análise de variância dos resultados de absorção de água por imersão aos 28 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	58,4594	2	29,2297	200,771	0,000000	S
AGR	5,9272	3	1,9757	13,571	0,000366	S
a/c x AGR	2,4211	6	0,4035	2,772	0,062739	NS
Erro	1,7470	12	0,1456			
Total	68,5547	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

S – significativo; NS – não significativo

Fonte: da autora.

A ANOVA da Tabela 28 revelou que a relação a/c e a porcentagem de AGR possuem influência significativa na propriedade de absorção de água, contudo a interação entre elas não tem significância.

Na Equação 16 visualiza-se o modelo matemático resultante da análise de regressão linear múltipla. Este modelo possui um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,92 e sua ANOVA está demonstrada na Tabela 29.

$$\text{Abs}_{28} = - 4,07 + 19,11 * a/c + 0,04 * \text{AGR} \quad (16)$$

Onde: Abs_{28} = absorção de água por imersão aos 28 dias (%); a/c = relação água/cimento (adimensional); AGR = porcentagem de agregado graúdo reciclado (%).

Tabela 29 – Análise de variância do modelo matemático da absorção de água por imersão aos 28 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	702,8346	3,00000	234,2782	1016,990	0,000000
Resíduos	4,8377	21,00000	0,2304		
Total	707,6723	24,00000			
Total corrigido	68,5547	23,00000			

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

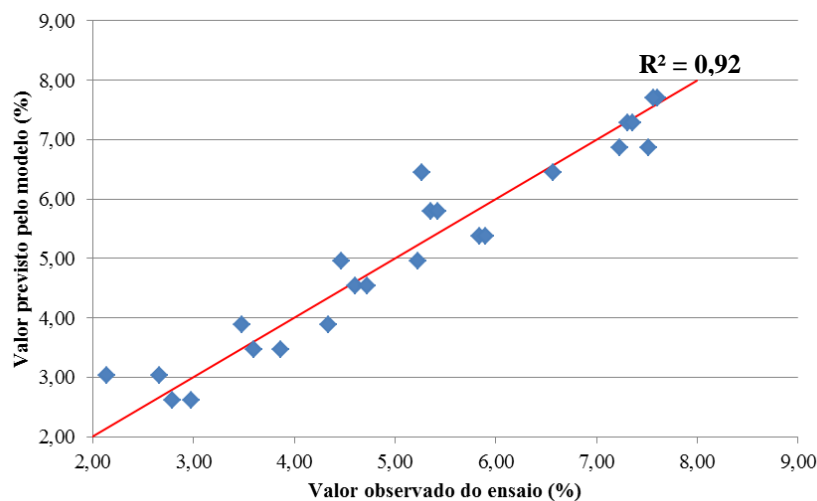
Fonte: da autora.

Pela Tabela 29 verifica-se que o modelo matemático tem alta significância na representação da absorção de água dos CAA, pois foi encontrado um valor “p” infinitamente inferior a 0,05, sendo corroborado pelo alto valor do teste F (1016,99) e do coeficiente de determinação ($R^2 = 0,92$) obtidos.

Pela Equação 16 constata-se que, embora as duas variáveis independentes tenham influência significativa na propriedade de absorção de água por imersão é a relação a/c quem determina o valor desta propriedade, uma vez que seu teste F, apresentado na Tabela 28, foi cerca de quinze vezes superior ao obtido pelo AGR.

A comparação entre os valores obtidos da realização do ensaio e os valores previstos pela Equação 16 está apresentada na Figura 40. A grande proximidade destes valores à linha de tendência indica que o modelo proposto expressa muito bem a propriedade de absorção de água dos CAA.

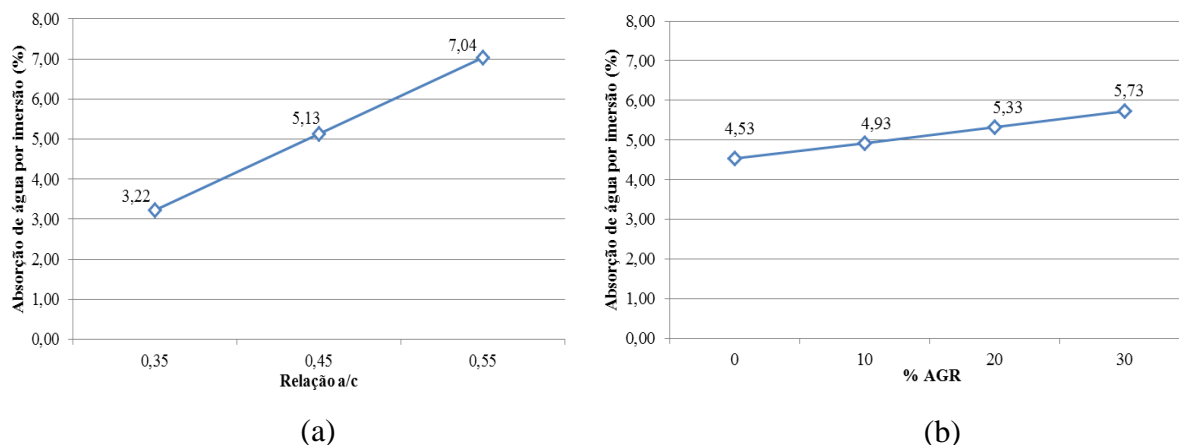
Figura 40 – Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias.



Fonte: da autora.

Os efeitos isolados da relação a/c e da porcentagem de AGR sobre a absorção de água por imersão aos 28 dias estão apresentados na Figura 41a e Figura 41b, respectivamente.

Figura 41 – Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre a absorção de água dos CAA aos 28 dias.



Fonte: da autora.

Observa-se, na Figura 41a, que os CAA com maiores relações a/c tiveram absorções de água expressivamente superiores, corroborando com a literatura. Para a relação a/c=0,45 tem-se uma absorção 59,4% maior do que a da relação a/c=0,35; por sua vez, para a relação a/c=0,55 tem-se uma absorção 118,8% maior do que a da relação a/c=0,35. Maiores relações a/c no concreto indicam maiores quantidades de poros na pasta, os quais podem estar interligados (poros capilares) e promoverem a absorção de água. Helene e Andrade (2010) afirmam que a redução da relação a/c no concreto promove uma redução na sua porosidade e uma melhoria das características mecânicas da pasta, considerando um mesmo grau de hidratação. Assié et al. (2007) e Zhu e Bartos (2003) encontraram resultados parecidos quando avaliaram as propriedades de absorção dos concretos autoadensáveis.

Constata-se, da Figura 41b, que a absorção de água dos CAA cresceu com o aumento da porcentagem de AGR. Para 10%, 20% e 30% de AGR tem-se um acréscimo, respectivamente, de 8,8%, 17,7% e 26,5% da absorção comparados a 0% de AGR. Safiuddin et al. (2011) alertam que a qualidade do agregado reciclado de concreto é geralmente inferior a do agregado natural, pois o agregado reciclado contém não só o agregado original, mas também pasta de cimento hidratado aderida à superfície do agregado. Esta pasta torna o agregado reciclado de concreto mais poroso do que o agregado natural que, sendo utilizado no concreto, conduz a uma maior porosidade e absorção de água do concreto. Esta absorção será maior para maiores porcentagens de substituição do agregado natural pelo agregado reciclado.

Resultados análogos foram encontrados por Tenório (2007), ao analisar o uso de agregados graúdos reciclados em concretos para fins estruturais, e por Gómez-Soberón (2002), Levy e Helene (2004) e Xiao et al. (2012) ao estudarem concretos produzidos com agregados reciclados de concreto.

6.3.5 Índice de vazios

A análise de variância dos resultados do ensaio que avalia o índice de vazios dos corpos-de-prova aos 28 dias está apresentada na Tabela 30.

Tabela 30 – Análise de variância dos resultados de índice de vazios aos 28 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	233,684	2	116,842	171,149	0,000000	S
AGR	23,710	3	7,903	11,577	0,000742	S
a/c x AGR	10,180	6	1,697	2,485	0,084683	NS
Erro	8,192	12	0,683			
Total	275,7658	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

S – significativo; NS – não significativo

Fonte: da autora.

Pela Tabela 30 entende-se que os fatores controláveis apresentaram efeito significativo sobre a análise do índice de vazios dos CAA produzidos, mas a interação entre eles não teve efeito, tal como ocorreu para a propriedade de absorção de água por imersão.

Da Equação 17 pode ser visualizado o modelo matemático resultante da análise dos resultados de índice de vazios aos 28 dias. Foi obtido um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,92 e a ANOVA do modelo encontra-se na Tabela 31.

$$\text{Vazios}_{28} = - 7,12 + 38,21 * a/c + 0,08 * \text{AGR} \quad (17)$$

Onde: Vazios_{28} = índice de vazios do concreto aos 28 dias (%); a/c = relação água/cimento (adimensional); AGR = porcentagem de agregado graúdo reciclado (%).

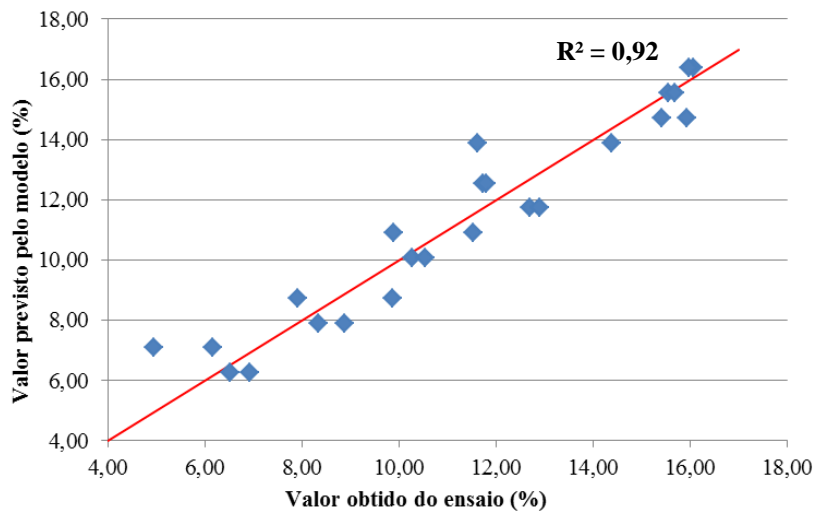
Tabela 31 – Análise de variância do modelo matemático de índice de vazios aos 28 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	3323,976	3,00000	1107,992	1068,521	0,000000
Resíduos	21,776	21,00000	1,037		
Total	3345,752	24,00000			
Total corrigido	275,766	23,00000			

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada
 Fonte: da autora.

Pela Tabela 31 fica comprovada a alta significância do modelo matemático proposto para o índice de vazios dos CAA aos 28 dias. Fez-se, então, a comparação entre os valores obtidos da realização do ensaio e os valores previstos pela Equação 17 (Figura 42). A grande proximidade destes valores à linha de tendência indica que o modelo proposto expressa muito bem o comportamento do índice de vazios dos CAA.

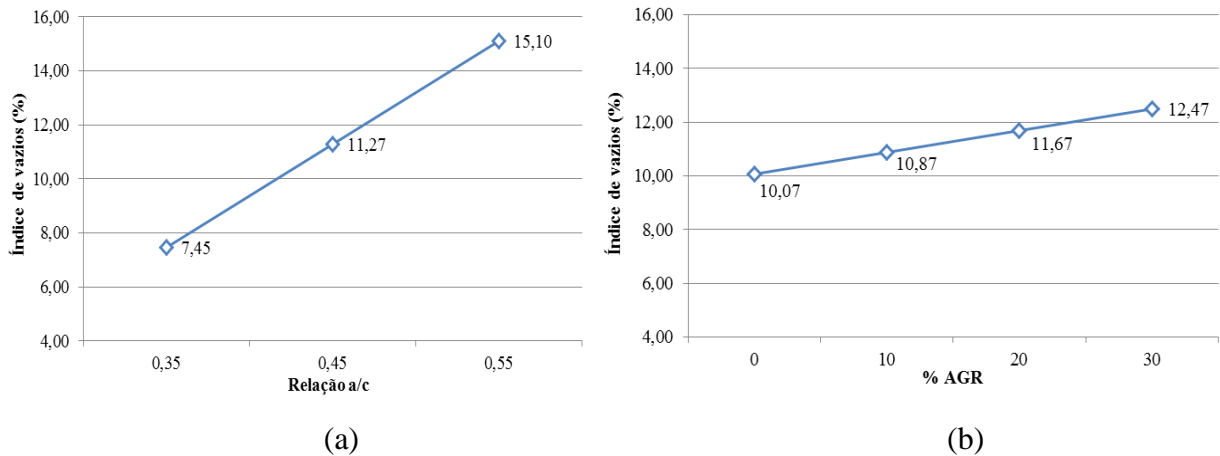
Nota-se que a Equação 17 fornece uma análise similar à realizada para o modelo matemático da absorção de água por imersão: a relação a/c afeta mais diretamente o valor do índice de vazios do concreto, ainda que o agregado reciclado também interfira, pois o valor do teste F, apresentado na Tabela 30, para a relação a/c foi cerca de quinze vezes maior do que o do AGR.

Figura 42 – Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de índice de vazios dos CAA aos 28 dias.

Fonte: da autora.

Os efeitos isolados da relação a/c e da porcentagem de AGR sobre o índice de vazios aos 28 dias estão apresentados na Figura 43a e Figura 43b, respectivamente.

Figura 43 – Efeitos isolados (a) da relação a/c e (b) da porcentagem de AGR sobre o índice de vazios dos CAA aos 28 dias.



Fonte: da autora.

Analisando os dados da Figura 43a, tem-se que quanto maior a relação a/c maior será o índice de vazios na mistura. Para a relação a/c=0,45 tem-se um índice de vazios 51,3% maior do que o da relação a/c=0,35; por sua vez, para a relação a/c=0,55 tem-se um índice de vazios 102,5% maior do que o da relação a/c=0,35. Estes resultados convergem com a explicação dada no tópico anterior para a maior absorção de água dos concretos com relações a/c maiores: têm-se maiores quantidades de vazios na pasta que proporcionarão a absorção de água. Valcuende e Parra (2010), Carrijo (2005) e Levy (2001) também encontraram uma tendência crescente dos valores de absorção de água e do índice de vazios em função do aumento da relação a/c.

Na Figura 43b verifica-se que o índice de vazios dos concretos produzidos com agregados reciclados tende a ser maior com o aumento da porcentagem de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Estes aumentos não são tão expressivos como os observados para a influência da relação a/c, pois, para 10%, 20% e 30% de AGR tem-se um acréscimo, respectivamente, de 7,9%, 15,9% e 23,8% da absorção comparados a 0% de AGR. Chiu (2006) explica que as partículas dos agregados reciclados, no concreto, tendem a não se encaixar tão bem deixando mais vazios no compósito, o que resulta em maior absorção de água. De fato, já foi verificado pela Figura 41b, que mostra a influência dos agregados graúdos reciclados na absorção dos concretos, que estes concretos tendem a absorver mais água quando possuem maiores porcentagens de agregados reciclados. Estes resultados estão coerentes com os encontrados por Levy e Helene (2004) e Xiao et al. (2012).

6.3.6 Massa específica real

A análise de variância dos resultados do ensaio de massa específica real dos corpos-de-prova aos 28 dias está apresentada na Tabela 32.

Tabela 32 – Análise de variância dos resultados de massa específica real aos 28 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	0,0066	2	0,0033	7,8812	0,006522	S
AGR	0,0036	3	0,0012	2,8350	0,082966	NS
a/c x AGR	0,0029	6	0,0005	1,1617	0,386955	NS
Erro	0,0051	12	0,0004			
Total	0,0182	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

S – significativo; NS – não significativo

Fonte: da autora.

A ANOVA da Tabela 32 mostra que apenas a relação a/c influenciou significativamente na massa específica real dos CAA, ainda que seu teste F não tenha sido relativamente alto (7,88) e o valor “p” não tenha ficado muito abaixo do nível de significância de 5%. Tanto a porcentagem de agregado reciclado como a interação dos fatores não tiveram efeito significativo.

Tentou-se efetuar uma modelagem matemática resultante da influência da relação a/c sobre a massa específica real dos CAA aos 28 dias, contudo o coeficiente de determinação obtido foi muito baixo ($R^2 = 0,23$), o que inviabilizou a modelagem.

De fato, visualizando os resultados da massa específica real dos CAA apresentados na Tabela 26, percebe-se que não houve uma diferença relevante nem entre os concretos de referência nem entre os concretos com agregados reciclados. Tendo em vista que a massa específica real considera apenas o volume real ocupado pelo concreto endurecido, descontando-se os poros permeáveis, conforme recomenda a NBR 9.778 (ABNT, 2005), estes resultados podem indicar que não houve grandes diferenças de quantidade de poros impermeáveis e ar incorporado entre os concretos produzidos.

6.3.7 Frente de carbonatação

Na Tabela 33 pode ser visualizada a análise de variância dos resultados do ensaio de carbonatação dos corpos-de-prova aos 200 dias.

Tabela 33 – Análise de variância dos resultados de carbonatação aos 200 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p	Significância
a/c	41,0764	2	20,5382	78,1366	0,000000	S
AGR	1,2853	3	0,42843	1,6300	0,234522	NS
a/c x AGR	2,6491	6	0,44152	1,6797	0,209200	NS
Erro	3,1542	12	0,26285			
Total	48,1650	23				

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

S – significativo; NS – não significativo

Fonte: da autora.

Pela Tabela 33 tem-se que apenas a relação a/c teve efeito significativo sobre a carbonatação. De fato, Werle (2010), em seu trabalho sobre a análise do fenômeno da carbonatação em concretos com agregados reciclados de concreto, relata que a profundidade de carbonatação será afetada pelo agregado reciclado apenas a teores superiores a 60%. Como nesta pesquisa foi adotado um teor máximo de 30%, este resultado é coerente com a observação do autor.

Na Equação 18 pode ser visto o modelo matemático obtido da análise dos resultados do ensaio, com um coeficiente de determinação (R^2) igual a 0,71. Na Tabela 34 foi exposta a ANOVA do modelo.

$$\text{Carb200} = 8,30 - \frac{2,81}{a/c} \quad (18)$$

Onde: Carb200 = profundidade de carbonatação do concreto aos 200 dias (mm);

a/c = relação água/cimento (adimensional).

Tabela 34 – Análise de variância do modelo matemático de carbonatação aos 200 dias.

Fator controlável	SQ	GDL	MQ	Teste F	Valor p
Modelo	116,7354	2,00000	58,36771	94,63008	0,000000
Resíduos	13,5696	22,0000	0,61680		
Total	130,3050	24,0000			
Total corrigido	48,1650	23,0000			

Onde: SQ – soma quadrada; GDL – grau de liberdade; MQ – média quadrada

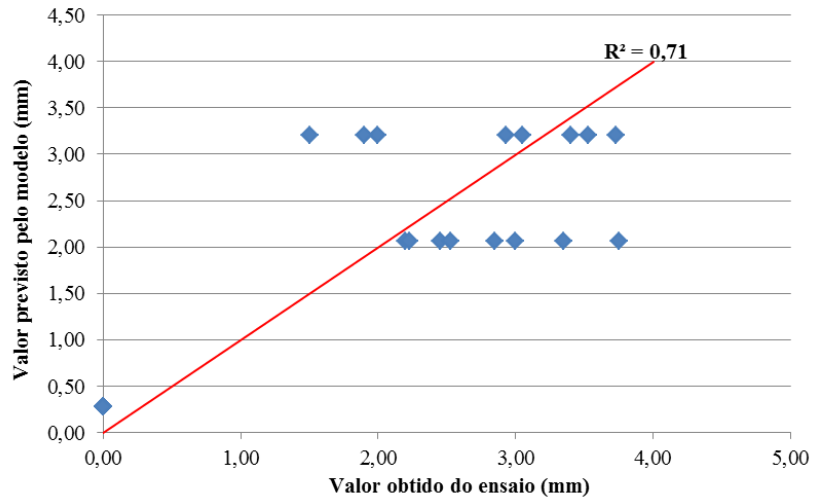
Fonte: da autora.

A ANOVA da Tabela 34 exprime a significância do modelo, dado que o valor “p” ficou abaixo de 0,05, sendo confirmado pelo coeficiente de determinação que indica um bom ajuste (71%).

Fica clara, pela Equação 18, a influência da relação a/c sobre a carbonatação dos CAA. Em seus estudos, Levy (2001) encontrou uma forte relação linear entre o coeficiente de carbonatação e a relação a/c: conforme a relação a/c é aumentada ocorre um incremento na profundidade de carbonatação.

Fez-se uma comparação entre os valores obtidos da realização do ensaio e os valores previstos pela Equação 18, sendo mostrada na Figura 44. Tendo em vista que a única variável independente do modelo (relação a/c) possui apenas três pontos que são 0,35, 0,45 e 0,55, os valores previstos serão 0,28 mm, 2,07 mm e 3,20 mm, respectivamente.

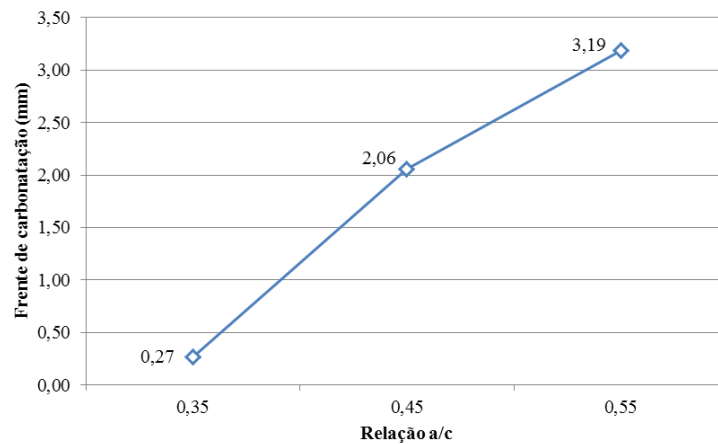
Figura 44 – Comparação entre o valor obtido e o valor previsto pelo modelo para o ensaio de carbonatação dos CAA aos 200 dias.



Fonte: da autora.

Efetuuou-se, também, uma análise do efeito da relação a/c sobre a carbonatação, sendo apresentada na Figura 45.

Figura 45 – Efeito da relação a/c sobre a frente de carbonatação dos CAA aos 200 dias.



Fonte: da autora.

Com base na Figura 45, visualiza-se que a frente de carbonatação dos CAA cresce expressivamente com o aumento da relação a/c . Para a relação $a/c=0,45$ tem-se uma carbonatação 7,58 vezes maior do que a da relação $a/c=0,35$; por sua vez, para a relação $a/c=0,55$ tem-se uma carbonatação 11,76 vezes maior do que a da relação $a/c=0,35$.

Cascudo e Carasek (2011) relatam que a carbonatação se processa em poros parcialmente preenchidos com água, que é normalmente o caso próximo à superfície do concreto, até a profundidade em que os poros apresentem esta condição favorável. Isto se deve ao fato do dióxido de carbono se dissolver na fase líquida intersticial. Os autores relatam também que quanto maior a relação a/c , maior será a velocidade de carbonatação, pois a relação a/c influencia significativamente a porosidade do concreto e, portanto, a facilidade ou não de penetração do CO_2 . Esta observação é coerente com os estudos realizados por Zhang e Yan (2009), Valcuende e Parra (2010), Yuan et al. (2010), Lei e Xiao (2008), Sagoe-Crentsil et al. (2001).

7 CONCLUSÕES

A utilização da metodologia de dosagem proposta por Gomes (2002) para a produção de concretos autoadensáveis (CAA) com os materiais locais disponíveis para a pesquisa teve êxito. Esta metodologia se baseia na obtenção do CAA pela otimização da composição da pasta (ou argamassa) e do esqueleto granular, separadamente, com posterior estudo do conteúdo de pasta necessário para que o concreto apresente as características de um CAA. Os concretos testes produzidos apresentaram resultados dos ensaios no estado fresco satisfatórios, evidenciando conformidade com os materiais locais, de tal forma que os concretos objetos da pesquisa foram produzidos.

No que diz respeito aos resultados obtidos das propriedades no estado fresco e endurecido analisadas para os diferentes traços de CAA com relações água/cimento (a/c) iguais a 0,35, 0,45 e 0,55, produzidos com substituição de 0%, 10%, 20% e 30% do agregado graúdo natural por agregado graúdo reciclado (AGR) de concreto, para cada relação a/c, pode-se concluir:

- Para o estudo das propriedades dos CAA no estado fresco:
 - a) Os CAA de referência das três relações a/c atenderam às classes de enquadramento destinadas à utilização em estruturas correntes, como vigas, pilares e lajes, obedecendo aos requisitos da NBR 15.823-1 (ABNT, 2010), quando foram realizados os ensaios no estado fresco: espalhamento e tempo de escoamento pelo método do cone de Abrams, habilidade passante pelo anel J e pela caixa L, e viscosidade pelo funil V.
 - b) Todos os CAA com agregados reciclados da relação a/c igual a 0,35 se enquadraram nas classes destinadas às estruturas correntes. A substituição do agregado graúdo natural pelo reciclado não influenciou negativamente nas propriedades ligadas à trabalhabilidade destes CAA.
 - c) Os CAA com agregados reciclados da relação a/c igual a 0,45 apresentaram trabalhabilidade inferior ao CAA de referência, de tal forma que apenas o método de ensaio que mede o tempo de escoamento pelo cone de Abrams permaneceu na classe alcançada pelo CAA de referência.

- d) Todos os CAA com agregados reciclados da relação a/c igual a 0,55 apresentaram trabalhabilidade inferior ao CAA de referência. Entretanto, com os acréscimos no teor de agregados reciclados nas misturas não houve uma variação considerável nas propriedades de um concreto para outro nos ensaios de espalhamento, T500 e funil V; e não foi possível enquadrar estes concretos em nenhuma classe para os ensaios com o anel J e com a caixa L.
- e) Acredita-se ser possível produzir CAA para relações a/c iguais a 0,45 e 0,55 bastando ajustar os teores de água de molhagem e de aditivo, o que não foi objeto deste estudo.
- Para o estudo das propriedades dos CAA no estado endurecido:
 - a) Quanto à resistência à compressão axial aos 28 dias, constatou-se que a relação a/c e o teor de AGR, isoladamente, têm influência significativa sobre esta propriedade, contudo a interação entre as variáveis não exerce influência significativa.
 - b) Ainda para a resistência à compressão aos 28 dias, na medida em que se aumentou a relação a/c, para todos os concretos, houve uma diminuição na resistência. Também foi observado que ocorreu um incremento na resistência com o aumento da porcentagem de substituição do agregado natural por reciclado, para todas as relações a/c. Contudo, a relação a/c é mais significativa para esta propriedade que o teor de agregado reciclado.
 - c) Quanto à resistência à compressão axial aos 56 dias, tem-se que apenas a relação a/c influenciou significativamente nesta propriedade. Tal como ocorreu com a resistência aos 28 dias, verificou-se que o aumento da relação a/c provocou uma queda na resistência.
 - d) No que diz respeito ao módulo de elasticidade aos 56 dias, a ANOVA dos resultados indicou uma influência da relação a/c, da porcentagem de substituição do agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado de concreto e da interação entre eles.

- e) O efeito isolado da relação a/c sobre o módulo de elasticidade indicou que à medida que esta relação aumenta, o módulo diminui. O efeito isolado da porcentagem de agregado reciclado indicou que o módulo de elasticidade dos CAA com agregados reciclados, em geral, decresce suavemente com o aumento da porcentagem de substituição dos agregados naturais pelos agregados reciclados. Já o efeito da interação entre relação a/c e agregado reciclado indicou que para relações a/c menores do que 0,45, o módulo de elasticidade aumenta com o aumento da porcentagem de agregado reciclado, enquanto que para relações a/c a partir de 0,45 tem-se o comportamento inverso.
- f) No que diz respeito à análise de variância da absorção de água por imersão aos 28 dias, observou-se que, embora a relação a/c e a porcentagem de agregado gráudo reciclado tivessem influência significativa nesta propriedade, a relação a/c é o principal interveniente.
- g) Com relação ao efeito isolado da relação a/c sobre a absorção de água por imersão dos CAA, há um aumento expressivo desta quando se aumenta a relação a/c ; já o efeito isolado da porcentagem de agregado reciclado resulta em um aumento suave da absorção.
- h) As observações feitas para a propriedade de absorção de água foram similares para o índice de vazios: maior influência da relação a/c no modelo matemático proposto; aumento dos vazios com o aumento da relação a/c e com o aumento da porcentagem de agregado reciclado.
- i) O comportamento dos resultados da massa específica real aos 28 dias não foi demasiadamente alterado com a substituição do agregado gráudo natural pelo agregado gráudo reciclado de concreto para as três relações a/c , nem entre os concretos de referência. Assim, não foi possível modelar o comportamento.
- j) Quanto à frente de carbonatação aos 200 dias, conclui-se que há influência apenas da relação a/c sobre esta propriedade, sendo que quando a relação a/c aumenta, há um incremento na profundidade de carbonatação.

De maneira geral, pode-se concluir que os agregados graúdos reciclados de concreto (AGR) influenciam os CAA no estado fresco. No estado endurecido estes agregados não exerceram influência sobre a resistência à compressão axial aos 56 dias e sobre a profundidade de carbonatação aos 200 dias; já sobre as demais propriedades do estado endurecido avaliadas, mesmo o AGR exercendo influência significativa, esta influência sempre foi suplantada pela influência da relação a/c. Portanto, é viável utilizar agregados reciclados de concreto na produção de concretos autoadensáveis que resultem em desempenho mecânico e durabilidade satisfatórios, dentro das condições estudadas.

8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Entendendo que o uso de agregados reciclados de RCC em concretos convencionais já é uma realidade na construção civil brasileira, sugerem-se as seguintes abordagens para ampliar o estudo quanto ao uso destes agregados em concretos autoadensáveis (CAA):

- a) Aumento do percentual de substituição de agregado graúdo natural (AGN) por agregado graúdo reciclado de concreto (AGR) em até 60%, conforme recomenda Werle (2010), a fim de que as propriedades do CAA não sejam demasiadamente afetadas e que possam ser exploradas as condições de uso máximo aceitável de agregados reciclados;
- b) Uso de agregados graúdos mistos reciclados de RCC para as mesmas dosagens e percentuais de substituição utilizados nos CAA desta pesquisa, para comparação dos resultados obtidos com os agregados graúdos reciclados de concreto;
- c) Estudo de outros métodos de dosagem, como os mencionados neste trabalho, para produção de CAA com os percentuais de AGR utilizados a fim de identificar se há interferência do tipo de metodologia nas propriedades estudadas;
- d) Modelagem das propriedades estudadas para CAA com substituição de 0%, 10%, 20% e 30% de AGN por AGR em idades mais avançadas;
- e) Estudo da influência da substituição do AGN por AGR em outras propriedades mecânicas do CAA, tais como resistência à tração direta e indireta, à flexão, à torção, dentre outras;
- f) Estudo da influência da substituição do AGN por AGR em outras propriedades de durabilidade do CAA, tais como penetração de cloretos, carbonatação acelerada, fissuração por fluência, dentre outras.

REFERÊNCIAS

ADDIS, B. **Reuso de materiais e elementos de construção**. São Paulo: Oficina de textos, 2010.

ALENCAR, R. dos S. A. **Dosagem do concreto auto-adensável**: produção de pré-fabricados. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil. São Paulo, 2008. (dissertação de mestrado)

ALENCAR, R.; HELENE, P. Concreto auto-adensável de elevada resistência. Inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. São Paulo, **Concreto & Construções**, IBRACON, n.43, p.46-52, 2006.

ÂNGULO, S.C. **Caracterização de agregados de resíduos de construção e demolição reciclados e a influência de suas características no comportamento mecânico de concretos**. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. (tese de doutorado)

ÂNGULO, S.C. *et al.* Metodologia de caracterização de resíduos de construção e demolição. In: VI Seminário de Desenvolvimento Sustentável e Reciclagem na Construção Civil. IBRACON CT-206. São Paulo, 2003. **Anais...**

ÂNGULO, S.C.; JOHN, V.M. Normalização dos agregados graúdos de resíduos de construção e demolição reciclados para concretos e a variabilidade. In: IX Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído. Foz do Iguaçu, 2002. **Anais...**

ASSIÉ, S. et al. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability. **Construction and Building Materials**, v. 21, p. 1909-1917, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 23**: Cimento Portland e outros materiais em pó: determinação da massa específica. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 27**: Agregados: redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 30**: Agregado miúdo: determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

_____. **NBR NM 45**: Agregados: Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 46**: Agregados: determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo: determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 53**: Agregado graúdo: determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR NM 67:** Concreto: determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 76:** Cimento Portland: determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine). Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 248:** Agregados: determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 5.738:** Concreto: procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5.739:** Concreto: ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 5.752:** Materiais pozolânicos: determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 6.118:** Projeto de estruturas de concreto: procedimento. Rio de Janeiro, 2007.

_____. **NBR 7.215:** Cimento Portland: determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1996.

_____. **NBR 8.522:** Concreto: determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação e da curva tensão-deformação. Rio de Janeiro, 2003.

_____. **NBR 9.776:** Agregados: determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman. Rio de Janeiro, 1987.

_____. **NBR 9.778:** Argamassa e concretos endurecidos: determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 10.004:** Resíduos sólidos – Classificação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11.578:** Cimento Portland composto. Rio de Janeiro, 1991.

_____. **NBR 12.653:** Materiais pozolânicos. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 15.112:** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - Áreas de transbordo e triagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.113:** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - Aterros - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.114:** Resíduos sólidos da Construção civil - Áreas de reciclagem - Diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.115:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.116:** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15.575:** Desempenho de edifícios habitacionais de até cinco pavimentos (Partes 1 a 6). Rio de Janeiro, 2008.

_____. **NBR 15.823-1:** Concreto auto-adensável - parte 1: classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15.823-2:** Concreto auto-adensável - parte 2: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15.823-3:** Concreto auto-adensável - parte 3: determinação da habilidade passante - método do anel J. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15.823-4:** Concreto auto-adensável - parte 4: determinação da habilidade passante - método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15.823-5:** Concreto auto-adensável - parte 5: determinação da viscosidade - método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR 15.823-6:** Concreto auto-adensável - parte 6: determinação da resistência à segregação - método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2010.

BARROS, P.G.S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2008. (dissertação de mestrado)

BARROS, A.R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2009. (dissertação de mestrado)

BRASIL. **Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS):** Lei Federal Nº 12.305. 02 ago 2010. Brasília, 2010a.

_____. **Decreto Nº 7.404.** 23 dez 2010. Brasília, 2010b.

_____. **Lei Federal de Saneamento Básico:** Lei Nº 11.445. 05 jan 2007. Brasília, 2007.

_____. **Lei de Consórcios Públicos:** Lei Nº 11.107. 06 abr 2005. Brasília, 2005.

_____. **Plano Nacional sobre Mudança do Clima:** Lei Nº 12.187. 29 dez 2009. Brasília, 2009.

BRITO FILHO, J.A. Cidades versus entulho. In: Seminário desenvolvimento sustentável e a reciclagem na construção civil. São Paulo, 1999. **Anais...**

CABRAL, A. E. B. **Modelagem de propriedades mecânicas e de durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados, considerando-se a variabilidade da composição do RCD**. Universidade de São Paulo. Escola de Engenharia de São Carlos. São Carlos, 2007. (tese de doutorado)

CALMON, J. L. et al. Concreto auto-adensável utilizando resíduo de serragem de rochas ornamentais como fíler. In: 47º Congresso Brasileiro do Concreto. Recife, 2005. **Anais...**

CAMARGOS, U.A. Concreto Auto-Adensável e Autonivelante. **Téchne**, São Paulo, n. 59, p. 04-05, fev 2002.

CARRIJO, P.M. **Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Departamento de Engenharia de Construção Civil. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005. (dissertação de mestrado)

CASCUDO, O.; CARASEK, H. Ação da carbonatação no concreto. In: ISAIA, G.C. (Ed.) **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Pini, 2011.

CASSA, J.C.S.et al (coord.). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção**. Caixa Econômica Federal. EDUFBA. Salvador, 2001.

CASTRO, A.L. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. Departamento de Ciência e Engenharia dos Materiais. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2007. (tese de doutorado)

CAVALCANTI, D. J. de H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil: estruturas. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2006. (dissertação de mestrado)

CAVALCANTI, A.P. et al. **Características do entulho e do agregado reciclado**. In: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção, p. 27-45. Salvador: EDUFBA, 2001.

CEMENT CONCRETE & AGGREGATES AUSTRALIA (CCAA). **Use of Recycled Aggregates in Construction**. Australia, May 2008.

CHIU, M.K.M.K. **The use of recycled concrete aggregate in structural concrete around South East Queensland**. Faculty of Engineering and Surveying. University of Southern Queensland. Queensland, 2006. (dissertação de mestrado)

COELHO, L. **Gerenciamento de resíduos sólidos**. s.d. Disponível em: <<http://www.licenciamentoambiental.eng.br/gerenciamento-de-residuos-solidos>>. Acesso em: 29 nov 2010.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. Concrete and mortar performance by using recycled aggregates. International Conference on Sustainable Waste Management and Recycling. p.157-164, London, 2004. **Analls...**

DAL MOLIN, D.C.C. Adições minerais. In: ISAIA, G.C. (Ed.) **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: Pini, 2011.

DIAS, J.F. **Avaliação de resíduos da fabricação de telhas cerâmicas para seu emprego em camadas de pavimento de baixo custo**. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2004. 251p. (tese de doutorado)

DIAS, J.F.; AGOPYAN, V.; SILVA, T.J. Proposta de procedimento para determinação da absorção de agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil para emprego em concreto. 47º Congresso Brasileiro do Concreto. p. 1088-1097. Recife, 2005. **Anais...**

DOMONE, P.L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement & Concrete Composites**, n. 28, p. 197-208, 2006.

DOMONE, P.L. A review of the hardened mechanical properties of self-compacting concrete. **Cement & Concrete Composites**, n. 29, p. 1-12, 2007.

EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS (EFNARC). **Especificaciones y Directrices para el hormigón autocompactable**. Fev, 2002

EUROPEAN READY-MIX CONCRETE ORGANIZATION (ERMCO). **European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use**. Mai, 2005.
FENATO, T.M. et al. Verificação da existência de propriedades autoadensáveis em concretos de alto desempenho, através de ensaios experimentais. **Semina: Ciências Exatas e Tecnológicas**, Londrina, v. 28, n. 1, p. 65-78, jan./jun. 2007.

FELEKOGLU, B. Effect of water/cement ratio on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Building and Environment**, v. 42, p. 1795-1802, 2007.

FILHO, F.M.A. et al. Variabilidade da aderência e das propriedades mecânicas do concreto auto-adensável. **Revista Ibracon de Estruturas e materiais**, São Paulo, v. 1, n. 1, p. 31-57. mar. 2008.

FORTALEZA. **Lei Municipal Nº 8.408**, de 24 de dezembro de 1999.

_____. **Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Controle Urbano (SEMAM): Portaria Municipal Nº 48**. 31 de maio de 2011. Fortaleza, 2011.

FREITAS, C.S. *et al.* Diagnóstico do descarte clandestino dos resíduos de construção e demolição em Feira de Santana/BA: estudo piloto. In: VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. IBRACON. São Paulo, 2003. **Anais...**

GEYER, A.L. **Qualidade plástica**: apesar de mais caro, o concreto auto-adensável pode apresentar vantagens que reduzem o custo final da obra. *Téchne*. ed. 111, nov 2005.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. Universitat Politècnica de Catalunya. Escola Tècnica Superior D'Enginyers de Camins, Canals i Ports de Barcelona. Barcelona, 2002 (tese de doutorado)

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: PINI, 2009.

GOMES, P. C. C.; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concreto autoadensável de alta resistência com aditivos minerais. In: V Simpósio EPUSP sobre estruturas de concreto, São Paulo, 2003. **Anais...**

GÓMEZ-SOBERÓN, J.M.V. Porosity of recycled concrete with substitution of recycled concrete aggregate: An experimental study. **Cement and Concrete Research**. v. 32, p. 1301-1311, 2002.

GONÇALVES, R.D.C. **Agregados reciclados de resíduos de concreto: um novo material para dosagens estruturais**. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, 2001. (dissertação de mestrado)

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

GUIA DA CONSTRUÇÃO. **Concreto autoadensável x concreto convencional: material mais caro ajudou a reduzir o cronograma do empreendimento e o custo da mão de obra**. Ed. 112. nov 2010.

HANSEN, T.C. Recycled aggregates and recycled aggregate concrete. Second state-of-the-art report, developments 1945-1985. **Materials and Structures**. 1986; 19(3), p. 201-246.

HELENE, P.; ANDRADE, T. **Concreto de cimento Portland**. In: ISAIA, G.C. (Ed.) **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia de materiais**. 2 ed, v.2, p. 905-944, São Paulo: Ibracon, 2010.

HELENE, P; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. São Paulo: Pini, 1992.

HERIK, G.; PENTII, P. Properties of SCC especially early age and long term shrinkage and salt frost resistance. First international RILEM symposium on self-compacting concrete, Rilem Publications, p. 211–226, 1999. **Annals...**

HOLSCHEMACHER, K. Hardened material properties of self-compacting concrete. **Journal of Civil Engineering and Management**, v. 10, n. 4, p. 261-266, 2004.

HU, Q. et al. Experimental research on the mechanical properties of recycled concrete. **Journal Harbin Institute Technology**, v. 41, n. 4, p.33-36, 2009.

INSTITUTO BRASILEIRO DE ADMINISTRAÇÃO MUNICIPAL (IBAM). **Manual de gerenciamento integrado dos resíduos sólidos**. Rio de Janeiro, 2001.

INTERNATIONAL UNION OF LABORATORIES AND EXPERTS IN CONSTRUCTION MATERIALS, SYSTEMS AND STRUCTURES (RILEM). **CPC 18: Measurement of hardened concrete carbonation depth**. France, 1988.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. In: Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção, p. 27-45. Salvador: EDUFBA, 2001.

JOHN, V.M. **Materiais de construção e o meio ambiente**. In: ISAIA, G.C. (Ed.) Materiais de construção civil: princípios de ciência e engenharia de materiais. v. 1, 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

KANTRO, D. L. Influence of water reducing admixtures on properties of cement pastes: a miniature slump test. **Cement Concrete Aggregates**, v. 2, p. 95-102, 1980.

KARPINSKI, L.A. et al. **Gestão diferenciada de resíduos da construção civil: uma abordagem ambiental**. Porto Alegre: Edipucrs, 2009.

KATZ, A. Treatments for the improvement of recycled aggregate. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v.16, n.6, p. 597-602, 2004.

KASZNAR, I.K.; GONÇALVES, B.M.L. **Regressão múltipla: uma digressão sobre seus usos**. Disponível em: < http://www.ibci.com.br/Regressao_Multipla.pdf >. Acesso em: 20 abr 2012. Rio de Janeiro, 2007.

KOU, S.C. et al. Influence of fly ash as cement replacement on the properties of recycled aggregate concrete. **Journal Materials Civil Engineering**, v.19, n. 9, p.709-17, 2007.

KOU, S.C.; POON, C.S. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse and fine recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 31, n. 9, p. 622-627, out 2009.

KOU, S.C.; POON, C.S. Enhancing the durability properties of concrete prepared with coarse recycled aggregate. **Construction and Building Materials**, v. 35, p. 69-76, 2012.

KUMAR, P.S.; DHINAKARAN, G. Effect of Admixed Recycled Aggregate Concrete on Properties of Fresh and Hardened Concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**. v. 24, n. 4, p. 494-498, 2012.

LEI B; XIAO, J.Z. Research on carbonation resistance of recycled aggregate concrete. **Chinese Journal Building Materials**, v. 11, n. 5, p. 605-611, 2008.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2001. (tese de doutorado)

LEVY, S.M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2001. (tese de doutorado)

LEVY, S.M. **Materiais reciclados na construção civil**. In: ISAIA, G.C. (Ed.) Materiais de construção civil: princípios de ciência e engenharia de materiais. v. 2, 2 ed. São Paulo: IBRACON, 2010.

LI, J.B.; XIAO, J.Z.; HUANG, J. Influence of recycled coarse aggregate replacement percentage on compressive strength of concrete. **Chinese Build Materials**, v. 9, n. 3, p. 297-301, 2006.

LIMA, J.A.R. **Proposição de diretrizes para produção e normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. (dissertação de mestrado)

LIMA, A.S. **Caracterização e classificação dos resíduos de construção e demolição (RCD) da cidade de Fortaleza-CE**. Programa de Pós-Graduação em Tecnologia e Gestão Ambiental. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará. Fortaleza, 2012. (dissertação de mestrado)

LIU, Y. et al. Na assessment of optimal mixture for concrete made with recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**. v.34, p. 1373-1380, 2004.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2004. (dissertação de mestrado)

LOVATO, P.S. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2007. (dissertação de mestrado)

MANUEL, P.J.M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos auto-adensáveis**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2005. (dissertação de mestrado)

MARQUES NETO, J.C. **Gestão dos resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Paulo: Rima, 2005.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: Ibracon, 2008.

MELEIRO, L. P.; PIOVEZAM, I. A. R.; ISA, M. M. Influência da pozolanicidade da adição no comportamento da resistência à compressão do concreto auto-adensável. **Teoria e Prática na Engenharia Civil**, n.10, p.19-24, Jul 2007.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filler calcário**. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005. (dissertação de mestrado)

MESQUITA, E.F.T. **Durabilidade do concreto auto-adensável com incorporação do pó de carnaúba**. Curso de Engenharia Civil. Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral, 2011. (monografia de conclusão de curso)

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE (MMA). **Planos de gestão de resíduos sólidos:** manual de orientação. Brasília, 2012.

_____. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA):** Resolução N° 307. 05 jul 2002. Brasília, 2002.

_____. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA):** Resolução N° 348, de 16 ago 2004. Brasília, 2004.

_____. **Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA):** Resolução N° 431, de 24 mai 2011. Brasília, 2011.

MIRANDA, L. F. R.; ÂNGULO, S. C.; CARELI, E. D. A reciclagem de resíduos de construção e demolição no Brasil: 1986 - 2008. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 9, n. 1, p. 57-71, jan/mar 2009.

MONTGOMERY, D.C. **Design and analysis of experiments**. 5 ed. Arizona: John Wiley & Sons Inc, 2001.

MOREIRA, L.H.H. **Avaliação da influência da origem e do tratamento dos agregados reciclados de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto estrutural**. Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2010. (dissertação de mestrado)

NOVAES, M.V.; MOURÃO, C.A.M. **Manual de gestão ambiental de resíduos sólidos na construção civil**. Fortaleza: COOPERCON/CE, 2008.

NORMA EUROPÉIA. **EN 445:** Lechadas para Tendones de Pretensado - Métodos de Ensayo. CEN, 1996.

OKAMURA, H.; MAEKAWA, K.; OZAWA, K. **High Performance Concrete**, Gihoudou Pub., Tokyo, 1993.

OKAMURA, H. Self-compacting High-performance concrete. In: **Concrete International**. v.19, n.7, p. 50-54, jul 1997.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Japão, v. 1, n. 1, p. 5-15, abr 2003.

OLIVEIRA, M.B.; VAZQUEZ, E. The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. **Waste Management**, v. 16, n. 1-3, p. 113-117, 1996.

OLIVEIRA, M.E.D. et al. **Diagnóstico da geração e da composição dos RCD de Fortaleza/CE**. s/ed. Fortaleza, 2011.

OLIVEIRA, M.J.E. **Materiais descartados pelas obras de construção civil:** estudo dos resíduos de concreto para reciclagem. Instituto de Geociências e Ciências Exatas. Universidade Estadual Paulista. Rio Claro, 2002. (tese de doutorado)

OZAWA, K.; SAKATA, N.; OKAMURA, H. **Evaluation of self-compactability of fresh concrete using the funnel test.** Concrete Library of JSCE. n. 25, p. 59-75, mar. 1995.

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

PERSSON, B. Creep, shrinkage and elastic modulus of self-compacting concrete. First international RILEM symposium on self-compacting concrete. Rilem Publications, p. 239-50, 1999. **Annals...**

PERSSON, B. A comparison between mechanical properties of self-compacting concrete and the corresponding properties of normal concrete. **Cement and Concrete Research**. v. 31, p.193-198, 2001.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana.** Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. São Paulo, 1999. (tese de doutorado)

PINTO, T.P. Metodologia para gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana. In: CASSA, J.C.S. *et al.* (Org). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom.** Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001.

POON, C.S. et al. Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. **Cement and Concrete Research**. n. 34, p. 31-36. Elsevier Ltd, 2004.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO PAULO (PMSP). Departamento de Limpeza Urbana. In: **Seminário gestão e reciclagem de resíduos de construção e demolição – avanços e desafios.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, 2005.

QUADROS, B.E.C; OLIVEIRA, A.M.V. Gestão diferenciada do entulho na cidade de Salvador. In: CASSA, J.C.S. *et al.* (Org). **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção: projeto entulho bom.** Salvador: EDUFBA; Caixa Econômica Federal, 2001.

RAHAL, K. Mechanical properties of concrete with recycled coarse aggregate. **Building Environment**, v. 42, n. 1, p. 407-415, 2007.

REPETTE, W. L. (Coord.) Implementação do concreto auto-adensável na execução de estrutura de concreto armado. **Relatório.** Comunidade da construção. Ano 6. Florianópolis, 2005.

REPETTE, W. L. **Concreto autoadensável.** In: ISAIA, G.C. (Ed.) Concreto: ciência e tecnologia. v. 2. São Paulo: Ibracon, 2011.

RIBEIRO, J.L.D.; CARTEN, C. **Série monográfica qualidade: projeto de experimentos.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. Porto Alegre, 2010.

SAFIUDDIN, M. et al. Properties of High-Workability Concrete with Recycled Concrete Aggregate. **Materials Research**, n. 14, v. 2, p. 248-255, 2011.

SAGOE-CRENTSIL, K.K; BROWN, T.; TAYLOR, A.H. Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 31, p. 707-712, 2001.

SALEM, R.M.; BURDETTE, E.G. Role of chemical and mineral admixtures on physical properties and frost-resistance of recycled aggregate concrete. **ACI Materials Journal**, v. 95, n. 5, p. 558-563, 1998.

SARDÁ, M.C.; ROCHA, J.C. Métodos de classificação e redução dos resíduos da construção civil tirados em Blumenau/SC, utilizando como base a resolução do CONAMA nº 307. In: VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. IBRACON. São Paulo, 2003. **Anais...**

SCHNEIDER, D. M.; PHILIPPI JR., A. Gestão pública de resíduos da construção civil no município de São Paulo. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 21-32, out./dez. 2004.

SCHUBERT, S. et al. Recycled aggregate concrete: Experimental shear resistance of slabs without shear reinforcement. **Engineering Structures**. v. 41, , p. 490-497, 2012.

SILVA FILHO, L.C.P. **Futuro da construção é incorporar resíduos de outras indústrias: reciclagem de concreto para agregado também é tendência mundial.** Reportagem. 06 mar 2012. Disponível em: <<http://www.piniweb.com.br/construcao/tecnologia-materiais>>. Acesso em: 07 mar 2012.

SILVA, P.; BRITO, J. Betão auto-compactável (BAC): estado atual do conhecimento. **Revista Engenharia Civil**, Portugal, n. 35, p. 13-32, Set 2009.

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

SOUZA, U.E.L. et al. Desperdício de materiais nos canteiros de obras: a queda do mito. Simpósio Nacional. PCC/EPUSP. São Paulo, 1999. **Anais...**

SU, N.; HSU, K; CHAI, H. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, Taiwan, n. 31, p. 1799-1807, 2001.

TENÓRIO, J.J.L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió, 2007. (dissertação de mestrado)

TU, T. The Application of Recycled Aggregates in Self-Consolidating Concrete. 1st International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidating Concrete. China, 2005. **Anais...**

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do

Sul, 2004. (dissertação de mestrado)

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2007. (tese de doutorado)

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto auto-adensável**. São Paulo: PINI, 2008.

USINA DE RECICLAGEM DE FORTALEZA. Disponível em: www.usifort.com.br. Acesso em: 12 jan 2012.

VALCUENDE, M.; PARRA, C. Natural carbonation of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**, v. 24, p. 848-853, 2010.

VALDEZ, P. et al. Uso de residuos de la industria del mármol como filler para la producción de hormigones autocompactantes. **Materiales de Construcción**, v. 61, n. 301, p. 61-76, jan-mar, 2011.

VIEIRA, G.L. **Estudo do processo de corrosão sob a ação de íons cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2003. (dissertação de mestrado)

VIEIRA, G.L.; DAL MOLIN, D.C.C. Viabilidade técnica da utilização de concretos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 4, n. 4, p. 47-63, out./dez. 2004.

XIAO, J. et al. An overview of study on recycled aggregate concrete in China (1996–2011). **Construction and Building Materials**, v. 31, p. 364-383, 2012.

WERLE, A.P. Determinação de propriedades **de concretos com agregados reciclados de concreto, com ênfase na carbonatação**. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos. São Leopoldo, 2010. (dissertação de mestrado)

YUAN, C.F. et al. Orthogonal experiment of carbonation resistance for recycled aggregate concrete. **Journal Wuhan University Technology**, v.322, p. 9-12, 2010.

ZHANG, Z.; YAN, H.S. Carbonization of recycled aggregate concrete. **Chinese Concrete**, v. 11, p. 34-36, 2009.

ZHU, W.; BARTOS, P.J.M. Permeation properties of self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 33, p. 921-926, 2003.

ZORDAN, S.E. **Utilização do entulho como agregado na confecção do concreto**. Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 1997. (dissertação de mestrado)

ZORDAN, S.E. **Entulho da indústria da construção civil**. São Paulo: PCC-EPUSP, 2001.

APÊNDICES

APÊNDICE A – Estudo do volume da pasta para os CAA com relações a/c iguais a 0,35, 0,45 e 0,55.

Características do CAA			Propriedades no estado fresco dos CAA								Observações
a/c	sp/c (%)	Vp (%)	Espalham. (mm)		T500 (s)		Caixa L (adimens.)		Funil V (s)		
			Res.	Clas.	Res.	Clas.	Res.	Clas.	Res.	Clas.	
0,35	0,60	40	840	SF 3	2,52	VS 2	-	-	-	-	Não se obteve CAA com a relação sp/c = 0,50%. Alterou-se para sp/c = 0,60%, contudo o CAA segregou.
0,35	0,55	40	740	SF 2	2,50	VS 2	1,08	PL 2	12,28	VF 2	CAA com boa viscosidade e coesão. Relação sp/c superior a do cone de Marsh (sp/c = 0,50%). Concreto aprovado.
0,45	0,25	40	505	fora	4,25	VS 2	0,40	fora	27,80	fora	CAA ficou muito coeso. Decidiu-se por aumentar o volume de pasta.
0,45	0,25	42	530	fora	3,50	VS 2	0,42	fora	25,34	fora	CAA ainda ficou muito coeso. Decidiu-se por aumentar a relação sp/c e retornar para Vp = 40%.
0,45	0,35	40	785	SF 3	1,53	VS 1	1,00	PL 2	-	-	CAA ficou muito fluido e segregou. Decidiu-se por reduzir a relação sp/c.
0,45	0,275	40	730	SF 2	2,21	VS 2	0,89	PL 2	9,54	VF 2	CAA com boa viscosidade e coesão. Relação sp/c superior a do cone de Marsh, (sp/c = 0,25%). Concreto aprovado.
0,55	0,20	40	685	SF 2	1,75	VS 1	1,00	PL 2	9,12	VF 2	CAA com boa viscosidade e coesão. Concreto aprovado.

Nota: Os dados omitidos correspondem a ensaios não realizados.

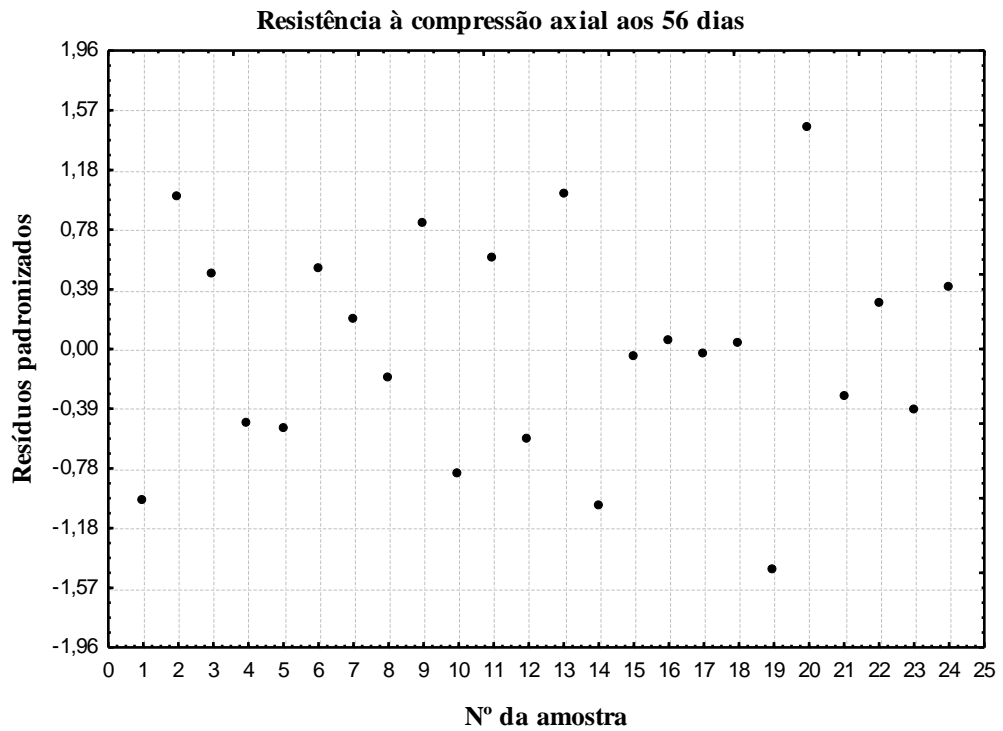
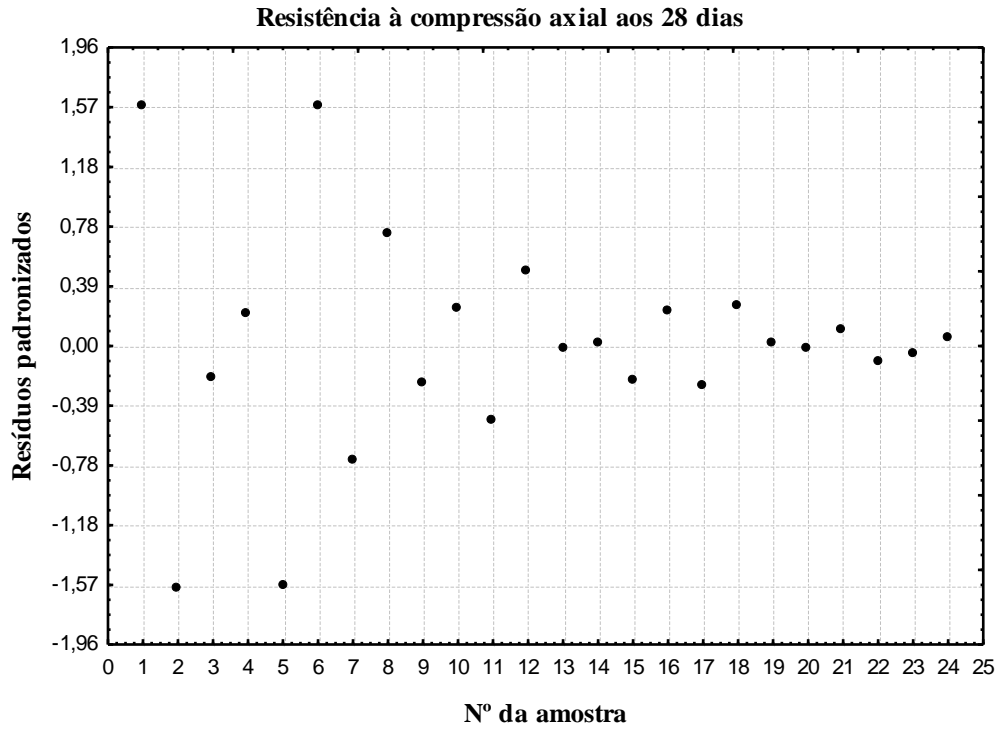
APÊNDICE B – Traços dos CAA do programa experimental para 27 litros de concreto.

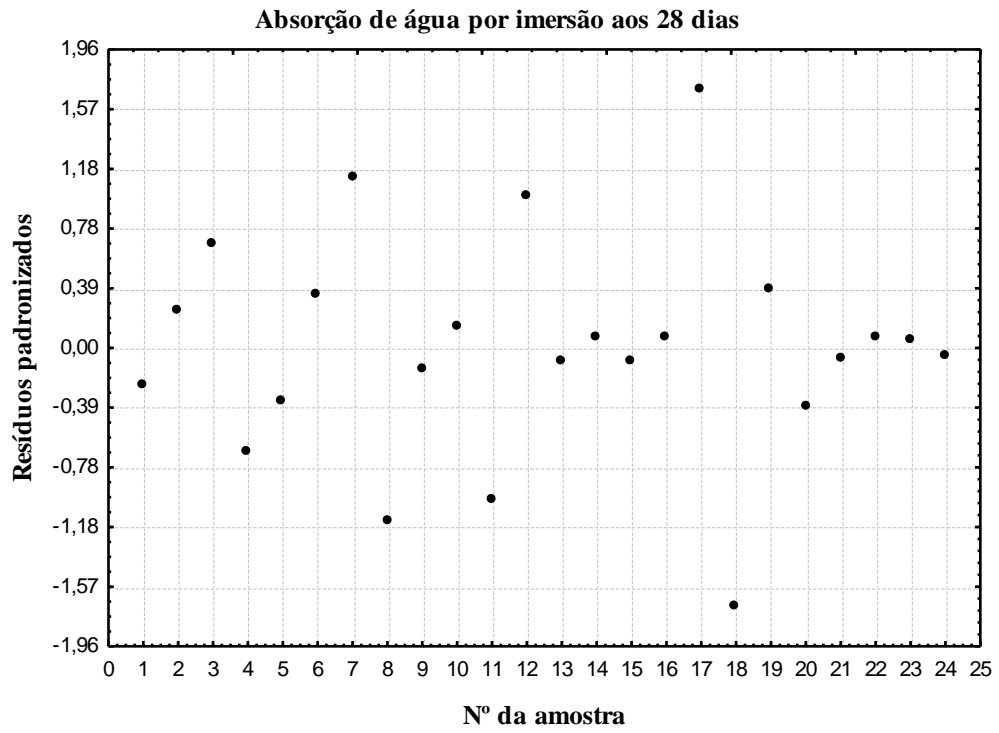
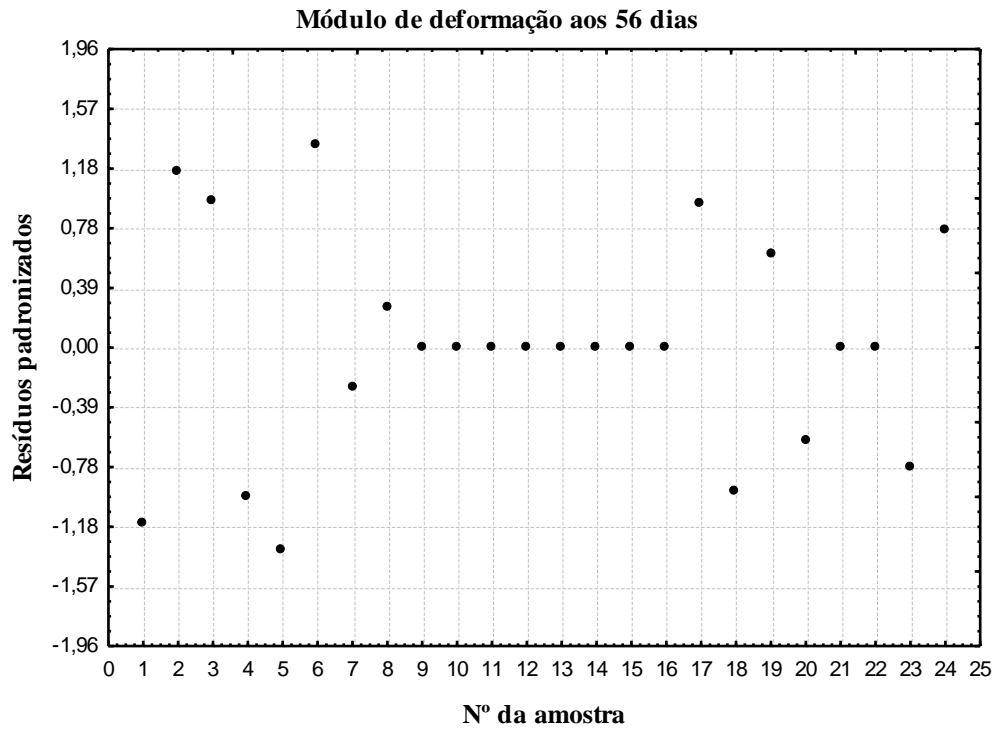
Traço	a/c	sp/c (%)	%AGR	Cimento (kg)	Fíler (kg)	Areia (kg)	Pedrisco (kg)	AGN (kg)	AGR (kg)
1	0,35	0,55	0%	12,91	5,16	20,57	7,97	13,32	0,00
2	0,35	0,55	10%	12,91	5,16	20,57	7,97	11,98	1,14
3	0,35	0,55	20%	12,91	5,16	20,57	7,97	10,65	2,28
4	0,35	0,55	30%	12,91	5,16	20,57	7,97	9,32	3,43
5	0,45	0,275	0%	11,56	4,62	20,57	7,97	13,32	0,00
6	0,45	0,275	10%	11,56	4,62	20,57	7,97	11,98	1,14
7	0,45	0,275	20%	11,56	4,62	20,57	7,97	10,65	2,28
8	0,45	0,275	30%	11,56	4,62	20,57	7,97	9,32	3,43
9	0,55	0,20	0%	10,44	4,18	20,57	7,97	13,32	0,00
10	0,55	0,20	10%	10,44	4,18	20,57	7,97	11,98	1,14
11	0,55	0,20	20%	10,44	4,18	20,57	7,97	10,65	2,28
12	0,55	0,20	30%	10,44	4,18	20,57	7,97	9,32	3,43

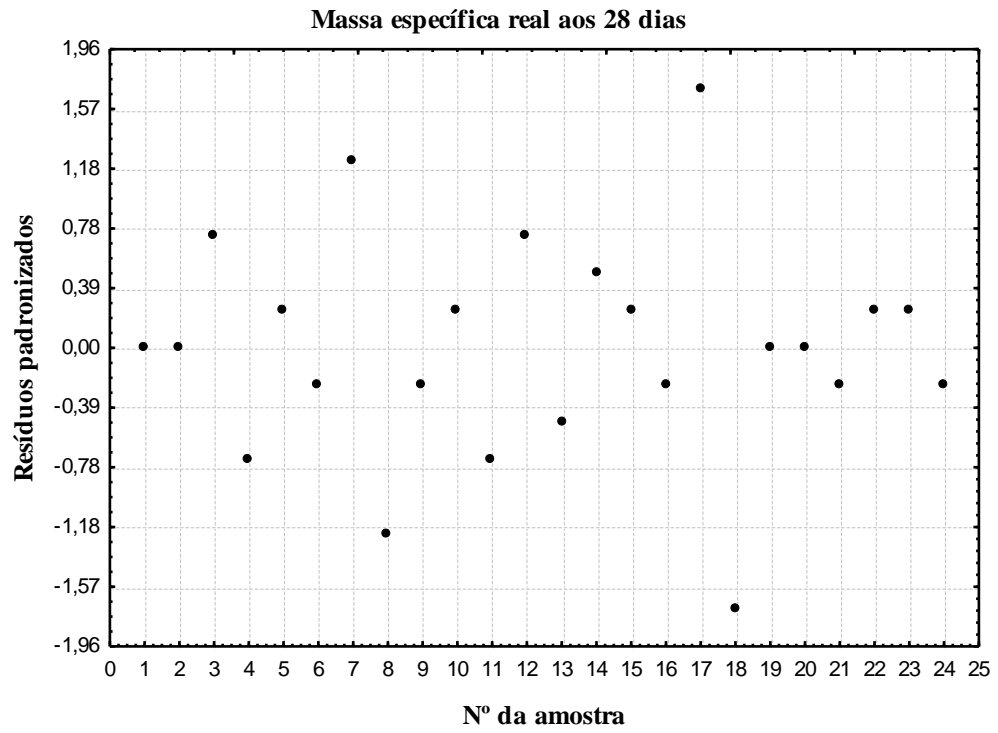
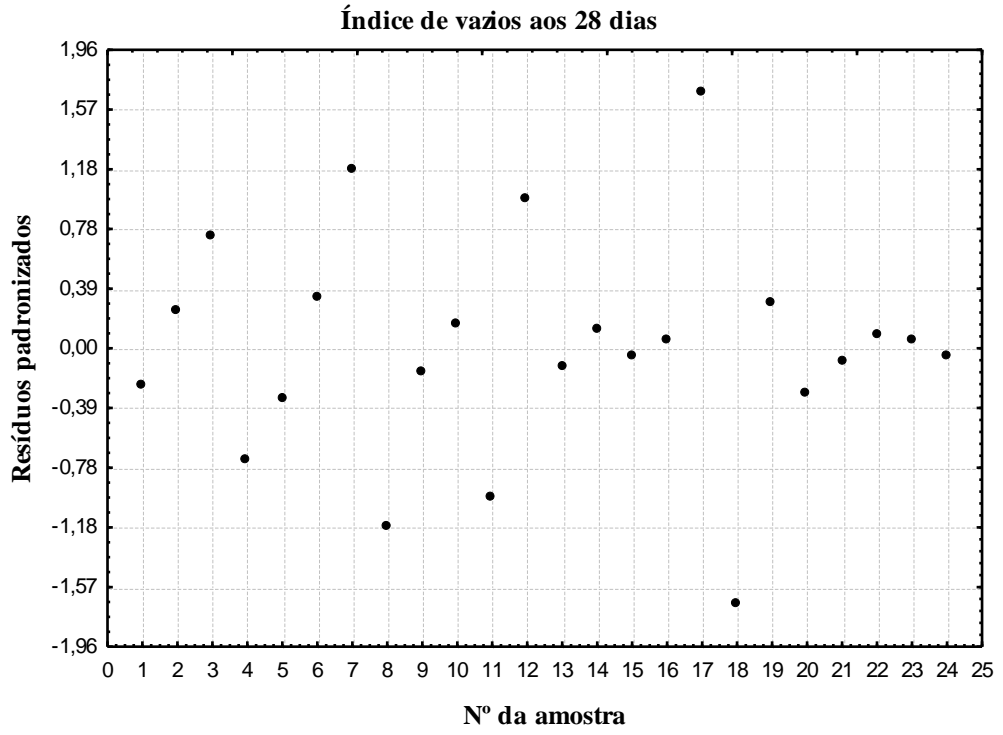
APÊNDICE C – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos CAA do programa experimental.

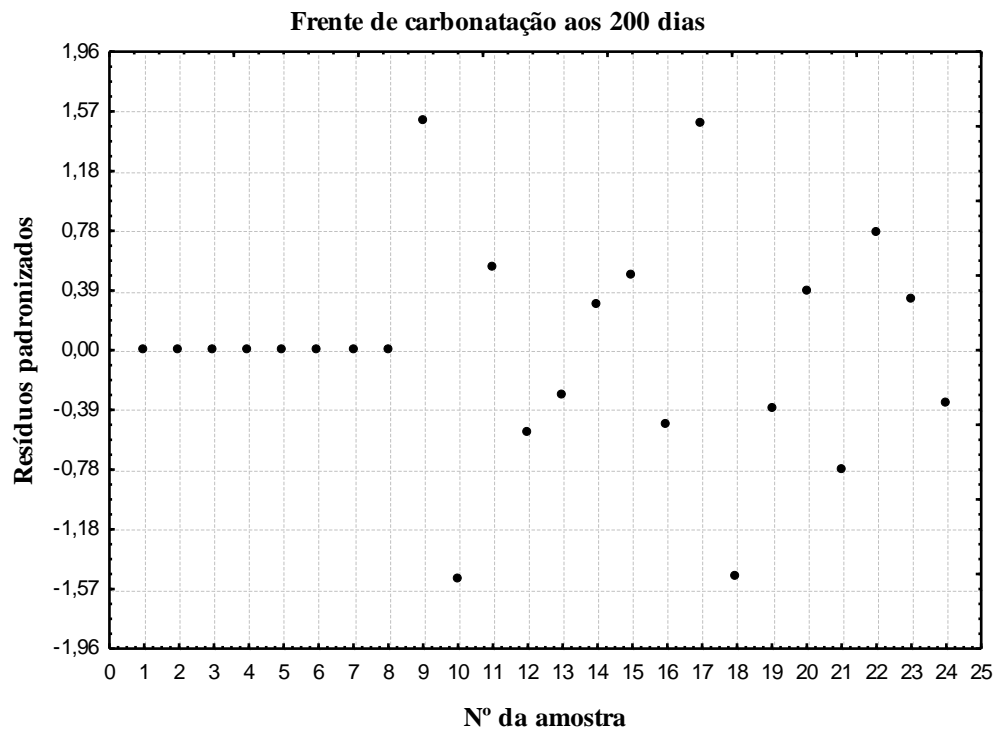
Traço	CP	Resistência axial (MPa)		Módulo de elasticidade (GPa)	Absorção por imersão (%)	Índice de vazios (%)	Massa específica (g/cm ³)	Carbonatação (mm)
		28 dias	56 dias	56 dias	28 dias	28 dias	28 dias	200 dias
1	1	48,48	41,72	55,66	2,79	6,51	2,50	0,00
	2	37,72	50,71	66,80	2,98	6,92	2,50	0,00
2	1	48,64	53,95	71,55	2,66	6,15	2,46	0,00
	2	50,10	49,48	62,22	2,14	4,94	2,43	0,00
3	1	53,14	55,14	67,04	3,60	8,33	2,52	0,00
	2	63,80	59,90	79,81	3,87	8,87	2,51	0,00
4	1	55,42	57,21	63,11	4,34	9,86	2,52	0,00
	2	60,47	55,50	65,64	3,48	7,92	2,47	0,00
5	1	30,44	38,02	61,19	4,61	10,26	2,48	3,75
	2	32,14	30,60	61,19	4,72	10,53	2,49	2,20
6	1	38,65	43,85	43,92	4,47	9,90	2,46	3,00
	2	41,98	38,52	43,92	5,23	11,52	2,49	2,45
7	1	41,79	37,53	58,56	5,84	12,69	2,49	2,23
	2	41,91	28,30	58,56	5,90	12,89	2,51	2,53
8	1	34,90	33,57	48,20	5,36	11,72	2,48	3,35
	2	36,45	34,05	48,20	5,42	11,80	2,47	2,85
9	1	28,69	32,00	57,19	6,57	14,39	2,56	3,53
	2	30,46	32,32	48,16	5,27	11,62	2,49	2,00
10	1	27,19	18,96	39,56	7,52	15,92	2,52	1,50
	2	27,07	32,01	33,70	7,23	15,42	2,52	1,90
11	1	33,10	30,74	45,65	7,31	15,54	2,52	2,93
	2	32,43	33,49	45,65	7,36	15,69	2,53	3,73
12	1	32,35	28,08	42,35	7,61	16,07	2,52	3,40
	2	32,67	31,72	49,82	7,57	15,98	2,51	3,05

APÊNDICE D – Análises dos resíduos padronizados para os resultados dos ensaios no estado endurecido dos CAA do programa experimental.









ANEXOS

ANEXO A – Classificação do CAA no estado fresco segundo a NBR 15.823-1 (ABNT, 2010)

Tabela 1 - Classes de espalhamento (slump-flow)

Classe	Espalhamento (mm)	Método de ensaio
SF 1	550 a 650	NBR 15823-2 (cone de Abrams)
SF 2	660 a 750	
SF 3	760 a 850	

Tabela 2 - Classes de viscosidade plástica aparente T_{500} (sob fluxo livre)

Classe	T_{500} (s)	Método de ensaio
VS 1	≤ 2	NBR 15823-2 (cone de Abrams)
VS 2	> 2	

Tabela 3 - Classes de habilidade passante pelo anel J (sob fluxo livre)

Classe	Anel J (mm)	Método de ensaio
PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	NBR 15823-3 (método do anel J)
PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço	

Tabela 4 - Classes de habilidade passante pela caixa L (sob fluxo confinado)

Classe	Caixa L (H2/H1)	Método de ensaio
PL 1	$\geq 0,80$ com 2 barras de aço	NBR 15823-4 (método da caixa L)
PL 2	$\geq 0,80$ com 3 barras de aço	

Tabela 5 - Classes de viscosidade plástica pelo funil V (sob fluxo confinado)

Classe	Funil V (s)	Método de ensaio
VF 1	< 9	NBR 15823-5
VF 2	9 a 25	(método do funil V)

Tabela 6 - Classes de resistência à segregação pela coluna de segregação

Classe	Coluna de segregação (%)	Método de ensaio
SR 1	≤ 20	NBR 15823-6
SR 2	≤ 15	(método da coluna de segregação)

ANEXO B – Requisitos do CAA no estado fresco em função de sua aplicação segundo a NBR 15.823-1 (ABNT, 2010).

Tabela 1 - Classes de espalhamento (*slump-flow*)

Classe	Espalhamento (mm)	Aplicação	Exemplo
SF 1	550 a 650	<ul style="list-style-type: none"> - Estruturas não armadas ou com baixa taxa de armadura e embutidos, cuja concretagem é realizada a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. - Concreto auto-adensável bombeado. - Estruturas que exigem uma curta distância de espalhamento horizontal do concreto auto-adensável. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lajes - Revestimento de túneis - Estacas e certas fundações profundas
SF 2	660 a 750	<ul style="list-style-type: none"> - Adequada para a maioria das aplicações correntes. 	<ul style="list-style-type: none"> - Paredes, vigas, pilares e outras
SF 3	760 a 850	<ul style="list-style-type: none"> - Estruturas com alta densidade de armadura e/ou de forma arquitetônica complexa, com o uso de concreto com agregado graúdo de pequenas dimensões (menor que 12,5 mm). 	<ul style="list-style-type: none"> - Pilares-parede - Paredes-diafragma - Pilares

Tabela 2 - Classes de viscosidade plástica aparente

Classe	T500 (s)	Funil V (s)	Aplicação	Exemplo
VS 1 / VF 1	≤ 2	< 9	<ul style="list-style-type: none"> - Adequado para elementos estruturais com alta densidade de armadura e embutidos, mas exige controle de exsudação e segregação. - Concretagens realizadas a partir do ponto mais alto com deslocamento livre. 	<ul style="list-style-type: none"> - Lajes, paredes-diafragma, pilares-parede, indústria de pré-moldados e concreto aparente
VS 2 / VF 2	> 2	9 a 25	<ul style="list-style-type: none"> - Adequada para a maioria das aplicações correntes. Apresenta efeito tixotrópico que acarreta menos pressão sobre as fôrmas e melhor resistência à segregação. - Efeitos negativos podem ser obtidos com relação à superfície de acabamento (ar aprisionado), no preenchimento de cantos e suscetibilidade a interrupções ou demora entre sucessivas camadas. 	<ul style="list-style-type: none"> - Vigas, pilares e outras

Tabela 3 - Classes de habilidade passante

Classe	Anel J (mm)	Caixa L (H2/H1)	Aplicação	Exemplo
PJ 1/ PL 1	0 a 25mm com 16 barras de aço	$\geq 0,80$ com 2 barras de aço	- Adequada para elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 80 mm a 100 mm.	- Lajes, painéis e elementos de fundações
PJ 2 /PL 2	25 a 50 mm com 16 barras de aço	$\geq 0,80$ com 3 barras de aço	- Adequada para a maioria das aplicações correntes. - Elementos estruturais com espaçamentos de armadura de 60 mm a 80 mm.	- Vigas, pilares, tirantes e indústria de pré-moldados

Tabela 4 - Classes de resistência à segregação

Classe	Coluna de segregação	Distância a ser percorrida	Espaçamento entre armaduras	Exemplo
SR 1	≤ 20	< 5	> 80	- Lajes de pequena espessura - Estruturas convencionais de pouca complexidade
SR 2	≤ 15	> 5	> 80	- Elementos de fundações profundas
		< 5	< 80	- Pilares, paredes e elementos estruturais complexos - Elementos pré-moldados