

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO NA
COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS**

Jocimar Souza Kuster Junior

São Carlos
2018

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ESTRUTURAS E CONSTRUÇÃO CIVIL

**AVALIAÇÃO DA INCORPORAÇÃO DE AGREGADO RECICLADO NA
COMPOSIÇÃO DE CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS**

Jocimar Souza Kuster Junior

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil da Universidade Federal de São Carlos como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Estruturas e Construção Civil.

Área de Concentração: Sistemas Construtivos

Orientador: Profa. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

Coorientador: Prof. Dr. Fernando Menezes de Almeida Filho

São Carlos
2018



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

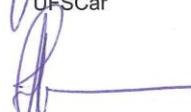
Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil

Folha de Aprovação

Assinaturas dos membros da comissão examinadora que avaliou e aprovou a Defesa de Dissertação de Mestrado do candidato Jocimar Souza Kuster Junior, realizada em 24/04/2018:



Prof. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira
UFSCar



Prof. Dra. Valdirene Maria Silva Capuzzo
UnB



Prof. Dra. Alessandra Lorenzetti de Castro
EESC/USP

Certifico que a defesa realizou-se com a participação à distância do(s) membro(s) Valdirene Maria Silva Capuzzo e, depois das arguições e deliberações realizadas, o(s) participante(s) à distância está(ão) de acordo com o conteúdo do parecer da banca examinadora redigido neste relatório de defesa.



Prof. Dra. Fernanda Giannotti da Silva Ferreira

DEDICATÓRIA

*À minha esposa Esimely pelo amor,
companheirismo e compreensão.*

AGRADECIMENTOS

À Deus, pela capacitação diante dos desafios encontrados ao longo desta jornada.

À minha amada esposa Esimely pela paciência, companheirismo, amor, dedicação e incentivo durante esta trajetória.

Aos meus pais, Jocimar e Reginalva, que sempre me apoiaram e me incentivaram durante toda a minha vida.

Aos meus irmãos, Samuel e Alana, que sempre torceram por mim.

À toda a minha família pelo apoio.

À Professora Fernanda Giannotti que me orientou com sabedoria e paciência, pela confiança depositada em mim, pelo tempo dedicado na condução desta pesquisa, pelas valiosas contribuições nos momentos de decisões e pela forma que conduziu este trabalho. Meus sinceros agradecimentos!

Ao Professor Fernando Menezes de Almeida Filho, por ter sido coorientador desta pesquisa e aquele que me mostrou lá no começo de tudo, que isto seria possível. Meus sinceros agradecimentos!

Aos técnicos de laboratório, José Roberto e Ricardo Canato, pelo apoio na realização dos ensaios.

À UFSCAR pela oportunidade a mim concedida de participar deste programa de tamanha relevância educacional.

KUSTER JUNIOR, J.S. **Avaliação da incorporação de agregado reciclado na composição de concretos autoadensáveis.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

O concreto autoadensável possui características específicas que o difere do concreto convencional. Destaca-se a sua capacidade de autoadensamento, facilidade de bombeamento, excelente homogeneidade e resistência à segregação, sendo estas características obtidas pela sua composição. Por outro lado, a reciclagem dos resíduos da construção civil vem despertando grande interesse e se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade do setor construtivo, pela redução do impacto ambiental gerado. Dentre as finalidades que tem gerado grande interesse é a da utilização dos resíduos da construção civil como agregado reciclado. Desta forma, o presente estudo buscou avaliar a influência da substituição dos agregados naturais por reciclados (gráúdo e miúdo). A dosagem do concreto autoadensável foi realizada de acordo com o método proposto por Alencar e Helene. A partir da obtenção do traço referência (AN REF), foram produzidos 3 traços com teores de substituição do agregado gráúdo reciclado de 30%, 50% e 100% (AGR 30, AGR 50 e AGR 100) e 2 traços com teores de substituição do agregado miúdo reciclado de 30% e 50% (AMR 30 e AMR 50). Realizou-se no estado fresco da mistura ensaios para determinação do espalhamento e do tempo de escoamento, índice de estabilidade visual, habilidade passante pelo método do anel J, habilidade passante pelo método da caixa L, viscosidade pelo método do funil V e resistência à segregação pelo método da coluna de segregação, para verificação da autoadensabilidade dos concretos. No estado endurecido, foram realizados ensaios para determinação da resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral, módulo de elasticidade, absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica. Os concretos produzidos apresentaram desempenho satisfatório no estado fresco, sendo considerados autoadensáveis. Quanto ao comportamento mecânico, os concretos apresentaram resistência à compressão similar ou mesmo superior ao concreto de referência. Ocorreu redução no módulo de elasticidade à medida que se elevou o teor de substituição dos agregados reciclados. Já os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios cresceram à medida que aumentou o teor de substituição dos agregados reciclados. Por meio do presente estudo, pode-se constatar que a incorporação de agregados reciclados (gráúdo e miúdo) provenientes de resíduos da construção civil, mostra-se como uma alternativa para a produção de concretos autoadensáveis.

Palavras-chave: Concreto autoadensável, agregado reciclado, dosagem, propriedades mecânicas.

ABSTRACT

KUSTER JUNIOR, J.S. **Evaluation of the incorporation of recycled aggregate in the composition of self-supporting concretes.** Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil) – Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2018.

Self-compacting concrete has specific characteristics that differ from conventional concrete. Its self-compacting capability, ease of pumping, excellent homogeneity and resistance to segregation are highlighted, being these characteristics obtained by its composition. On the other hand, the recycling of waste from civil construction has aroused great interest and consolidated as an important practice for the sustainability of the construction sector, by reducing the environmental impact generated. Among the purposes that have generated great interest is the use of construction waste as a recycled aggregate. In this way, the present study tried to evaluate the influence of the substitution of the natural aggregates for recycled (big and small). The dosage of self-compacting concrete was performed according to the method proposed by Alencar and Helene. From the reference trace (AN REF), three traces were produced with 30%, 50% and 100% recycled aggregate replacement (AGR 30, AGR 50 and AGR 100) and 2 traces with substitution contents of the recycled kid's aggregate of 30% and 50% (AMR 30 and AMR 50). Tests were carried out in the fresh state of the mixture for determination of scattering and run-time, visual stability index, passing ability by ring method J, passing through L method, viscosity by funnel V method and resistance to segregation by the segregation column method, to verify the self-density of the concretes. In the hardened state, tests were performed to determine the resistance to simple compression, tensile strength by diametrical compression, modulus of elasticity, absorption of water by immersion, voids index and specific mass. The concretes produced presented satisfactory performance in the fresh state, being considered self-supporting. As for the mechanical behavior, the concretes presented resistance to compression similar or even superior to the reference concrete. The modulus of elasticity decreased as the substitution content of the recycled aggregates increased. The results of water absorption by immersion and voids index increased as the substitution content of the recycled aggregates increased. Through the present study, it can be seen that the incorporation of recycled aggregates (large and small) from construction waste is an alternative for the production of self-supporting concrete.

Key-words: Self-compacting concrete, recycled aggregate, dosage, mechanical properties.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Materiais presentes no RCC	12
Figura 2.2 - RCC descartados em área de preservação permanente.....	13
Figura 2.3 - RCC descartados na drenagem urbana	14
Figura 2.4 - RCC descartados em vias e logradouros públicos.....	14
Figura 2.5 - Reciclagem de resíduos da classe A para a produção de agregados.....	19
Figura 3.1 - Agregado reciclado de concreto (ARC) miúdo (a) e graúdo (b)	24
Figura 3.2 - Agregado reciclado misto (ARM) miúdo (a) e graúdo (b)	25
Figura 4.1 - Vista do edifício Camila	42
Figura 4.2 - Lançamento do CAA na laje.....	43
Figura 4.3 - Método de dosagem Gomes, Gettu e Agulló.....	53
Figura 4.4 - Método de dosagem Tutikian	54
Figura 4.5 - Método de dosagem Repette-Melo	55
Figura 4.6 - Método de dosagem Tutikian e Dal Molin	56
Figura 4.7 - Sequência para o proporcionamento dos materiais do traço médio.....	57
Figura 4.8 - Diagrama de dosagem.....	60
Figura 5.1 - Programa experimental	63
Figura 5.2 - Lote para coleta dos agregados graúdos reciclados (a), face exterior da pilha (b), material abaixo da camada de 30 cm.....	64
Figura 5.3 - Quarteamento dos agregados graúdo (a) e miúdo (b)	65
Figura 5.4 - Agregado miúdos: agregado miúdo natural MF 1,07 (a), agregado miúdo natural MF 2,47 (b) e agregado miúdo reciclado MF 2,86 (c)	67
Figura 5.5 - Agregado graúdo natural $D_{máx}$ 9,5 mm (a) e agregado graúdo reciclado $D_{máx}$ 9,5 mm (b)	67
Figura 5.6 - Corpos de prova em cura	71
Figura 5.7 - Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (<i>Slump-flow test</i>).....	72
Figura 5.8 - Ensaio do anel-J (<i>J-Ring test</i>)	73
Figura 5.9 - Ensaio da caixa-L (<i>L-Box test</i>).....	74
Figura 5.10 - Ensaio do funil-V (<i>V-funnel test</i>).....	75
Figura 5.11 - Coluna de segregação	76
Figura 6.1 - Etapas para obtenção do CAA referência: primeira tentativa (a), segunda tentativa (b), traço final - referência (c)	80
Figura 6.2 - Caracterização do CAA no estado fresco: espalhamento (a), anel J (b), funil V (c) e coluna de segregação (d).....	82
Figura 6.3 - Índice de estabilidade visual	84
Figura 6.4 - Resistência à compressão dos concretos estudados.....	85
Figura 6.5 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias.....	88
Figura 6.6 - Módulo de elasticidade aos 28 dias	90
Figura 6.7 - Absorção de água de água por imersão dos concretos estudados.....	92
Figura 6.8 - Índice de vazios	94
Figura 6.9 - Massa específica	95

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Resíduos sólidos da construção civil coletados pelos municípios brasileiros.....	10
Tabela 2.2 - Composição do RCC de diversas cidades brasileiras.....	12
Tabela 2.3 - Instrumentos legais e normativos de abrangência nacional	15
Tabela 2.4 - Instrumentos legais nos municípios relativos aos RCC	16
Tabela 3.1 - Densidades aparentes médias	22
Tabela 3.2 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado	23
Tabela 3.3 - Classificação segundo a composição do agregado reciclado	25
Tabela 3.4 – Abordagem quanto à utilização da pré-molhagem dos agregados reciclados	31
Tabela 3.5 - Diretrizes para reuso e reciclagem dos resíduos da construção civil	36
Tabela 3.6 - Especificações para uso do agregado reciclado em concreto.....	38
Tabela 4.1 - Características e efeitos da utilização de adições minerais no concreto autoadensável.....	51
Tabela 5.1 - Proporção de agregados.....	68
Tabela 5.2 – Classificação do CAA no estado fresco.....	76
Tabela 5.3 - Tabela gerada para análise de ANOVA	78
Tabela 5.4 - Tabela gerada para o teste t Student.....	79
Tabela 6.1 - Proporção dos materiais constituintes do concreto de referência.....	81
Tabela 6.2 - Traço unitário	81
Tabela 6.3 – Classificação do concreto no estado fresco	81
Tabela 6.4 – Composição e parâmetros dos concretos estudados	83
Tabela 6.5 - Avaliação da propriedades no estado fresco	83
Tabela 6.6 - Resistência à compressão do concretos estudados	85
Tabela 6.7 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias	88
Tabela 6.8 - Módulo de elasticidade aos 28 dias	89
Tabela 6.9 - Absorção de água por imersão dos concretos estudados.....	92
Tabela 6.10 - Índice de vazios dos concretos estudados	93

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 Objetivos.....	4
1.1.1 Geral	4
1.1.2 Específicos.....	5
1.2 Justificativa	5
1.3 Descrição dos capítulos	5
2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)	7
2.1 Definição	7
2.2 Histórico	7
2.3 Geração de RCC	8
2.4 Classificação do RCC	10
2.5 Composição do RCC	11
2.6 Reciclagem e reutilização de RCC	13
2.7 Considerações finais	19
3. AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS.....	21
3.1 Definição, classificação e características dos agregados	21
3.2 Definição e classificação dos agregados reciclados.....	24
3.3 Características dos agregados reciclados	26
3.3.1 Forma e textura superficial	27
3.3.2 Composição granulométrica	28
3.3.3 Massa específica	28
3.3.4 Absorção de água.....	29
3.3.5 Presença de Contaminantes	34
3.4 Normas nacionais e internacionais.....	34
3.5 Considerações finais	39
4. CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)	40
4.1 Definição	40
4.1.1 Histórico	41
4.1.2 Vantagens do uso do CAA	43
4.2 Propriedades do CAA no estado fresco	44
4.2.1 Habilidade de preenchimento	44
4.2.2 Habilidade passante	44
4.2.3 Resistência à segregação	45
4.3 Materiais constituintes	45
4.3.1 Agregado miúdo	45
4.3.2 Agregado graúdo	46
4.3.3 Cimento	46
4.3.4 Aditivos	47

4.3.4.1	Aditivos superplastificantes (SP)	48
4.3.4.2	Aditivos modificadores de viscosidade (AMV)	49
4.3.5	Adições minerais	49
4.3.5.1	Nanosflica	52
4.4	Métodos de dosagem.....	53
4.4.1	Método de dosagem por Gomes, Gettu e Aguiló	53
4.4.2	Método de dosagem por Tutikian	54
4.4.3	Método de dosagem por Repette-Melo	54
4.4.4	Método de dosagem por Tutikian e Dal Molin.....	55
4.4.5	Método de dosagem por Alencar e Helene.....	56
4.4.6	Método de dosagem IBRACON para concreto convencional.....	58
4.5	Considerações finais	60
5.	<i>PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL</i>.....	62
5.1	Coleta dos agregados	64
5.2	Materiais utilizados	66
5.2.1	Cimento Portland.....	66
5.2.2	Fíler calcário	66
5.2.3	Aditivo superplastificante.....	66
5.2.4	Agregado miúdo	66
5.2.5	Agregado graúdo	67
5.3	Definição dos traços.....	68
5.3.1	Procedimento de dosagem do concreto com agregado reciclado	68
5.3.1.1	Compensação do volume do agregado	68
5.3.1.2	Compensação da água na mistura.....	69
5.3.2	Mistura dos materiais e moldagem dos corpos de prova.....	69
5.4	Propriedades avaliadas	71
5.4.1	Propriedades do CAA no estado fresco.....	71
5.4.1.1	Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrams	71
5.4.1.2	Determinação da habilidade passante – Método do anel J	72
5.4.1.3	Determinação da habilidade passante – Método da caixa L.....	73
5.4.1.4	Determinação da viscosidade – Método do Funil V.....	74
5.4.1.5	Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação	75
5.4.2	Propriedades do CAA no estado endurecido.....	77
5.4.2.1	Resistência à compressão axial.....	77
5.4.2.2	Resistência à tração por compressão diametral	77
5.4.2.3	Módulo de elasticidade	77
5.4.2.4	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica	77
5.4.3	Análise estatística dos resultados	78
6.	<i>RESULTADOS E DISCUSSÃO</i>	80
6.1	Dosagem dos concretos autoadensáveis.....	80
6.1.1	Determinação do CAA referência	80
6.1.2	Dosagem dos concretos com agregados reciclados.....	82
6.2	Desempenho mecânico dos concretos	85
6.2.1	Resistência à compressão	85

6.2.2	Resistência à tração por compressão diametral	88
6.2.3	Módulo de elasticidade	89
6.2.4	Absorção de água por imersão.....	91
6.2.5	Índice de vazios	93
6.2.6	Massa específica	95
7.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	97
7.1	Conclusões	97
7.2	Sugestões para trabalhos futuros	98
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100
	APÊNDICE A.....	111
	APÊNDICE B.....	122
	APÊNDICE C.....	131
	APÊNDICE D.....	134
	APÊNDICE E.....	136
	APÊNDICE F.....	138
	APÊNDICE G.....	140
	APÊNDICE H.....	142
	ANEXO A.....	144
	ANEXO B.....	146
	ANEXO C.....	148

1. INTRODUÇÃO

O setor da construção civil passa por um período de desenvolvimento e implementação de tecnologias que visam a redução, reutilização e reciclagem dos resíduos da construção civil. A reciclagem destes resíduos vem se consolidando como uma prática importante para a sustentabilidade do setor construtivo, tanto pela redução de custos, como pela diminuição dos impactos ambientais gerados (PINTO, 1999; JOHN, 2001).

Segundo Pinto (1999), nas atividades de construção, reparos e demolição, muitas vezes por deficiência no processo construtivo, são gerados os resíduos, considerados subprodutos dos processos. Os custos desta prática estarão no aumento do custo final da construção, remoção e tratamento destes resíduos, e se agravam mais quando esses materiais são dispostos clandestinamente em locais impróprios, como terrenos baldios, margens de rios e córregos, gerando problemas como enchentes, poluição visual, proliferação de vetores de doenças e substâncias tóxicas nos locais.

Estudos realizados estimaram em 230 a 760 kg/habitante/ano a produção de resíduos da construção, o que pode representar entre 40% e 70% do resíduo sólido municipal (PINTO, 1999).

O panorama dos resíduos sólidos no Brasil divulgados pela ABRELPE (2016) indica que no ano de 2015 foi coletado 0,605 kg/habitante/dia que corresponde 220,8 kg/habitante/ano. Já em 2016 houve uma ligeira redução para 0,600 kg/habitante/dia que representa 219 kg/habitante/ano.

Segundo Luz *et al.* (2004), os resíduos de construção e demolição são compostos por componentes minerais misturados com outros materiais como metais, restos de tintas e esmalte, gesso e madeira. Sendo assim, é necessária a separação e a classificação dos resíduos para serem reutilizados.

O gerenciamento dos Resíduos da Construção Civil (RCC) no Brasil está previsto na lei federal nº 12.305/2010 de 2 de Agosto de 2010, aprovada pelo decreto nº 7.404/2010 de 23 de Dezembro de 2010, que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) dispondo de objetivos e instrumentos, bem como diretrizes relativas à gestão integrada de resíduos sólidos (BRASIL, 2017).

Diante desta realidade, uma das finalidades que vem despertando grande interesse é a utilização dos agregados reciclados, provenientes dos resíduos da construção e demolição, para a produção de concretos. Esta é uma aplicação que exige muitos cuidados

e estudos, tendo em vista o importante papel que os agregados desempenham no comportamento dos concretos (MARIA; SIMONE, 2008).

A possibilidade de produzir um concreto em que a matéria-prima natural (agregados) seja substituída por agregado reciclado de resíduos da construção, sem afetar drasticamente as características mecânicas necessárias para o bom desempenho do mesmo, pode favorecer para a disseminação da tecnologia do CAA no mercado brasileiro, que ainda esbarra nas questões de aceitação popular e no ponto de visto econômico.

Diversos estudos a nível nacional e mundial foram desenvolvidos com o intuito de avaliar a utilização de resíduos da construção e demolição para a produção de concreto convencional, obtendo resultados satisfatórios, tais como as pesquisas de Zordan (1997), Latterza (1998), Ângulo (2000), Leite (2001), Tenório (2007), Silva (2011), Moretti (2014), Abdel-Hay (2015), Zhou e Chen (2017), entre outras.

Zordan (1997), após realizar ensaios de resistência à compressão, resistência à abrasão e permeabilidade em concretos com agregados reciclados, concluiu que estes são viáveis para fabricação de peças de concretos para drenagem superficial de estradas, guias e blocos para calçamento e blocos de concreto para alvenaria sem fim estrutural.

Já Latterza (1998) em seus estudos atestou a viabilidade técnica e econômica do uso de agregados reciclados em concretos de baixa e média resistência para fabricação de painéis leves de vedação.

Ângulo (2000) aprofundou-se no estudo da variabilidade dos agregados reciclados de resíduos da construção e demolição, destacando a importância dos mecanismos de controle de qualidade. Porém, o autor também concluiu a viabilidade técnica do uso do agregado reciclado em comparativo com os de origem natural. Da mesma forma, Leite (2001) comprovou a viabilidade de utilização dos agregados reciclados em concretos quanto às propriedades mecânicas avaliadas, sendo estas: a resistência à compressão; a resistência à tração por compressão diametral e a resistência à tração na flexão; e o módulo de deformação dos concretos.

Para Tenório (2007), os resultados encontrados em seu estudo para as propriedades dos concretos com agregados reciclados corroboram para o uso dos agregados reciclados em aplicações estruturais, desde que observadas suas particularidades. Da mesma forma, Silva (2011) atestou a viabilidade de utilizar os agregados graúdos reciclados em concretos estruturais, já que os resultados das propriedades mecânicas são satisfatórios. A resistência à compressão, na idade de 28 dias, do concreto com agregado reciclado e relação água/cimento de 0,50 atingiu 84,21% do valor da resistência à compressão do concreto de referência (composto só com agregados naturais). Já o módulo de elasticidade, aos 28 dias e relação água/cimento de 0,50 resultou em 85,15% do valor obtido pelo concreto de referência.

Moretti (2014) concluiu em seus estudos que é possível a substituição parcial de agregados naturais pelos reciclados na confecção de concretos, pois os valores obtidos das propriedades mecânicas foram similares ao concreto de referência. Na idade de 28 dias a diferença da resistência à compressão com substituição de 30% dos agregados naturais por reciclados frente ao concreto de referência foi de apenas 0,2% e com a substituição de 50% a diferença apresentada foi de 6,1%. Já com substituição de 100% dos agregados naturais por reciclados a resistência à compressão do concreto de RCC apresentou resultado 16,3% inferior ao concreto de referência. Os valores de resistência à tração e módulo de elasticidade foram de igual forma satisfatórios.

Segundo Abdel-Hay (2015) a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado para a produção de concreto também se mostra uma alternativa viável. O autor avaliou a substituição do agregado natural pelo agregado reciclado com os teores de 25%, 50% e 100% em diferentes tipos de cura (ao ar, água e química) e nas idades de 3, 7 e 28 dias. Quanto a resistência à compressão, na idade de 28 dias, cura em água e 100% de substituição do agregado natural pelo reciclado, houve um aumento de aproximadamente 9% na resistência à compressão.

Da mesma forma, Zhou e Chen (2017) concluíram que a resistência à compressão e a resistência à flexão dos concretos produzidos com agregados reciclados foi compatível ou mesmo ultrapassou os resultados do concreto convencional para os diferentes teores de substituição avaliados. Na idade de 28 dias, com 50% de substituição de agregado natural pelo agregado reciclado, a resistência à compressão aumentou aproximadamente 14% e com 100% de substituição o aumento na resistência à compressão foi de aproximadamente 18%. Os resultados dos ensaios realizados pelos autores afirmam a viabilidade técnica da utilização do agregado reciclado para produção de concreto com esse material.

Como visto, diversos estudos foram desenvolvidos com o intuito de avaliar a utilização de RCC na produção de concreto convencional. Da mesma forma, principalmente nos últimos anos, pesquisas estão sendo desenvolvidas para analisar a viabilidade do uso de agregado de RCC na confecção de concreto autoadensável. Dentre essas se encontram: Grdic *et al.* (2010), Branco (2012), Oliveira *et al.* (2013), Tang *et al.* (2016), Campos (2017), entre outras.

Grdic *et al.* (2010) concluíram que substituir parcialmente o agregado natural por agregado reciclado em misturas de concreto autoadensável é totalmente viável já que as diferenças nas propriedades mecânicas são pequenas. A substituição de 50% da brita natural por reciclada diminuiu a resistência à compressão em 3,88% e a substituição de 100% do agregado graúdo diminuiu a resistência à compressão em 8,55%. Quanto o uso de 50 e 100% do agregado graúdo reciclado diminuiu a resistência à tração na flexão para 2,49 e 13,95%, respectivamente. A quantidade de agregado reciclado afeta a absorção de água

devido a maior porosidade que este material apresenta sendo que a utilização de 50 e 100% de agregado graúdo reciclado aumentou a absorção de água para 0,15 e 0,37%, respectivamente.

Em pesquisa desenvolvida por Branco (2012), concluiu-se que os agregados reciclados de concretos são uma ótima alternativa para elaboração de novos concretos tanto do ponto de vista econômico como ambiental, sendo que os resultados das propriedades mecânicas, se comparado ao concreto de referência, foram próximos ou até mesmo superiores.

Oliveira *et al.* (2013) também apresentaram resultados favoráveis para a utilização do agregado de RCC em concreto autoadensável. Com a incorporação de 40% de agregados reciclados a resistência à compressão apresentou uma perda de apenas 2% na idade de 28 dias. No módulo de elasticidade a perda foi de aproximadamente 3% quando comparado com o concreto autoadensável apenas com agregados de origem natural.

Da mesma forma, Tang *et al.* (2016) obtiveram resultados positivos na substituição dos agregados naturais por agregados reciclados na confecção de concreto autoadensável, concluindo que os testes experimentais indicaram a viabilidade da utilização do agregado de RCC e, conseqüentemente, favorecendo a economia e diminuindo os impactos ambientais. Com substituição de 50% dos agregados naturais por reciclados o valor da resistência à compressão foi de 9,9% superior ao concreto de referência. A resistência à tração obteve resultado equivalente ao de referência e o módulo de elasticidade apresentou valor inferior apenas de 6,3%.

Campos (2017), em sua pesquisa de concreto autoadensável produzido com agregado de RCC, observou que não houve diferença significativa na resistência à compressão, resistência à tração e no módulo de elasticidade, aos 28 dias, com substituição de 20% do agregado miúdo ou graúdo natural por agregado reciclado. A diminuição constatada nas propriedades mecânicas e na massa específica dos concretos produzidos com agregado de RCC, em relação aos resultados obtidos pelos traços referência, é devido às propriedades inerentes destes agregados, ou seja, à maior absorção de água, menor resistência mecânica e massa específica, em relação aos agregados naturais.

Neste sentido, esta pesquisa está embasada e contribui para a avaliação da incorporação de agregado reciclado para a produção de concreto autoadensável.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 GERAL

Avaliar concretos autoadensáveis com a substituição de agregados naturais, graúdo e miúdo, por agregados reciclados.

1.1.2 ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Avaliar as propriedades de autoadensabilidade dos concretos no estado fresco: espalhamento e tempo de escoamento, índice de estabilidade visual, anel J, caixa L, funil V e coluna de segregação, utilizando agregado reciclado;
- Comparar o desempenho mecânico dos concretos, analisando o seu comportamento no estado endurecido: resistência à compressão simples, resistência à tração por compressão diametral e módulo de elasticidade, utilizando agregado reciclado;
- Comparar os índices físicos mediante os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica dos concretos com agregados naturais e reciclados.

1.2 JUSTIFICATIVA

A quantidade de resíduos produzidos nas cidades brasileiras é significativa e tem demonstrado um desperdício de materiais e recursos para obtê-los, que vão desde a extração, transporte e processos industriais, até chegarem a ser utilizados diretamente na construção. As consequências dessa produção desenfreada de resíduos são distribuídas por toda a sociedade, com o aumento do custo final das construções e também por custos de remoção e tratamento adequado dos resíduos. Os resíduos retirados das obras, na maioria das vezes, são destinados a lugares inadequados e dispostos de modo clandestino em terrenos baldios, nas margens de rios e em alguns bairros da periferia. Essa atitude acaba por comprometer os órgãos públicos a dispor de recursos nem sempre mensuráveis para remover e tratar esse material (VAZ, 2007).

Segundo Mehta e Monteiro (2014), a melhor forma de reduzir o impacto ambiental causado pela indústria da construção civil e, neste caso, específico da indústria do concreto, seria a redução do seu consumo. Porém, sabendo que esta é uma realidade distante, deve-se adotar medidas visando o desenvolvimento industrial sustentável do material. Uma alternativa para o controle e redução deste impacto ambiental é o reaproveitamento e reciclagem desses resíduos, pois, com isso, ocorrerá a diminuição de áreas de depósitos de resíduos e também reduzirá a extração de recursos naturais para a fabricação de materiais para a construção civil.

1.3 DESCRIÇÃO DOS CAPÍTULOS

O trabalho foi dividido em 7 capítulos.

No capítulo 1 foi apresentada a introdução, objetivos e justificativa do trabalho.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica, discorrendo sobre os resíduos da construção civil (RCC) no Brasil e no mundo e as diversas vantagens da reciclagem e reutilização desses resíduos.

O capítulo 3 trata das características dos agregados naturais e dos reciclados, além das principais normas nacionais e internacionais que norteiam a utilização dos RCC como agregado.

Já no capítulo 4 apresentam-se os aspectos importantes sobre o concreto autoadensável (CAA), como as vantagens de sua utilização e as principais propriedades do CAA tanto no estado fresco quanto endurecido.

O capítulo 5 discorre sobre o procedimento experimental, detalhando as etapas, materiais e metodologias utilizados nesta pesquisa.

O capítulo 6 traz os resultados obtidos nos ensaios. Neste mesmo capítulo, foram apresentadas as análises e discussão sobre os ensaios realizados, buscando avaliar o potencial de aplicação do agregado reciclado no concreto autoadensável.

As considerações finais, conclusões e sugestão para trabalhos futuros foram abordadas no capítulo 7.

As referências bibliográficas, os apêndices e anexos foram apresentados ao final do texto.

2. RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO CIVIL (RCC)

Neste capítulo serão apresentados os principais aspectos relativos aos resíduos de construção e demolição, discorrendo de forma sucinta a trajetória do uso do RCC no Brasil e no mundo. Também será abordada a concepção sobre a geração dos resíduos da construção e demolição que, resumidamente, é o resultado dos diversos ciclos na construção civil como: o processo de construção, de manutenção e reformas, e da fase de demolição de edifícios. Por fim, concluirá mostrando as diversas vantagens da reciclagem e reutilização dos RCC.

2.1 DEFINIÇÃO

De acordo com Ângulo (2000), a definição do termo RCC é motivo de discórdia entre diversos autores, em função da abrangência das partes constituintes e a atividade geradora destas frações. Ressalta-se ainda que alguns autores preferem utilizar a palavra “entulho”. Para Leite (2001) o material pode ser definido como resíduos provenientes de construções, reparos, reformas, e demolições de estruturas e estradas.

Com o intuito de facilitar o entendimento quanto à definição de resíduo da construção civil, apresenta-se a definição da resolução 307, de 5 de julho de 2002, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).

“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 entulho de obras calça ou metralha” (CONAMA, 2002, p. 571).

Para fins deste trabalho será considerado RCC todos os resíduos oriundos de atividades ligadas à construção, reforma e demolição.

2.2 HISTÓRICO

A reciclagem de Resíduos da Construção Civil (RCC) ganhou importante destaque após a 2ª Guerra Mundial, a partir da necessidade de remover ruínas e realizar novas

construções. Neste período surgiu uma demanda de materiais, que pôde ser suprimida pelo uso de agregados oriundos da britagem de entulhos de edifícios demolidos, iniciando a prática de reaproveitamento de resíduos (WEDLER; HUMMEL, 1946¹ *apud* LEVY, 2001). A partir da utilização dos resíduos foi possível obter, além da limpeza das cidades, uma economia na aquisição de novos materiais (SCHULZ; HENDRICKS, 1992).

Segundo Ângulo (2000), ocorreu na Europa a formação do comitê técnico da RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires d'Essais et de Recherches sur les Matériaux et les Construction*), o TC 37 DRC, no período de 1976 a 1982, com o objetivo de estudar métodos de demolição e os aspectos técnicos ligados à reutilização do concreto, sendo denominado RILEM 121-DRG após 1988.

Na Europa, alguns fatores influenciaram para a obtenção de resultados positivos da reciclagem de resíduos, como a falta de recursos naturais, elevado custo para transporte de matéria-prima e também em função da conscientização da importância desta prática. Para estimular a reciclagem, o governo europeu desenvolveu programas para informar e educar a população (FHWA, 2004).

Comparando-se a países de primeiro mundo, a reciclagem de RCC no Brasil ainda é bastante recente e pequena, com a exceção da reciclagem pelas indústrias de cimento e aço (ÂNGULO, 2001). Os primeiros estudos de utilização de resíduos na construção civil devem-se a Cincotto (1983) e Pinto (1986), ocorrendo na sequência os estudos de Silveira (1993), Zordan (1997), Levy (1997), Latterza (1998), Lima (1999) e John (2000).

Vale ressaltar que desde então diversas pesquisas estão sendo realizadas na área, investigando as mais diversas aplicações do RCC: desde preenchimento de furos nas paredes para instalação de tubulações hidráulicas e elétricas; chumbamento de caixas elétricas e tubulações; contrapiso de interiores de unidades habitacionais; sistemas de drenagem; aterramento de valetas junto ao solo; até para o uso em pavimentação; agregados para a argamassa e agregados para o concreto sem ou com finalidade estrutural.

2.3 GERAÇÃO DE RCC

A indústria da construção civil destaca-se como uma grande geradora de resíduos e a quantidade destes é diretamente proporcional ao grau de desenvolvimento de uma cidade, resultado da maior atividade econômica e dos hábitos de consumo decorrentes (SCHNEIDER, 2003).

Em qualquer procedimento, devido à variabilidade natural, é inevitável que ocorra certa quantidade de perda, o que conseqüentemente gera resíduo. A parcela da perda que

¹ WEDLER, B.; HUMMEL A. *Trümmerverwertung und ausbau von brandruinen*. Wilhelm Ernest & Sohn, Berlin, 1946.

excede o limite mínimo é considerada desperdício. É difícil estabelecer o limite entre o que é perda inevitável e o desperdício, dispondo, assim, de diversas variáveis. As perdas originam-se nas inúmeras etapas de um edifício, desde a fase do planejamento e elaboração de projeto, mas a fase de execução é definitivamente a parte mais visível das perdas, inclusive porque é nesta etapa que as parcelas anteriores apresentam estrutura física, consumindo recursos naturais.

Para Agopyan *et al.* (1998), os resíduos da construção e demolição são gerados devido a diversos ciclos da construção como: processo de construção; processo de manutenção e reformas; e fase de demolição de edifícios. A parcela referente às reformas, ampliações e demolições constituem 59% do RCC gerado em muitos municípios brasileiros; as novas edificações (acima de 300 m²) são responsáveis por 21% e, finalmente, as residências novas geram 20% dos resíduos (PINTO; GONZÁLES, 2005).

Ainda segundo Pinto e Gonzáles (2005), a quantidade média de geração de resíduos em novas construções é de aproximadamente 150 kg/m². No Brasil, a construção civil é responsável por aproximadamente 40% dos resíduos gerados e apresenta uma produção média anual de RCC de 500 kg/hab (PINTO, 1999).

A ABRECON (2015), em seu relatório de pesquisa setorial de 2014/2015, salienta que como o Brasil apresenta uma produção média anual de RCC de 500 kg/hab., e levando em consideração que, pelo IBGE, o país no ano de 2014 possuía em torno de 200 milhões de habitantes e que a massa unitária do RCC é de 1200 kg/m², estima-se, portanto, que a geração anual de RCC é de 84.180.696 m³.

O panorama dos resíduos sólidos no Brasil em 2016 pôde ser verificado na pesquisa realizada pela Associação das Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, que traz a descrição sobre a coleta realizada nas diferentes regiões do país dos resíduos da construção e demolição, conforme Tabela 2.1.

A pesquisa não representa o total de resíduos produzidos de RCC, mas como se baseia em registros confiáveis, esta é a parcela que comprovadamente foi coletada e direcionada para uma destinação final ambientalmente adequada. A comparação dos dados de 2013 e 2014 indica que houve um aumento de 4,1% na quantidade de resíduos coletados pelos municípios brasileiros. Já em comparação entre 2015 e 2016 houve uma pequena redução de 0,1%, este resultado mostra que nesses dois anos não houve diferenças significativas na quantidade de material coletado. Ao se comparar 2013 e 2016 é possível notar um aumento de 5,3% na quantidade de resíduos coletados pelos municípios brasileiros.

Tabela 2.1 - Resíduos sólidos da construção civil coletados pelos municípios brasileiros

Região	2013	2014	2015	2016
	RCC Coletado (ton./dia) e Índice (kg/hab./dia)			
Sul	16.067 – 0,558	16.513 – 0,569	16.662 – 0,570	16.718 – 0,568
Sudeste	61.487 – 0,728	63.469 – 0,746	64.097 – 0,748	63.981 – 0,741
Centro Oeste	13.439 – 0,896	13.675 – 0,899	13.916 – 0,901	13.813 – 0,882
Nordeste	22.162 – 0,397	24.066 – 0,428	24.310 – 0,430	24.387 – 0,428
Norte	4.280 – 0,252	4.539 – 0,263	4.736 – 0,271	4.720 – 0,266
Brasil	117.435 – 0,584	122.262 – 0,603	123.721 – 0,605	123.619 – 0,600

Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (ABRELPE, 2014; ABRELPE, 2016).

O Sinduscon (2012) cita diversos cuidados necessários para evitar a geração de RCC, o devido planejamento para o acondicionamento dos materiais e as políticas de aproveitamento, destacando-se:

- Planejamento da obra já considerando as possibilidades de aproveitamento e reutilização dos materiais, conciliando os fluxos de geração de resíduos e as possibilidades de estocagem;
- Segregação imediata para evitar contaminação e mistura de resíduos;
- Acondicionamento adequado e sinalização para identificação dos resíduos reutilizáveis;
- Acompanhamento sistematizado da obra, visando localizar possíveis restos de materiais com a finalidade de recuperá-los e utilizá-los de forma adequada;
- Identificação, pela área de suprimentos, dos fornecedores com capacidade de desenvolvimento de soluções compromissadas de reutilização dos resíduos.

Quando os resíduos forem oriundos de demolição outros cuidados devem ser tomados, quanto ao planejamento da desconstrução considerando todas as possibilidades de aproveitamento e reutilização de materiais, conciliando os fluxos de geração de resíduos, as possibilidades de estocagem, atentando-se para a frequência das retiradas dos resíduos.

2.4 CLASSIFICAÇÃO DO RCC

Com objetivo de estabelecer as diretrizes, os critérios e procedimentos para a gestão racional dos resíduos da construção civil, a resolução CONAMA 307 (2002), classifica os resíduos da seguinte forma:

- a) Classe A: resíduos reutilizáveis ou recicláveis como agregados (solos, tijolos, blocos, telhas, argamassa, concreto etc.);
- b) Classe B: resíduos destinados a outros empregos na reciclagem (plásticos, papel, metais, vidros, madeiras, embalagens vazias de tintas, gesso etc.);
- c) Classe C: resíduos que ainda não têm tecnologias ou aplicações a um custo viável para serem reciclados.
- d) Classe D: resíduos perigosos (tintas, solventes) aqueles contaminados ou prejudiciais à saúde, oriundos de demolições e reformas (clínicas radiológicas, indústrias) bem como materiais que contenham amianto (telha, caixa d'água).

Diante das penalidades, o artigo 10 (CONAMA, 2002) alerta sobre a forma de destino dos RCC, que são:

- a) Classe A: deverão ser reciclados ou reutilizados na forma de agregados, ou encaminhados a áreas de aterro de resíduos classe A de reservação de material para utilização futura;
- b) Classe B: deverão ser reutilizados, reciclados ou encaminhados à área de armazenamento temporário, sendo dispostos de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura;
- c) Classe C: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas;
- d) Classe D: deverão ser armazenados, transportados e destinados em conformidade com as normas técnicas específicas.

Cabe ressaltar que a Resolução Conama nº 307/2012 é considerada o principal marco regulatório para a gestão dos RCC, dispondo das responsabilidades, diretrizes, critérios e procedimentos para o manejo destes resíduos (IPEA, 2012).

2.5 COMPOSIÇÃO DO RCC

A composição dos resíduos da construção e demolição varia significativamente de acordo com a região, do tipo de tecnologia utilizada na obra e da idade da construção. Em geral, os resíduos de demolições são constituídos por: concretos e argamassas; material cerâmico como blocos, tijolos e lajotas; solos, areia e argila; asfalto; metais; madeiras e outros materiais como papel, plástico e borracha (CARNEIRO *et al.*, 2001). A Figura 2.1 apresenta alguns dos materiais presentes no RCC.

Figura 2.1 - Materiais presentes no RCC

Fonte: Autor (2018).

Devido a heterogeneidade que pode ocorrer na composição dos RCC diversas pesquisas foram realizadas a fim de analisar a variabilidade dos materiais presentes nos RCC em diversas cidades brasileiras como apresentado na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 - Composição do RCC de diversas cidades brasileiras

Constituintes	São Carlos/SP (a)	São Paulo/SP (b)	Porto Alegre/RS (c)	Ribeirão Preto/SP (d)	Salvador/BA (e)	Campina Grande/PB (f)	Maceió/AL (g)
Argamassa	63,67%	25,20%	44,20%	37,40%	53,00%	28,00%	27,82%
Concreto	4,38%	8,20%	18,30%	21,10%		10,00%	18,65%
Material Cerâmico	29,09%	29,60%	35,60%	20,80%	9,00%	34,00%	48,15%
Cerâmica polida	0,39%	-	0,10%	2,50%	5,00%	1,00%	3,06%
Rochas, Solos	0,13%	32,00%	1,80%	17,70%	27,00%	9,00%	-
Outros	2,34%	5,00%	-	0,50%	6,00%	18,00%	2,32%

(a) Pinto, 1986 (b) Brito Filho, 1999 (c) Lovato, 2007 (d) Zordan, 1997 (e) Quadros e Oliveira, 2001
(f) Nóbrega, 2002 (g) Vieira, 2003

Fonte: Cabral, 2007.

Nota-se que em todas as cidades citadas, a argamassa, o concreto e o material cerâmico correspondem juntos, mais de 60% dos resíduos gerados.

2.6 RECICLAGEM E REUTILIZAÇÃO DE RCC

A reciclagem e a reutilização como forma de diminuir os resíduos oferecem inúmeras vantagens do ponto de vista ambiental e econômico: a redução de procura por novos recursos naturais, o que acarretaria a preservação das reservas de matérias-primas não renováveis; diminuição de energia necessária para produção de novos insumos e economia na aquisição de agregados, com a substituição de agregados naturais por reciclados; e utilização de resíduos que teriam o aterro como destino final, o que geraria aumento da vida útil em aterros de inertes.

Apesar das inúmeras vantagens, a utilização do RCC na construção civil ainda encontra diversas barreiras. Rao *et al.* (2007) destacam:

- A não aceitação popular;
- A falta de instalações apropriadas para a reciclagem;
- A falta de tecnologias apropriadas;
- A falta de incentivo governamental, entre outros.

A Figura 2.2 apresenta a degradação ambiental causada quando os resíduos da construção e demolição são descartados em áreas de preservação permanente. Já a Figura 2.3 mostra a obstrução de sistemas de drenagem provocados pelos RCC e a Figura 2.4 exemplifica a poluição visual, além do prejuízo acarretado para circulação de pessoas e veículos quando estes resíduos são dispostos em vias e logradouros públicos.

Figura 2.2 - RCC descartados em área de preservação permanente



Fonte: Piovezan (2007).

Figura 2.3 - RCC descartados na drenagem urbana



Fonte: Piovezan (2007).

Figura 2.4 - RCC descartados em vias e logradouros públicos



Fonte: Piovezan (2007).

No Japão, os construtores são obrigados a incluir em seus projetos a destinação final do resíduo gerado por suas obras. Ao mesmo tempo, o cidadão é impedido de jogar os rejeitos no primeiro córrego ou terreno baldio que encontrar pela frente, sob risco de ser autuado, pagando pesadas multas pela infração (GONÇALVES, 2001).

Mediante este cenário e crescente preocupação da população com a preservação dos recursos naturais e com a saúde pública, foi regulamentada em dezembro de 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos, que reúne um conjunto de diretrizes e ações a serem adotadas visando o gerenciamento adequado dos resíduos sólidos (BRASIL, 2017).

A partir da regulamentação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, iniciou-se em 2011 a elaboração do Plano Nacional de Resíduos Sólidos, concluído em 2012, que apresenta diretrizes e estratégias cujo objetivo é eliminar lixões e aterros controlados, de

modo a promover a disposição final ambientalmente adequada dos resíduos (BRASIL, 2012).

Apesar do Plano Nacional de Resíduos Sólidos ter sido implementado em 2012, a importância da reciclagem de RCC já vinha sendo discutida ao longo dos anos, como pode ser visto na Tabela 2.3, que apresenta em ordem cronológica decrescente, os instrumentos legais, na esfera nacional, relacionados ao gerenciamento dos RCC (IPEA, 2012).

Tabela 2.3 - Instrumentos legais e normativos de abrangência nacional

Documento	Descrição
Decreto nº 7.404/2010	Regulamenta a Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010, que institui a PNRS, cria o Comitê Interministerial da Política Nacional de Resíduos Sólidos e o Comitê Orientador para a Implantação dos sistemas de logística reversa, e dá outras providências.
Lei Federal nº 12.305/2010	Institui a PNRS, altera a Lei no 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências.
Lei Federal nº 11.445/2007	Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis no 6.766, de 19 de dezembro de 1979, no 8.036, de 11 de maio de 1990, no 8.666, de 21 de junho de 1993 e no 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências.
Resolução nº 348/2004	Altera a Resolução Conama no 307, de 5 de julho de 2002, incluindo o amianto na classe de resíduos perigosos.
Resolução nº 307/2002	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC.
Lei Federal nº 10.257/2001	Estatuto das Cidades: regulamenta os Artigos 182 e 183 da Constituição Federal, estabelece diretrizes gerais da política urbana e dá outras providências.
Lei Federal nº 9.605/1998	Lei de Crimes Ambientais: dispõe sobre as sanções penais e administrativas derivadas de condutas e atividades lesivas ao meio ambiente, e dá outras providências.
Lei Federal nº 6.938/1981	Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências.

Fonte: IPEA, 2012.

Na esfera estadual também ocorreu a preocupação em discutir a questão da reciclagem de RCC. No estado de São Paulo este tema é abordado pela Lei Estadual nº. 12.300/2006, que define princípios, objetivos, instrumentos para gestão integrada e compartilhada de resíduos sólidos, com o intuito de promover a saúde pública, e assegurar o uso adequado dos recursos (LIMEIRA, 2015)

De acordo com a pesquisa realizada pelo Sinduscon (2012), 39% dos municípios consultados, no estado de São Paulo, possuem legislação específica sobre o RCC ou estão em processo de elaboração e aprovação da lei. Tendo em vista a necessidade de elaboração de legislação específica sobre o RCC realizou-se um levantamento dos instrumentos legais presentes nos municípios que possuem regionais do Sinduscon, conforme apresentado na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Instrumentos legais nos municípios relativos aos RCC

Municípios	Documento	Regulamentação
Bauru	Decreto nº 11.689, de 21 de outubro de 2.011	Regulamenta a lei nº 5.852, de 23 de dezembro de 2.009, que estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão ambientalmente correta dos resíduos da construção civil e dispõe sobre as sanções e penalidades aplicáveis ao decreto.
	Lei nº 5.852, de 23 de dezembro de 2.009	Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão a ambientalmente correta dos resíduos da construção civil.
Brasília	Lei nº 5.605, de 07 de janeiro de 2016	Dispõe sobre a utilização de agregados provenientes de resíduos reciclados nas obras de pavimentação ou com sistemas construtivos em concreto ou argamassa executadas ou contratadas pelo Poder Público no Distrito Federal.
	Lei nº 5.418, de 24 de novembro de 2014	Dispõe sobre a Política Distrital de Resíduos Sólidos e dá outras providências.
	Lei nº 4.704, de 20 de dezembro de 2011	Dispõe sobre a gestão integrada de resíduos da construção civil e de resíduos volumosos e dá outras providências.
Campinas	Decreto nº 18.167 de 29 de novembro de 2013	Regulamenta a lei nº 14.418, de 05 de outubro de 2012, que "institui o Plano Integrado de Gerenciamento de Resíduos da Construção Civil – PIGRCC e dá outras providências".
	Lei nº 14.418, de 05 de outubro de 2012	Institui o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção civil e dá outras providências.
	Decreto nº 14.644 de 19 de fevereiro de 2004	Autoriza a implantação de usina de reciclagem de resíduos da construção civil e dá outras providências
Mogi das Cruzes	Lei nº 5674, de 14 de julho de 2004	Institui ao programa de reciclagem de entulhos de construção civil e dá outras providências.
Presidente Prudente	Lei nº 8.986/2015	Institui o Sistema de Gestão Sustentável de Resíduos da Construção Civil e de Demolição, Resíduos Volumosos e Potencialmente Contaminantes; o Plano de Gerenciamento Integrado de Resíduos da Construção Civil, de acordo com o disposto na Resolução CONAMA nº 307, de 5 de julho de 2002, Lei Federal nº 12.305, de 2 de agosto de 2010 – PNRS, e dá outras providências.
Ribeirão Preto	Lei nº 11.655/2008	Dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas e equipamentos públicos do município de ribeirão preto.
	Lei complementar nº 1704, de 30 de junho de 2004	Dispõe sobre o gerenciamento, disciplina a coleta, o transporte e a deposição final de resíduos da construção civil.
	Lei complementar nº 1536, de 09 de setembro de 2003	Autoriza o poder executivo receber direito real de uso de bem imóvel particular, por meio de contrato, para fins de implantação de depósito de resíduos inertes da construção civil e recuperação de área degradada e dá outras providências.
	Lei nº 9438, de 07 de dezembro de 2001	Autoriza o poder executivo a implantar o programa de reciclagem de entulhos da construção civil no município de ribeirão preto e dá outras providências.

Tabela 2.4 - Instrumentos legais nos municípios relativos aos RCC (continuação)

Municípios	Documento	Regulamentação
Santo André	-	Não há legislação específica para o gerenciamento e reutilização do RCC
Santos	Lei Complementar nº 792, de 14 de janeiro de 2013	Institui o programa municipal de gerenciamento dos resíduos sólidos da construção civil - PMGRSCC, e dá outras providências.
São José do Rio Preto	Decreto nº 12.765, de 08 de abril de 2005	Regulamenta a lei nº 9393, de 20 de dezembro de 2004 que versa sobre o sistema de gestão e resíduos volumosos e o plano integrado de gerenciamento de resíduos da construção.
	Lei nº 9393, de 20 de dezembro de 2004	Institui o sistema para a gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos e dá outras providências.
	Lei nº 9390, de 20 de dezembro de 2004	Autoriza o município, através do chefe do poder executivo, firmar convênio com a associação das empresas movimentadoras de resíduos da construção civil.
	Decreto nº 10.615, de 29 de março de 2000	Institui o sistema de captação e destinação dos resíduos de construção e outros resíduos sólidos (entulhos), e dá outras providências.
	Lei nº 7176, de 27 de julho de 1998	Dispõe sobre a regulamentação do uso de caçambas para a retirada de entulho da construção civil no perímetro urbano e dá outras providências.
São José dos Campos	Lei nº 8707, de 29/05/2012	Altera a lei nº 7.146, de 31 de julho de 2006, que "institui o plano integrado de gerenciamento e o sistema de gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, de acordo com o previsto na resolução do Conama nº 307, de 05 de julho de 2002, e dá outras providências".
	Lei nº 8696, de 14/05/2012	Cria o sistema de controle de resíduos da construção civil.
	Lei nº 7146, de 31/07/2006	Institui o plano integrado de gerenciamento e o sistema de gestão sustentável de resíduos da construção civil e resíduos volumosos, de acordo com o previsto na resolução do CONAMA nº 307, de 05 de julho de 2002, e dá outras providências.
São Paulo	Lei nº 14.803, de 26 de junho de 2008	Dispõe sobre o plano integrado de gerenciamento dos resíduos da construção civil e resíduos volumosos e seus componentes, o programa municipal de gerenciamento e projetos de gerenciamento de resíduos da construção civil.
	Decreto nº 48.075, de 28 de dezembro de 2006	Dispõe sobre a obrigatoriedade da utilização de agregados reciclados, oriundos de resíduos sólidos da construção civil, em obras e serviços de pavimentação das vias públicas do município de São Paulo.
	Decreto nº 42.217, de 24 de julho de 2002	Regulamenta a lei nº 10.315, de 30 de abril de 1987, no que se refere ao uso de áreas destinadas ao transbordo e triagem de resíduos de construção civil e resíduos volumosos, na forma que especifica, e dá outras providências.

Tabela 2.4 - Instrumentos legais nos municípios relativos aos RCC (continuação)

Municípios	Documento	Regulamentação
Sorocaba	Lei nº 11.131, de 19 de junho de 2015	Institui o sistema para a gestão sustentável de resíduos da construção civil no município de Sorocaba e dá outras providências.
	Lei nº 8966, de 4 de novembro de 2009	Dispõe sobre o controle da destinação dos resíduos de construção civil no município de Sorocaba e dá outras providências.
	Decreto nº 20.038, de 27 de junho de 2012	Declara de utilidade pública, conjunto móvel de britagem modelo I-130, para fins de desapropriação, instalado no aterro de resíduos inertes, destinado à reciclagem dos resíduos da construção civil, gerados no município de Sorocaba, e dá outras providências.

Fonte: Autor (2018).

Para Mália (2010), a reutilização é a melhor opção se comparada com a reciclagem, visto que é mais eficaz na redução do desperdício e na procura por recursos. Ao ser reutilizado, o material recuperado não sofre nenhum tipo de processamento, o que ocorre de forma diferente na reciclagem, já que o material usado é processado para a produção de um novo produto similar ou diferente.

Três grandes assuntos devem ser levados em conta ao se considerar a utilização de um material reciclável e reutilizável: a economia; a compatibilidade com outros materiais; e as propriedades do material (MINDESS *et al.*, 2003). Segundo Tam e Tam (2006), apenas do ponto de vista financeiro, a reutilização de RCC se torna atraente somente quando o produto reciclado é competitivo com os recursos naturais.

Marques Neto (2005) destaca a utilização dos resíduos da construção no próprio canteiro de obra, como em enchimento de degraus de escadas e buracos de parede decorrentes de tubulações elétricas e hidráulicas; assentamento de blocos cerâmicos, batentes e esquadrias e outros afins. Os estudos de Pinto (1986) e Levy (1997) apontam um bom desempenho do RCC em argamassas contendo produtos cerâmicos em sua composição. Já Offermann (1987) analisou a substituição dos agregados naturais por resíduos de construção, na composição de concreto.

A Figura 2.5 apresenta a reciclagem de resíduos da construção civil e demolição da classe A que são compostos por resíduos de origem mineral (rochas, concretos, solos, argamassa, cerâmicas etc.) para a produção de agregados reciclados que poderão ser utilizados na produção de concretos, argamassas e outros afins.

Figura 2.5 - Reciclagem de resíduos da classe A para a produção de agregados



Fonte: SindusCon (2012).

Carrijo (2005) destaca que pode-se encontrar várias finalidades para a reutilização de resíduos da construção civil desde que sejam devidamente tratados e analisados. É possível reciclar quase todo o RCC, desde que seja escolhido o uso adequado e se respeitem as limitações técnicas do material.

2.7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo apresentou-se um panorama geral sobre os resíduos da construção e demolição com ênfase para reciclagem e reutilização destes materiais. Desta forma, evidenciou-se a necessidade da reciclagem e reutilização dos RCC como um instrumento gerador de benefícios de ordem econômica, ambiental e social.

Do ponto de vista econômico, a substituição dos materiais convencionais pelos reciclados pode resultar em economia na aquisição da matéria-prima e ainda promover oportunidades de trabalho e renda.

No aspecto ambiental, a reciclagem e reutilização minimizam a extração de recursos naturais, além de reduzir a poluição causada por esses resíduos que, por exemplo, podem contribuir para a ocorrência de enchentes devido à obstrução da rede de drenagem e o assoreamento de rios e córregos. O descarte incorreto também pode resultar em consequências para o ambiente urbano, criando um ambiente propício para a proliferação de doenças. Assim, a falta de direcionamento adequado desses materiais gera prejuízos do

ponto de vista ambiental e da qualidade de vida da população, evidenciando ainda mais a necessidade de reaproveitamento.

Ressalta-se que a reciclagem e reutilização destes resíduos serão efetivas se devidamente tratadas com planejamento e uma política de gestão sólida. Assim, uma legislação firme e bem aplicada tem efeitos importantes nesse processo.

3. AGREGADOS NATURAIS E RECICLADOS

Este capítulo abordará sobre as características dos agregados naturais e dos agregados reciclados. Também elucidará sobre a classificação dos agregados reciclados e as principais normas nacionais e internacionais que norteiam a utilização dos resíduos da construção e demolição como agregado.

3.1 DEFINIÇÃO, CLASSIFICAÇÃO E CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS

A NBR 9935:2011 (ABNT, 2011) define agregado como o material granular, geralmente inerte, com dimensões e propriedades adequadas para a preparação de argamassa ou concreto. Já Bauer (2010) define agregado como:

“Agregado é o material particulado, incoesivo, de atividade química praticamente nula, constituído de misturas de partículas cobrindo extensa gama de tamanhos. O termo “agregado” é de uso generalizado na tecnologia do concreto, nos outros ramos da construção é conhecido, conforme cada caso, pelo nome específico: filer, pedra britada, bica-corrida, rachão etc.” (BAUER, 2010, p. 63).

Os agregados podem ser classificados de acordo com a origem, do peso específico aparente e do tamanho das partículas (BAUER, 2010). Segundo à sua origem podem ser classificados como:

- Naturais: Os que já se encontram em forma particulada na natureza, ou seja, que estão depositados em jazidas nas condições de emprego imediato, tais como, as areias, os seixos obtidos dos leitos dos rios e os cascalhos;
- Industrializados: Os que têm sua composição obtida por meio de processos industriais. No qual, a matéria-prima pode ser: rocha, escória de alto-forno e argila.

Já conforme o peso específico aparente do material que constitui as partículas, os agregados podem ser classificados em leves, médios e pesados. A Tabela 3.1 apresenta valores aproximados das médias das densidades aparentes de alguns materiais.

Tabela 3.1 - Densidades aparentes médias

Leves (g/cm ³)	Médios (g/cm ³)	Pesados (g/cm ³)
Vermiculita – 0,3	Calcário – 1,4	Barita – 2,9
Argila expandida – 0,8	Arenito – 1,45	Hematita – 3,0
Escória granulada – 1,0	Cascalho – 1,6	Magnetita – 3,3
	Granito – 1,5	
	Areia – 1,5 (a)	
	Basalto – 1,5	
	Escória – 1,7	

(a) Densidade aparente da areia seca ao ar.

Fonte: Bauer (2010).

Por fim, segundo às dimensões de suas partículas, os agregados podem ser classificados, de acordo com a NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) em:

- Miúdos: agregado cujos grãos passam por uma peneira com abertura de malha de 4,75 mm;
- Graúdos: agregado cujos grãos passam por uma peneira com abertura de malha de 75 mm e ficam retidos na peneira com a abertura de malha de 4,75 mm.

Os agregados são de suma importância para elaboração de um concreto de qualidade e que atinja as propriedades desejadas. Como eles representam de 60 a 80% do volume do concreto convencional e 28 a 35% do concreto autoadensável, suas características são fatores imprescindíveis para a resistência, trabalhabilidade, estabilidade dimensional, durabilidade e custo do concreto (GOMES; BARROS, 2009; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Ainda segundo Mehta e Monteiro (2014), as principais características dos agregados podem ser enumeradas como: dimensão; forma e textura superficial; composição granulométrica (distribuição do tamanho das partículas) e mineralogia; sanidade; absorção de água; massa específica; dureza; módulo de elasticidade; resistência à compressão e substâncias deletérias (torrões de areia, materiais freáveis, materiais pulverulentos, óxidos, sulfetos, matéria orgânica, dentre outros).

Para Souza (2006), a dimensão de um agregado influencia diretamente na quantidade de água e cimento necessária para a produção do concreto. Já a forma e textura superficial, que dependem das características geométricas do agregado, podem interferir na aderência e na trabalhabilidade da mistura. A composição granulométrica pode influenciar no custo e também na trabalhabilidade. E quanto às substâncias deletérias, sua

presença no concreto afeta na trabalhabilidade, pega e endurecimento, além das reações químicas que podem acontecer com a pasta de cimento.

Já a absorção de água, umidade superficial e porosidade são conceitos que estão interligados e são relevantes no momento da produção do concreto, influenciando diretamente na relação água/cimento da mistura que, conseqüentemente, afetará na trabalhabilidade e também no tempo de pega, resistência e aderência entre o agregado e a pasta de cimento. Por fim, outra característica importante dos agregados é a massa específica, que auxilia na quantificação dos agregados a serem utilizados na produção do concreto (SOUZA, 2006).

Na Tabela 3.2 aponta-se uma correlação das características relevantes dos agregados frente às principais propriedades que ela resulta ao concreto.

Tabela 3.2 - Propriedades do concreto influenciadas pelas características do agregado

Propriedades do Concreto	Características Relevantes do Agregado
Resistência mecânica	Resistência mecânica
	Textura superficial
	Limpeza
	Forma dos grãos
	Dimensão máxima
Retração	Módulo de elasticidade
	Forma dos grãos
	Textura superficial
	Limpeza
	Dimensão máxima
Massa unitária	Massa específica
	Forma dos grãos
	Granulometria
	Dimensão máxima

Fonte: Adaptado de Valverde (2001).

Cabe salientar que embora as propriedades do agregado possam ser analisadas individualmente, as de grande valia para a tecnologia do concreto estão inter-relacionadas e, de acordo com Mehta e Monteiro (2014), são assim agrupadas:

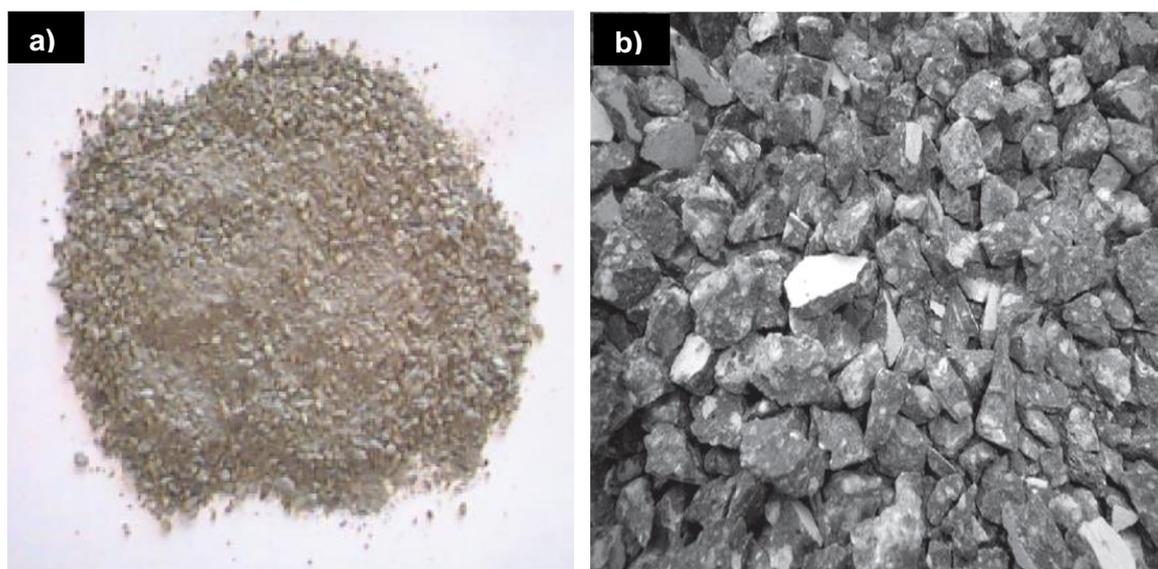
- Características dependentes da porosidade: massa específica, absorção de água, resistência, dureza, módulo de elasticidade e sanidade;
- Características dependentes das condições prévias de exposição e condicionantes de fabricação: dimensão, forma e textura das partículas;
- Características dependentes da composição química e mineralógica: resistência, módulo de elasticidade e substâncias deletérias presentes.

3.2 DEFINIÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DOS AGREGADOS RECICLADOS

Segundo a NBR 15116:2004 (ABNT, 2004) os agregados reciclados de resíduos da construção civil são materiais granulares obtidos de processos de beneficiamento de resíduos de construção ou demolição de obras civis, que apresentam características técnicas para aplicação em obras de edificação e de infraestrutura, precisamente triados e pertencentes à classe A (conforme classificação estabelecida na Resolução 307 do CONAMA, 2002). Assim, o agregado reciclado proveniente de resíduos da construção civil é uma composição de agregados miúdos e graúdos, obtidos pelo processo de britagem em usinas.

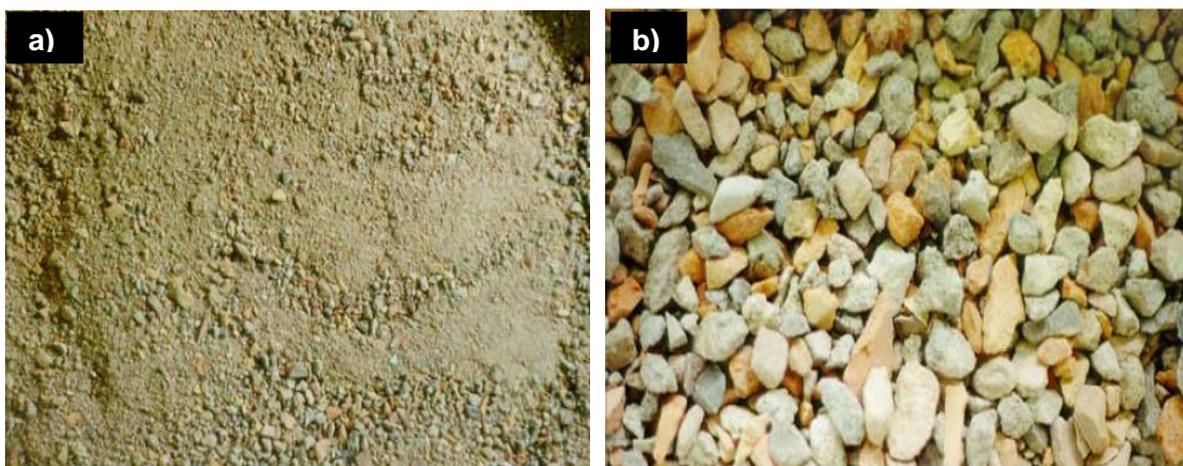
Ainda segundo a referida norma, os agregados provenientes de RCC podem ser classificados como agregado reciclado de concreto (ARC) ou agregado reciclado misto (ARM). O ARC é definido como material granular obtido pela reciclagem de resíduos de concreto fresco ou endurecido, constituído em sua fração graúda (maior que 4,75 mm), de no mínimo 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland ou de material pétreo. Já o ARM é definido como material granular obtido conforme o ARC, porém com menos de 90% em massa de fragmentos à base de cimento Portland ou de material pétreo (ABNT, 2004). A Figura 3.1 ilustra o agregado reciclado de concreto (ARC) miúdo e graúdo e a Figura 3.2 o agregado reciclado misto (ARM) miúdo e graúdo.

Figura 3.1 - Agregado reciclado de concreto (ARC) miúdo (a) e graúdo (b)



Fonte: Gonçalves (2001); Safiuddin *et al.* (2011).

Figura 3.2 - Agregado reciclado misto (ARM) miúdo (a) e graúdo (b)



Fonte: Leite (2001)

Para Ângulo (2000) enquadram-se como agregados reciclados de RCC homogêneos os resultantes da reciclagem dos RCC, mas com a presença de apenas uma fase inorgânica não metálica dominante. Nesta definição encontram-se os agregados reciclados de concreto, ou seja, que possuem apenas concreto, e também os agregados reciclados de cerâmica, que contém somente materiais cerâmicos. Além disso, há outro enquadramento: os agregados reciclados de RCC mistos. Estes também são provenientes da reciclagem dos RCC, porém possuem inúmeros componentes presentes, tais como concreto, argamassa, cerâmica, materiais betuminosos, rochas, madeira, metais, plásticos, amianto, solo e cal, ainda assim, com predominância de fases inorgânicas não metálicas.

Grande parte das especificações classifica os agregados reciclados de acordo com sua composição. Em consequência disso, foi proposta uma nomenclatura normatizada a fim de que todas as especificações seguissem um padrão. Assim, cabe ressaltar que ARC é definido como agregado reciclado de concreto, ARM como agregado reciclado misto de concreto e cerâmica, e ARA como agregado reciclado de alvenaria (GONÇALVES, 2007). A Tabela 3.3 apresenta a classificação proposta por diferentes referências normativas.

Tabela 3.3 - Classificação segundo a composição do agregado reciclado

Especificações	Classificação	Composição (%teor máximo)				
		Concreto	Alvenaria	Material Orgânico	Impurezas	Material Leve
Brasil	ARC	> 90	-	2	3(c)	s.e
	ARM	> 90	-	2	3(c)	s.e
Alemanha	ARC	> 90	< 10	s.e	1(b)	s.e
	ARC	> 70	< 30	s.e	1(b)	s.e
	ARA	< 20	> 80	s.e	1(b)	s.e
	ARM	> 80		-	s.e	s.e

Tabela 3.3 - Classificação segundo a composição do agregado reciclado (continuação)

Especificações	Classificação	Composição (%teor máximo)				
		Concreto	Alvenaria	Material Orgânico	Impurezas	Material Leve
Japão	ARM	s.e		12 kg/m ³		
Reino Unido	ARM	s.e		1(b)		1
	ARC	> 95	< 5	1(b)		0,5
Holanda	ARC	> 95	< 5	0,1	1(b)	0,1
	ARA	-	>65	1	1(b)	s.e
Portugal	ARC	> 90	< 10	0,2		1
	ARC	> 70	< 30	0,5		1
	ARM	> 90		2		1
Bélgica	ARC	> 90	< 10	0,5	0,5(b)	s.e
	ARM	> 40	> 10	0,5	1(b)	s.e
	ARA	> 40	> 60	0,5	1(b)	s.e
Noruega	ARC	> 94	< 5	0,1	1(d)	0,1
	ARM	> 90		0,5	2,5(d)	0,1
Suíça	ARC	< 100	-	s.e	1(d)	s.e
	ARM	< 100	-	s.e	1	s.e
Dinamarca	ARC com teste	> 95	-	s.e	s.e	s.e
	ARC sem testes	> 95	-	s.e	s.e	s.e
	ARM	> 95		s.e	s.e	s.e

Notas: s.e – Sem especificação;

(a) um recurso primário ou natural;

(b) asfalto não está incluído;

(c) conteúdo de material orgânico incluído;

(d) asfalto e material leve não estão incluídos.

Fonte: Adaptado de Gonçalves (2007).

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS RECICLADOS

Para Ângulo e Figueiredo (2011), os agregados reciclados de RCC são mais porosos que os agregados naturais, o que resulta em uma absorção maior de água. Além disso, estes materiais produzidos nas usinas de reciclagem apresentam maior heterogeneidade de composição, menor resistência da matriz (concreto original), baixa massa específica, alto teor de finos e outras características que exigem cuidados especiais para a sua utilização como material para a produção de concreto. Portanto, para se obter resultados satisfatórios em determinadas aplicações, o material reciclado deve atender a certos requisitos de granulometria e ter uma quantidade mínima de contaminantes (cloretos; sulfatos; matéria orgânica; produtos industrializados leves como papel, plástico, tecido e borracha; vidro;

betume; vegetação; gesso; terra; madeira e outros), além de outras exigências de estabilidade e durabilidade.

Em contrapartida, apesar de algumas limitações e dispor de certas precauções, estudos realizados demonstram que estes resíduos apresentam componentes com propriedades proeminentes para o desempenho de materiais de construção.

A seguir serão elucidadas algumas das principais características do agregado reciclado.

3.3.1 FORMA E TEXTURA SUPERFICIAL

A forma do agregado refere-se ao aspecto dos seus grãos, ou seja, se estes são cúbicos, lamelares, alongados ou esféricos. Já a textura superficial relaciona-se ao grau de quanto a superfície do agregado é lisa ou áspera, baseado em uma avaliação visual.

Segundo Ângulo (2000), a forma e textura dos agregados reciclados de RCC divergem das dos agregados naturais. Em geral, os agregados reciclados são mais irregulares, angulares e de textura mais áspera e rugosa se comparado com os agregados naturais. Essas características influenciam diretamente na trabalhabilidade de argamassas e concretos no estado fresco.

Predominantemente os agregadores reciclados são de aspecto angular, mas estes também podem apresentar-se de forma mais lamelar do que o agregado natural. Esta aparência fina e achatada pode acarretar uma redução da resistência do concreto quando a carga é aplicada no lado achatado do agregado (TAM; TAM, 2007). Para Leite (2001), os grãos mais lamelares e angulares são propensos a dificultar a consistência do concreto. Desta forma, será necessária uma quantidade maior de água para que se obtenha a consistência apropriada.

A consistência do concreto também é afetada pela textura mais rugosa dos agregados reciclados, mas também proporciona uma facilidade na aderência com a pasta de cimento e isto pode gerar uma resistência mecânica melhor (TENÓRIO, 2007).

Diante deste âmbito, é pertinente enfatizar que o agregado reciclado, quando incorporado ao concreto, tornará a mistura muito mais coesa e como resultado diminuirá a trabalhabilidade, se contraposto com a utilização do agregado natural ao concreto. Além disso, os agregados recicláveis precisam de uma quantidade maior de pasta de cimento para fornecer uma mistura trabalhável, o que pode acarretar um aumento ao custo do concreto.

Cabe salientar que devido à textura rugosa dos agregados reciclados há uma melhor aderência entre a pasta e o agregado. Se comparado com o agregado natural, o reciclado ainda proporciona uma maior absorção da pasta de cimento pelos poros superficiais e isto gerará maior precipitação dos cristais de hidratação nos poros do agregado, possibilitando

melhor fechamento da zona de transição do concreto, tornando a matriz e o agregado um bloco único de material que, conseqüentemente, poderá beneficiar no desempenho final do concreto (LEITE, 2001).

3.3.2 COMPOSIÇÃO GRANULOMÉTRICA

A granulometria é definida como a distribuição, em porcentagem, dos diversos tamanhos de grãos que compõem um material. A determinação das dimensões das partículas dos agregados e suas respectivas porcentagens de ocorrência, são obtidas através do peneiramento do material, utilizando-se para isso peneiras com abertura de malha padronizada.

Para Moretti (2014) a composição granulométrica exerce grande influência nas propriedades do concreto. A autora salienta que os agregados reciclados de RCC oriundos de usinas de reciclagem apresentam distribuição granulométrica muito variada e que, portanto, a análise da distribuição granulométrica é de extrema importância, especialmente quando o material apresenta grande variação na distribuição das partículas, como é o caso.

Segundo Leite (2001) a trabalhabilidade dos concretos no estado fresco é diretamente influenciada pela granulometria dos agregados e esta característica depende do processo de produção do agregado. Portanto, para se possibilitar a produção de misturas de concreto trabalháveis, com grau de compacidade satisfatório, que possibilitem melhor desempenho técnico e a diminuição do custo, deve-se atentar quanto a composição granulométrica dos agregados reciclados.

3.3.3 MASSA ESPECÍFICA

A massa específica é uma propriedade física intensiva da matéria, isto é, independe do tamanho da amostra e é definida como a razão entre a massa de um objeto e seu volume (BORGNAKKE; SONNTAG; VAN WYLEN, 2003). Para Tenório (2007), a massa específica é uma das propriedades que está estreitamente ligada à porosidade, e as duas tem entre si uma relação inversamente proporcional.

Segundo Moretti (2014), a determinação da massa específica e massa unitária são de grande importância na realização da dosagem dos concretos. Propriedades do concreto como a consistência, a coesão, a massa específica, a resistência à compressão e a resistência à abrasão são influenciadas pela massa específica do agregado.

Para Bazuco (1999), os valores da massa específica dos agregados reciclados são de 5% a 10% inferiores ao dos agregados naturais, sendo que estes números podem variar de acordo com a origem e granulometria do material. Já segundo Leite (2001), a massa

específica do agregado reciclado é de aproximadamente 19% inferior ao do agregado natural.

Outros autores, tais como Gonçalves (2001), Ângulo (2005), Carrijo (2005), Lovato (2007), Tenório (2007), Pedrozo (2008), Silva (2011), também apresentam valores de massa específica bastante variável, o que pode ser justificado pela variabilidade na composição e distribuição granulométrica do agregado reciclado de RCC. Porém, todos os valores encontrados foram inferiores ao do agregado natural.

Segundo Lima (1999), de uma maneira geral, pode-se afirmar com relação à massa específica e unitária do agregado reciclado:

- A massa específica e unitária do agregado reciclado de RCC é menor do que a do agregado natural, mesmo que o agregado reciclado seja de concreto de alta resistência;
- A diferença entre a massa específica e unitária de agregado reciclado e agregado natural cresce de acordo com o aumento da porosidade do resíduo reciclado;
- A massa específica e unitária dos agregados reciclados depende da granulometria.

3.3.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA

A absorção de água é outra propriedade muito importante do agregado. Tenório (2007) destaca que a absorção de água é uma das propriedades mais simples de ser determinada já que não exige o emprego de equipamentos sofisticados e a metodologia para execução do mesmo é relativamente simples.

A absorção de água dos agregados naturais desempenha pouca influência nas misturas de concreto, visto que estes tipos de agregados apresentam pouca ou quase nenhuma porosidade. Já quando se utiliza agregados reciclados para a produção de concreto há uma grande preocupação, pois estes tipos de agregados apresentam resultados elevados de absorção de água se comparado com os agregados naturais (LEITE, 2001).

Segundo Moretti (2014), concretos feitos com agregados que absorvem muita água são propensos a serem menos resistentes e menos duráveis por causa do aumento da porosidade na matriz cimentícia.

Para Ângulo (2000) a absorção de água de agregados de RCC pode variar de acordo com a natureza do material e da composição granulométrica. O autor salienta que além da porosidade, a densidade influencia na absorção de água dos agregados. Assim, quanto maior a densidade, menor a absorção de água.

A absorção de água de um agregado, também irá influenciar na trabalhabilidade no estado fresco da mistura. Visto que o agregado reciclado apresenta maior absorção de

água, se utilizar a mesma quantidade de água em uma mistura de concreto com agregado reciclado e outra com agregado natural, a mistura de concreto com o material reciclado certamente será mais seca (GONÇALVES, 2001).

Leite (2001) destaca que o estudo da absorção de água dos agregados reciclados em misturas de concretos é de extrema importância, já que esta influenciará diretamente na relação água/cimento.

O acompanhamento da absorção de água no estágio inicial é importante, pois o concreto no estado fresco pode ter parte da água da mistura absorvida pelos agregados reciclados, o que pode resultar em perda de consistência (TENÓRIO, 2007). Cabe salientar que a quantidade de água que o agregado reciclado absorverá na produção do concreto depende da condição inicial de umidade, o tempo de permanência em contato com a água, se o agregado entrou inicialmente apenas em contato com a água, ou com a pasta de cimento, entre outros (BARRA, 1997).

Desta forma, devido à alta absorção de água que os agregados reciclados podem apresentar, diversos estudos sugerem que estes necessitam ser pré-umedecidos com o intuito de compensar uma maior necessidade de água.

A Tabela 3.4 traz uma abordagem quanto à utilização da pré-molhagem dos agregados reciclados por diversos autores.

Tabela 3.4 – Abordagem quanto à utilização da pré-molhagem dos agregados reciclados

Autor	Tipo de RCC	Relação água/cimento	Utilização de aditivo SP	Pré-molhagem	Tempo	Quantidade de Água	Método utilizado para determinação de quantidade de água para pré-molhagem
Zordan (1997)	Misto	Por tentativas. Até se obter abatimento 3 ± 1 cm. Variou de 0,51 a 1,09.	Não	Não	—	—	—
Bazuco (1999)	Misto	Variou de 0,40 a 0,83.	Sim	Sim	24 horas		Agregado saturado por 24h e exposto ao ar por 15 min.
Levy (2001)	Concreto e Alvenaria	Variou de 0,35 a 1,03.	Não	Não	—	Determina relação a/c de acordo com o abatimento estabelecido 70 ± 10 mm	—
Leite (2001)	Misto	0,40; 0,45; 0,60; 0,75 e 0,80	Não	Sim	10 minutos	Adiciona ao traço 40% da taxa de absorção em média (para agregado graúdo reciclado)	Amostra é seca em uma estufa, resfriada e submersa. São registrados os ganhos de massa ao longo do tempo, com auxílio de dispositivo acoplado em balança hidrostática.
Vieira (2003)	Misto	0,40; 0,60 e 0,80	Sim	Sim	10 minutos	Variou de acordo com a absorção do agregado, 7,50% para AMR e 4,07% para AGR – abatimento fixo em 70 ± 10 mm	Metodologia proposta por LEITE (2001)
Ângulo (2005)	Misto	0,67; 0,5 e 0,4	Sim	Sim	10 minutos	Submerso em 70% da água referente à absorção do agregado	Estabelece o tempo necessário para atingir 70% do valor da absorção de água em um período de 24 horas.
Cabral (2007)	Misto	0,40; 0,46; 0,60; 0,74; 0,80	Sim	Sim	10 minutos	80% de água que seria absorvida pelo agregado em 24 horas	Metodologia proposta por LEITE (2001)
Lovato (2007)	Misto	0,50; 0,60 e 0,70	Não	Sim	15 minutos	Varia de acordo com a taxa de absorção do material. 3 à 9,2 para AMR e 2,5 à 7 para AGR.	—
Grdic <i>et al.</i> (2010)	Concreto	0,41; 0,43 e 0,45	Sim	Não	—	Compensação de água para manter a mesma consistência devido a maior absorção de água do agregado reciclado.	Absorção de água é obtida pelo método de imersão gradual do agregado. Medido de 24h em 24h até obter uma diferença entre duas medições inferior a 0,01 g
Troian (2010)	Concreto	0,85; 0,56 e 0,43	Não	Sim	10 minutos	Varia de acordo com a taxa de absorção do material	Abatimento fixo de 100 ± 20 mm

Tabela 3.4 – Abordagem quanto à utilização da pré-molhagem dos agregados reciclados (continuação)

Autor	Tipo de RCC	Relação água/cimento	Utilização de aditivo SP	Pré-molhagem	Tempo	Quantidade de Água	Método utilizado para determinação de quantidade de água para pré-molhagem
Branco (2012)	Concreto	0,35; 0,36; 0,37; 0,38; 0,43; 0,44; 0,45; 0,46; 0,47; 0,55; 0,57; 0,58; 0,61	Sim	Não	—	Variou a quantidade de água para cada traço de concreto a fim de obter a melhor proporção a/c	—
Fakitsas <i>et al.</i> (2012)	Concreto	0,39	Sim	Sim	72 horas	—	Todos os agregados foram submerso em água durante 3 dias e depois seco na superfície por 12 h.
Oliveira <i>et al.</i> (2013)	Concreto	0,559; 0,560; 0,562	Sim	Não	—	Compensação de água para manter a mesma consistência devido a maior absorção de água do agregado reciclado.	—
Modani e Mohitkar (2014)	Concreto	0,66	Sim	Sim	24 horas	—	Todos os agregados foram imersos em água por até 24 horas e secos ao ar antes de serem utilizados para compensar o efeito inicial da maior absorção de água dos agregados reciclados.
Moretti (2014)	Concreto e Alvenaria	0,49; 0,51; 0,50; 0,52; 0,54 e 0,55	Não	Sim	10 minutos	Submerso com 80% da água da mistura.	Metodologia proposta por LEITE (2001). Abatimento constante de 70±10 mm e ajustes no fator a/c
Gomes <i>et al.</i> (2015)	Misto	0,65 e 0,70	Não	Sim	1 minuto	Submerso a 70% e 95% do valor da absorção de água medido em 24 horas	—
Tang <i>et al.</i> (2016)	Concreto	0,49	Sim	Sim	24 horas	—	Imerso em água por 24h e seco ao ar por 1h antes de ser utilizado na mistura de concreto (procedimento feito com o agregado natural e o reciclado)

Tabela 3.4 – Abordagem quanto à utilização da pré-molhagem dos agregados reciclados (continuação)

Autor	Tipo de RCC	Relação água/cimento	Utilização de aditivo SP	Pré-molhagem	Tempo	Quantidade de Água	Método utilizado para determinação de quantidade de água para pré-molhagem
Campos (2017)	Concreto	0,45	Sim	Sim	—	Espalhamento fixado em 650±65mm. A água de pré-molhagem correspondeu a 80% da capacidade de absorção de água do agregado reciclado conforme a NBR 15116: 2004	A pré-molhagem dos agregados reciclados foi efetuada de modo análogo ao empregado pelo método de Repette-Melo
Manzi, Mazzotti e Bignozzi (2017)	Concreto	0,49 e 0, 51	Sim	Sim	—	—	Todos os agregados foram utilizados em condição úmida e seu teor total de umidade foi estabelecido diretamente antes do procedimento de mistura
Salesa <i>et al.</i> (2017)	Concreto	0,5	Sim	Não	—	—	—
Santos, Silva e Brito (2017)	Concreto	0,43 e 0,69	Sim	Não	—	Ajustes foram feitos na quantidade de água levando em conta o efeito da absorção de água, que é muito maior em agregados reciclados.	—

Fonte: Autor (2018).

Percebe-se que a maioria dos autores utilizou a pré-molhagem para compensar a absorção dos agregados reciclados, mas nem todos optaram por utilizar aditivos para a obtenção da trabalhabilidade desejada, sendo esta adquirida em muitos casos pelo acréscimo de água na mistura.

3.3.5 PRESENÇA DE CONTAMINANTES

Consideram-se como contaminantes no agregado reciclado todos os materiais não inertes ou materiais que afetam na qualidade de concretos e argamassas. Dentre esses materiais encontram-se: cloretos, sulfatos, matéria orgânica, produtos industrializados leves (papel, plástico, tecido, borracha etc.), vidro, betume, vegetação, terra, gesso, madeira e outros (LIMA, 1999). Ainda segundo o autor, em alguns casos, os materiais minerais também podem ser tidos como contaminantes.

O gesso é considerado um dos materiais mais prejudiciais no agregado reciclado. A presença dele pode levar à expansão no concreto ou argamassa, já que este é composto de sulfatos. Além disso, a presença de cloretos nos agregados reciclados também pode levar à corrosão de armaduras. Esses dois contaminantes devem ser controlados e limitados para não prejudicar na mistura de concretos e argamassas e, conseqüentemente, afetar as estruturas construídas com estes (LIMA, 1999). O autor ainda destaca que o teor de vidro deve ser limitado, já que este material pode induzir a reações álcali-sílica quando em contato com o cimento na presença de umidade. Outro material prejudicial é o betume, que pode reduzir a resistência à compressão do concreto e, ainda, a presença de substâncias orgânicas pode acarretar à instabilidade do concreto e incorporar quantidades de ar indesejáveis ao material.

Como visto, a presença de contaminantes afeta na qualidade de concretos e argamassas, mas também podem afetar o meio externo em que entram em contato. Desta forma, segundo a NBR 10005:2004 (ABNT, 2004) a realização do ensaio de lixiviação, processo que consiste na determinação da capacidade de transferência de substâncias orgânicas e inorgânicas presentes nos resíduos sólidos através da dissolução em meio extrator, se faz necessário. Esta análise é uma das formas mais relevantes de avaliar o impacto ambiental dos materiais de construção e demolição, principalmente quando estão em contato direto ou indireto com o solo e águas subterrâneas (ENGELSEN *et al.*, 2010).

3.4 NORMAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS

As normas e especificações técnicas auxiliam na disseminação e consolidação da aplicação do agregado reciclado proveniente dos RCC como insumos na própria construção civil, além de proporcionar o embasamento técnico necessário para a sua utilização de

forma a não interferir na qualidade e segurança de obras de edificação e de infraestrutura executadas com este material.

Em muitos países os agregados reciclados já estão incorporados no contexto da construção civil, estando avançados em pesquisas, especificações e normas técnicas. O Brasil, por sua vez, começou a despertar para esta necessidade a partir da resolução do CONAMA 307 no ano de 2002, que estabelece que os geradores devem atentar para a redução, a reutilização, a reciclagem e a adequada destinação final dos resíduos sólidos. Posteriormente em 2010 foi regulamentada a Lei 12.305 que institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos e o comitê orientador para a implantação dos sistemas de logística reversa.

No Brasil, a primeira especificação técnica para a utilização dos agregados reciclados foi elaborada em 2003. Esta especificação está direcionada para a área de pavimentação, assim como quase todas as subseqüentes normas, demonstrando a limitação do Brasil neste âmbito.

As normas técnicas nacionais relacionadas ao processamento dos resíduos da construção civil são as seguintes:

- NBR 15112:2004 (ABNT, 2004) – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos volumosos: Áreas de transbordo e triagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15113:2004 (ABNT, 2004) – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Aterros: Diretrizes para projeto, implantação e operação;
- NBR 15114:2004 (ABNT, 2004) – Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes: Área de reciclagem: Diretrizes para projeto, implantação e operação.

As especificações e normas técnicas que orientam e disciplinam quanto à aplicação dos agregados reciclados são listadas a seguir:

- Especificação técnica da PMSP/SP ETS – 001/2003 - Camadas de reforço do subleito, sub-base, e base mista de pavimento com agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil;
- NBR 15115:2004 (ABNT, 2004) – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Execução de camadas de pavimentação – Procedimentos;
- NBR 15116:2004 (ABNT, 2004) – Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil: Utilização em pavimentos e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos.

A Tabela 3.5 apresenta de forma resumida as diretrizes que orientam a produção e as condições de aceitação do agregado reciclado como material da construção civil em

alguns países, além de mostrar cronologicamente quando estes países começaram a intensificar as pesquisas nesta área.

Tabela 3.5 - Diretrizes para reuso e reciclagem dos resíduos da construção civil

País	Sumário das Diretrizes - Reuso e Reciclagem dos RCC						
	1980	1989	1990	1999	2000	2009	2010
Alemanha (RILEM; 2005)	1. Diretrizes sobre o reuso e reciclagem dos materiais de construção e outros trabalhos pelo Departamento de Transportes; 2. Diretrizes sobre reuso de concreto e agregado de superfícies de rodagem para construção de novas estradas; 3. Diretrizes que incluem os agregados reciclados na especificação de engenharia para proporcionamento entre agregado natural e reciclado para composição de bases de pavimentação; 4. Organização da DIN EN 4226-100, que regulamenta o uso de agregado reciclado em concreto.						
Bulgária (Conforme HADEJEIVA <i>et al.</i> , 2003 <i>apud</i> RAO; JHA; MISRA, 2007)	1. Construção de estradas; 2. Projeto piloto de reciclagem de concreto para agregados em convênio com a Universidade do Norte da França						
União Européia (BALÁZS; KAUSAY; SIMON, 2008)	1. Definição da terminologia. Diretrizes para matéria-prima na mistura de concreto; 2. Diretrizes para a reciclagem de agregado de concreto; 3. Diretrizes para produtos de concreto sem resíduo de concreto reciclado de construção; 4. Diretrizes para produtos reciclados de concreto sem resíduo de materiais de construção; 5. Diretrizes para reforço e produtos de concreto protendido; 6. Diretrizes para produção e utilização do agregado reciclado pré-misturado ao concreto, incluindo os requisitos e ensaios.						
EUA (Conforme GILPIN <i>et al.</i> , 2004 <i>apud</i> RAO; JHA; MISRA, 2007)	1. Incentivos ao transporte dos resíduos de concreto; 2. Processamento dos resíduos para produção de agregados para pavimentação; 3. Emprego de agregados reciclados somente em aterro sanitário e construção de bases de pavimentação.						
Hong Kong (RAO; JHA; MISRA, 2007)	1. Projeto piloto de materiais reciclados de resíduos utilizados em obras relevantes do governo. Produção de agregados reciclados para pavimentação; 2. Produção de agregado reciclado para concreto massa.						
Taiwan (RAO; JHA; MISRA, 2007)	1. Programa de reciclagem subsidiado pelo governo para assegurar a qualidade, a qualidade do sistema de controle e suporte ao setor privado; 2. Estabilização da variabilidade de produção de planta piloto; 3. Recicla 80% do material antes destinado ao aterro sanitário e 30% desse agregado reciclado é utilizado em pavimentação.						

Tabela 3.5- Diretrizes para reuso e reciclagem dos resíduos da construção civil (continuação)

País	Sumário das Diretrizes - Reuso e Reciclagem dos RCC					
	1980	1989	1990	1999	2000	2009 2010
Japão (conforme KAWANO, 2003 <i>apud</i> RAO; JHA; MISRA, 2007)	1. Diretrizes para a qualidade do agregado reciclado graúdo para construção; 2. Diretrizes para utilização do agregado reciclado graúdo para construção; 3. Diretrizes para projetos e práticas de concreto de agregado reciclado para trabalho público; 4. Diretrizes para a qualidade do agregado reciclado para uso de blocos vazados; 5. Diretrizes técnicas para usinas de reciclagem e demolição de materiais de pavimentação; 6. Delineamento da padronização para uso de agregado reciclado e concreto de agregado reciclado.					
Brasil (IPEA, 2012)	1. Dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, seus fins e mecanismos de formulação e aplicação, e dá outras providências; 2. Lei de Crimes Ambientais: dispõe sobre as sanções penais e administrativas; 3. Estatuto das Cidades: estabelece diretrizes gerais da política urbana; 4. Estabelece diretrizes, critérios e procedimentos para a gestão dos RCC; 5. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; 6. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos.					

Fonte: Adaptado de Melo (2011).

Cabe salientar que a produção e utilização de agregados obtidos a partir dos resíduos da construção e demolição dependem do reordenamento das atividades da construção civil. O agregado natural é empregado devido ao desempenho e confiabilidade já esperada deste material. Desta forma, o agregado reciclado obterá um desempenho mais adequado e satisfatório quando observada a equivalência de propriedades atualmente encontradas nos agregados naturais. Assim, melhorar a aplicabilidade, diminuindo a variabilidade da composição é o intuito das pesquisas internacionais quanto à produção dos agregados reciclados (MELO, 2011).

Diante disso, a Tabela 3.6 compila algumas das propriedades e respectivas utilizações dos agregados reciclados no âmbito da construção civil, propostas por diferentes países, corroborando para inserção deste material em lugares que o seu uso ainda não é disseminado. Ressalta-se que há um campo amplo e variado para a aplicação de concreto composto de agregados reciclados da construção e demolição, conforme apresentado nas diversas normas internacionais.

Tabela 3.6 - Especificações para uso do agregado reciclado em concreto

País	Classe	Densidade mínima kg/m ³	Máxima Absorção de água (%)	Substituição Máxima (%)		Uso	Resistência Máxima (MPa)
				Graúdo	Miúdo		
Brasil	ARC	s.e	7 graúdo/12 miúdo	100	100	Concreto não estrutural	15
	ARM	s.e	12 graúdo/17 miúdo				
Alemanha	ARC I	2000	10	20-35	0	Concreto estrutural	C30/37 (20% de substituição)
	ARC II	2000	15	20-35	0		C25/30 (35% de substituição)
	ARA III	1800	20	s.e		Concreto não estrutural	s.e
	ARM	1500	s.e	s.e			
Honk Kong	ARC	2000	10	20 ou 100	0	Concreto estrutural	C20 (100% de substituição); C35 (20% de substituição)
Japão (BCSJ)	ARM	2200	7	100	100	Concreto não estrutural	18
RILEM	ARC	2400	3	100	(a)	Ambientes secos e molhados, não agressivos	sem limitação
	ARC	2000	10				C50/60
	ARA	1500	20				C16/20
Reino Unido	ARC	s.e	s.e	20	0	Concreto estrutural	C40/50
	ARM	s.e	s.e	s.e	0	Concreto não estrutural	s.e
Holanda	ARC	2000	s.e	100	(a)	Ambientes não agressivos	C40/50
	ARM	2000	s.e				C35/45
Portugal	ARC I	2200	7	25	0	Concreto estrutural	C40/50
	ARC II	2200	7	20	0		C35/45
	ARM	2000	7	s.e	0	Concreto não estrutural	s.e
Suíça	ARC	s.e	s.e	100	100	Concreto reforçado	C30/37
	ARM	s.e	s.e			Concreto não estrutural	s.e
Dinamarca	ARC	2200	s.e	100	20	Ambientes não agressivos	C40
	ARC	2200	s.e				
	ARM	1800	s.e				C20

Notas: s.e – Sem especificação;

(a) Somente se misturados com agregado graúdo natural;

ARA: Agregado reciclado de alvenaria;

ARC: Agregado reciclado de concreto;

ARM: Agregado reciclado misto.

Fonte: Adaptado de Kiouranis (2016).

Como visto na Tabela 3.6, vários países permitem o uso de agregados reciclados para a produção de concretos estruturais, observando a agressividades do meio e limitando o teor de substituição. Países como Holanda, Dinamarca e Suíça permitem a incorporação de 100% de agregados graúdos reciclados para concretos com resistência de até 40 MPa.

Isso mostra que é possível utilizar agregados reciclados para a produção de concretos estruturais, desde que sejam realizados estudos prévios que comprovem a aplicabilidade do material para o fim desejado.

3.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conclui-se que grande parte das recomendações visa a classificação de agregados reciclados com base na sua composição, com o intuito de estabelecer os requisitos técnicos necessários para sua utilização na construção civil. Conhecer a variabilidade de suas características e o efeito que estas podem causar ao concreto é de extrema importância para que este material atinja seu máximo desempenho e possa ser empregado de forma satisfatória como agregado.

Cabe salientar que existe um vasto campo de aplicações para os agregados reciclados. Como observou-se nas normas e especificações técnicas, o uso de agregados reciclados de resíduos da construção e demolição é permitido, mas devem ser empregados de maneira adequada. Assim, diferentes tipos de agregados são adequados para diferentes tipos de demandas.

4. CONCRETO AUTOADENSÁVEL (CAA)

Neste capítulo serão abordados aspectos importantes sobre o concreto autoadensável, expondo de forma sucinta o histórico do uso do CAA pelo mundo e apresentando as diversas vantagens de sua utilização. Além disso, será explanado sobre as principais propriedades no CAA no estado fresco, frente às características dos materiais que o constitui.

4.1 DEFINIÇÃO

De acordo com Tutikian (2007) o termo concreto autoadensável (CAA) identifica uma categoria de material cimentício que pode ser moldado nas formas e preencher os espaços por meio do seu peso próprio, dispensando o uso de vibração externa. Assim, a autoadensabilidade do concreto no estado fresco é definida como a habilidade do material preencher os espaços, passando pelas barras de aço e as envolvendo, por meio exclusivo da ação da força gravitacional, mantendo-se homogêneo.

Com base em Okamura (1997) e Gomes (2002), pode-se definir concreto autoadensável (CAA) como um concreto capaz de se adensar em qualquer ponto da forma e preenchê-la totalmente só pela atuação de seu peso próprio, sem a necessidade de vibração. De forma semelhante, Almeida Filho (2006) define o CAA como um concreto capaz de fluir pela forma, passando pelas armaduras e preenchendo a forma sem o uso de vibradores.

Segundo Mehta e Monteiro (2014), define-se concreto autoadensável (CAA) como o concreto fluido que pode ser aplicado *in loco* sem a utilização de vibradores para formar um produto livre de vazios e falhas.

Conforme a NBR 15823-1:2017 (ABNT, 2017), o concreto autoadensável é aquele capaz de fluir, autoadensar pelo seu peso próprio, preencher a forma e passar por armaduras, dutos e insertos, sem segregação e mantendo sua homogeneidade durante as etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento.

De acordo com EFNARC (2002), o concreto autoadensável deve apresentar três características essenciais: fluidez, habilidade passante e resistência à segregação. Define-se fluidez como a capacidade do concreto autoadensável de fluir através da forma e

preencher todos os espaços. Habilidade passante é a capacidade de passar por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação. Resistência à segregação está relacionada à capacidade do concreto de se manter coeso, ou seja, sem haver separação entre a pasta de cimento e os agregados.

Diante das definições mencionadas acima, percebe-se a convergência dos autores para aspectos indispensáveis que caracterizam o concreto autoadensável, cuja principal característica é a capacidade de autoadensar através do seu peso próprio, preenchendo todos os espaços das formas, sem deixar vazios ou nichos. Contudo, outras características são imprescindíveis e indispensáveis, como a homogeneidade, trabalhabilidade, habilidade passante e resistência à segregação, que tornam este concreto eficiente.

4.1.1 HISTÓRICO

Segundo Okamura e Ouchi (2003), o problema de durabilidade das estruturas de concreto foi um importante tema de interesse no Japão durante vários anos, principalmente no início dos anos 1980, devido à redução da mão-de-obra qualificada, o que conseqüentemente gerou uma redução na qualidade das obras de construção civil. Uma solução para a execução de estruturas de concreto duráveis, independente da qualificação dos trabalhadores, foi o desenvolvimento de um concreto que dispensasse a etapa de adensamento.

A partir de 1983, na Universidade de Tóquio, o Prof. Okamura, com o objetivo de minimizar tal problema de durabilidade nas estruturas de concreto, iniciou seus estudos buscando obter um concreto especial capaz de se adensar sem a necessidade de nenhum tipo de vibração mecânica, dando origem a um concreto denominado autoadensável, onde seu primeiro protótipo foi realizado em 1988 (OKAMURA, 1997; GOMES, 2002).

De acordo com Okamura e Ouchi (2003) o primeiro protótipo foi desenvolvido, utilizando materiais existentes no mercado. O protótipo apresentou desempenho satisfatório com atenção especial para a retração por secagem, calor de hidratação e densidade no estado endurecido. Este concreto foi inicialmente nomeado concreto de alto desempenho, com os seguintes estágios e características:

- Fresco: autoadensável;
- Idades iniciais: redução de defeitos;
- Estado endurecido: proteção contra agentes externos.

Contudo, o conceito de concreto de alto desempenho já estava sendo desenvolvido na Europa, com um concreto de alta resistência à compressão e alta durabilidade, função da baixa relação água/cimento. Desse modo, os autores mudaram a definição passando a denominá-lo “Concreto de alto desempenho autoadensável” (ALMEIDA FILHO, 2006).

Após uma década de utilização no Japão, o CAA surge na Europa em meados dos anos 1990, mais precisamente na Suécia e na Holanda, onde foi empregado em aplicações de concreto *in loco* (OKAMURA; OUCHI, 1998). Segundo Gomes (2002), este concreto especial teve rápida aceitação no mercado europeu.

A partir do uso e comprovação das propriedades singulares do CAA, a entidade europeia EFNARC (*European Federation of National Trade Associations Representing Producers and Applicators of Specialist Building Products*) menciona que o CAA tem sido considerado como o desenvolvimento mais revolucionário da construção em estruturas de concreto nas últimas décadas (EFNARC, 2002).

No Brasil, a primeira experiência prática com CAA em obra de edificação foi no Edifício Camila em Goiânia no final de 2004. Outras cidades como São Paulo e Porto Alegre, paralelamente a esta data, lançaram mão desta tecnologia podendo-se citar obras como a do Museu Iberê Camargo, em Porto Alegre, considerada emblemática para Engenharia e Arquitetura contemporânea brasileira (GEYER; RESENDE DE SÁ, 2005).

A Figura 4.1 mostra a vista geral do Edifício Camila em processo de construção e a Figura 4.2 a laje sendo concretada com o CAA. Observa-se o número reduzido de trabalhadores necessários para realizar a concretagem.

Figura 4.1 - Vista do edifício Camila



Fonte: Geyer e Resende de Sá (2005).

Figura 4.2 - Lançamento do CAA na laje



Fonte: Geyer e Resende de Sá (2005).

Dentre os principais estudos sobre dosagem de CAA no Brasil, pode-se citar os desenvolvidos na Universidade do Rio Grande do Sul (UFRGS) por meio das metodologias de dosagem de Tutikian (2004) e Tutikian (2007) resultando no livro de Tutikian e Dal Molin (2008); na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) através do estudo de Melo (2005) no qual desenvolveu-se o método de dosagem Repette-Melo; há também na Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP) a elaboração da metodologia de dosagem de Alencar e Helene (2008) e na Universidade Federal de Alagoas (UFAL), com o desenvolvimento do método de Gomes e Barros (2009).

4.1.2 VANTAGENS DO USO DO CAA

A partir do uso do concreto autoadensável, a construção civil pode obter diversos ganhos, direta e indiretamente. As principais vantagens do uso do CAA são citadas abaixo (OKAMURA; OZAWA; OUCHI, 2000; TUTIKIAN, 2004):

- Permite reduzir o prazo de execução da obra;
- Proporciona uma concretagem sem a necessidade de adensamento mesmo em regiões com grande densidade de armadura;
- Proporciona um melhor acabamento superficial, sendo bastante recomendado para estruturas em concreto aparente;
- Possibilita o uso de resíduos de outras indústrias que podem integrar a fração de finos, como o pó de pedra, sílica ativa, cinza volante e cinza de casca de arroz.

É importante ressaltar que o concreto autoadensável permite a redução de custos não mensuráveis, como o menor índice de acidentes de trabalho em função da

mão-de-obra necessária, o que pode proporcionar melhores condições de trabalho no canteiro. Também ocorrem ganhos para o meio ambiente, a partir da redução da poluição sonora no entorno das obras, o reaproveitamento e incorporação de finos que seriam descartados na natureza. Contudo, um aspecto que deve ser levado em consideração é a necessidade de um controle mais rigoroso na dosagem e das características dos materiais, uma vez que ele é bem mais sensível às variações nos materiais do que o concreto convencional (COUTINHO, 2011).

4.2 PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO

Para que o concreto autoadensável apresente um desempenho adequado à sua finalidade, a mistura deve apresentar alta fluidez, viscosidade e coesão entre os componentes, com o intuito de garantir um fluxo contínuo de toda a mistura, de modo a preencher os espaços sem que ocorra a segregação ou bloqueio entre as armaduras. Assim, as principais características do CAA no estado fresco são: habilidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação. Estas características distinguem o concreto autoadensável do concreto convencional (GOMES; BARROS, 2009).

4.2.1 HABILIDADE DE PREENCHIMENTO

A habilidade de preenchimento do concreto está ligada diretamente à habilidade de passagem do mesmo. Esta propriedade caracteriza a capacidade do CAA fluir pela forma sem que as armaduras ou geometrias complexas interfiram no fluxo, tornando o CAA capaz de preencher todos os espaços somente pelo efeito do seu peso próprio. Estas propriedades estão intrinsecamente ligadas à alta fluidez e coesão da mistura (GOMES; BARROS, 2009).

4.2.2 HABILIDADE PASSANTE

De acordo com a NBR 15823-1:2017 (ABNT, 2017) a habilidade passante pode ser definida como a capacidade do concreto autoadensável de fluir dentro da forma, passando por entre os embutidos, sem obstrução do fluxo ou segregação.

Para Gomes e Barros (2009), esta propriedade caracteriza a capacidade do concreto autoadensável de passar por obstáculos tais como armaduras e formas com seções reduzidas, sem que ocorra o impedimento do fluxo. Esta propriedade é influenciada pela viscosidade da pasta, da argamassa e das características dos agregados.

Esta característica é mencionada por Almeida Filho (2006) como sendo a mais importante para o concreto autoadensável, uma vez que ela determina a capacidade de preenchimento das formas, influenciando na resistência e durabilidade do concreto.

4.2.3 RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO

A segregação é definida como a separação ou afastamento dos componentes do concreto. Assim, a resistência à segregação ou estabilidade é a propriedade que caracteriza a capacidade do CAA de se manter uniforme durante as etapas de transporte e lançamento. Os mecanismos que influenciam esta propriedade são a coesão e a viscosidade (ALMEIDA FILHO, 2006; GOMES; BARROS, 2009).

A resistência à segregação é a propriedade que o concreto fresco tem de manter sua uniformidade contra ações segregantes, como forças externas durante a colocação (segregação dinâmica) ou força de gravidade em repouso (segregação estática). Em ambos os casos, uma baixa resistência à segregação implica em heterogeneidade da resistência mecânica da estrutura resultante (MOURET; ESCADEILHAS; BASCOUL, 2008).

De acordo com Grabiec (2013), a segregação influencia negativamente em muitas propriedades do concreto endurecido, incluindo parâmetros físicos como a absorção de água, bem como a uniformidade da resistência à compressão, em casos extremos.

4.3 MATERIAIS CONSTITUINTES

Os materiais utilizados nas dosagens de CAA são semelhantes aos utilizados nas misturas de concreto convencional (CCV), sendo: agregado miúdo, agregado graúdo, cimento Portland e água. Contudo, há a necessidade de utilizar uma quantidade significativa de finos, aditivos superplastificantes, e quando necessários aditivos modificadores de viscosidade (EFNARC, 2005; TUTIKIAN, 2007; SANTOS, 2012).

4.3.1 AGREGADO MIÚDO

A influência do agregado miúdo nas propriedades do CAA no estado fresco é significativamente maior que a do agregado graúdo. As frações de partículas menores que 0,125 mm devem ser incluídas para o cálculo do teor de finos da pasta e devem também ser levadas em consideração no cálculo da proporção de finos e água. O alto volume de pasta em misturas de CAA ajuda a reduzir o atrito interno entre as partículas de areia, mas uma boa distribuição granulométrica ainda é muito importante. Muitos métodos de dosagem do CAA usam areias misturadas para proporcionar uma curva granulométrica otimizada (EFNARC, 2005).

De acordo com Santos (2012), a escolha do agregado miúdo está condicionada ao consumo de água, devido à sua influência sobre a coesão e a fluidez do concreto.

Segundo Okamura e Ouchi (2003), o formato das partículas dos agregados miúdos influencia na deformabilidade do CAA no estado fresco, sendo que agregados com partículas arredondadas e lisas são preferíveis para a produção de concreto autoadensável

porque aumentam a fluidez da mistura para uma mesma quantidade de água. Quanto mais anguloso for o agregado, maior a dificuldade de escoamento do concreto.

4.3.2 AGREGADO GRAÚDO

A aderência entre o agregado e a pasta de cimento exerce um papel fundamental para a adequada interação entre os componentes do concreto. Assim, a forma e a textura superficial do agregado tornam-se fatores determinantes no comportamento mecânico do concreto (SANTOS, 2012).

Segundo Geiker *et al.* (2002), a relação de aspecto, angularidade e textura dos agregados graúdos afeta a viscosidade da mistura e a tensão de aderência.

De modo semelhante, Rao e Prasad (2002) concluíram em seu estudo que a resistência ao cisalhamento entre o agregado e a pasta cresce à medida que aumenta-se a rugosidade do agregado.

De acordo com a EFNARC (2005), o espaçamento entre as barras da armadura é o principal fator na determinação do tamanho máximo do agregado a ser utilizado para a produção do CAA. O bloqueio ocasionado pelo agregado deve ser evitado, tendo em vista que o CAA deve fluir através dos espaços entre as barras. O tamanho máximo do agregado geralmente deve ser limitado a 12 - 20 mm.

O concreto autoadensável deve conter um baixo volume de agregado graúdo, variando de 28% a 35% do volume de concreto e uma relação em massa de agregado graúdo/concreto da ordem de 32% a 40%, com um consumo de agregado variando entre 750 kg/m³ e 920 kg/m³ (GOMES; BARROS, 2009).

4.3.3 CIMENTO

De acordo com a NBR 5732:1991 (ABNT, 1991), define-se o cimento Portland comum como o aglomerante hidráulico obtido pela moagem de clínquer ao qual se adiciona, durante a operação, a quantidade necessária de sulfato de cálcio, em suas variadas formas. Durante o processo de moagem é permitido acrescentar materiais pozolânicos, escórias de alto forno e/ou materiais carbonáticos, em quantidades que atendam as especificações da referida norma, dando origem aos cimentos compostos.

Podem ser utilizados para a produção do CAA todos os tipos de cimento Portland, desde que estejam em conformidade com as especificações técnicas. A escolha do tipo de cimento adequado para o uso depende das exigências específicas de cada aplicação (GOMES; BARROS, 2009; SANTOS, 2012).

De acordo com Nunes (2001), quanto maior a superfície específica do cimento, menor é a tensão de escoamento e maior a viscosidade da mistura. Isso ocorre em função

do acréscimo de partículas em contato com a água, diminuindo a distância e aumentando a frequência de colisão entre estas.

De acordo com a EFNARC (2002), cimentos com teor de C₃A superior a 10% podem causar problemas de trabalhabilidade da mistura de CAA.

O estudo realizado por Hanehara e Yamada (2008) concluiu que um menor teor de C₃A resulta em maior fluidez da pasta de cimento e que o C₃A tem um efeito negativo sobre o desempenho do superplastificante na mistura, uma vez que este elemento apresenta maior reatividade levando a uma perda rápida de trabalhabilidade da mistura.

Conforme Cavalcanti (2006), a adsorção do aditivo superplastificante pelas partículas do cimento ocorre preferencialmente nos aluminatos (aluminato tricálcico - C₃A e ferroaluminato tetracálcico - C₄AF). Assim, a quantidade destes elementos deve ser moderada, a fim de que ocorra uma adsorção uniforme.

Segundo Almeida Filho (2006), os cimentos Portland apresentam um bom comportamento quando se incorporam aditivos superplastificantes à mistura, aumentando assim a trabalhabilidade, porém o acréscimo da trabalhabilidade depende da composição dos materiais. Quanto maior a finura do cimento, menor a eficiência do superplastificante, já que ocorre a redução da concentração das moléculas adsorvidas aos grãos do cimento.

4.3.4 ADITIVOS

De acordo com a norma NBR 11768:2011 (ABNT, 2011), aditivo é definido como um produto que pode ser adicionado ao concreto com finalidade de modificar as suas propriedades, no estado fresco ou endurecido, com o intuito de promover trabalhabilidade, fluidez e durabilidade ao concreto.

Segundo Roncero (2000), a incorporação de aditivos superplastificantes ao CAA é indispensável para garantir as características do concreto no estado fresco. Estes aditivos promovem a elevada fluidez da mistura, através da capacidade de redução de água, tornando-se adequados para aplicações em regiões de pouca acessibilidade e alta densidade de armadura.

Além dos aditivos superplastificantes, pode-se utilizar em alguns casos, aditivos modificadores de viscosidade, cujo objetivo é evitar a segregação e reduzir a sensibilidade da mistura devido à variação do teor de umidade dos agregados. Podem ainda ser utilizados aditivos incorporadores de ar, retardadores ou aceleradores de pega, de modo a atender a necessidade e característica do produto final (EFNARC, 2005; MELO, 2005).

A necessidade de incorporação de aditivos torna um diferencial entre o CAA e o concreto convencional (CCV). Os principais aditivos usados no CAA são: aditivos superplastificantes e os modificadores de viscosidade (TUTIKIAN; DAL MONLIN, 2008).

O uso de aditivos para a produção do CAA é inevitável, tornando-se materiais de extrema importância.

4.3.4.1 ADITIVOS SUPERPLASTIFICANTES (SP)

De acordo com Santos (2012), os aditivos superplastificantes começaram a ser utilizados ao final dos anos 1960, simultaneamente no Japão e na Alemanha. À medida que foram utilizados em maiores proporções nas dosagens, percebeu-se que eles poderiam ser usados como excelentes redutores de água. Com o avanço dos estudos em tecnologia dos concretos, a utilização de aditivos químicos se tornou indispensável para a produção de concretos especiais, principalmente de concreto autoadensável.

Segundo Almeida Filho (2006), os aditivos plastificantes foram os primeiros redutores de água utilizados. Seu uso permitia apenas uma pequena redução de água, por este motivo, diversas pesquisas convergiram para os aditivos superplastificantes, que proporcionavam uma redução de até 40% de água da mistura.

Os aditivos superplastificantes representam uma categoria especial de agentes redutores de água, cuja formulação permite maior redução de água e trabalhabilidade elevada aos concretos nos quais são incorporados. Geralmente são empregados na produção de concretos de alto desempenho, quando é exigida alta fluidez e baixa relação água/cimento (GOMES; BARROS, 2009).

Os superplastificantes podem ser agrupados em categorias, conforme sua composição química. De acordo com Hartmann e Helene (2003), eles podem ser divididos em: lignossulfonatos, naftaleno sulfonato e melamina sulfonato e policarboxilatos.

Os lignossulfonatos (LS) são conhecidos como aditivos plastificantes de primeira geração e permitem a redução de água da mistura de 8% a 12%. O naftaleno (NS) e a melamina (MS) são comercialmente conhecidos como aditivos superplastificantes de segunda geração, permitindo a redução de até 25% de água da mistura. Por último, os policarboxilatos (PC) são os aditivos mais indicados para o uso no CAA, por serem aditivos de alta eficiência que dispersam e desfloculam as partículas de cimento, permitindo a redução de até 40% da água da mistura, mantendo a mesma trabalhabilidade (HARTMANN; HELENE 2003; TUTIKIAN; DAL MONLIN, 2008).

Os aditivos superplastificantes à base de policarboxilatos são os mais empregados no CAA, já que melhoram a dispersão das partículas de cimento, quando comparados aos aditivos de primeira e segunda gerações. Isso se dá porque os aditivos de primeira e segunda gerações são constituídos por polímeros, que as partículas de cimento adsorvem e acumulam-se em sua superfície. Estes polímeros aumentam a carga negativa (desbalanceando) do cimento, fazendo com que as partículas de cimento se dispersem por

repulsão elétrica, exigindo menos água para fluidificar a pasta. As cadeias dos superplastificantes de terceira geração, baseadas em polímeros de éter carboxílico com largas cadeias laterais, promovem a dispersão das partículas de cimento da mesma forma, porém com maior eficiência, relacionada a um efeito chamado repulsão estérica, pelo fato de suas cadeias serem ramificadas, aumentando assim a área superficial. Ainda geram uma energia capaz de estabilizar a refração e dispersão das partículas de cimento (TUTIKIAN; DAL MONLIN, 2008).

4.3.4.2 ADITIVOS MODIFICADORES DE VISCOSIDADE (AMV)

Os aditivos modificadores ou promotores de viscosidade são empregados ao concreto quando o teor de finos for limitado, promovendo a viscosidade necessária para garantir a resistência à segregação, contribuindo para a homogeneidade da mistura. A ação deste agente se dá pela formação de uma rede que sustenta os agregados, evitando a segregação e a exsudação da mistura (MELO, 2005).

Os agentes modificadores de viscosidade podem ser constituídos de polímeros solúveis em água à base de celulose, acrílico ou glicol, biopolímeros e agentes inorgânicos. Os mecanismos de ação dos AMV são basicamente dois: mecanismos que atuam sobre as partículas dos finos, como o cimento, e mecanismos que atuam sobre a água livre existente na mistura. Geralmente, os modificadores de viscosidade são adsorvidos à superfície das partículas de cimento, em função da estrutura molecular. Quando isso ocorre, há uma redução na adsorção dos superplastificantes, diminuindo o potencial de fluidez do concreto, conseqüentemente aumentando a viscosidade da mistura. Quando dispersos em água, as cadeias dos polímeros podem embeber a água livre, promovendo o aumento da viscosidade da mistura (NUNES, 2001).

A incorporação de agentes promotores de viscosidade pode gerar ao concreto um comportamento pseudoplástico, que corresponde à redução da viscosidade devido ao aumento da taxa de cisalhamento aplicada. Este comportamento facilita a utilização do CAA, já que o lançamento do concreto nas formas ocorre sob elevadas taxas de cisalhamento, desse modo, a viscosidade diminui facilitando a operação. Em contrapartida, após a aplicação, a viscosidade aumenta e garante ao concreto a capacidade de manter a sustentabilidade das partículas (KHAYAT *et al.*, 1999).

4.3.5 ADIÇÕES MINERAIS

As adições minerais são materiais finamente moídos que são incorporados ao concreto, geralmente em teores elevados, cujo intuito é agregar características específicas a este. As principais fontes destes materiais são usinas de energia que utilizam carvão e a

indústria metalúrgica. Diante da produção anual de milhões de toneladas em vários países do mundo, a incorporação destes subprodutos ao concreto ocupa um papel de grande relevância ambiental, pois possibilita a reciclagem destes subprodutos, contribui para a redução das emissões de gases para a atmosfera durante a produção do cimento, e preservação da matéria-prima, melhorando ainda as propriedades do concreto no estado fresco e endurecido (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

De acordo com Santos (2012), os efeitos da incorporação das adições minerais ao concreto dependem do formato das partículas e da distribuição granulométrica. Geralmente são utilizadas no concreto autoadensável para melhorar a viscosidade e coesão da mistura, contribuindo para elevar a resistência à segregação. Também exercem influência nas propriedades do concreto no estado endurecido, melhorando o desempenho mecânico e reduzindo a permeabilidade e porosidade do concreto. Isto contribui para elevar o desempenho mecânico do concreto e sua durabilidade.

Segundo Melo (2005), as adições são classificadas de acordo com o seu efeito no concreto, sendo divididas em:

- Inertes - contribuem para uma maior compacidade da mistura, como é o caso do fíler calcário e pó de quartzo.
- Reativas – contribuem para a formação de hidratos. Estas se subdividem em pozolanas, como: cinza volante com baixo teor de cálcio, cinza de casca de arroz, sílica ativa e metacaulim; e cimentantes, como a escória de alto forno e cinza volante com elevado teor de cálcio.

A Tabela 4.1 apresenta alguns exemplos de adições minerais mais utilizadas na produção do concreto autoadensável e seus efeitos na mistura.

Tabela 4.1 - Características e efeitos da utilização de adições minerais no concreto autoadensável

PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	TIPOS DE ADIÇÕES MINERAIS					
	Fíler calcário	Cinza volante	Cinza de casca de arroz	Escória de alto forno	Sílica ativa	Metacaulim
Origem	Natureza calcítica	Calcinação do carvão pulverizado em usinas termoeletricas	Calcinação da casca de arroz	Subproduto não-metálico resultante do processo de fabricação do ferro gusa	Subproduto resultante do processo de obtenção do ferro-silício e do silício metálico	Calcinação de alguns tipos especiais de argila ou obtido através de tratamento do resíduo do papel
Forma e textura	Prismática com faces retangulares	Esférica e lisa	Alveolar e áspera	Prismática e áspera	Esférica e lisa	Prismática e áspera
Massa específica (kg/dm ³)	2,20 a 2,60	2,35	2,20 a 2,60	2,79 a 2,93	2,20	2,40
Superfície específica (m ² /kg)	800 a 856	300 a 700	50.000 a 100.000	300 a 700	13.000 a 30.000	Variável em função do grau de moagem
Tamanho médio das partículas	Variável em função do grau de moagem	Variável em função do grau de moagem	Variável em função do grau de moagem	Variável em função do grau de moagem	0,1 a 0,2 µm	Variável em função do grau de moagem
Efeito no CAA na condição fresca quando utilizado em substituição ao cimento	Maior capacidade de adsorver água, comparada às partículas de outras adições, provoca aumento na viscosidade e maior resistência à exsudação.	Aumento da coesão; Redução da exsudação e da segregação; Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas; Normalmente reduz o consumo de superplastificante.	Elevado aumento de coesão; Redução acentuada da exsudação e segregação; Piores condições de fluidez em função da forma e textura das partículas; Elevado aumento no consumo de superplastificantes.	Aumento da coesão; Redução da exsudação e segregação; Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas; Pouco altera o consumo de superplastificantes.	Elevadíssimo aumento da coesão; Redução acentuada da exsudação e segregação; Melhores condições de fluidez em função do formato esférico das partículas; Aumento do consumo de superplastificante para teores superiores a 5% da massa do cimento	Grande aumento da coesão; Redução acentuada da exsudação e segregação; Não contribui para a fluidez em função da forma e textura das partículas; Aumento no consumo de superplastificante
Efeito no CAA na condição endurecida quando utilizado em substituição ao cimento	Por não ser totalmente inerte, pode afetar a manutenção da fluidez e retardar a pega do concreto quando se usa altos teores de aditivo superplastificante.	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade.	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade.	Pequena alteração da resistência à compressão e aumento da durabilidade	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade.	Melhoria notável da resistência à compressão e da durabilidade.

Fonte: Adaptado de Assunção (2016).

Como visto na Tabela 4.1, as adições minerais têm por característica aumentar a coesão da mistura, reduzir a exsudação e segregação. Na maioria dos casos há também melhoria da resistência à compressão, tornando estes materiais componentes importantes para a composição do CAA.

4.3.5.1 NANOSÍLICA

A nanosílica apresenta a mesma composição química que o quartzo ou que a sílica ativa, ou seja, trata-se de (SiO_2) . A principal diferença em relação à sílica ativa é o tamanho muito inferior da partícula, variando de 0,003 a 0,2 μm . A combinação entre o estado amorfo e o tamanho da partícula da nanosílica faz com que este material seja extremamente ativo na elaboração de argamassas e concretos. A nanosílica reage com o hidróxido de cálcio liberado durante o processo de hidratação do cimento, produzindo compostos mineralógicos parecidos aos do próprio cimento, mais especificamente o gel CSH (silicato de cálcio hidratado), que pode otimizar as propriedades mecânicas (SILICON, 2018).

Segundo Li *et al.*(2017), a nanosílica possui dimensões inferiores à sílica ativa e maior superfície específica, por esta razão o efeito pozolânico se potencializa. A adição destes materiais em conjunto podem preencher os vazios entre os grãos do cimento, aumentar o empacotamento dos materiais e densificar a microestrutura da pasta de cimento endurecida.

De acordo com Yazdanbakhsh e Grasley (2012), o maior desafio para se obter os benefícios da adição de nanomateriais na pasta de cimento é obter uma uniformidade na distribuição das nanopartículas. As partículas de cimento tem diâmetro maior que o espaçamento médio entre as nanopartículas quando estas se encontram totalmente dispersas na pasta, o que significa que a presença de partículas de cimento na pasta fresca diminui a máxima dispersão possível das nanopartículas na pasta endurecida. Assegurar uma melhor dispersão de nanopartículas requer simultaneamente alcançar a dispersão de partículas de cimento.

Quando a nanosílica é incorporada a um aditivo orgânico elimina a dificuldade de manipulação e homogeneização promovendo melhor desempenho dos concretos (SILICON, 2018).

Segundo Nolli Filho (2015), a adição de nanosílica estabilizada em aditivo superplastificante melhora a trabalhabilidade e a compacidade dos concretos, bem como as propriedades mecânicas. O fato de a nanosílica estar incorporada em um aditivo superplastificante à base de policarboxilato melhora a sua aplicação e eficácia nos concretos, em função da maior facilidade de homogeneização.

4.4 MÉTODOS DE DOSAGEM

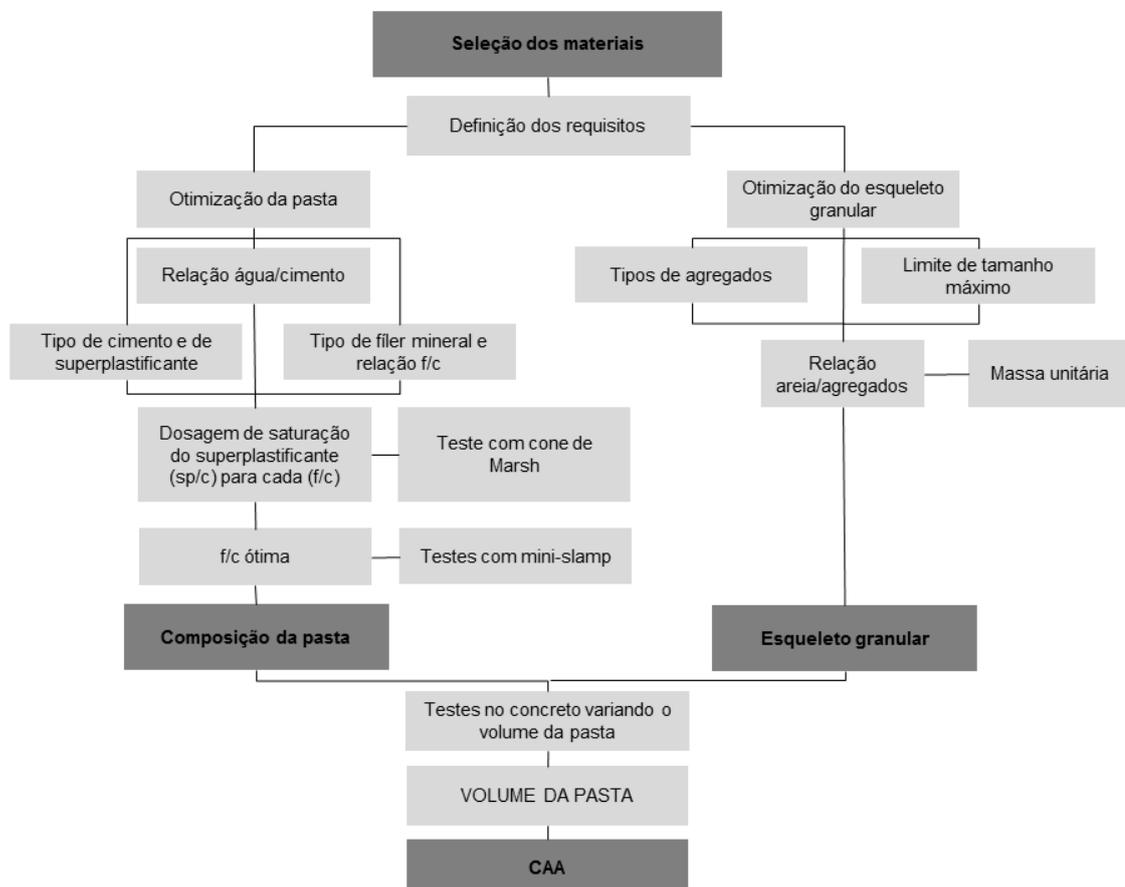
Os métodos de dosagem do CAA têm como objetivo o atendimento das propriedades que estabelecem uma relação entre a habilidade das misturas de fluir com facilidade nas formas, independente de sua complexidade, e a estabilidade da mistura que garante a ausência de segregação (GOMES; BARROS, 2009).

Diferentes metodologias de dosagem para obtenção do CAA são encontradas na literatura. Neste trabalho são descritos alguns destes métodos.

4.4.1 MÉTODO DE DOSAGEM POR GOMES, GETTU E AGUILLÓ

O método de dosagem do CAA de Gomes, Gettu e Agulló (2003) propõe que o concreto pode ser obtido otimizando-se a composição da pasta e o esqueleto granular. A viscosidade e a fluidez da pasta ditam o comportamento de fluxo do concreto. O método é executado em três fases sendo estas: obtenção da composição da pasta, determinação da proporção de mistura dos agregados e seleção do conteúdo da pasta. A Figura 4.3 apresenta um organograma dos diferentes passos do método proposto.

Figura 4.3 - Método de dosagem Gomes, Gettu e Agulló

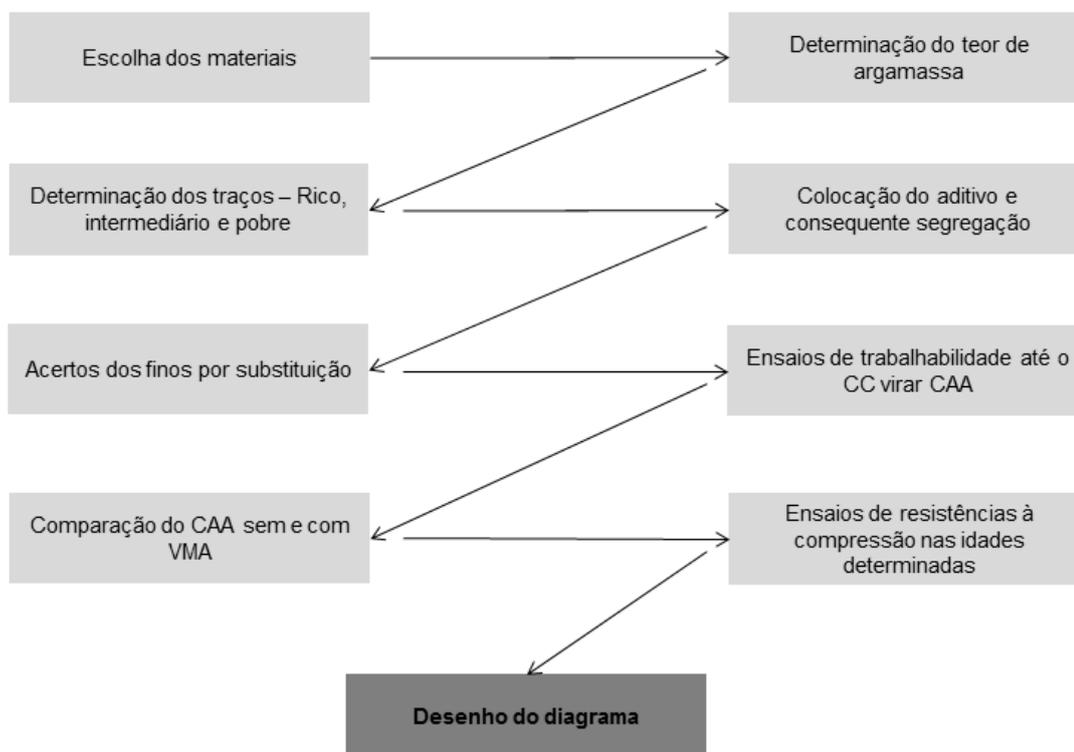


Fonte: Adaptado de Gomes e Barros (2009).

4.4.2 MÉTODO DE DOSAGEM POR TUTIKIAN

O método de dosagem do CAA proposto por Tutikian (2004) é baseado no método de dosagem para concreto convencional IPT/EPUSP (HELENE E TERZIAN, 1992). Consiste em um método experimental e prático, e apresenta passos que devem ser seguidos para se obter o objetivo final. A Figura 4.4 apresenta o organograma do passo-a-passo para execução do método de dosagem proposto.

Figura 4.4 - Método de dosagem Tutikian



Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008).

4.4.3 MÉTODO DE DOSAGEM POR REPETTE-MELO

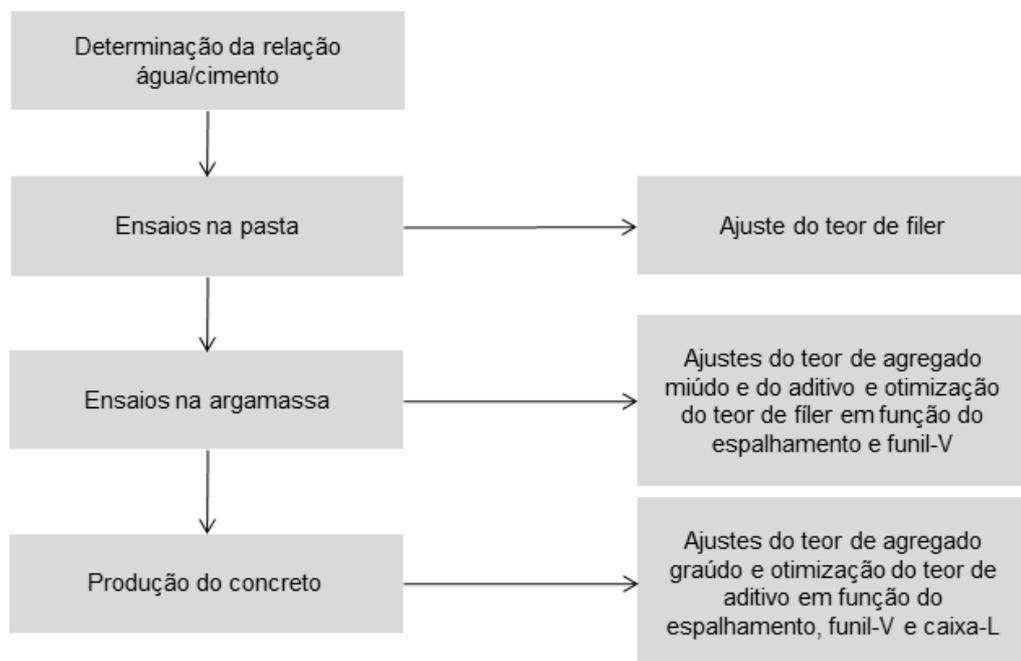
O método de dosagem do CAA proposto por Repette-Melo, apresentado em Melo (2005), consiste no estabelecimento da relação água/cimento com o intuito de possibilitar a produção de dosagem de CAA com exigências de durabilidade ou de resistência à compressão como praticadas nos concretos convencionais. A relação fíler/cimento é estabelecida de acordo com a relação água/cimento definida anteriormente, de modo que não tenha indícios de segregação ou exsudação na pasta.

A relação volumétrica agregado miúdo/argamassa é determinada através dos ensaios de espalhamento e fluidez nas argamassas, variando-se o teor de aditivo superplastificante e o teor de agregado miúdo.

Já o volume do agregado graúdo é determinado em relação ao volume total de concreto, de maneira a se obter misturas adequadas em função dos ensaios de espalhamento, fluidez e caixa L, além de analisar a sua estabilidade e distribuição dos agregados. Se necessário, faz-se ajustes do teor de aditivo no concreto.

O organograma do método de dosagem Repette-Melo é apresentado na Figura 4.5

Figura 4.5 - Método de dosagem Repette-Melo



Fonte: Adaptado de Melo (2005).

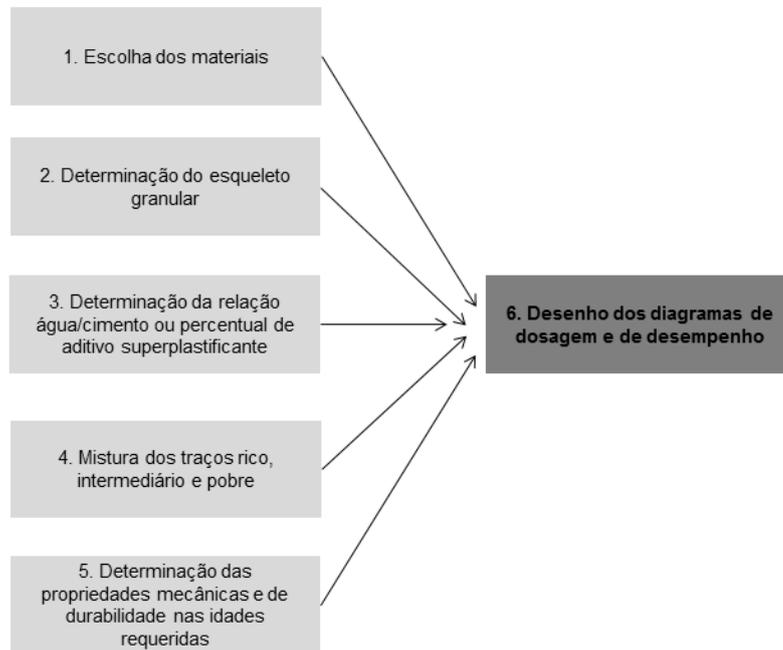
4.4.4 MÉTODO DE DOSAGEM POR TUTIKIAN E DAL MOLIN

O método de Tutikian e Dal Molin utiliza dos conceitos de O'Reilly (1992) para determinar o empacotamento granular máximo, os conceitos de De Larrard (1999) para a escolha dos materiais constituintes na mistura, também utiliza conceitos do diagrama de dosagem do IPT/EPUSP para permitir os cálculos de qualquer CAA dentro da faixa avaliada, a quantidade do teor de aditivo, da relação água/cimento e o procedimento básico proposto por Tutikian (2004) (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

O método ainda apresenta aspectos novos, como a união de todas essas teorias mencionadas, o teor de argamassa variável, a inserção da curva de custo no diagrama de dosagem e o diagrama de desempenho.

A Figura 4.6 apresenta o passo-a-passo do método de dosagem de CAA proposto.

Figura 4.6 - Método de dosagem Tutikian e Dal Molin



Fonte: Adaptado de Tutikian e Dal Molin (2008).

4.4.5 MÉTODO DE DOSAGEM POR ALENCAR E HELENE

O método proposto por Alencar e Helene (2008) se baseia no método de dosagem do IBRACON, com duas inovações, sendo: a introdução do conceito de correção da coesão do concreto no estado fresco, a partir do incremento de adições minerais ou fíler, e inclusão de ensaios específicos no concreto fresco, que não eram considerados na dosagem do concreto convencional, cujo objetivo é verificar a capacidade de autoadensamento, habilidade passante e resistência à segregação, que são imprescindíveis para a caracterização e classificação do concreto no estado fresco (ALENCAR, 2008).

O estudo de dosagem proposto por Alencar e Helene (2008) consiste na obtenção de um traço médio com base na resistência média prevista e posteriormente a obtenção de traços auxiliares (muito rico, rico, muito pobre e pobre), mantendo-se o mesmo teor de argamassa, teor de substituição da adição mineral ou fíler, teor de aditivo e relação a/c (água/cimento). A dosagem para obtenção do traço médio inicia-se seguindo duas etapas principais:

- ✓ Fase de proporcionamento: deve-se adotar o valor de m (relação em massa de agregado seco/cimento), com base na resistência média prevista. A partir daí seguem-se os passos para o proporcionamento dos materiais, que são:
 - 1º Passo – Teor de argamassa (α);
 - 2º Passo – Teor de substituição (T);

3º Passo – Aditivo;

4º Passo – Relação a/c.

- ✓ Fase de verificação: verifica-se a possibilidade de realização dos ensaios de trabalhabilidade, a cada ajuste de traço realizado, cujo objetivo é constatar a obtenção do nível de autoadensabilidade desejado, sendo necessário realizar pelo menos os seguintes ensaios:

1º Passo – Determinação do espalhamento e tempo de escoamento;

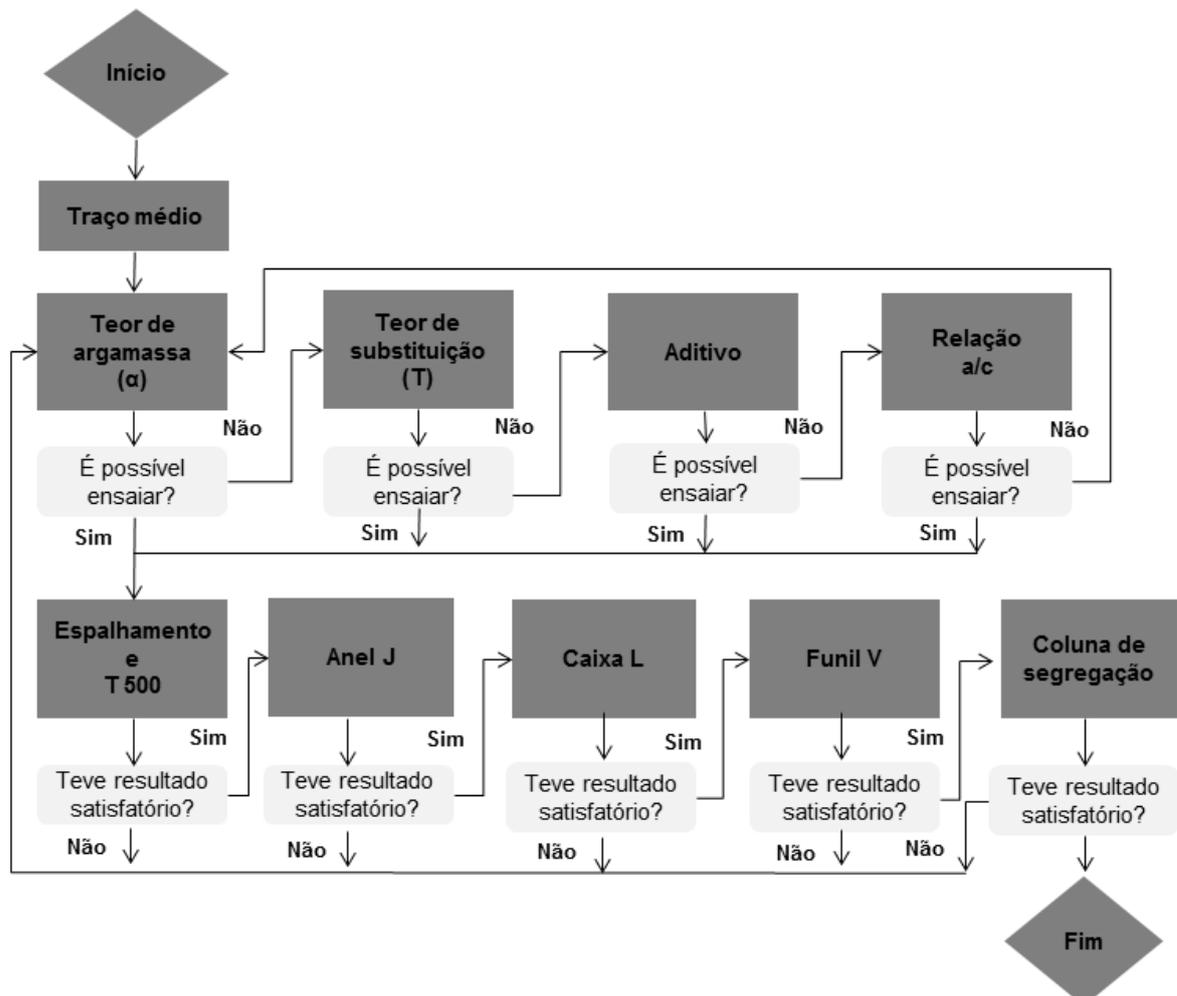
2º Passo – Determinação da habilidade passante pelo método da caixa L;

3º Passo – Determinação da viscosidade pelo método do funil V;

4º Passo – Determinação da resistência à segregação pelo método da coluna de segregação.

Na figura 4.7 é apresentado o esquema para obtenção do traço médio.

Figura 4.7 – Sequência para o proporcionamento dos materiais do traço médio



Fonte: Adaptado de Alencar (2008).

Para a primeira tentativa de obtenção do CAA aconselha-se utilizar um teor de argamassa ligeiramente acima do empregado para obtenção do concreto comum, sendo da ordem de 53 %, com um baixo valor de T e baixo valor de a/c e teor de aditivo. Caso a mistura não atenda as características do CAA, deve-se testar porcentagens crescentes de teor de substituição, até o momento em que não sejam verificadas melhoras expressivas na mistura. Segue-se então para o 3º e 4º passos, com o aumento gradual do teor de aditivo e da relação a/c (ALENCAR, 2008).

Se após a realização dos quatro passos não tenha sido possível obter o CAA, deve-se elevar o teor de argamassa em três pontos, mantendo o teor de substituição (T), relação a/c e teor de aditivo definidos na tentativa anterior. Estes passos devem ser seguidos até a obtenção do teor de argamassa ideal, atendendo aos requisitos do CAA no estado fresco da mistura. Cabe ressaltar que a proporção de T cresce lentamente a cada tentativa, uma vez que à medida que se eleva este valor é necessário aumentar o teor de aditivo, em função da superfície específica da mistura. No caso do uso de fíler, inicia-se a dosagem com 7%, crescendo 2% a cada nova tentativa (ALENCAR, 2008).

4.4.6 MÉTODO DE DOSAGEM IBRACON PARA CONCRETO CONVENCIONAL

O método IBRACON busca obter o comportamento mecânico e reológico do concreto de forma unívoca com os materiais escolhidos. A base do método consiste em fixar o mesmo abatimento para diferentes teores de argamassa seca (α), através de um traço intermediário (1:m) dos demais traços previstos (1:m-1; 1:m+1 etc.) com o intuito de determinar a quantidade mínima de água para obter a trabalhabilidade desejada, para um mesmo conjunto de materiais. Desse modo, é possível otimizar as etapas de proporção entre agregados miúdos e graúdos com bases experimentais nas quais está implicitamente incluída a interferência do cimento, agregados, adições e de outros materiais utilizados, conferindo-lhe uma vantagem em relação a outros métodos que tratam de otimizar separadamente a mistura de agregados com base em curvas granulométricas ideais, pasta de cimento, adições e aditivos, esperando que, assim, isoladamente otimizadas, possam levar a um concreto ideal quando misturados na betoneira (TUTIKIAN; HELENE, 2011).

Para a produção do traço intermediário, deve-se variar o teor de argamassa seca (α), iniciando com um valor baixo, da ordem de 33% e subir de 2% em 2% até obter o teor ótimo de argamassa, por meio de observações visuais da mistura, combinadas com o manuseio do concreto com a colher de pedreiro, com o intuito de verificar a trabalhabilidade e acabamento, além da realização do ensaio de abatimento para verificação da coesão e plasticidade do concreto. Após a definição do α no traço intermediário (Equação 1), para o valor de abatimento desejado, obtém-se os demais traços auxiliares, mantendo-se constante

o teor de argamassa, o abatimento e a relação água/ materiais secos, conforme Equação 2 (ALENCAR, 2008).

$$\text{Teor de argamassa seca} \quad \alpha = \frac{1+a}{1+m} \quad \text{Equação (1)}$$

$$\text{Teor de água/ materiais secos} \quad H = \frac{a/c}{1+m} \quad \text{Equação (2)}$$

Onde:

$m = a+b$: relação em massa de agregado seco/cimento, em kg/kg;

a : relação agregado miúdo seco/cimento em massa, em kg/kg;

b : relação agregado graúdo seco/cimento em massa, em kg/kg.

A quantidade de traços, no mínimo três, permite o ajuste das equações de correlação de dosagem e a construção do diagrama que correlaciona a resistência f_{cj} (MPa) de acordo com a Equação 3, a relação a/c (kg/kg), a relação total de agregados secos/cimento m (kg/kg), conforme apresentado na Equação 4 e o consumo de cimento C_{cim} (kg/m³), segundo a Equação 5, possibilitando obter, através da regressão linear, qualquer resistência dentro do intervalo estudado (ALENCAR, 2008).

$$\text{Abrams (1918)} \quad f_c = \frac{k_1}{k_2^{a/c}} \quad \text{Equação (3)}$$

$$\text{Lyse (1932)} \quad m = k_3 + k_4 \times \frac{a}{c} \quad \text{Equação (4)}$$

$$\text{Prizkulnik \& Kirilos (1974)} \quad C = \frac{1000}{k_5 + k_6 \times m} \quad \text{Equação (5)}$$

Onde:

f_c : resistência à compressão axial, em MPa;

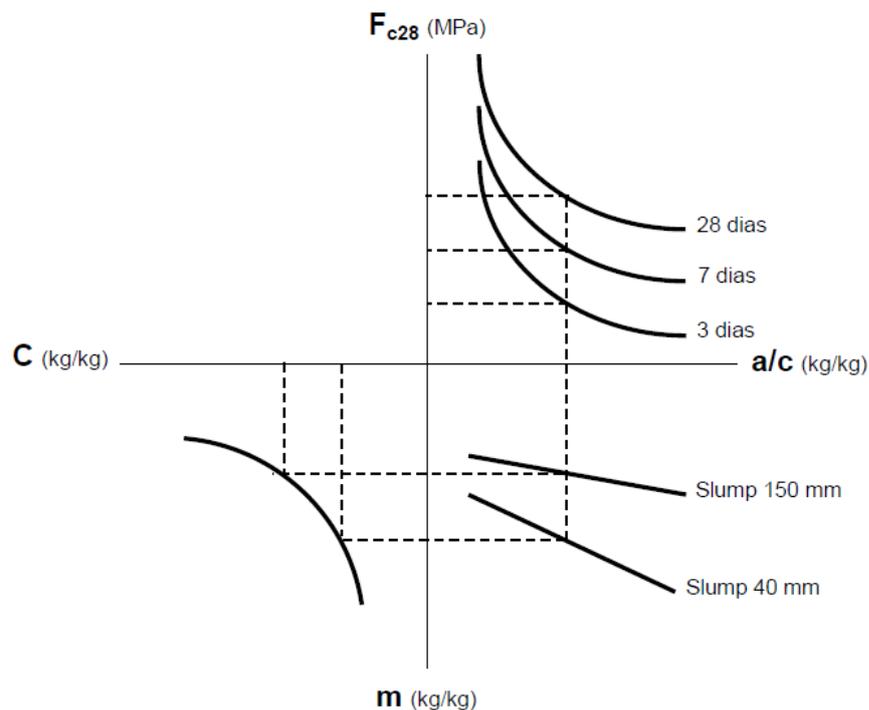
a/c : relação em massa de água/cimento, em kg/kg;

C : consumo de cimento por m³ de concreto, em kg/m³;

$k_1, k_2, k_3, k_4, k_5, k_6$: são constantes particulares de cada conjunto de materiais.

Com os resultados obtidos é possível construir o diagrama de dosagem, que corresponde ao modelo de comportamento das misturas do estudo, facilitando o entendimento do comportamento da família de concretos com o mesmo abatimento, embora apresentem propriedades diferentes após endurecidos (ALENCAR, 2008; TUTIKIAN; HELENE, 2011). O modelo do diagrama de dosagem pode ser visto na Figura 4.8.

Figura 4.8 - Diagrama de dosagem



Fonte: Tutikian; Helene, (2011).

4.5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O concreto autoadensável é considerado uma grande inovação na tecnologia do concreto para a construção civil. Este capítulo buscou apresentar algumas dessas vantagens.

As propriedades do CAA no estado fresco são influenciadas pelos materiais utilizados na sua produção. O CAA é obtido pela ação de aditivos superplastificantes e composição ideal entre os agregados, que proporciona maior facilidade de bombeamento, excelente homogeneidade, resistência à segregação e durabilidade que, conseqüentemente, influenciam na sua qualidade final. Desta forma, torna-se imprescindível o controle tecnológico destes materiais.

No Brasil desenvolveu-se diversos métodos de dosagem de CAA, como Repette-Melo (2005); Tutikian e Dal Molin (2008); Alencar e Helene (2008) e Gomes e Barros (2009).

Ainda assim, existe a necessidade de um maior número de pesquisas que se aprofundem e analisem as propriedades mecânicas e reológicas do concreto autoadensável para que desta forma a tecnologia se desenvolva e se estabeleça de forma efetiva no país.

Desta forma, o CAA apresentará as vantagens tão desejadas e esperadas, visto que a cada dia se torna mais frequente a alta exigência por qualidade e durabilidade das construções em estruturas de concreto.

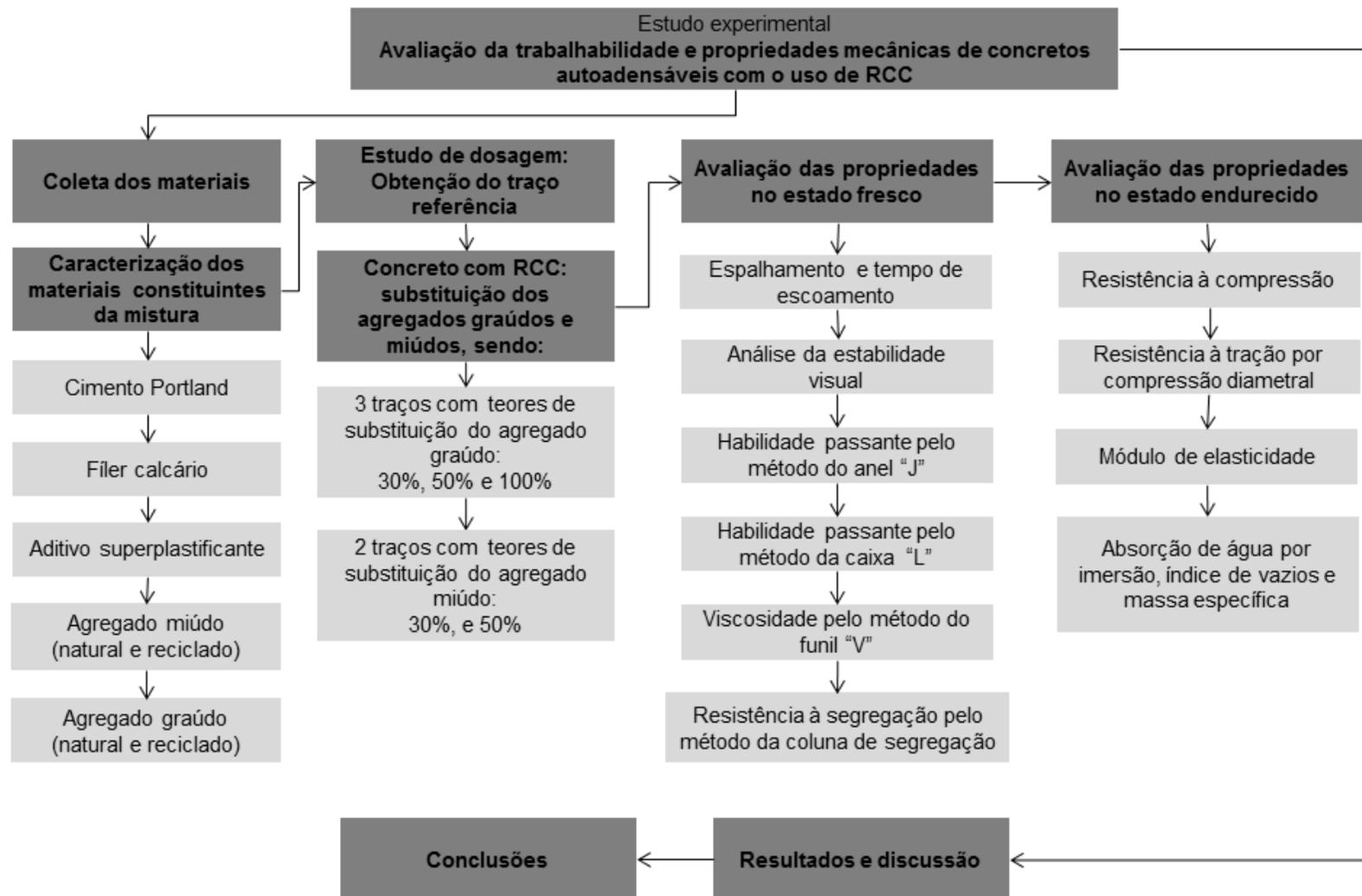
5. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Esta pesquisa consiste em um trabalho teórico-experimental cuja finalidade é avaliar as propriedades do concreto autoadensável, com a utilização de agregados reciclados provenientes de resíduos da construção civil. Para tanto, foram realizados ensaios para caracterização dos materiais constituintes e ensaios para avaliação das propriedades do CAA, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. A dosagem do traço de referência do concreto autoadensável foi desenvolvida de acordo com o método proposto por Alencar e Helene (2008). O programa experimental desenvolvido foi dividido nas seguintes etapas:

1. Coleta do RCC;
2. Caracterização dos agregados (miúdo e graúdo);
3. Estudo de dosagem do concreto para obtenção do traço referência;
4. Substituição parcial dos agregados naturais pelos reciclados;
5. Caracterização e classificação do CAA no estado fresco;
6. Avaliação das propriedades do concreto no estado endurecido.

O organograma do programa experimental é apresentado na Figura 5.1.

Figura 5.1 – Programa experimental



5.1 COLETA DOS AGREGADOS

As amostras de agregados reciclados foram coletadas em uma usina de reciclagem na cidade de Americana/SP, em função da disponibilidade dos materiais e facilidade de obtenção dos mesmos. Foram coletados os agregados miúdo e graúdo, provenientes da reciclagem de concretos e argamassas, conforme apresentado na Figura 5.2.

Figura 5.2 – Lote para coleta dos agregados graúdos reciclados (a), face exterior da pilha (b), material abaixo da camada de 30 cm



Sabe-se que os agregados reciclados apresentam heterogeneidade em sua composição, como pode ser observado na Figura 5.2. Assim, uma correta amostragem torna-se imprescindível para a determinação de suas características, de modo a

representarem adequadamente o lote examinado. Para tanto, foram seguidos os procedimentos para amostragem estabelecidos na NBR NM 26:2009 (ABNT, 2009).

A partir da obtenção das amostras de campo, as mesmas foram reduzidas pelo processo de quarteamento, de acordo com a NBR NM 27:2001 (ABNT, 2001). Foi utilizado o método “B” que consiste nas seguintes etapas: coloca-se a amostra de campo sobre uma superfície rígida e limpa onde não ocorra perda de material ou contaminação; homogeneizar a amostra revolvendo-a no mínimo três vezes, sendo que na última vez deve-se formar um tronco de cone, dividir o tronco de cone em quatro partes iguais, eliminando duas partes e agrupando as outras duas em sentido diagonal, tomando o cuidado para evitar a perda de materiais finos da amostra; repetir as etapas com o material remanescente até a obtenção da quantidade necessária de material para a execução do ensaio. A Figura 5.3 exemplifica a etapa de divisão do tronco de cone em quatro partes iguais.

Figura 5.3 – Quarteamento dos agregados graúdo (a) e miúdo (b)



Cabe ressaltar que a redução da amostra de campo é tão importante quanto a obtenção da mesma, já que a partir desta amostra reduzida serão obtidos os parâmetros de caracterização dos materiais mediante à realização dos ensaios.

5.2 MATERIAIS UTILIZADOS

Para o desenvolvimento desta pesquisa e produção das misturas foram utilizados os seguintes materiais: cimento Portland CP V ARI RS, fíler calcário, aditivo superplastificante, agregado miúdo natural e reciclado e agregado graúdo natural e reciclado.

5.2.1 CIMENTO PORTLAND

O CP V ARI RS é um cimento que apresenta alta resistência inicial e resistência à sulfatos. Os ensaios de caracterização, fornecidos pelo fabricante, são apresentados no Anexo A.

5.2.2 FÍLER CALCÁRIO

O fíler calcário, também conhecido como pó de pedra, é um material compacto de granulação fina e coloração cinza. Os ensaios de caracterização, fornecidos pelo fabricante, são apresentados no Anexo B.

5.2.3 ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Utilizou-se o aditivo superplastificante Silicon NS MIX 400, à base de policarboxilatos, modificado com nanosílica estabilizada, que atua como dispersante das partículas de cimento, proporcionando trabalhabilidade adequada ao concreto, além de melhorar a microestrutura da pasta de cimento por meio do preenchimento dos vazios pela nanosílica. Os dados técnicos do produto são apresentados no Anexo C.

5.2.4 AGREGADO MIÚDO

Foram selecionadas duas areias naturais provenientes da região de Campinas/SP, com composições granulométricas distintas, cujo objetivo foi promover o melhor empacotamento da mistura. O agregado reciclado foi utilizado para substituição da areia que apresentou semelhança na composição granulométrica.

Realizou-se os seguintes ensaios para caracterização destes materiais: determinação da composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003); massa unitária no estado solto e índice de vazios de acordo com a NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006); massa específica de acordo com a NBR NM 9775:2011 (ABNT, 2011) e absorção de água conforme a NBR NM 30:2000 (ABNT, 2000).

Ressalta-se a importância de realizar o ensaio de lixiviação para o agregado reciclado de acordo com a NBR 10005:2004 (ABNT, 2004). Contudo, não foi possível realizá-lo pela indisponibilidade de equipamentos.

A Figura 5.4 apresenta os agregados miúdos utilizados no concreto. Os agregados miúdos foram denominados em função do módulo de finura.

Figura 5.4 - Agregado miúdos: agregado miúdo natural MF 1,07 (a), agregado miúdo natural MF 2,47 (b) e agregado miúdo reciclado MF 2,86 (c)



Os resultados de caracterização destes materiais são apresentados no Apêndice A.

5.2.5 AGREGADO GRAÚDO

Para a composição da mistura foram utilizados agregados graúdos naturais e reciclados. Estes foram caracterizados por meio dos seguintes ensaios: determinação da composição granulométrica de acordo com a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003); massa unitária no estado solto conforme a NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006); massa específica e absorção de água de acordo com a NBR NM 53:2009 (ABNT, 2009).

A Figura 5.5 apresenta os agregados graúdos utilizados no concreto.

Figura 5.5 - Agregado graúdo natural $D_{\text{máx}}$ 9,5 mm (a) e agregado graúdo reciclado $D_{\text{máx}}$ 9,5 mm (b)



Os resultados de caracterização destes materiais são apresentados no Apêndice A.

5.3 DEFINIÇÃO DOS TRAÇOS

A dosagem do traço de referência do concreto autoadensável foi desenvolvida de acordo com o método proposto por Alencar e Helene (2008), conforme apresentado no item 4.4.5 deste trabalho. Tendo em vista o objetivo principal de avaliar o impacto na substituição dos agregados naturais por reciclados, optou-se por utilizar o traço médio (m=4) como referência, não sendo desenvolvidos os traços rico e pobre.

A partir da definição do traço de referência, foram estudados 5 traços com a substituição do agregado natural pelo reciclado (gráudo e miúdo), sendo analisados concretos com teores de substituição do agregado gráudo de 30%, 50% e 100%, e com teores de substituição do agregado miúdo de 30% e 50%, totalizando 6 traços, conforme apresentado na Tabela 5.1. A substituição dos agregados naturais pelos reciclados, gráudo e miúdo, não ocorreu de forma simultânea, ou seja, quando foi incluído na mistura o agregado gráudo reciclado, utilizou-se o agregado miúdo natural e vice-versa. O agregado miúdo reciclado de MF igual a 2,86 foi utilizado para substituição do agregado miúdo natural de MF igual a 2,47, tendo em vista a semelhança da composição granulométrica.

Tabela 5.1 - Proporção de agregados

Traço	Código	AGR (agregado gráudo reciclado)	AGN (agregado gráudo natural)	AMR (agregado miúdo reciclado – MF 2,86)	AMN (agregado miúdo natural - MF 2,47)
1	AN REF	0	100	0	100
2	AGR 30	30	70	0	100
3	AGR 50	50	50	0	100
4	AGR 100	100	0	0	100
5	AMR 30	0	100	30	70
6	AMR 50	0	100	50	50

Conforme a NBR 12655:2015 (ABNT, 2015) foi considerada a classe de agressividade ambiental II, resultando em uma relação água/cimento menor ou igual a 0,60 e consumo de cimento maior ou igual a 280 kg/m³ de concreto, com o intuito de se obter a resistência à compressão mínima de 25 MPa. Ressalta-se que estes parâmetros foram utilizados como requisitos mínimos, e que os traços desenvolvidos atendem esses critérios.

5.3.1 PROCEDIMENTO DE DOSAGEM DO CONCRETO COM AGREGADO RECICLADO

5.3.1.1 COMPENSAÇÃO DO VOLUME DO AGREGADO

Para realizar um estudo de dosagem de concreto com agregados reciclados, se faz necessário conhecer as massas específicas e unitárias destes materiais. Para Leite (2001),

devido à diferença entre as características dos agregados naturais e reciclados, existe a necessidade de realizar uma compensação da quantidade de material reciclado a ser empregado nas misturas de concreto, quando traços em massa de concretos com agregados naturais são aplicados aos concretos com agregados reciclados. Sem esta compensação, o volume de material reciclado correspondente à massa de agregado natural seria maior, o que resultaria em uma diferença entre o volume destes concretos produzidos a partir de um mesmo traço unitário. A compensação do volume do material foi realizada de acordo com a Equação 6.

$$M_{AR} = M_{AN} * \frac{\gamma_{AR}}{\gamma_{AN}}$$

Compensação Equação (6)

Sendo que:

M_{AR} = Massa do agregado reciclado (kg);

M_{AN} = Massa do agregado natural (kg);

γ_{AR} = Massa específica do agregado reciclado (kg/dm³);

γ_{AN} = Massa específica do agregado natural (kg/dm³).

5.3.1.2 COMPENSAÇÃO DA ÁGUA NA MISTURA

Outro aspecto essencial na realização de um estudo de dosagem de concreto é a avaliação da absorção de água dos agregados. Segundo Leite (2001), os agregados reciclados possuem a característica de absorver mais água que os agregados naturais. Desta forma, ao se produzir concretos com este material existe a necessidade de acrescentar mais água a mistura.

Ao analisar pesquisas de dosagens de concreto com agregados reciclados, cujos autores utilizaram a compensação da taxa de absorção de água, percebeu-se que estes divergem quanto a forma e o tempo para pré-saturar os agregados, conforme apresentado de forma sucinta na Tabela 3.4. Assim, optou-se por realizar a compensação acrescentando água na mistura em função da absorção do agregado reciclado, onde este foi imerso em 70% da água de amassamento da mistura por um período de 15 minutos.

5.3.2 MISTURA DOS MATERIAIS E MOLDAGEM DOS CORPOS DE PROVA

A mistura foi realizada com a utilização de betoneira gravitacional, com capacidade para 400 litros. A sequência de colocação dos materiais foi baseada na norma NBR

12821:2009 (ABNT, 2009) sendo adotada a mesma para todas as dosagens. No entanto, para os concretos com agregados reciclados, foi necessário realizar a pré-saturação dos agregados por 15 minutos em 70% da água de amassamento antes do início da mistura. A sequência de inclusão dos materiais na betoneira é apresentada a seguir:

✓ **Concreto de referência:**

1. Adiciona-se o agregado graúdo, 30% da água e mistura-se por 30 segundos;
2. Adiciona-se o cimento, mais 30% da água e mistura-se por 30 segundos;
3. Adiciona-se o fíler calcário, o agregado miúdo, o restante da água e mistura-se por 30 segundos;
4. Adiciona-se o aditivo superplastificante, mistura-se durante 7 minutos (tempo necessário para garantir a homogeneidade e trabalhabilidade do concreto).

✓ **Concreto com agregado graúdo reciclado:**

1. Adiciona-se o agregado graúdo e 70% da água de amassamento, mantendo-se nesta condição por 15 minutos; então, mistura-se por 30 segundos;
2. Adiciona-se o cimento e mistura-se por 30 segundos;
3. Adiciona-se o fíler calcário, o agregado miúdo, o restante da água e mistura-se por 30 segundos.
4. Adiciona-se o aditivo superplastificante, mistura-se durante 7 minutos (tempo necessário para garantir a homogeneidade e trabalhabilidade do concreto).

✓ **Concreto com agregado miúdo reciclado:**

1. Adiciona-se o agregado graúdo natural e 30% da água e mistura-se por 30 segundos;
2. Adiciona-se o cimento e mistura-se por 30 segundos;
3. Adiciona-se o fíler calcário, o agregado miúdo (saturado durante 15 minutos em 70% da água de amassamento) e mistura-se por 30 segundos;
4. Adiciona-se o aditivo superplastificante, mistura-se durante 7 minutos (tempo necessário para garantir a homogeneidade e trabalhabilidade do concreto).

Após a conclusão da mistura, para cada traço foram moldados 12 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 x 200 mm para a realização dos ensaios previstos neste programa experimental, totalizando 72 corpos de prova. Os corpos de prova foram moldados de acordo com a NBR 5738:2015 (ABNT, 2015). Após 24 horas, os corpos de prova foram desmoldados e mantidos em cura submersa (Figura 5.6) em água saturada com cal até as idades dos respectivos ensaios.

Figura 5.6 - Corpos de prova em cura



5.4 PROPRIEDADES AVALIADAS

Após a obtenção da mistura, foram realizados os ensaios para caracterização do CAA no estado fresco. Em seguida, foram moldados corpos de prova para avaliação das propriedades do CAA no estado endurecido.

5.4.1 PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO FRESCO

Para avaliação e classificação do concreto no estado fresco, foram realizados os seguintes ensaios: determinação do espalhamento e do tempo de escoamento; determinação da habilidade passante pelo método do anel “J”; determinação da habilidade passante pelo método da caixa “L”; determinação da viscosidade pelo método do funil “V” e determinação da resistência à segregação pelo método da coluna de segregação. Os ensaios foram realizados de acordo com as respectivas normas.

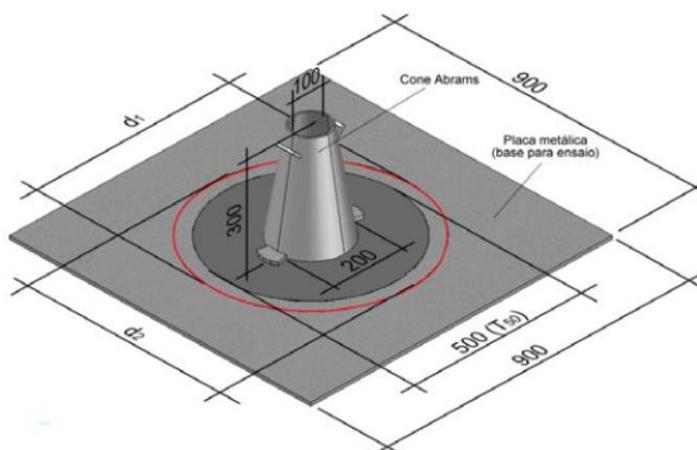
5.4.1.1 DETERMINAÇÃO DO ESPALHAMENTO E DO TEMPO DE ESCOAMENTO – MÉTODO DO CONE DE ABRAMS

O ensaio para determinação do espalhamento e tempo de escoamento foi realizado de acordo com a NBR 15823-2:2017 (ABNT, 2017). Por meio do *slump flow test*, busca-se verificar a capacidade de preenchimento do concreto autoadensável em fluxo livre, sob a ação de seu peso próprio, empregando-se o cone de Abrams. Desta forma, este ensaio é utilizado para medir a capacidade de fluir sem ocorrer segregação (GOMES; BARROS, 2009).

Para realização do ensaio, o cone de Abrams deve ser posicionado no centro de uma placa de base metálica ou de madeira, plana e rígida, conforme Figura 5.7, e posteriormente ser completamente preenchido com o CAA sem a realização de

adensamento e de forma contínua e uniforme. Levanta-se o cone com velocidade não superior a 4 segundos. Imediatamente após o molde perder o contato com a placa-base, o cronômetro deve ser acionado e parado quando o concreto atingir a marca circular de 500 mm, registrando-se o intervalo de tempo em segundos (t_{500}). Assim que o concreto parar de se mover, mede-se o seu espalhamento, por meio da média aritmética de duas determinações perpendiculares dos diâmetros do CAA.

Figura 5.7 - Ensaio de espalhamento e tempo de escoamento (*Slump-flow test*)



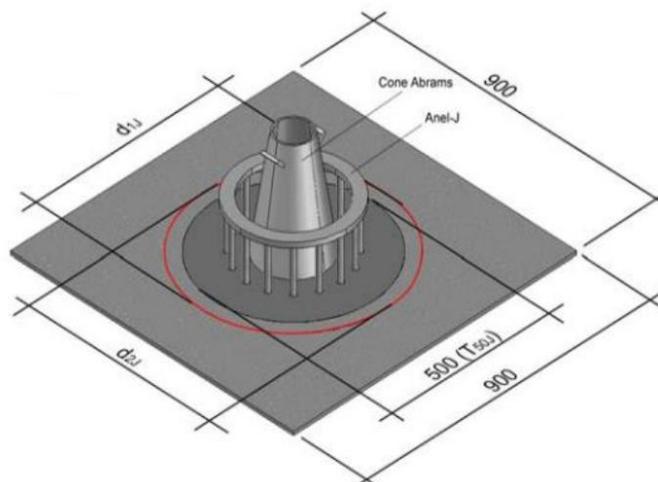
Fonte: Barros (2009).

5.4.1.2 DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE – MÉTODO DO ANEL J

O ensaio do anel J foi realizado de acordo com a NBR 15823-3:2017 (ABNT, 2017). Por meio deste ensaio, busca-se apresentar parâmetros de extensão do fluxo do concreto, tempo de escoamento e obstrução à passagem do concreto pelas barras do anel J (GOMES; BARROS, 2009).

O equipamento consiste em um anel metálico com 300 mm de diâmetro e 120 mm de altura com barras dispostas em seu perímetro com distância apropriada à dimensão máxima do agregado graúdo. Para a execução do ensaio, segue-se o mesmo procedimento do ensaio de espalhamento, acrescentando o anel J, posicionado no centro da base, que ficará em torno do cone de Abrams, conforme exemplificado na Figura 5.8. Tendo cessado o espalhamento, deve-se determinar o diâmetro final atingido pelo concreto, obtido por meio da média aritmética de duas medidas realizadas em direções perpendiculares. A determinação da classe do concreto neste ensaio é obtida avaliando a diferença entre o diâmetro médio do espalhamento obtido no ensaio de espalhamento previsto na NBR 15823-2:2017 (ABNT, 2017), sem o anel J.

Figura 5.8 - Ensaio do anel-J (*J-Ring test*)



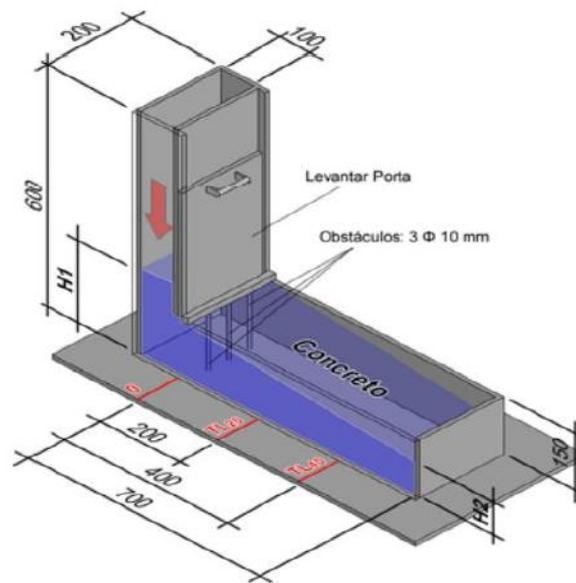
Fonte: Barros (2009).

5.4.1.3 DETERMINAÇÃO DA HABILIDADE PASSANTE – MÉTODO DA CAIXA L

O ensaio para determinação da habilidade passante pelo método da caixa “L” foi executado conforme a NBR 15823-4:2017 (ABNT, 2017). O ensaio da caixa L mede a fluidez do CAA e sob a força de seu peso próprio, verificando-se a capacidade de passar por obstáculos, como por exemplo, armaduras e nos espaços entre as armaduras e paredes das formas, sem que ocorram bloqueios e permanecendo coeso (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Para a realização do ensaio, a caixa “L” deve ser fixada em solo firme e nivelado. A amostra de CAA é despejada, sem adensamento e de forma uniforme, no compartimento vertical da caixa “L” até esta ser totalmente preenchida. Após 30 a 60 segundos, tempo necessário para verificar se a amostra apresenta algum sinal de segregação, deve-se ser efetuada a abertura da porta de forma rápida, uniforme e sem interrupção, permitindo o concreto escoar da parte vertical para o horizontal da caixa “L”. Cessado o escoamento, deve-se medir as alturas H1 e H2 do concreto. A altura H1 é medida junto à porta de contenção e a H2 na extremidade final do compartimento horizontal. A habilidade passante (HP) é a relação entre a altura do concreto no trecho horizontal (H2) e a altura do concreto que permaneceu no trecho vertical (H1) da caixa “L”. A Figura 5.9 apresenta as dimensões e especificações da caixa “L”.

Figura 5.9 - Ensaio da caixa-L (*L-Box test*)



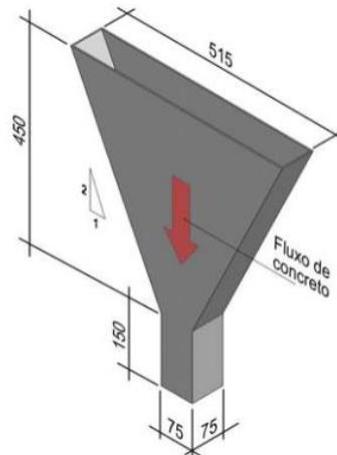
Fonte: Barros (2009).

5.4.1.4 DETERMINAÇÃO DA VISCOSIDADE – MÉTODO DO FUNIL V

O ensaio para determinação da viscosidade pelo método do funil “V” foi executado conforme a NBR 15823-5:2017 (ABNT, 2017). O ensaio do *V-funnel test* tem por objetivo avaliar a capacidade do CAA escoar e passar por estreitamentos apenas sob a ação de seu peso próprio. Além disso, este ensaio também é utilizado para verificar a presença de segregação, quando o concreto é impedido de escorrer pela saída do funil (GOMES; BARROS, 2009).

Para realização do ensaio o funil “V” é posicionado verticalmente em uma superfície plana e regular, com a abertura superior nivelada horizontalmente. O funil deve ser totalmente preenchido com a amostra de CAA, de aproximadamente 10 litros, sem adensamento e sem interrupção. A abertura da extremidade inferior do funil deve ocorrer em um tempo não superior a 30 segundos e assim que abrir é disparado o cronômetro, permitindo que a amostra escoe unicamente sob a ação da gravidade. O tempo que o concreto leva para esvaziar do funil é o resultado do ensaio, sendo denominado tempo de fluxo do ensaio do funil-V. A Figura 5.10 apresenta as características do funil “V”.

Figura 5.10 - Ensaio do funil-V (V-funnel test)



Fonte: Barros (2009).

5.4.1.5 DETERMINAÇÃO DA RESISTÊNCIA À SEGREGAÇÃO – MÉTODO DA COLUNA DE SEGREGAÇÃO

O ensaio para determinação da resistência à segregação foi realizado conforme a NBR 15823-6:2017 (ABNT, 2017). O ensaio consiste na determinação da resistência à segregação do CAA pela diferença das massas de agregado graúdo no topo e na base da coluna de segregação.

Para execução do ensaio a coluna de segregação, que possui três partes conforme Figura 5.11, deve ser apoiada em superfície rígida e plana, de maneira a permitir a colocação do CAA. A coluna deve ser completamente preenchida com a amostra sem adensamento, de forma uniforme e sem interrupção, com tempo de preenchimento inferior a 5 minutos.

Aproximadamente 20 minutos após a moldagem retiram-se as porções de concreto do topo e da base da coluna com o auxílio de uma chapa metálica, que deve ser colocada entre a união das seções do tubo, a fim de facilitar a extração. Em seguida, as partes devem ser lavadas em uma peneira com abertura de malha de 5 mm, de forma a ficar retido na peneira apenas os agregados graúdos. Os agregados graúdos são submetidos a uma secagem superficial e pesados, obtendo-se as massas m_B e m_T para cada amostra. Feito isso, é possível calcular a porcentagem de segregação utilizando a equação:

$$SR = \frac{2(m_B - m_T)}{m_B + m_T} 100 \quad \text{Equação (7)}$$

Onde:

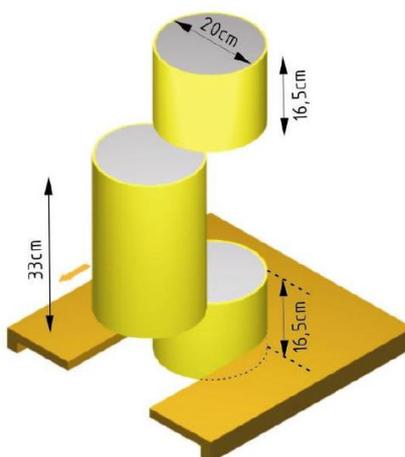
SR é a resistência à segregação do concreto, expressa em porcentagem (%);

m_B é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retida da base da coluna, expressa em gramas (g);

m_T é a massa do agregado graúdo obtido na porção de concreto retida da topo da coluna, expressa em gramas (g);

Caso m_B seja maior ou igual a m_T , a segregação é nula.

Figura 5.11 - Coluna de segregação



Fonte: Alencar (2008).

Após a realização dos ensaios no concreto fresco, as misturas serão classificadas de acordo com o desempenho apresentando mediante os parâmetros definidos pela norma NBR 15823-1:2017 (ABNT, 2017), conforme apresentado na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 – Classificação do CAA no estado fresco

Ensaio	Classes		Método de ensaio
Espalhamento (mm)	SF 1	550 a 650	NBR 15823-2:2017
	SF 2	660 a 750	
	SF 3	760 a 850	
t_{500} (s)	VS 1	≤ 2	
	VS 2	> 2	
Índice de estabilidade visual	IEV 0	Sem evidência de segregação ou exsudação	
	IEV 1	Sem evidência de segregação e leve exsudação	
	IEV 2	Presença de pequena auréola de argamassa (≤ 10 mm) e/ou empilhamento de agregados no centro do concreto	
	IEV 3	Segregação claramente evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto ou pela dispersão de argamassa nas extremidades (auréola de argamassa > 10 mm)	
Anel J (mm)	PJ 1	0 a 25 com 16 barras de aço	NBR 15823-3:2017
	PJ 2	25 a 50 com 16 barras de aço	
Caixa L (H2/H1)	PL 1	$\geq 0,80$ com duas barras de aço	NBR 15823-4:2017
	PL 2	$\geq 0,80$ com três barras de aço	
Funil V (s)	VF 1	< 9	NBR 15823-5:2017
	VF 2	9 a 25	
Coluna de segregação (%)	SR 1	≤ 20	NBR 15823-6:2017
	SR 2	≤ 15	

Fonte: NBR 15823-1:2017 (ABNT, 2017).

5.4.2 PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO ENDURECIDO

Para avaliação do desempenho mecânico dos concretos, foram realizados os seguintes ensaios: resistência à compressão; resistência à tração por compressão diametral; módulo de elasticidade; absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica.

5.4.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL

O ensaio de resistência à compressão axial em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm, foi realizado aos 3 dias, 7 dias, e 28 dias, segundo a norma NBR 5739:2007 (ABNT, 2007). Foram rompidos 3 corpos de prova para cada idade, sendo considerada a média dos resultados.

5.4.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

O ensaio para determinação da resistência à tração por compressão diametral foi realizado em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm, para a idade de 28 dias, conforme a norma NBR 7222:2011 (ABNT, 2011). Foram rompidos 3 corpos de prova, sendo considerada a média dos resultados.

5.4.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

O módulo de elasticidade do concreto foi avaliado na idade de 28 dias de acordo com a norma NBR 8522:2008 (ABNT, 2008). Seguiu-se a metodologia A da referida norma, que consiste em manter fixa a tensão inicial de 0,5 MPa (σ_a) e uma tensão σ_b que corresponde a 30% da tensão de ruptura (f_c) obtida pelo ensaio de resistência à compressão. Para tanto, foram ensaiados 3 corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm, sendo considerado o módulo de elasticidade a média das determinações.

5.4.2.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA

Os ensaios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica foram realizados em corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm x 200 mm, na idade de 28 dias, de acordo com a NBR 9778:2009 (ABNT, 2009). Foram ensaiados 3 corpos de prova, sendo considerada a média dos resultados.

5.4.3 ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos para determinação das propriedades físicas e mecânicas dos concretos foram verificados pelo método da ANOVA e do teste t de Student com o objetivo de analisar estatisticamente os resultados.

A ANOVA (análise de variância) testa a hipótese de que as médias de duas ou mais populações são iguais. Tem como objetivo avaliar se as diferenças encontradas entre as médias de determinadas amostras são estatisticamente significativas, ou seja, avaliar a importância de um ou mais fatores e comparar as médias de variáveis de respostas nos diferentes níveis de fator. No teste existem duas hipóteses, a hipótese nula H_0 e a hipótese alternativa H_1 . A hipótese nula afirma que todas as médias de população (médias de nível de fator) são iguais, enquanto a hipótese alternativa afirma que pelo menos uma é diferente. O teste é realizado sob a hipótese nula e desta forma, cabe rejeitar ou aceitar o valor da hipótese nula, sendo que, a aceitação ou rejeição depende da distribuição F de Snedecor e do valor F crítico (MORETTI, 2014).

A análise foi realizada com o auxílio do EXCEL, onde ao selecionar os dados a serem analisados, gera uma tabela conforme modelo apresentado na Tabela 5.3.

Tabela 5.3 - Tabela gerada para análise de ANOVA

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX	XXXX
Dentro dos grupos	XXXX	XXXX	XXXX			
Total	XXXX	XXXX				

Sendo que:

SQ = soma dos quadrados;

gl = grau de liberdade;

MQ = quadrado médio;

F = valor calculado para o teste F;

valor-P = maior valor de nível de significância α que rejeita H_0

F crítico = é o valor tabelado do teste F para a fonte de variação.

Para as análises foi utilizado o nível de significância de $\alpha = 5\%$, sendo que a hipótese nula é aceita se o $F \leq F$ crítico; caso contrário, a hipótese nula é rejeitada. Se isto acontecer, conclui-se que existe diferença entre as médias e para encontrar entre quais populações há essa diferença deve-se realizar outro teste de hipótese (MORETTI, 2014).

Neste estudo, optou-se por realizar o teste t de Student, sendo testadas as hipóteses H_0 ($\mu_i = \mu_j$) e H_a ($\mu_i \neq \mu_j$). Neste teste são analisadas somente duas populações e, desta forma,

é necessário realizar várias combinações para verificar todas as populações. Utilizando a ANOVA verifica-se se há diferença entre os resultados dos traços, se a hipótese nula for rejeitada, significa que há diferença significativa, indicando ser necessário verificar entre quais traços ocorreu essa diferença.

O teste t Student foi realizado com o auxílio do EXCEL, onde ao selecionar os dados a serem analisados, gera uma tabela conforme modelo apresentado na Tabela 5.4.

Tabela 5.4 - Tabela gerada para o teste t Student

	<i>POPULAÇÃO 1</i>	<i>POPULAÇÃO 2</i>
Média	XXXXX	XXXXX
Variância	XXXXX	XXXXX
Observações	XXXXX	XXXXX
Variância agrupada	XXXXX	
Hipótese da diferença de média	XXXXX	
gl (graus de liberdade)	XXXXX	
Stat t	XXXXX	
P(T<=t) uni-caudal	XXXXX	
t crítico uni-caudal	XXXXX	
P(T<=t) bi-caudal	XXXXX	
t crítico bi-caudal	XXXXX	

Para as análises foi utilizado o nível de significância de $\alpha = 5\%$, sendo que para aceitar ou rejeitar a hipótese nula é necessário verificar os resultados de Stat t e t crítico bi-caudal. O Stat t é o valor calculado para as populações analisadas e o valor do t crítico bi-caudal é o valor de t encontrado na tabela t-Student. A hipótese nula é aceita se Stat t < t crítico bi-caudal, caso contrário, a hipótese nula é rejeitada e admite-se a hipótese alternativa (DEVORE, 2006).

6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos a partir dos procedimentos experimentais descritos no capítulo 5.

Os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados são apresentados no Apêndice A e o estudo de dosagem para obtenção do concreto de referência no Apêndice B.

Os ensaios realizados tiveram como objetivo analisar a influência da substituição parcial de agregados naturais por agregados reciclados sobre as propriedades do concreto tanto em seu estado fresco, por meio de ensaios para avaliação da autoadensabilidade, quanto no estado endurecido, por meio de ensaios para avaliação das propriedades mecânicas e físicas.

6.1 DOSAGEM DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS

6.1.1 DETERMINAÇÃO DO CAA REFERÊNCIA

Conforme apresentado no item 5.3 deste trabalho, adotou-se a metodologia de dosagem proposta por Alencar e Helene (2008) para o desenvolvimento do traço do concreto de referência, cujas etapas para obtenção, são apresentadas de maneira detalhada no Apêndice B.

Resumidamente, as etapas para obtenção do traço médio do CAA consistem em utilizar teores crescentes de argamassa e aditivo superplastificante, até que se obtenha uma mistura que apresente a trabalhabilidade desejada, viscosidade, estabilidade (ausência de segregação) obtida por meio da coesão entre os materiais.

A Figura 6.1 apresenta parte das etapas para obtenção do traço médio ($m=4$).

Figura 6.1 - Etapas para obtenção do CAA referência: primeira tentativa (a), segunda tentativa (b), traço final - referência (c)



A partir da obtenção da dosagem do CAA referência foi possível determinar a proporção dos materiais constituintes da mistura, para o traço médio ($m=4$), conforme apresentado nas tabelas 6.1 e 6.2.

Tabela 6.1 - Proporção dos materiais constituintes do concreto de referência

Material	Quantidade
Cimento - C (kg/m ³)	421
Fíler Calcário - FC (kg/m ³)	62
AMN MF 1,07 (kg/m ³)	441
AMN MF 2,47 (kg/m ³)	441
AGN MF 5,42 (kg/m ³)	738
Água (kg/m ³)	211
Aditivo superplastificante - SP (kg/m ³)	8,0
Relação A/C	0,50
FC/C (%)	14,7
FC/AM (%)	7,0
SP/C (%)	1,9
Teor de argamassa (%)	65

Nota:

AMN: Agregado miúdo natural

AGN: Agregado graúdo natural

Tabela 6.2 - Traço unitário

Concreto	m	Cimento	Fíler calcário	AMN MF 1,07	AMN MF 2,47	AGN MF 5,42	A/C
AN REF	4	1	0,15	1,05	1,05	1,75	0,50

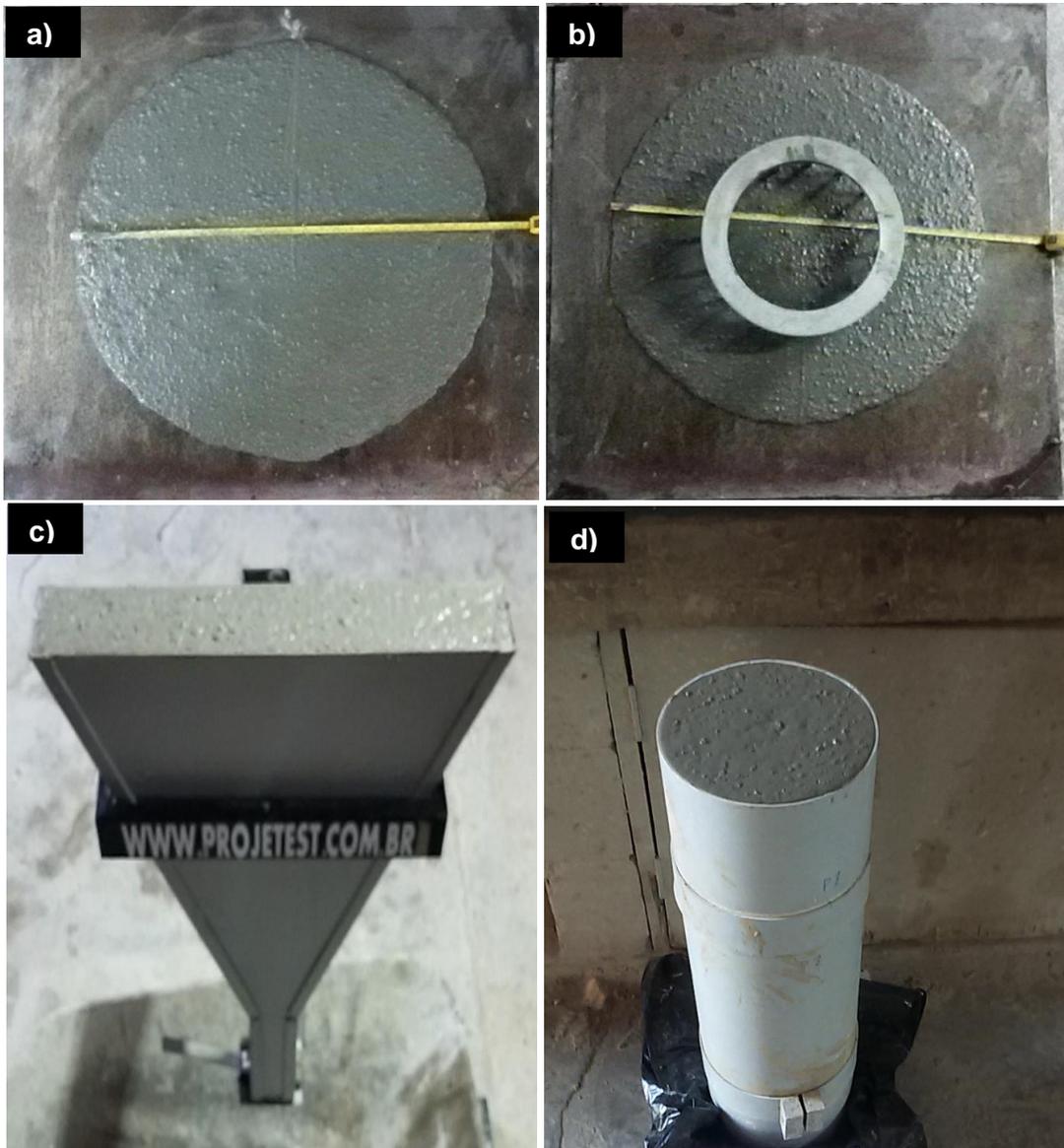
O traço do CAA referência foi submetido a ensaios para avaliação e classificação no estado fresco, cujos resultados são apresentados a Tabela 6.3.

Tabela 6.3 – Classificação do concreto no estado fresco

Ensaio	Resultado obtido	Classificação NBR 15823-1
Espalhamento (mm)	720	SF 2
T 500 (s)	1,91	VS 1
Índice de estabilidade visual	Sem evidência de segregação ou exsudação	IEV 0
Anel J (mm)	0	PJ 1
Caixa L (H2/H1)	0,94	PL 1
Funil V (s)	3,88	VF 1
Coluna de segregação (%)	10,96	SR 2

A Figura 6.2 apresenta parte dos ensaios realizados para caracterização e classificação do concreto de referência no estado fresco.

Figura 6.2 – Caracterização do CAA no estado fresco: espalhamento (a), anel J (b), funil V (c) e coluna de segregação (d)



6.1.2 DOSAGEM DOS CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS

A partir da determinação do CAA de referência, efetuou-se a substituição parcial dos agregados naturais por reciclados. Nesta etapa foi realizada a compensação do volume em função da massa específica dos materiais, bem como o acréscimo de água na mistura para compensar a absorção dos agregados reciclados, conforme apresentado na Tabela 6.4.

A perda de fluidez ocasionada pela inclusão dos agregados reciclados nos concretos foi corrigida com o acréscimo de aditivo superplastificante nas misturas, cujo parâmetro para ajuste foi a obtenção do espalhamento no intervalo da classe de espalhamento SF2 (660 a 750 mm).

Tabela 6.4 – Composição e parâmetros dos concretos estudados

Material	AN REF	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
Cimento (kg/m ³)	421,0	421,0	421,0	421,0	421,0	421,0
Fíler calcário (kg/m ³)	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0	62,0
AMN MF 1,07 (kg/m ³)	441,0	441,0	441,0	441,0	441,0	441,0
AMN MF 2,47 (kg/m ³)	441,0	441,0	441,0	441,0	176,4	-
AMR MF 2,86 (kg/m ³)	-	-	-	-	252,4	441
AGN MF 5,42 (kg/m ³)	738,0	516,6	369,0	-	738,0	738,0
AGR MF 5,18 (kg/m ³)	-	200,9	334,8	669,7	-	-
Água amassamento (kg/m ³)	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0	211,0
Água absorção (kg/m ³)	-	9,2	15,3	33,7	12,4	20,6
Aditivo (kg/m ³)	8,0	8,4	8,4	9,3	9,3	10,1
A/C amassamento	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50	0,50
A/C amassamento + ABS	0,50	0,52	0,54	0,57	0,56	0,60
FC/C (%)	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7	14,7
FC/AM (%)	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
SP/C (%)	1,9	2,0	2,0	2,2	2,2	2,4
Teor de argamassa (%)	64,9	65,5	66,0	67,1	64,8	64,7

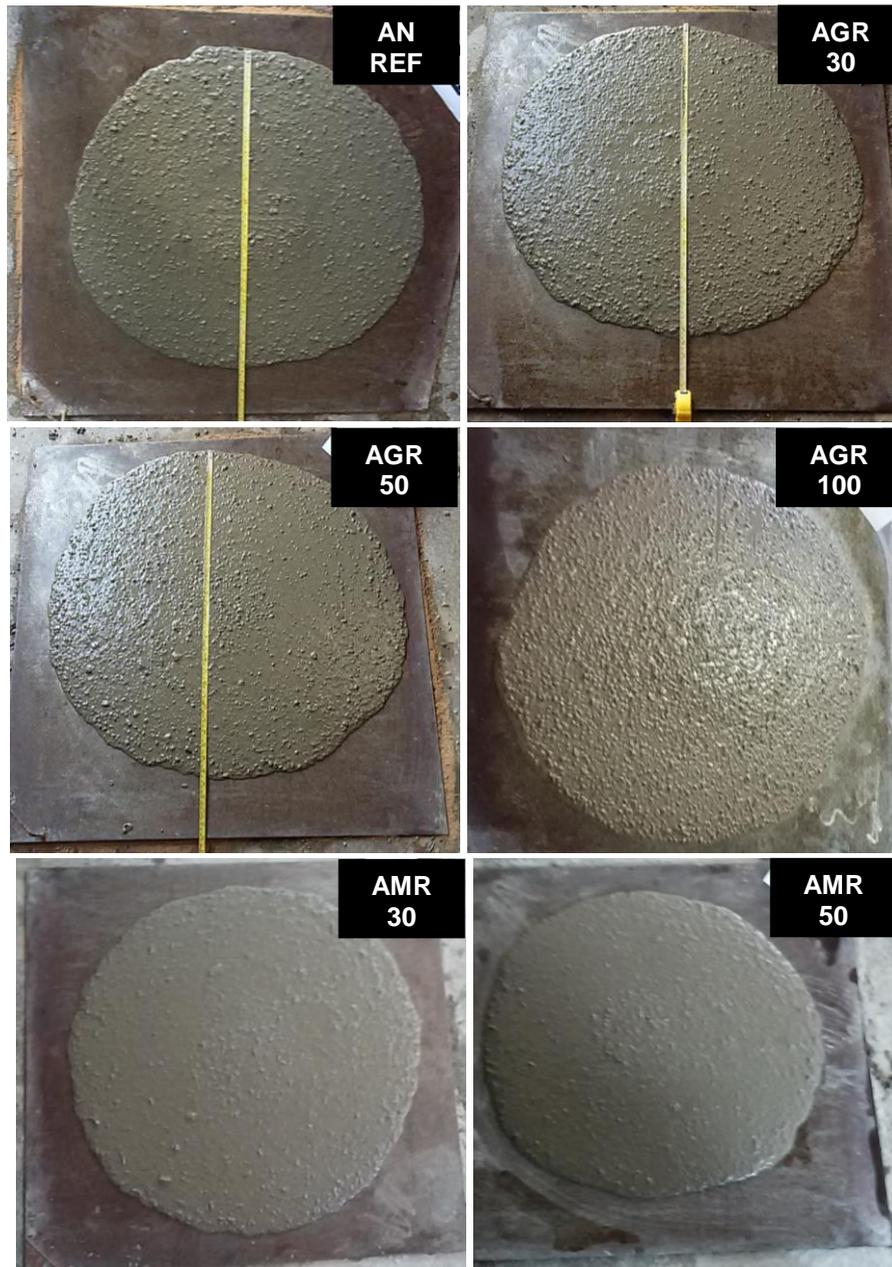
Os concretos foram submetidos aos ensaios para avaliação das propriedades no estado fresco, conforme apresentado na Tabela 6.5. O traço AMR 50 não atingiu o valor mínimo de 0,80 para o ensaio da caixa L, mas obteve resultados satisfatórios nos demais parâmetros. Ressalta-se que o resultado obtido no ensaio da caixa L (AMR 50) foi para o equipamento com três barras. Contudo, em função do resultado do ensaio do anel J, deveria ter sido utilizado um equipamento com duas barras, não sendo possível pela indisponibilidade do mesmo.

Tabela 6.5 - Avaliação da propriedades no estado fresco

Traço	Espalhamento (mm)	T 500 (s)	Índice de estabilidade visual	Anel J (mm)	Caixa L (H2/H1)	Funil V (s)	Coluna de segregação (%)
AN REF	720	1,91	Sem evidência de segregação ou exsudação	0	0,94	3,88	10,96
AGR 30	740	1,14	Sem evidência de segregação ou exsudação	20	0,94	3,40	11,82
AGR 50	745	1,05	Sem evidência de segregação ou exsudação	15	0,97	3,59	9,12
AGR 100	730	1,31	Sem evidência de segregação ou exsudação	45	0,80	4,41	9,21
AMR 30	750	1,09	Sem evidência de segregação ou exsudação	5	1,00	3,47	1,60
AMR 50	715	1,06	Sem evidência de segregação ou exsudação	40	0,62	5,72	0,77

O índice de estabilidade visual foi determinado imediatamente após o término do espalhamento do concreto, conforme a NBR 15823-2:2017 (ABNT, 2017), sendo determinado visualmente pela análise do concreto. Para esta análise observou-se a distribuição dos agregados graúdos na mistura, a distribuição da argamassa ao longo do perímetro e a ocorrência de exsudação, conforme apresentado na Figura 6.3.

Figura 6.3 - Índice de estabilidade visual



Todos o traços foram enquadrados na classe *IEV 0*, pois não houve evidência de segregação ou exsudação.

6.2 DESEMPENHO MECÂNICO DOS CONCRETOS

Neste item são apresentados os resultados obtidos nos ensaios realizados para determinação das propriedades mecânicas e físicas dos concretos estudados.

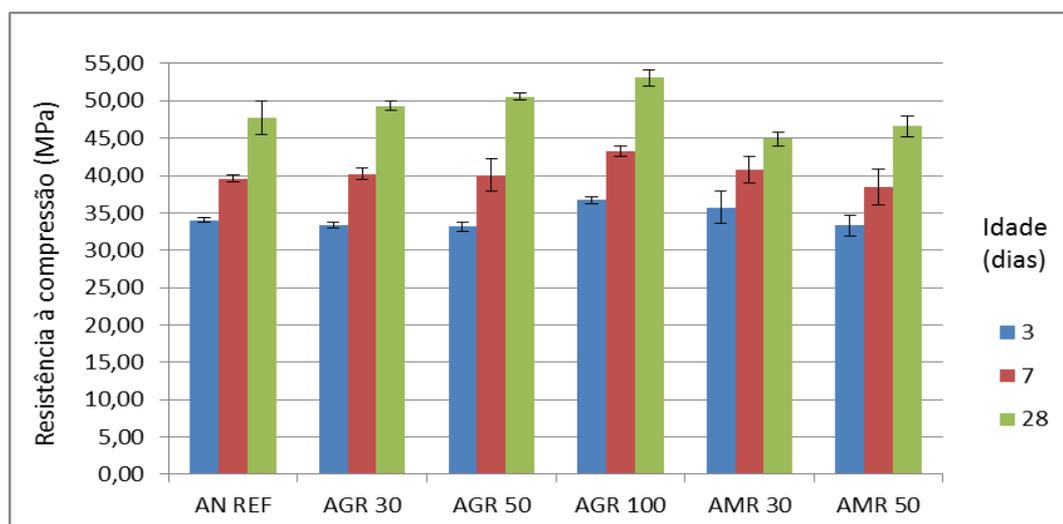
6.2.1 RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO

Os resultados do ensaio de resistência à compressão dos concretos aos 3, 7 e 28 dias, bem como o desvio padrão (DP) são apresentados na Tabela 6.6. Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados são apresentados no Apêndice C. O gráfico com a evolução da resistência à compressão com o tempo é apresentando na Figura 6.4.

Tabela 6.6 - Resistência à compressão do concretos estudados

Concreto	Resistência à compressão (MPa)					
	3 dias		7 dias		28 dias	
	Média	DP	Média	DP	Média	DP
AN REF	34,03	0,33	39,61	0,51	47,74	2,27
AGR 30	33,33	0,43	40,22	0,72	49,35	0,60
AGR 50	33,16	0,63	40,07	2,10	50,56	0,44
AGR 100	36,70	0,45	43,24	0,75	53,08	1,04
AMR 30	35,74	2,16	40,76	1,82	44,88	0,87
AMR 50	33,31	1,41	38,51	2,42	46,61	1,42

Figura 6.4 - Resistência à compressão dos concretos estudados



Os concretos AGR 30, AGR 50 e AGR 100 apresentaram valores médios de resistência à compressão aos 28 dias superiores ao do concreto AN REF, da ordem de 3,4% (AGR 30), 5,9% (AGR 50) e 11,2% (AGR 100). Já os concretos AMR 30 e AMR 50 apresentaram resultados inferiores ao concreto de referência. Para estes traços, houve uma redução da resistência à compressão de 6,0% e 2,4%, respectivamente.

Para verificar estatisticamente se houve diferença entre as resistências médias dos traços apresentados, foi realizado o teste ANOVA. Como o valor de F foi maior que F crítico pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre as médias das amostras. Para verificar quais traços apresentam estas diferenças, aplicou-se o teste t de Student.

Por meio da análise realizada é possível constatar que o traço AGR 100 apresentou valor de $\text{Stat } t > t$ crítico bi-caudal. Ou seja, os resultados de resistência à compressão deste traço são significativos para a análise e a hipótese nula (médias iguais) é rejeitada.

Pode-se afirmar que os valores médios de resistência à compressão aos 28 dias para os traços AGR 30, AGR 50, AMR 30 e AMR 50 são estatisticamente equivalentes ao valor médio de resistência do concreto de referência. Assim, constatou-se por meio da análise estatística que a utilização de 30% e 50% de agregado graúdo reciclado (traços AGR 30 e AGR 50) e 30% e 50% de agregado miúdo reciclado (traços AMR 30 e AMR 50) não interferiu significativamente na resistência à compressão do concreto aos 28 dias. Já a utilização de 100% de agregado graúdo reciclado (AGR 100) resultou no aumento significativo da resistência à compressão, quando comparado ao concreto de referência.

De acordo com Tang *et al.* (2016), existem várias razões que podem possibilitar o aumento da resistência à compressão, dentre elas pode-se destacar: o agregado reciclado possui maior rugosidade superficial, possibilitando uma melhor aderência com a pasta de cimento; o elevado teor de absorção de água pode reduzir a relação água/cimento na matriz cimentícia, elevando a resistência de aderência entre os agregados e a pasta. No referido trabalho, foram obtidos resultados de resistência à compressão dos concretos com agregados reciclados, superiores ao concreto de referência até o teor de 75% de substituição, sendo que o teor de 100% de substituição apresentou resultado inferior ao concreto de referência. Os agregados utilizados permaneceram imersos em água por 24 horas e foram secos ao ar por 1 hora antes de serem utilizados na mistura.

Modani e Mohitkar (2014), em seus estudos, observaram que traços contendo agregado reciclado podem obter resistências iniciais elevadas, em função da presença de cimento parcialmente hidratado aderido ao agregado, o que potencializa o processo de hidratação. Os agregados foram imersos em água por 24 horas e secos ao ar antes de serem utilizados.

O estudo desenvolvido por Salesa *et al.* (2017) mostra que os concretos produzidos com agregados graúdos reciclados de resíduos de concreto pré-fabricado apresentaram resistência superior ao concreto de referência da ordem de 13,8% com o teor de 100% de agregado graúdo reciclado. Este resultado é devido à alta qualidade dos agregados reciclados e a presença de cimento não hidratado nos mesmos.

Outro fator relevante para a obtenção de resistências elevadas para concretos com agregados reciclados, é apresentado por Fakitsas *et al.* (2012). No estudo, os autores utilizaram o agregado graúdo reciclado saturado (imerso em água por 3 dias e utilizado na condição saturado superfície seca). Os concretos produzidos obtiveram ganho de resistência à compressão de 4% aos 28 dias e 7,6% aos 90 dias, fato explicado pelo autor devido a um possível processo de cura interna. De maneira semelhante, Neville (2015) menciona que a cura interna é promovida devido à saturação do agregado antes da mistura, o que pode ser favorável.

Já Manzi, Mazzotti e Bignozzi (2017) concluíram que quanto maior a quantidade de agregados reciclados na mistura, maior a resistência à compressão do concreto autoadensável. Ao comparar a resistência à compressão dos concretos verificou-se que a presença dos agregados reciclados (graúdo e miúdo) não desempenha papel prejudicial na resistência à compressão, uma vez que ocorreu o ganho de resistência da ordem de 3,7% para o concreto com teor de 25% de agregado reciclado e 17 % para o concreto com teor de 40% de agregado reciclado, na idade de 28 dias. Estes resultados podem estar relacionados a uma boa aderência entre a nova argamassa e a argamassa já aderida nos agregados reciclados e também pela qualidade dos mesmos.

De acordo com Hani *et al.* (2018), estes resultados também podem ser explicados devido ao uso do aditivo superplastificante modificado com nanosílica, já que a nanosílica pode melhorar a microestrutura da pasta de cimento, por meio do preenchimento dos vazios pela nanosílica, tornando a microestrutura mais densa (efeito fíler). Além disso, a reação pozolânica de nanopartículas com $\text{Ca}(\text{OH})_2$ livre é produzida durante a hidratação do cimento, formando mais gel de C-S-H, resultando na melhora das propriedades mecânicas.

Em seu estudo Nolli Filho (2015) constatou que a resistência à compressão do concreto com o uso de aditivo superplastificante contendo nanosílica estabilizada apresentou resultados superiores ao concreto de referência para todas as idades (7, 14 e 28 dias). O concreto obteve o acréscimo na resistência à compressão da ordem de: 12,6% aos 7 dias; 13,3% aos 14 dias e 11,9% aos 28 dias, em relação ao traço de referência. A partir dos resultados encontrados, o autor destaca que há um efeito benéfico da adição da nanosílica, devido aos seus efeitos físico e químico (reações pozolânicas), aumentando a resistência à compressão do concreto.

O estudo desenvolvido por Maghsoudi, Maghsoudi, e Noori (2010) analisou o efeito da adição de nanosílica coloidal em suspensão e sílica ativa como adição em concretos autoadensáveis. Os resultados mostraram que a utilização da nanosílica e sílica ativa podem melhorar as propriedades mecânicas do concreto autoadensável. Contudo, observou-se que os concretos com a nanosílica atingiram resistência à compressão

superiores ao concreto de referência, bem como o concreto com sílica ativa. Acredita-se que as nanopartículas são mais eficazes na reação pozolânica do que a sílica ativa, além de preencherem os poros do concreto.

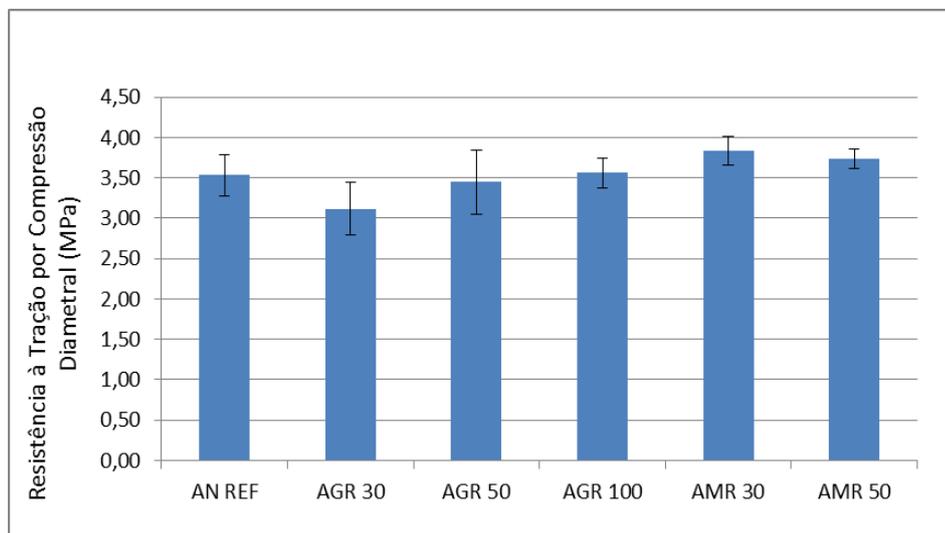
6.2.2 RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL

Os resultados do ensaio de tração por compressão diametral para os concretos aos 28 dias são apresentados na Tabela 6.7 e representados pela Figura 6.5. Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados são apresentados no Apêndice D.

Tabela 6.7 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias

Concreto	Resistência à tração por compressão diametral (MPa)	
	28 dias	
	Média	DP
AN REF	3,53	0,25
AGR 30	3,12	0,32
AGR 50	3,45	0,40
AGR 100	3,56	0,18
AMR 30	3,84	0,17
AMR 50	3,73	0,12

Figura 6.5 - Resistência à tração por compressão diametral dos concretos aos 28 dias



Os valores obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral indicaram uma relação de 6 a 9% da resistência à compressão. Segundo Mehta e Monteiro (2014), para concretos convencionais a relação entre a resistência à tração e a resistência à compressão é de 8 a 9%.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.7 foi realizada a análise de variância para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de tração por compressão diametral para os concretos estudados.

Como o valor de F foi menor que F crítico pode-se afirmar que não existem diferenças significativas entre as médias das amostras, tornando-se desnecessário aplicar o teste t de Student. Ou seja, os resultados de resistência à tração por compressão diametral não são significativos para a análise e a hipótese de que as médias são iguais é aceita.

Percebe-se que não há uma tendência clara de aumento ou redução da resistência à tração por compressão diametral em função do teor de substituição de agregados reciclados na mistura. Este comportamento também pôde ser observado no estudo realizado por Manzi, Mazzotti e Bignozzi (2017), cujos resultados apresentaram uma relação de 5 a 8% da resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão.

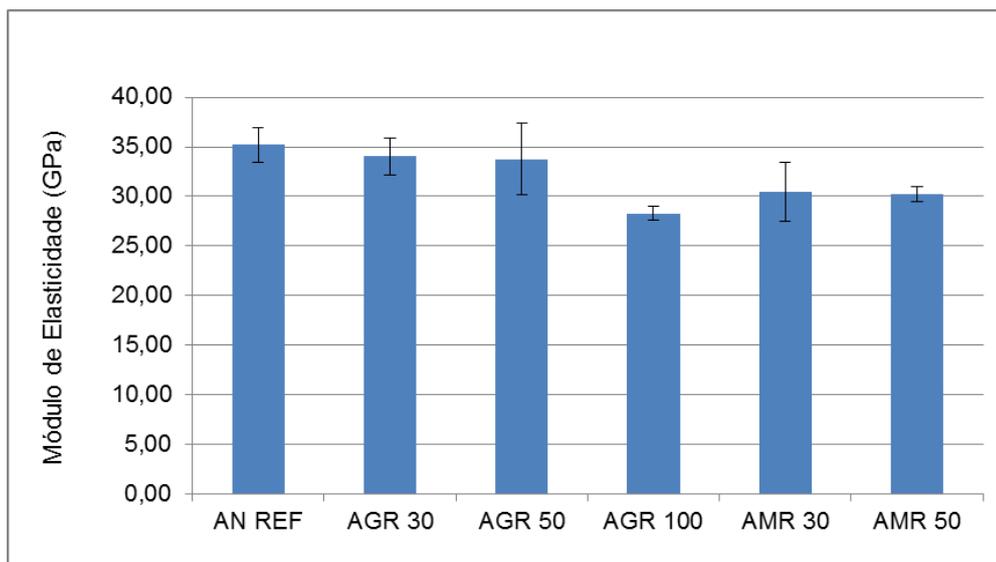
Da mesma forma, Tang *et al.* (2016) encontraram uma relação de 6 a 8% da resistência à tração por compressão diametral e resistência à compressão. Ressalta-se que também não ocorreu uma linearidade entre os teores de substituição e os resultados obtidos de resistência à tração por compressão diametral. Para o teor de substituição de 25% de agregado graúdo reciclado ocorreu um ganho de 19,5%, para o teor de 50% de agregado graúdo reciclado obteve-se o mesmo resultado do concreto de referência. Já para os teores de 75% e 100% de substituição ocorreu a redução de 4,9% e 7,3%, respectivamente.

6.2.3 MÓDULO DE ELASTICIDADE

Os resultados do ensaio de módulo de elasticidade para os concretos aos 28 dias, bem como o desvio padrão (DP) são apresentados na Tabela 6.8 e representados pela Figura 6.6. Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados são apresentados no Apêndice E.

Tabela 6.8 - Módulo de elasticidade aos 28 dias

Concreto	Módulo de elasticidade (GPa)	
	28 dias	
	Média	DP
AN REF	35,19	1,73
AGR 30	34,03	1,84
AGR 50	33,77	3,62
AGR 100	28,30	0,71
AMR 30	30,44	2,99
AMR 50	30,20	0,78

Figura 6.6 - Módulo de elasticidade aos 28 dias

Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram valores médios de módulo de elasticidade inferiores ao concreto de referência, de forma decrescente, ou seja, quanto maior a porcentagem de substituição menor foi o valor do módulo de elasticidade. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados reduziu o módulo de elasticidade dos concretos em 3,3% (AGR 30), 4,0% (AGR 50) e 19,6% (AGR 100) e para os agregados miúdos em 13,5% (AMR 30) e 14,2% (AMR 50). Este comportamento já era esperado devido à maior porosidade e menor rigidez do agregado reciclado.

A partir dos resultados apresentados na Tabela 6.8 foi realizada a análise de variância para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de módulo de elasticidade para os traços.

Como o valor de F foi maior que F crítico pode-se afirmar que existem diferenças significativas entre as médias das amostras. Para verificar quais traços apresentam estas diferenças, aplicou-se o teste t de Student.

Por meio da análise realizada foi possível constatar que os traços AGR 100 e AMR 50 apresentaram valor de Stat $t > t$ crítico bi-caudal. Ou seja, os resultados do módulo de elasticidade destes traços são significativos para a análise e a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada.

Apesar do traço AMR 50 ter sido considerado como significativo para a análise, percebe-se que numericamente o resultado deste traço é semelhante ao AMR 30, que foi considerado como não significativo, isso se dá pelo fato de o traço AMR 30 ter apresentado maior desvio padrão em relação ao traço AMR 50 e por isso o teste t de Student não apontou

diferença significativa entre o valor médio do traço AMR 30 quando comparado ao traço de referência. De acordo com Volpato e Barreto (2016), em situações como esta deve-se aumentar a amostragem até obter coerência entre o que se vê e o que a estatística diz. Neste caso não foi possível, devido à quantidade de corpos de prova destinados para este ensaio.

Uma das principais características que afetam o módulo de elasticidade do concreto é a porosidade do agregado graúdo, pois quanto maior a porosidade, menor é a sua rigidez e capacidade de restringir a deformação da matriz. Outra característica importante é a densidade, pois geralmente agregados densos possuem um alto módulo de elasticidade (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

O estudo realizado por Tang *et al.* (2016) mostra que apesar de terem sido obtidos resultados de resistência à compressão, para os traços com agregado reciclado, superiores ao concreto de referência, os resultados do ensaio de módulo de elasticidade foram decrescendo à medida que aumentava-se o teor de agregados reciclados na mistura, até o valor de 22,2% para o concreto com 100% de agregado reciclado.

De forma semelhante, Salesa *et al.* (2017) mostraram que apesar do aumento da resistência à compressão para o concreto com o teor de 100% de agregado reciclado, houve redução de 17,2% no resultado do ensaio de módulo de elasticidade, que pode ter sido ocasionado devido à presença de argamassa aderida na superfície dos agregados reciclados, também pela maior porosidade do agregado reciclado, reduzindo a capacidade de deformabilidade do concreto.

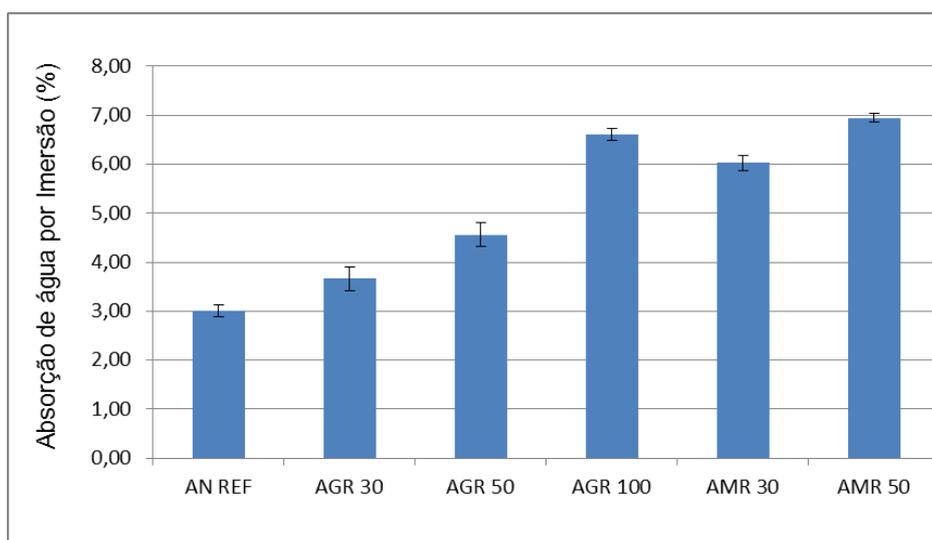
De acordo com Santos, Silva e Brito (2017) a substituição dos agregados graúdos e miúdos naturais por reciclados promoveu a redução do módulo de elasticidade do concreto e este reduziu à medida que aumentou o teor de incorporação do agregado miúdo reciclado, explicada pela sua menor rigidez e maior deformabilidade.

6.2.4 ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO

Os resultados obtidos no ensaio de absorção de água por imersão para os concretos aos 28 dias são apresentados na Tabela 6.9 e representados pela Figura 6.7. Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados são apresentados no Apêndice F.

Tabela 6.9 - Absorção de água por imersão dos concretos estudados

Concreto	Absorção de água por imersão (%)	
	28 dias	
	Média	DP
AN REF	3,02	0,12
AGR 30	3,66	0,25
AGR 50	4,56	0,24
AGR 100	6,61	0,12
AMR 30	6,02	0,15
AMR 50	6,95	0,08

Figura 6.7 - Absorção de água de água por imersão dos concretos estudados

Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram absorção de água por imersão superior ao concreto de referência, de forma crescente, ou seja, quanto maior a porcentagem de substituição maior foi o valor da absorção de água por imersão. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados elevou a absorção de água por imersão dos concretos em 21% (AGR 30), 51% (AGR 50), 119% (AGR 100), e para os agregados miúdos reciclados em 100% (AMR 30) e 130% (AMR 50), quando comparados ao concreto de referência. Cabe ressaltar que apesar do elevado crescimento da absorção de água por imersão para os concretos com agregados reciclados, todos os resultados obtidos são inferiores a 7% em massa, sendo que para Neville (2015), a maioria dos bons concretos tem absorção de água menor do que 10% em massa.

A análise de variância foi realizada para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios de absorção de água por imersão para os traços. O resultado indicou que houve diferença significativa entre as médias das amostras. Assim, foi aplicado o teste t de Student para verificar quais traços apresentaram essa diferença.

O test t de Student indicou que os valores para absorção de água por imersão de todos os traços com substituição do agregado natural pelo reciclado apresentaram diferença em relação ao concreto de referência, pois os valores de Stat t obtidos foram superiores ao t crítico bi-caudal. Assim, a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada.

Apesar da maior absorção de água por imersão observada para os traços com a substituição do agregado natural pelo reciclado, os valores de resistência à compressão dos concretos AGR 30, AGR 50 e AGR 100 foram superiores ao concreto de referência. Este comportamento também pode ser observado na pesquisa realizada por Salesa *et al.* (2017), cujos resultados de absorção de água por imersão foram maiores à medida que utilizou-se agregados graúdos reciclados com maior taxa de absorção. Apesar disso não houve impacto negativo na resistência à compressão; pelo contrário, esta foi maior para todos os traços com agregado reciclado, quando comparada com o concreto de referência.

De forma semelhante, a pesquisa realizada por Malešev, Radonjanin e Marinković (2010) apresenta resultados de absorção de água por imersão crescentes à medida que foi aumentando o teor de agregado reciclado na mistura, o que não impactou negativamente na resistência à compressão do concreto, uma vez que os traços com agregados reciclados atingiram valores de resistência à compressão superior ao concreto de referência. Ressalta-se que a referida pesquisa trabalhou com concreto convencional.

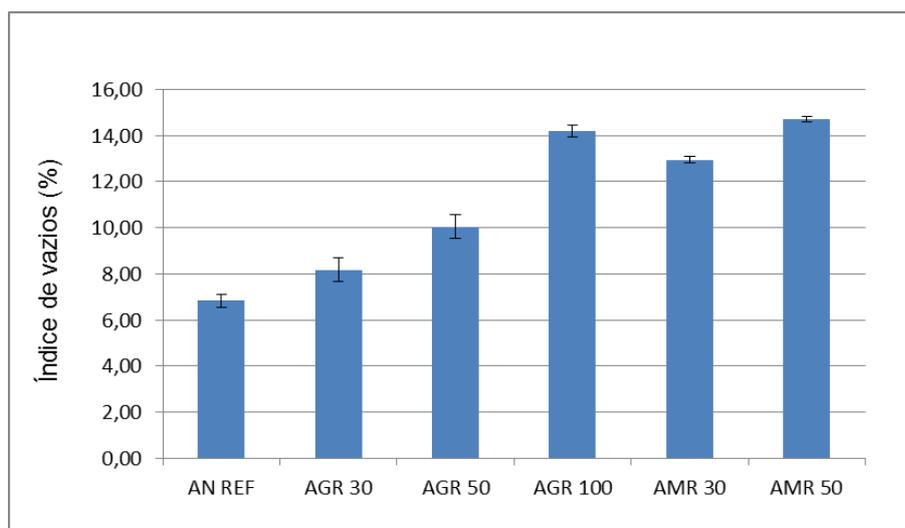
Tendo em vista os resultados obtidos e os dados encontrados na literatura, deve-se realizar novos ensaios para comprovação deste comportamento, analisando também a microestrutura do concreto.

6.2.5 ÍNDICE DE VAZIOS

Os resultados obtidos na determinação do índice de vazios para os concretos aos 28 dias são apresentados na Tabela 6.10 e representados pela Figura 6.8. Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados são apresentados no Apêndice G.

Tabela 6.10 - Índice de vazios dos concretos estudados

Concreto	Índice de vazios (%)	
	28 dias	
	Média	DP
AN REF	6,82	0,26
AGR 30	8,16	0,51
AGR 50	10,05	0,50
AGR 100	14,20	0,25
AMR 30	12,95	0,14
AMR 50	14,70	0,13

Figura 6.8 - Índice de vazios

Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram valores médios de índice de vazios superiores ao concreto de referência, de forma crescente, ou seja, quanto maior a porcentagem de substituição, maior foi o valor do índice de vazios, semelhante ao observado para a absorção de água por imersão. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados elevou o índice de vazios dos concretos, em comparação ao concreto de referência, em 20% (AGR 30), 47% (AGR 50), 108% (AGR 100), e para os agregados miúdos em 90% (AMR 30) e 115% (AMR 50). Cabe ressaltar que, apesar do elevado crescimento do índice de vazios para os concretos com agregados reciclados, todos os resultados obtidos de índice de vazios são inferiores a 15%, conforme apresentado na Tabela 6.10.

Foi realizada a análise de variância para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios do índice de vazios para os traços. O resultado indicou que houve diferença significativa entre as médias das amostras. Assim, foi aplicado o teste t de Student para verificar quais traços apresentaram essa diferença.

O teste t de Student indicou que os valores para o índice de vazios de todos os traços com substituição do agregado natural pelo reciclado apresentaram diferença significativa em relação ao concreto de referência, pois os valores de Stat t obtidos foram superiores ao t crítico bi-caudal. Assim, a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada.

Apesar de serem observados maiores resultados para o índice de vazios dos concretos com a substituição do agregado natural pelo reciclado, os valores de resistência à compressão dos concretos AGR 30, AGR 50 e AGR 100 foram superiores ao concreto de referência.

De acordo com a norma NBR 9778:2009 (ABNT, 2009), o índice de vazios é a relação entre o volume de poros permeáveis e o volume total da amostra. Dessa forma, percebe-se que quanto maior for o resultado de absorção de água por imersão dos concretos, maior o índice de vazios, e que este cresceu à medida que aumentou o teor de agregados reciclados na mistura.

Resultados semelhantes foram encontrados por Moreira (2012) que estudou concretos autoadensáveis com agregados graúdos reciclados nos teores de 10%, 20% e 30% de substituição. O autor obteve resultado de índice de vazios para o teor de 30% de substituição superior ao concreto de referência em 23% e resultado individual de índice de vazios de até 16,07%, mesmo assim apresentou ganho de resistência à compressão na idade de 28 dias de 9,9% quando comparado com o concreto de referência.

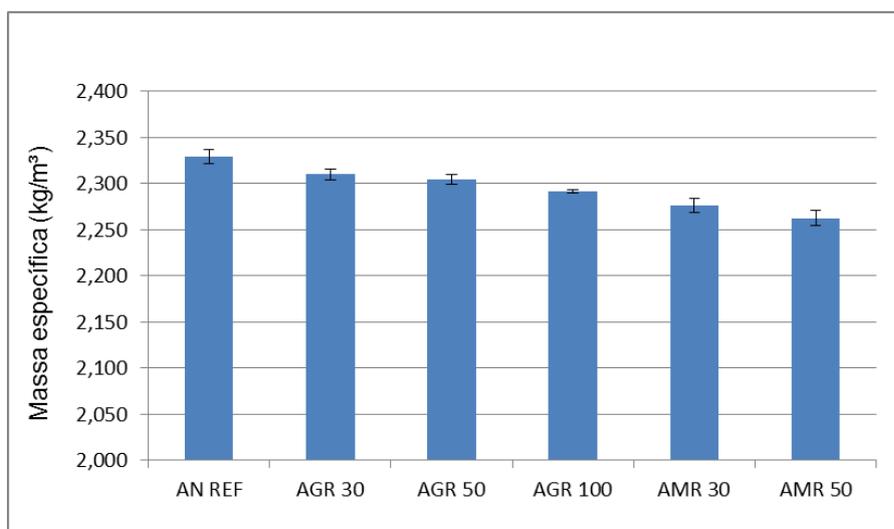
A pesquisa realizada por Silva *et al.* (2016) apresenta resultados de índice de vazios de até 17,58% para o teor de substituição de 100% de agregados graúdos reciclados.

Tendo em vista os resultados obtidos e os dados encontrados na literatura, deve-se realizar novos ensaios para comprovação deste comportamento, analisando também a microestrutura do concreto.

6.2.6 MASSA ESPECÍFICA

Os resultados obtidos no ensaio de determinação da massa específica para os concretos aos 28 dias são representados pela Figura 6.9. Os valores individuais obtidos, bem como a análise estatística dos resultados são apresentados no Apêndice H.

Figura 6.9 - Massa específica



Os traços com a incorporação de agregados reciclados apresentaram valores médios de massa específica inferior ao concreto de referência, de forma decrescente, ou seja, quanto maior a porcentagem de substituição, menor foi o valor de massa específica dos concretos. Este comportamento já era esperado, pois o agregado reciclado possui menor massa específica que o agregado natural. Pode-se observar que a incorporação dos agregados graúdos reciclados reduziu a massa específica dos concretos em 0,8% (AGR 30), 1,1% (AGR 50), 1,6% (AGR 100), e para os agregados miúdos em 2,3% (AMR 30) e 2,9% (AMR 50), em comparação ao concreto de referência.

Foi realizada a análise de variância para verificar se houve diferença significativa entre os valores médios da massa específica para os traços. O resultado indicou que houve diferença significativa entre as médias das amostras. Assim, foi aplicado o teste t de Student para verificar quais traços apresentaram essa diferença.

O teste t de Student indicou que os valores para massa específica de todos os traços com substituição do agregado natural pelo reciclado apresentaram diferenças significativas em relação ao concreto de referência, pois os valores de Stat t obtidos foram superiores ao t crítico bi-caudal. Assim, a hipótese de que as médias são iguais é rejeitada.

Cabe salientar que todos os traços produzidos com agregados reciclados apresentaram resultados de massa específica inferiores ao concreto de referência. O agregado reciclado possui menor massa específica que o agregado natural e, além disso, como foi realizada a compensação do volume deste agregado na mistura, pode-se inferir que a substituição do agregado natural pelo reciclado acarretou na redução da massa específica dos concretos.

De acordo com Salesa *et al.* (2017) os concretos com agregados reciclados apresentam resultados de massa específica inferior aos concretos com agregados naturais, pois os agregados reciclados tem menor densidade que os agregados naturais.

Segundo Grdic *et al.* (2010) o aumento do teor de agregados reciclados na mistura reduz a massa específica do concreto, que é uma consequência esperada em função do aumento da porosidade. O autor obteve redução de 2,12% para a substituição de 50% e 3,4% para a substituição de 100% do agregado graúdo reciclado.

Para Santos, Silva e Brito (2017) a massa específica dos concretos diminuiu com o aumento do teor de agregados na mistura, devido a sua menor densidade. Em relação ao concreto de referência, a mistura com 100% de agregado miúdo reciclado foi a que apresentou o menor resultado de massa específica na ordem de 5%.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este capítulo apresenta as conclusões do trabalho, bem como sugestões para pesquisas futuras, visando aprimorar os conhecimentos para a produção de concretos autoadensáveis com a utilização de agregados reciclados.

7.1 CONCLUSÕES

Por meio do presente estudo, pode-se constatar que a incorporação de agregados reciclados (graúdo e miúdo) provenientes de resíduos da construção civil, mostra-se como uma alternativa para a produção de concretos autoadensáveis.

Tendo em vista os resultados obtidos, pode-se concluir que:

- Os agregados reciclados comprometeram a fluidez e trabalhabilidade dos concretos autoadensáveis estudados, mesmo realizando a pré-molhagem. A perda de fluidez e trabalhabilidade ocasionada pelos agregados reciclados nos concretos podem ser corrigidas com o incremento de aditivo superplastificante nas misturas;
- Ao comparar com o concreto de referência, os concretos autoadensáveis com agregado graúdo reciclado AGR 30 e AGR 50 apresentaram ganho de resistência à compressão de 3,4% e 5,9%, respectivamente. Já os concretos AMR 30 e AMR 50, apresentaram redução da resistência à compressão em 6,0% e 2,4%, respectivamente. Para estes concretos não foram observadas diferenças estatisticamente significativas na resistência à compressão aos 28 dias. Quanto ao traço AGR 100, houve um aumento na resistência à compressão de 11,2%, sendo este traço considerado significativo para a análise estatística. Isso se dá pelo fato do agregado reciclado possuir maior rugosidade superficial, possibilitando uma melhor aderência entre os agregados e a pasta de cimento; a presença de cimento parcialmente hidratado já aderido ao agregado reciclado, que potencializa o processo de hidratação; à alta qualidade dos agregados reciclados e ao aditivo superplastificante com incorporação de nanosílica estabilizada que pode melhorar a microestrutura da pasta de cimento, por meio do preenchimento dos vazios pela nanosílica, tornando a microestrutura mais densa (efeito fíler);
- Os ensaios de resistência à tração por compressão diametral mostram que não ocorreu uma linearidade entre os teores de substituição e os resultados obtidos. Os

resultados médios foram considerados estatisticamente iguais, apresentando uma relação de 6 a 9% da resistência à compressão;

- O módulo de elasticidade decresceu à medida que aumentou o teor de agregados reciclados na mistura. Ocorreu redução do módulo de elasticidade dos concretos com agregados graúdos reciclados em 3,3% (AGR 30), 4,0% (AGR 50) e 19,6% (AGR 100) e para os concretos com agregados miúdos em 13,5% (AMR 30) e 14,2% (AMR 50). Os agregados reciclados são menos densos que os agregados naturais e a densidade do agregado é uma das principais características que afetam o módulo de elasticidade do concreto;
- O aumento na absorção de água por imersão observado nos concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados está relacionado com a maior capacidade de absorção de água destes agregados, em comparação com os agregados naturais. Os resultados obtidos foram de 3,02% (AN REF), 3,66% (AGR 30), 4,56% (AGR 50), 6,61 (AGR 100), 6,02% (AMR 30) e 6,95% (AMR 50);
- O aumento do índice de vazios observado nos concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados é inerente à porosidade do concreto. Os resultados obtidos foram de 6,82% (AN REF), 8,16% (AGR 30), 10,05% (AGR 50), 14,20% (AGR 100), 12,95% (AMR 30) e 14,70 (AMR 50);
- Todos os traços produzidos com agregados reciclados apresentaram valores de massa específica inferiores ao concreto de referência. Isso se deve ao fato do agregado reciclado possuir menor massa específica que o agregado natural e, além disso, foi realizada a compensação do volume deste agregado na mistura. Pode-se inferir que a substituição do agregado natural pelo reciclado acarretou na redução da massa específica dos concretos. Quando comparado ao concreto de referência, os concretos com agregados graúdos reciclados apresentaram redução de massa específica em 0,8% (AGR 30), 1,1% (AGR 50) e 1,6% (AGR 100) e para os concretos com agregados miúdos reciclados, de 2,3% (AMR 30) e 2,9% (AMR 50).

7.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para contribuir na análise de viabilidade da utilização de agregados reciclados de RCC em concretos autoadensáveis, lista-se algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Estudar a lixiviação nos agregados reciclados e nos concretos produzidos com esse material;
- Avaliar a durabilidade de concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados de RCC;

- Avaliar a retração e fluência de concretos autoadensáveis produzidos com agregados reciclados de RCC;
- Verificar a influência da forma e da textura dos agregados reciclados nas propriedades reológicas dos concretos autoadensáveis;
- Avaliar outros métodos de dosagem, buscando a alternativa mais adequada em função das propriedades requeridas na aplicação do concreto autoadensável;
- Demonstrar a viabilidade econômica e social na utilização dos agregados reciclados de RCC para a construção de habitações de interesse social.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDEL-HAY, A. S. **Properties of recycled concrete aggregate under diferente curing conditions.** Housing and building national research center, 2015.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** 2014.

ABRELPE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil.** 2016.

AGOPYAN, V.; SOUZA, U. E. L.; PALIARI, J. C.; ANDRADE, A. C. **Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras: relatório final.** São Paulo: EPUSP/PCC, 1998. v. 1-5. (Pesquisas Alternativas para a redução do desperdício de materiais nos canteiros de obras).

ALENCAR, R. S.A. **Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados.** Dissertação (Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de engenharia de construção civil, 2008.

ALENCAR, R. S.A; HELENE, P. R. L. *Diseño de la mezcla del hormigón autocompactante por el método brasileño. In: 1er Congreso Español sobre Hormigón Autocompactante.* Valencia, p. 257-266, 2008.

ALMEIDA FILHO, F. M.. **Contribuição ao estudo da aderência entre barras de aço e concretos auto-adensáveis.** Tese de doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2006.

ÂNGULO, S.C. **Variabilidade de agregados graúdos reciclados de resíduos de construção e demolição reciclados.** Dissertação (Mestrado), Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2000.

ANGULO, S. C. et al. **Utilização de Pilhas de Homogeneização para Controle de Agregados Miúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados** In: CONSTRUÇÃO 2001: por uma construção sustentável, 2001, Lisboa. Anais... Lisboa: Instituto Superior Técnico, 2001. p. 713- 720.

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

ÂNGULO, S. C.; FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com agregados reciclados.** In: ISAIA, G. C (Ed.). *Concreto: ciência e tecnologia.* São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 47.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA PARA RESICLAGEM DE RESÍDUOS DA CONSTRUÇÃO CIVIL E DEMOLIÇÃO - ABRECON Disponível: <<http://www.abrecon.org.br/index.php/pesquisa-setorial/>> Acesso em: 20 de Janeiro de 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM 26:** Agregados - Amostragem. Rio de Janeiro 2009.

_____. **NBR NM 27:** Agregados – Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório. Rio de Janeiro 2000.

_____. **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 53:** Agregado Graúdo - Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro 2009.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro 2009.

_____. **NBR NM 248:** Agregados – Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro 2003.

_____. **NBR 5732:** Cimento Portland Comum. Rio de Janeiro 1991.

_____. **NBR 5738:** Moldagem e cura de corpos-de-prova cilíndricos ou prismáticos de concreto. Rio de Janeiro 2015.

_____. **NBR 5739:** Concreto – Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro 2007.

_____. **NBR 7211:** Agregados para concreto - Especificação. Rio de Janeiro 2009.

_____. **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro 2011.

_____. **NBR 8522:** Concreto – Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão. Rio de Janeiro 2017.

_____. **NBR 9775:** Agregado miúdo – determinação do teor de umidade superficial por meio do frasco de Chapman – Método de ensaio. Rio de Janeiro 2011.

_____. **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro 2005.

_____. **NBR 9935.** Agregados – Terminologia. Rio de Janeiro, 2011.

_____. **NBR 10005:** Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólido. Rio de Janeiro 2004.

_____. **NBR 11768:** Aditivos Químicos para Concreto de Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro 2010.

_____. **NBR 12655:** Concreto de Cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - procedimento. Rio de Janeiro 2015.

_____. **NBR 12821:** Preparação de concreto em laboratório - Procedimento. Rio de Janeiro 2009.

_____. **NBR 15112.** Resíduos da construção civil e resíduos volumosos - áreas de transbordo e triagem - diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15113.** Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes - aterros - diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15114.** Resíduos sólidos da construção civil - áreas de reciclagem - diretrizes para projeto, implantação e operação. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15115.** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil - execução de camadas de pavimentação - procedimentos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15116.** Agregados reciclados de resíduos sólidos da construção civil- Utilização em pavimentação e preparo de concreto sem função estrutural – Requisitos. Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 15823-1:** Concreto auto-adensável Parte 1 – Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro 2017.

_____. **NBR 15823-2:** Concreto auto-adensável Parte 2 – Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento – Método do cone de Abrans. Rio de Janeiro 2017.

_____. **NBR 15823-3:** Concreto auto-adensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-4:** Concreto auto-adensável Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-5:** Concreto auto-adensável Parte 5: Determinação da viscosidade Método do funil V. Rio de Janeiro, 2017.

_____. **NBR 15823-6:** Concreto auto-adensável Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2017.

ALENCAR, R. S.A. **Dosagem do concreto autoadensável: produção de pré-fabricados.** Dissertação (Mestrado). São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia de Construção Civil, 2008.

ASSUNÇÃO, J. W. **Concreto leve autoadensável: avaliação da influência da argila expandida no processo de dosagem e nas propriedades do concreto.** Tese (Doutorado). Instituto de Arquitetura e Urbanismo da Universidade de São Paulo, São Carlos-SP, 2016.

BARRA, M. **Dosagem de concretos com agregados reciclados: aspectos particulares.** In: **Reciclagem na construção civil, alternativa econômica para proteção ambiental.** 1997, São Paulo. Anais São Paulo: PUC-USP, 1997, p. 39 -43.

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

BAUER, L. A. F. **Materiais de construção.** v. 1. 5 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2010.

BAZUCO, R.S. **Utilização de agregados reciclados de concreto para a produção de novos concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.

BORGNAKKE; C.; SONNTAG; R. E.; VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da termodinâmica clássica**. 4 ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.

BRANCO, P. R. **Utilização de resíduos de concreto em concreto auto-adensável**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira-SP, 2012.

BRASIL. Lei n. 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Política Nacional de Resíduos Sólidos**. – 3. ed., reimpr. – Brasília: Câmara dos Deputados, Edições Câmara, 2017 80 p. – (Série legislação ; n. 229. ISBN 978-85-402-0496-6 .

BRASIL. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília - DF, 2012.

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

CAMPOS, R. S. **Concreto autoadensável produzido com resíduos de construção e demolição: propriedades mecânicas e reológicas**. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Sistemas de Infraestrutura Urbana) - Pontifícia Universidade Católica de Campinas, Campinas-SP, 2017.

CAVALCANTI, D. J. H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação (Mestrado). Departamento de Engenharia Estrutural – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CARNEIRO, A. P.; QUADROS, B. E.C.; OLIVEIRA, A. M. V.; BRUM. I.A.S.; SAMPAIO, T.S.; ALBERTE, E. PP. V.; COSTA, D.B. Características do entulho e do agregado reciclado. In: **Reciclagem de entulho para a produção de materiais de construção** / Organizado por Alex Pires Carneiro, Irineu Antônio Schadach de Brum e José Clodoaldo da Silva Cassa: EDUFBA; 312 p.; 2001; p. 144 -187.

CARRIJO, P. M. **Análise da influência da massa específica dos agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil – Construção Civil e Urbana). Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.

CINCOTTO, A. **Utilização de subprodutos e resíduos na indústria da construção civil**. A Construção, São Paulo: PINI, n 1855, p. 27-30, ago, 1983.

CONAMA, Resolução nº. 307, de 05 de julho de 2002. **Diretrizes e processamentos para gestão dos resíduos de construção**. Brasília: MMA/CONAMA 2002.

COUTINHO, S.B. **Propriedades e comportamento estrutural do concreto auto-adensável**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2011.

DEVORE, J. L. **Probabilidade e estatística para engenharia e ciências**: 6 ed. São Paulo: Cengage, 2006.

EFNARC (2002). **Specificacion and Guidelines for Self-Compacting Concrete**. 32 p. February, ISBN: 0-9539733-4-4.

EFNARC. (2005). **The European Guidelines for Self-Compacting Concrete; specification, production and use**. 63 p. May.

ENGELSEN, C.J.; VAN DER SLOOT, H. A.; WIBETOE, G.; JUSTNES, H.; LUND, W.; HANSSON, E. S. Leaching characterisation and geochemical modelling of minor and trace elements released from recycled concrete aggregates. **Cement and Concrete Research**, 2010.

FAKITSAS, C.G.; PAPAKONSTANTINO, P. E. A.; KIOUSIS, P. D.; SAWA, A. Effects of recycled concrete aggregates on the compressive and shear strength of high-strength self-consolidating concrete. **Journal of Materials in Civil Engineering**, 2012.

FHWA – FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION U.S DEPARTAMENT OF TRANSPORTATION. United States, 2004. **Transportation Applications of Recycled Concrete Aggregate**. FHWA Stages of the Praticce National Review September 2004.

GEYER, A. L. B.; RESENDE DE SÁ, R. **Concreto autoadensável: uma nova tecnologia à disposição da construção civil de Goiânia**. Informativo técnico Realmix, 2005.

GEIKER, M. R.; BRANDL, M.; THRANE, M. NIELSEN, L. F. (2002). On the effect of coarse aggregate fraction and shape on the rheological properties of self-compacting concrete. **Cemente, Concrete and Aggregates**, Vol. 24, No. 1, June 2002, pp. 3-6

GOMES, P.C.C. **Optmization and characterization of higt-strength self-compacting concrete**. Tese de Doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tecnica Superior D´ Enginyers de Camins, Canais i Ports de Barcelona, Barcelona, Spain, 2002.

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, 2003, São Paulo – Brasil.

GOMES, P.C.C.; BARROS, A.R.. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. 1 ed. São Paulo: PINI, 2009.

GOMES, P. C. C.; ALENCAR, T. F. F. de; SILVA, N. V. da; MORAES, K. A. de M.; ANGULO, S. C. Obtenção de concreto leve utilizando agregados reciclados. **Ambiente Construído**, Porto Alegre,v. 15, n. 3, p. 31-46, jul./set. 2015. ISSN 1678-8621 Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212015000300024>

GONÇALVES, R. D. C. **Agregados reciclados de resíduos de Concreto - um novo material para dosagens estruturais**. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos – Universidade de São Paulo, 2001.

GONÇALVES, P.C.M. **Concrete with recycled aggregates: Commented analysis of exististing legislation** (in Portuguese), Civil Engineering Master Thesis, Instituto Superior Técnico, Technical University of Lisbon, Lisbon, 2007.

GRABIEC, Anna M. "Influence of viscosity modifying agent on some rheological properties, segregation resistance and compressive strength of self-compacting concrete." **Journal of Civil Engineering and Management**, vol. 19, no. 1, 2013, p. 1

GRDIC, Z.J.; TOPLICIC-CURCIC, G. A.; DESPOTOVIC, I. M.; RISTIC, N. A. Properties of self-compacting concrete prepared with coarse recycled concrete aggregate. **Construction and Building Materials**, 2010.

HANEHARA, S.; YAMADA, K. Rheology and early age properties of cement systems. **Cement and Concrete Research**. No. 21, P 175-195, 2008.

HANI, N.; NAWAWY, O.; RAGAB, K. S.; Kohail, M. The effect of different water/binder ratio and nano-silica dosage on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**, p. 504-513, 2018.

HARTMANN, C. T.; HELENE, P. R. L. **Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinados a concretos de cimento Portland**. Boletim técnico da escola politécnica da USP, departamento de engenharia e construção civil, BT/PCC/330, São Paulo, 2003.

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

IPEA – INSTITUTO DE PESQUISA ECOCÔMICA APLICADA. **Diagnóstico dos resíduos sólidos da construção civil**. Brasília-DF, 2012.

JOHN, V. M. **Aproveitamento de resíduos sólidos como materiais de construção**. In: UFBA. (Org.). *Reciclagem de Entulho para a Produção de Materiais de Construção*. Salvador: CAIXA/EDUFBA, 2001, p. 26-45.

JOHN, V. M. **Reciclagem de resíduos na construção civil: contribuição para metodologia de pesquisa e desenvolvimento**. Tese (Livre Docência) - Departamento de Engenharia de Construção Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

KIOURANIS, A; Miranda, L.F.R; MELO NETO, A.A. **Agregados reciclados em concretos: Uma análise crítica das propriedades e classificações estabelecidas em diferentes normas**. Evento: XVI Encontro nacional de tecnologia do ambiente construído: Desafios e perspectivas da internacionalização da construção. São Paulo. 2016.

KHAYAT, K. H.; HU, C.; MONTY, H. **Stability of self-compacting concrete, advantages, and potential applications**. Edição: A. Skarendahl; O. Petersson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st, 1999, Stokholm. Proceedings... France: RILEM Publications, 1999. p. 143-152. Disponível em: <<https://books.google.com.br/books?id=D4Vn96zmWuwC&pg=PA143&img=PA143&dq=stability+of+selfconsolidating+concrete+advantages+and+potential+applications&source=bl&ots=drRYyJjGjV&sig=WVZg4sHkBaqlt5H0R6MXV5JleQ4&hl=ptBR&sa=X&sqi=2&ved=0ahUKEwjheXcj6nRAhXBg5AKHRZrAHEQ6AEIJAB#v=onepage&q=stability%20of%20selfconsolidating%20concrete%20advantages%20and%20potential%20applications&f=false>> Acesso em: jan. 2017.

LATTERZA, L. M., **Concreto com agregado graúdo proveniente da reciclagem de resíduos da construção civil – Um novo material para fabricação de painéis leves de vedação**. São Carlos. Dissertação (mestrado em Engenharia de Estruturas) – Escola de Engenharia de São Carlos, USP, Universidade de São Paulo, 1998.

LEITE, M. B. **Avaliação de propriedades mecânicas de concretos produzidos com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Tese (Doutorado) -

Escola de Engenharia, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LEVY, S. M. **Reciclagem do entulho de construção civil, para utilização como agregado de argamassas e concretos**. São Paulo. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 1997.

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

Li, L. G., Huang, Z. H., Zhu, J., Kwan, A. K. H., Chen, H. Y.: Synergistic effects of micro-silica and nano-silica on strength and microstructure of mortar. **Construction and Building Materials**, v. 140, p. 229-238. < <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.02.115>>

LIMA, J. A. R. **Proposição de diretores e elaboração de textos básicos para normalização de resíduo de construção reciclado e de suas aplicações em argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Arquitetura e Urbanismo) – Departamento de Arquitetura e Urbanismo, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidades de São Paulo, São Carlos, 1999.

LIMEIRA. **Plano Municipal de Gestão de Resíduos da Construção Civil (PMGRCC) do Município de Limeira (SP)**. Prefeitura Municipal de Limeira, Limeira – SP, 2015

LOVATO, S. P. **Verificação dos parâmetros de controle de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição para utilização em concreto**. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS, 2007.

LUZ, A. B.; SAMPAIO, J. A.; MONTE, M. B. M.; ALMEIDA, S. L. M. **Tratamento de Minérios**. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/ MCT, 2004.

MAGHSOUDI, A. A.; MAGHSOUDI, M.; NOORI, M. Effect of nano particles on SCC. **Sustainable Construction Materials and Technologies**. In: SECOND INTERNATIONAL CONFERENCE, Proceedings of Special Technical Sessions, 2010, Ancona, Anais: Milwaukee: UWM Center, 2010, p. 41-53.

MALEŠEV, M.; RADONJANIN, V.; MARINKOVIĆ, S. Recycled Concrete as Aggregate for Structural Concrete Production. **Sustainability** 2010, 2, 1204-1225.

MANZI, S.; MAZZOTTI, C.; BIAGNOZZI, M. C. Self-compacting concrete with recycled concrete aggregate: tudy of the long-term properties. **Construction and building materials**, p. 582-590, 2017.

MARQUES NETO, J.C. **Gestão de resíduos de construção e demolição no Brasil**. São Carlos: Editora RiMa, 2005, 162 p.

MÁLIA, B. A. M. **Indicadores de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado). Instituto Superior Técnico – Universidade Técnica de Lisboa, 2010.

MARIA, E. H. C. P.; SIMONE, V. S. **Reaproveitamento dos entulhos de concreto na construção de casas populares**. Evento: XXVIII Encontro nacional de engenharia de produção. Rio de Janeiro – RJ. 2008.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MELO, A.V.S. **Diretrizes para a produção de agregado reciclado em usinas de reciclagem de resíduos da construção civil**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2011.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MINDESS, S., YOUNG, J.F., DARWIN, D., 2003. **Concrete**. 2nd edition, Prentice Hall, Pearson Education, Upper Saddle River, New Jersey, United States of America.

MODANI, P. O.; MOHITKAR, V. M. Recycled aggregate self-compacting concrete. **International journal of modern trends in engineering and research**, 2014.

MOREIRA, K. M. V. **Concreto autoadensável com agregados graúdos reciclados de concreto**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Estruturas e Construção Civil, Fortaleza, 2012.

MORETTI, J. P. **Estudo de viabilidade técnica da utilização da ACBC e do RCC na composição de concretos**. São Carlos: UFSCAR. Dissertação (Mestrado em Estruturas e Construção Civil), Programa de Pós-Graduação em Estruturas e Construção Civil, Universidade Federal de São Carlos, 2014.

MOURET, M.; ESCADEILHAS, G.; BASCOUL, A. Metrological significance of the column test in the assessment of the static segregation of self-compacting concrete in the fresh state. **Materials and Structures**, vol. 41, p. 663-679, 2008.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5 ed. São Paulo: PINI, 2015.

NOLI FILHO, P. R. **Propriedades mecânicas do concreto de alto desempenho com adição de nanosílica estabilizada**. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: Tecnologia e propriedades**. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia – Universidade do Porto, 2001.

OFFERMANN, E.H. **O futuro da reciclagem de entulho de construção** (Tradução). Hochschuljournal Essen, n. 52, 1987.

OKAMURA, H. Self-Compacting High-Performance Concrete. **International Concrete**, v. 19, n. 7, 1997, p. 50-54.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. (1998). Self-compacting high performance concrete. **Progress in Structural Engineering and Materials**, Vol. 4, 1998, p. 378-383.

OKAMURA, H.; OZAWA, K.; OUCHI, M. (2000). Self-compacting concrete. **Structural Concrete**, Vol. 1, No. 1, March, 2000, p. 3-17.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. (2003). Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology**, Vol. 1, No. 1, April, 2003, p. 5-15.

OLIVEIRA, L. A. P.; NEPOMUCENO, M.; RANGEL, M. An eco-friendly self-compacting concrete with recycled coarse aggregates. **Informes de la construcción**, vol. 65, extra-1, p. 31-41, ISSN 0020-0883, 2013.

PEDROZO, E. F. R. **Influência da substituição do agregado miúdo natural por agregado reciclado fino em propriedades de argamassas e concretos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis-SC, 2008.

PINTO, T. P. P. **Utilização de Resíduos de Construção: estudo do uso em argamassas**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1986.

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

PINTO, Tarcísio de P; GONZÁLES, Juan L.R. (coord.). **Manejo e gestão dos resíduos da construção civil**. Brasília: CAIXA, 2005.

PIOVEZAN JÚNIOR, G. T.A. **Avaliação dos resíduos da construção civil (RCC) gerados no município de Santa Maria**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria). Rio Grande do Sul, 2007.

PMSP/SP ETS – 001/2003. **Camadas de reforço de subleito, sub-base e base mista de pavimento com agregado reciclado de resíduos sólidos da construção civil**. PMSP – Prefeitura do município de São Paulo, São Paulo, 2003.

RAO, A.; JHA, K. N.; MISRA, S. Use of aggregates from recycled construction and demolition waste in concrete. **Resources, Conservation and Recycling**, No. 50, p. 71-81, 2007.

RAO, G. A.; PRASAD, B. K. R. (2002). Influence of the roughness of aggregate surface on the interface bond strength. **Cement and Concrete Research**, vol. 32, p. 253-257

RONCERO, J. **Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states**: Implications for high performance concretes. 2000. 189 p. Tese – Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

SANTOS, R. F. C. **Estudos de concretos auto-adensáveis, com aditivo incorporador de ar, utilizados na produção de paredes de concreto moldadas no local**. Dissertação (Mestrado em Habitação: Planejamento e Tecnologia) – Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, São Paulo, 2012.

SANTOS, S. A.; SILVA, P. R.; BRITO, J. Mechanical performance evaluation of self-compacting concrete with fine and coarse recycled aggregates from the precast industry. **Materials**, 2017.

SAFIUDDIN, et al . Properties of high-workability concrete with recycled concrete aggregate. **Mat. Res.**, São Carlos , v. 14, n. 2, p. 248-255, 2011 . Available from <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S151614392011000200018&lng=en&nrm=iso>. Acesso em 16 Julho 2017.

SCHULZ, R. R.; HENDRICKS, F. **Recycling of masonry rubble: recycling of demolished concrete and masonry**. Editado por T. C. Hansen. Londres: Spon, 1992. Part 2.

SCHNEIDER, D.M. **Deposições Irregulares de Resíduos da Construção Civil na Cidade de São Paulo**. Dissertação. Universidade de São Paulo – Faculdade de Saúde Pública. São Paulo, 2003.

SALESA, A.; PÉREZ-BENEDICTO, J. A.; ESTEBAN, L. M.; VICENTE-VAS, R.; ORNACARMONA, M. Physico-mechanical properties of multi-recycled self-compacting concrete prepared with precast concrete rejects. **Construction and building materials**, p. 364-373, 2017.

SANTOS, S.A.; DA SILVA, P.R.; DE BRITO, J. Mechanical Performance Evaluation of Self-Compacting Concrete with Fine and Coarse Recycled Aggregates from the Precast Industry. **Materials** 2017, 10, 904.

SILICON. **Nanotecnologia**. Disponível em: <<http://www.silicon.ind.br/produtos-nanotecnologia/>> Acesso em: 20 de Junho de 2018.

SILVA, N. A. K. **Estudo de propriedades mecânicas de concretos produzidos com diferentes agregados reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió-AL, 2011.

SILVA, Y. F.; ROBAYO, R. A.; MATTEY, P. E.; DELVASTO, S. Properties of self-compacting concrete on fresh and hardened with residue of masonry and recycled concrete. **Construction and Building Materials**, p. 639-644, 2016.

SILVEIRA, G.T.R. **Metodologia de caracterização dos resíduos sólidos como base para uma gestão ambiental. Estudo de caso: Entulhos de Construção em Campinas**. Campinas. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas, 1993.

SINDUSCON. **Resíduos da construção civil e o estado de São Paulo**. Sindicato da Construção Civil, São Paulo-SP, 2012.

SOUZA, C, A. **Utilização de resíduo de concreto como agregado graúdo para argamassas de concretos estruturais convencionais**. Dissertação (Mestrado em Construção Civil), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte-MG, 2006.

TAM, V.W.Y., TAM, C.M., 2006. A review on the viable technology for construction waste recycling. **Journal of Resources, Conservation and Recycling**, V. 47, n.º 3, pp. 209-221.

TAM, Vivian W.Y.; TAM, C. M. Crushed aggregate production from centralized combined and individual waste sources in Hong Kong. **Construction and Building Materials**, [S.l.], n. 20, p. 879-886, 2007.

TANG, C. W.; RYAN, C. P.; CUI, Z. H.; LIAO, W. **Properties of self-compacting concrete with recycled coarse aggregate**. Hindawi Publishing Corporation, 2016.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. Maceió: UFAL. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, 2007.

TROIAN, A. **Avaliação da durabilidade de concretos produzidos com agregado reciclado de concreto frente à penetração de íons de cloreto**. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2010.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método para dosagem experimental para concretos auto-adensáveis**. Tese de Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-Adensável**. 1. ed. São Paulo: Pini, 2008. 148 p.

TUTIKIAN, B. F.; HELENE, P. **Dosagem dos concretos de cimento Portland**. In: ISAIA, G. C (Ed.). **Concreto: ciência e tecnologia**. São Paulo: IBRACON, 2011. cap. 12.

VALVERDE, M. F. **Agregados para construção civil**. Balanço Mineral Brasileiro, São Paulo-SP, 2001.

VAZ, J. C. **Reciclagem de entulho**. Belo Horizonte – MG 2007.

VIEIRA, G. L. **Estudo do processo de corrosão sob ação de íons de cloreto em concretos obtidos a partir de agregados reciclados de resíduos de construção e demolição**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2003.

VOLPATO, G.; BARRETO, R. **Estatística sem dor**. 2. ed. Botucatu-SP: Best Wirint, 2016.

YAZDANBAKHSI, A.; GRASLEY, Z. The theoretical maximum achievable dispersion of nano-inclusions in cement paste. **Cement and Concrete Research**, v. 42, n. 12, p. 798-804, dec/2012.

ZHOU, C.; CHEN, Z. **Mechanical properties of recycled concrete made with different types of coarse aggregate**. *Construction and building materials*, 2017.

ZORDAN, S. E. (1997). **A utilização do entulho do entulho como agregado, na confecção do concreto**. Campinas. 136p. Dissertação (Mestrado) - Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Campinas.

APÊNDICE A

CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

AGREGADO MIÚDO

A.1 Composição granulométrica:

A determinação da composição granulométrica das areias (dimensão máxima característica e módulo de finura) foi realizada de acordo com a NBR NM 248: 2003 (ABNT, 2003).

Foram selecionadas duas areias naturais provenientes da região de Campinas/SP, com composições granulométricas distintas, cujo objetivo foi promover o melhor empacotamento da mistura. As areias foram classificadas de acordo com o módulo de finura, sendo as de origem natural denominadas por MF 1,07 e MF 2,47.

O agregado miúdo reciclado de MF igual a 2,86 foi utilizado para substituição do agregado miúdo natural de MF igual a 2,47, tendo em vista a semelhança da composição granulométrica.

Os resultados da composição granulométrica destes materiais são apresentados nas tabelas A 1, A.2 e A.3. A Figura A.1 apresenta as curvas granulométricas dos agregados miúdos.

Tabela A. 1 - Composição granulométrica do agregado miúdo MF 1,07 (natural)

Peneiras (mm)	Massa média retira (g)	Massa média acumulada (g)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média acumulada (%)
9,5	0,0	0,0	0,0	0
6,3	0,0	0,0	0,0	0
4,8	0,0	0,0	0,0	0
2,4	0,0	0,0	0,0	0
1,2	1,4	1,4	0,1	0
0,6	6,2	7,6	0,4	0
0,3	443,0	450,5	25,3	26
0,15	973,9	1424,4	55,1	81
Fundo	312,3	1736,6	19,0	100
Total	1736,6	-	100	-
Soma das porcentagens retidas nas peneiras da série normal				107
Módulo de finura				1,07
Diâmetro máximo (mm)				0,6

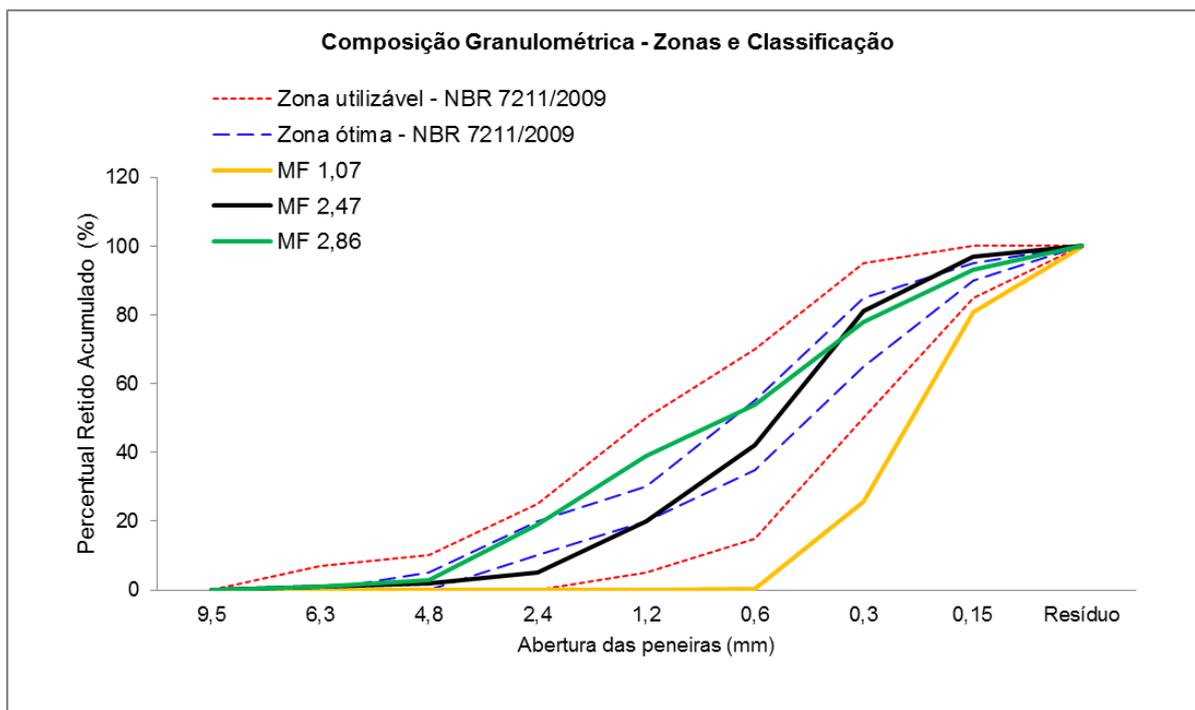
Tabela A. 2 - Composição granulométrica do agregado miúdo MF 2,47 (natural)

Peneiras (mm)	Massa média retira (g)	Massa média acumulada (g)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média acumulada (%)
9,5	0,0	0,0	0,0	0
6,3	10,7	10,7	0,7	1
4,8	14,5	25,2	0,9	2
2,4	61,1	86,3	3,8	5
1,2	227,0	313,2	14,3	20
0,6	356,5	669,7	22,4	42
0,3	620,9	1290,5	39,0	81
0,15	251,2	1541,7	15,8	97
Fundo	49,4	1591,1	3,1	100
Total	1591,1	-	100	-
Soma das porcentagens retidas nas peneiras da série normal				247
Módulo de finura				2,47
Diâmetro máximo (mm)				2,4

Tabela A. 3 - Composição granulométrica do agregado miúdo MF 2,86 (reciclado)

Peneiras (mm)	Massa média retira (g)	Massa média acumulada (g)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média acumulada (%)
9,5	0,0	0,0	0,0	0
6,3	20,5	20,5	1,1	1
4,8	37,8	58,3	2,1	3
2,4	287,9	346,1	15,8	19
1,2	358,2	704,3	19,6	39
0,6	285,7	989,9	15,7	54
0,3	441,1	1431,0	24,2	78
0,15	262,9	1693,8	14,4	93
Fundo	125,4	1819,2	6,9	100
Total	1819,2	-	100	-
Soma das porcentagens retidas nas peneiras da série normal				286
Módulo de finura				2,86
Diâmetro máximo (mm)				4,8

Figura A. 1 - Curvas granulométricas dos agregados miúdos



Somente a areia MF 1,07 encontra-se fora da zona utilizável de acordo com os parâmetros da NBR 7211:2009 (ABNT, 2009). Contudo, o agregado foi incorporado à mistura já que o intuito foi obter um esqueleto granular com a menor quantidade de vazios e maior massa unitária, sendo possível a partir do preenchimento destes espaços por agregados finos.

A.2 Composição dos agregados miúdos:

A composição dos agregados miúdos foi realizada a partir da determinação da massa unitária das areias de acordo com a NBR NM 45:2006 (ABNT, 2006).

A Figura A.2 exemplifica o processo para obtenção da composição dos agregados miúdos.

Figura A. 2 - Determinação da massa unitária: nivelamento da camada superficial do agregado (a), determinação da massa do recipiente e seu conteúdo (b)



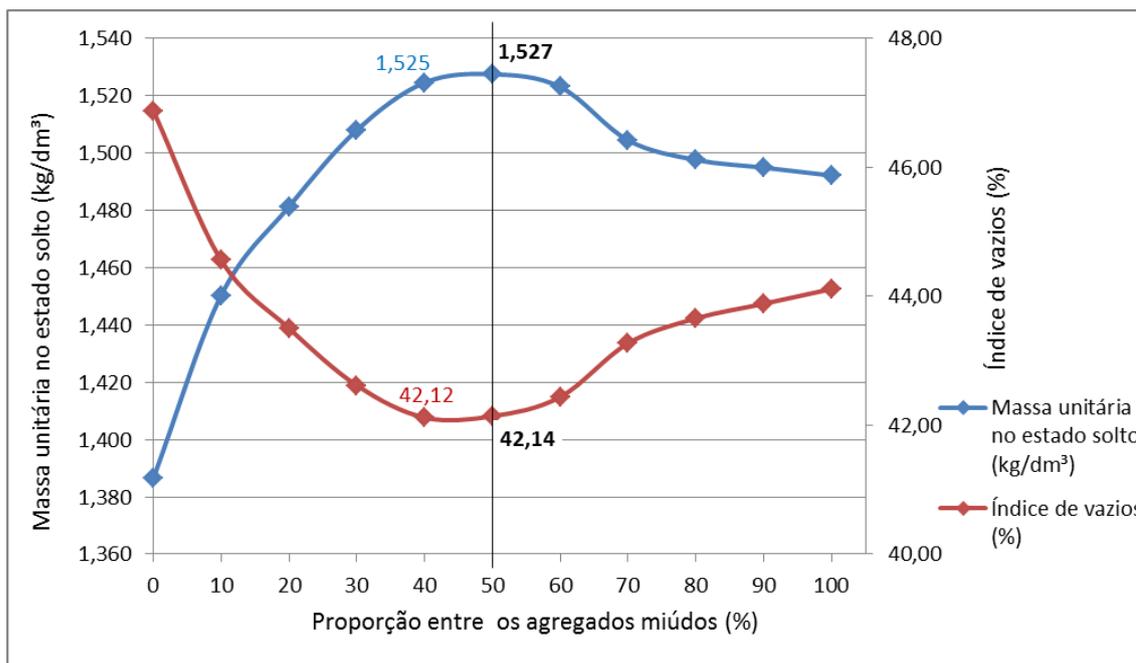
Os resultados da massa unitária dos agregados miúdos são apresentados na Tabela A. 4 e Figura A.3.

Tabela A. 4 - Determinação da proporção dos agregados miúdos

Proporção entre as areias naturais (%)		Areia MF 2,47	Areia MF 1,07	Acréscimo da areia MF 1,07	Acréscimo da areia MF 2,47	* Massa (agregado)	Massa unitária no estado solto	Índice de vazios
MF 2,47	MF 1,07	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg)	(kg/dm ³)	(%)
100	0	12,00	0,00	0,00	0	10,912	1,386	46,88
90	10	12,00	1,33	1,33	0	11,414	1,450	44,56
80	20	12,00	3,00	1,67	0	11,658	1,481	43,50
70	30	12,00	5,14	2,14	0	11,868	1,508	42,62
60	40	12,00	8,00	2,86	0	11,998	1,525	42,12
50	50	12,00	12,00	4,00	0	12,021	1,527	42,14
40	60	12,00	18,00	6,00	0	11,986	1,523	42,44
30	70	5,14	12,00	0	2,14	11,840	1,504	43,27
20	80	3,00	12,00	0	1,67	11,786	1,498	43,66
10	90	1,33	12,00	0	1,33	11,765	1,495	43,88
0	100	0,00	12,00	0	0,00	11,743	1,492	44,11

(*) média de três determinações.

Figura A. 3 - Composição ideal entre os agregados miúdos



A proporção de 50% entre os agregados miúdos não foi a que apresentou o menor índice de vazios, contudo, foi a que obteve o maior resultado de massa unitária. Assim, optou-se por utilizar esta proporção na mistura.

A.3 Massa específica:

A massa específica dos agregados miúdos foi determinada a partir de uma adaptação da NBR NM 9775:2011 (ABNT, 2011) uma vez que o agregado utilizado para o ensaio estava na condição seca, e não úmida, como previsto na norma. A Figura A.4 demonstra a determinação da massa específica por meio do frasco Chapman. Os resultados da massa específica dos agregados miúdos são apresentados na Tabela A. 5.

Figura A. 4 - Determinação da massa específica pelo método do frasco de Chapman



Tabela A. 5 - Determinação da massa específica dos agregados pelo método do frasco de Chapman

Massa específica	Agregado miúdo natural MF 1,07		Agregado miúdo natural MF 2,47		Agregado miúdo reciclado MF 2,86	
	A	B	A	B	A	B
Leitura Inicial (cm ³):	200	200	200	200	200	200
Massa Material Inserido (g):	500	500	500	500	500	500
Leitura Final (cm ³):	387	388	391,5	391	400,5	401,5
Massa Específica (g/cm ³):	2,67	2,66	2,61	2,62	2,49	2,48
Massa Específica média (g/cm ³):	2,67		2,61		2,49	
Diferença entre as Massas Específicas (g/cm ³):	0,01		0,01		0,01	

A.4 Absorção de água:

A determinação da absorção de água das areias foi realizada de acordo com a NBR NM 30:2000 (ABNT, 2000). A Figura A.5 exemplifica o processo para obtenção da condição saturada superfície seca do agregado miúdo. Os resultados da absorção de água dos agregados miúdos são apresentados na Tabela A. 6.

Figura A. 5 – Absorção de água: constatação da existência de umidade superficial (a), determinação da condição saturado superfície seca (b)

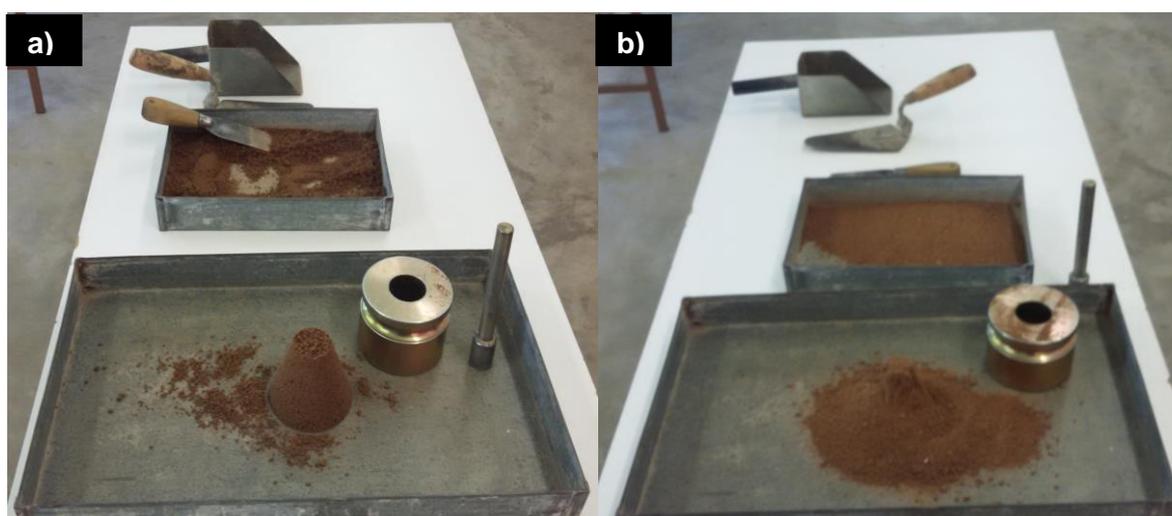


Tabela A. 6 - Absorção de água dos agregados miúdos

Absorção de água	Agregado miúdo natural MF 1,07		Agregado miúdo natural MF 2,47		Agregado miúdo reciclado MF 2,86	
	A	B	A	B	A	B
MSSP - Massa da amostra na condição saturada superfície seca (g)	997,9	996,2	1.002,5	991,6	1.116,5	1.344,7
MS - Massa da amostra seca em estufa (g)	995,9	994,1	990,5	979,9	1.014,2	1.227,6
Absorção de água (%) = $[(MSSP - MS) / MS] * 100$	0,20	0,21	1,21	1,19	10,09	9,54
Porcentagem de umidade média (%)	0,21		1,20		9,81	

O resumo dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos é apresentado na Tabela A.7.

Tabela A. 7 - Caracterização física dos agregados miúdos

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária solta (g/cm ³)	Absorção de água (%)
MF 1,07 (natural)	1,07	0,6	2,67	1,490	0,21
MF 2,47 (natural)	2,47	2,4	2,61	1,380	1,20
MF 2,86 (reciclada)	2,86	4,8	2,49	1,330	9,81

Agregado graúdo

A.8 Composição granulométrica:

A determinação da composição granulométrica dos agregados graúdos (dimensão máxima característica e módulo de finura) foi realizada de acordo com a NBR NM 248:2003 (ABNT, 2003).

Os agregados graúdos foram denominados em função da dimensão máxima característica, sendo o de origem natural designado por AGN - $D_{máx}$ 9,5 mm e o reciclado por AGR - $D_{máx}$ 9,5 mm. O agregado reciclado foi utilizado para substituição do agregado natural.

Os resultados da composição granulométrica destes materiais são apresentados nas tabelas A.8 e A.9. A Figura A.6 apresenta as curvas granulométricas dos agregados graúdos.

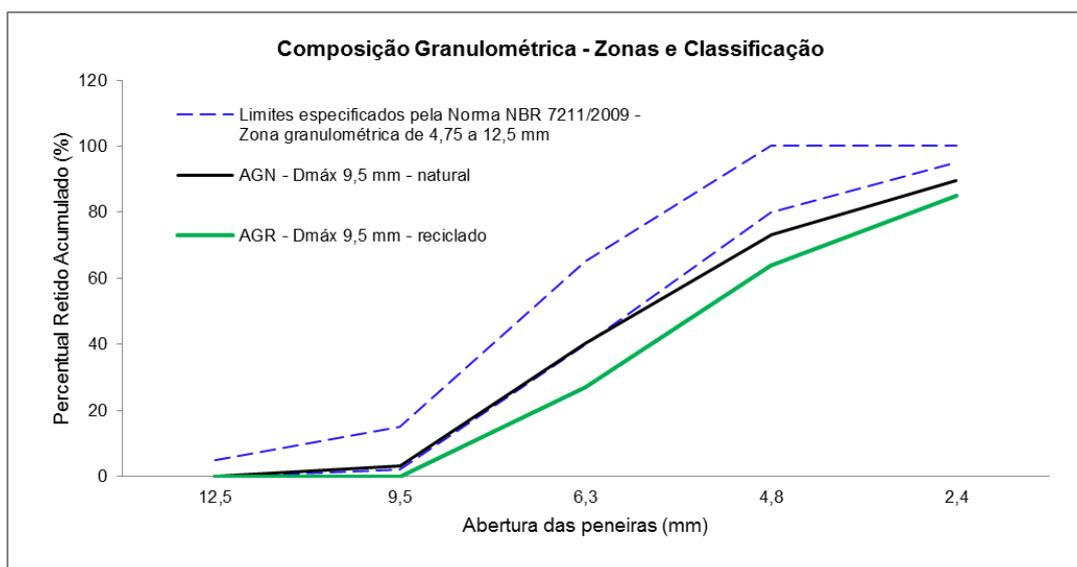
Tabela A. 8 - Composição granulométrica do agregado graúdo AGN - $D_{\text{máx}}$ 9,5 mm (natural)

Peneiras (mm)	Massa média retira (g)	Massa média acumulada (g)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média acumulada (%)
12,5	3,0	3,0	0,1	0
9,5	130,7	133,6	3,2	3
6,3	1515,2	1648,8	37,0	40
4,8	1346,4	2995,1	32,9	73
2,4	674,7	3669,8	16,5	90
1,2	141,7	3811,5	3,5	93
0,6	29,1	3840,5	0,7	94
0,3	21,4	3861,9	0,5	94
0,15	26,3	3888,2	0,6	95
Fundo	197,2	4085,4	4,8	100
Total	4085,4	-	100	-
Soma das porcentagens retidas nas peneiras da série normal				542
Módulo de finura				5,42
Diâmetro máximo (mm)				9,5

Tabela A. 9 - Composição granulométrica do agregado graúdo AGR - $D_{\text{máx}}$ 9,5 mm (reciclado)

Peneiras (mm)	Massa média retira (g)	Massa média acumulada (g)	Porcentagem média retida (%)	Porcentagem média acumulada (%)
12,5	0,0	0,0	0,0	0
9,5	7,1	7,1	0,2	0
6,3	1107,1	1114,2	26,8	27
4,8	1508,5	2622,6	36,5	64
2,4	884,0	3506,6	21,4	85
1,2	140,6	3647,2	3,4	88
0,6	99,2	3746,3	2,4	91
0,3	120,5	3866,8	2,9	94
0,15	109,5	3976,2	2,7	96
Fundo	142,0	4118,2	3,4	100
Total	4118,2	-	100	-
Soma das porcentagens retidas nas peneiras da série normal				518
Módulo de finura				5,18
Diâmetro máximo (mm)				9,5

Figura A. 6 - Curvas granulométricas dos agregados graúdos



Ambos os agregados encontram-se fora dos limites indicados pela norma NBR 7211:2009 (ABNT, 2009) para zona granulométrica 4,75/12,5 mm. Mesmo assim, o emprego dos materiais foi mantido na mistura, uma vez que não foi possível compor uma melhor distribuição granulométrica.

A.9 Massa unitária:

A determinação da massa unitária dos agregados graúdos foi realizada de acordo com a NBR NM 45: 2006 (ABNT, 2006). Os resultados obtidos são apresentados na Tabela A.10.

A.10 Massa específica:

A massa específica dos agregados graúdos foi determinada de acordo com a NBR NM 53: 2009 (ABNT, 2009). A Figura A.7 demonstra parte das etapas para a determinação da massa específica. Os resultados da massa específica dos agregados graúdos são apresentados na Tabela A.10.

Figura A. 7 - Determinação da massa específica: pesagem do agregado na condição saturado superfície seca (a), determinação da massa submersa (b)

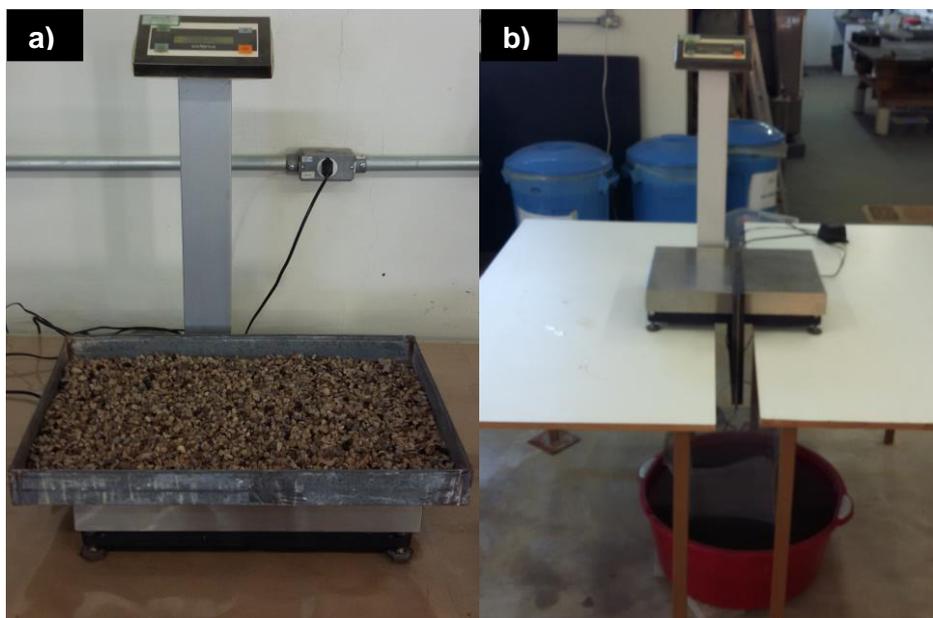


Tabela A. 10 - Caracterização física dos agregados graúdos

Material	Módulo de finura	Dimensão máxima característica (mm)	Massa específica (g/cm ³)	Massa unitária solta (g/cm ³)	Absorção de água (%)
MF 5,42 (natural)	5,42	9,5	2,70	1,410	0,74
MF 5,18 (reciclado)	5,18	9,5	2,45	1,250	4,58

O agregado graúdo proveniente de RCC utilizado por Leite (2001) apresentou absorção de água de 4,95%, massa específica de 2,51g/cm³ e massa unitária de 1,12g/cm³. Já Moretti (2014) obteve valores de absorção de água de 4,16%, massa específica de 2,46 g/cm³ e massa unitária de 1,30 g/cm³, ambos os resultados são bem próximos aos obtidos nesta pesquisa (Tabela A.10).

Através dos resultados obtidos nos ensaios de caracterização do agregado natural e do agregado reciclado de RCC, foi possível verificar que a absorção de água do agregado reciclado de RCC é em torno de seis vezes superior à absorção de água do agregado natural e o valor da massa específica do agregado reciclado de RCC é aproximadamente cerca de 10% menor que a massa específica do agregado natural. Os agregados de RCC são mais porosos que a brita, fato que interfere diretamente na absorção de água e massa específica do material.

APÊNDICE B

DOSAGEM DO CAA REFERÊNCIA

B.1 Determinação do CAA referência - Traço médio

Conforme apresentado no item 4.4.5, o estudo de dosagem para obtenção do traço médio é dividido em duas fases, sendo:

- ✓ Proporcionamento: Nesta fase, define-se o teor de argamassa (α), teor de substituição (T); teor de aditivo e relação água/cimento (a/c);
- ✓ Verificação: Nesta fase realiza-se os ensaios para verificação das propriedades do CAA no estado fresco.

Iniciou-se a dosagem para obtenção do traço médio ($m = 4$), partindo de um $\alpha = 53\%$, $T = 7\%$, $a/c = 0,5$ e teor de aditivo de $0,8\%$. Os valores de $T = 7\%$ e $a/c = 0,5$, permaneceram fixos, sendo ajustados apenas o teor de argamassa e o teor de aditivo a cada nova etapa, conforme necessidade. A cada nova tentativa de se obter o CAA foi elevado em 3% o teor de argamassa.

Figura B. 1 - Teores crescentes de argamassa



A seguir são apresentados os passos para obtenção do traço médio:

- ✓ Primeira tentativa de obter o CAA:
 - Teor de argamassa de 53% ;
 - Teor de aditivo de $0,8\%$;
 - Espalhamento de 605 mm ;

Classe de estabilidade visual IEV 3 (altamente instável): segregação evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto.

Figura B. 2 – Primeira tentativa - α 53%



- ✓ Segunda tentativa de obter o CAA:
 - Teor de argamassa de 56%;
 - Teor de aditivo de 0,8%;
 - Espalhamento de 405 mm;
 - Classe de estabilidade visual IEV 3 (altamente instável): segregação evidenciada pela concentração de agregados no centro do concreto.

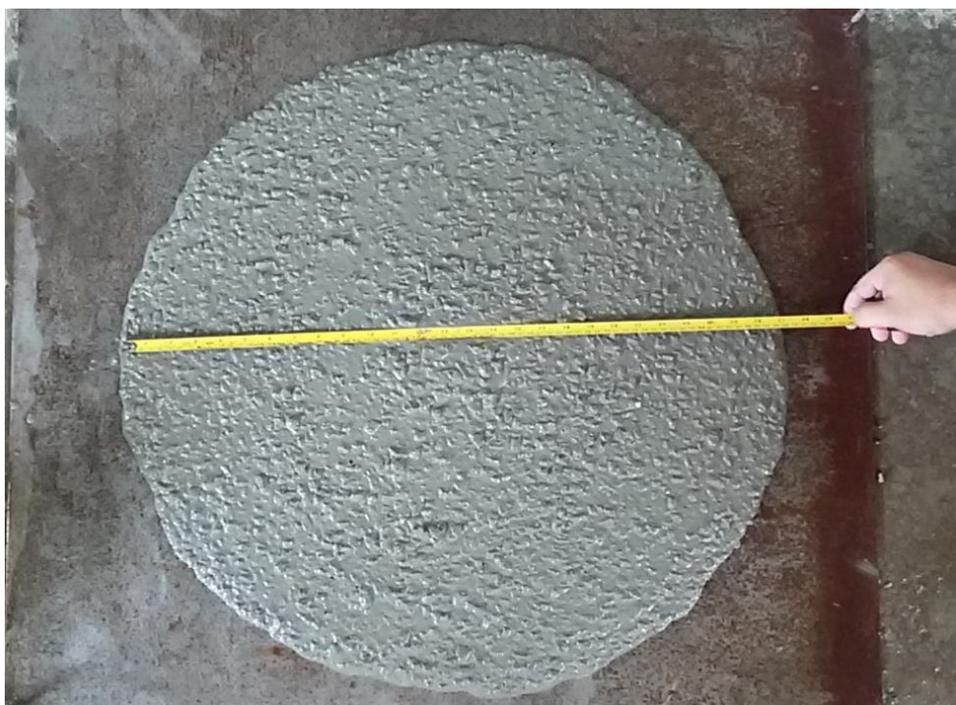
Figura B. 3 – Segunda tentativa - α 56%



Ainda na segunda tentativa para obter o CAA, tendo em vista o baixo resultado do espalhamento, foi necessário elevar o teor de aditivo para 1,0% obtendo o valor de

espalhamento de 670 mm e classe de estabilidade visual IEV 2 (instável) – Presença de pequena auréola de argamassa e empilhamento de agregados no centro do concreto. Constatou-se um espalhamento homogêneo com pequena segregação, conforme apresentado na Figura B.4.

Figura B. 4 – Segunda tentativa - α 56% e teor de aditivo 1,0%



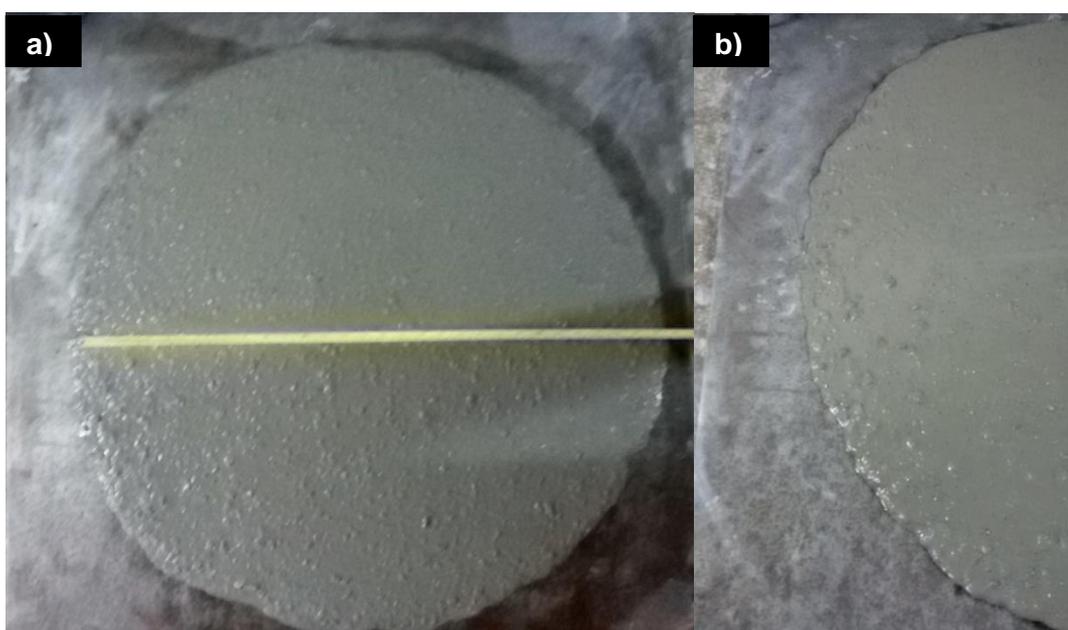
- ✓ Terceira tentativa de obter o CAA:
 - Teor de argamassa de 59%;
 - Teor de aditivo de 1,2%;
 - Espalhamento de 690 mm;
 - Classe de estabilidade visual IEV 2 (instável): empilhamento de agregados no centro do concreto. Espalhamento homogêneo com pequena segregação.

Figura B. 5 – Terceira tentativa - α 59%



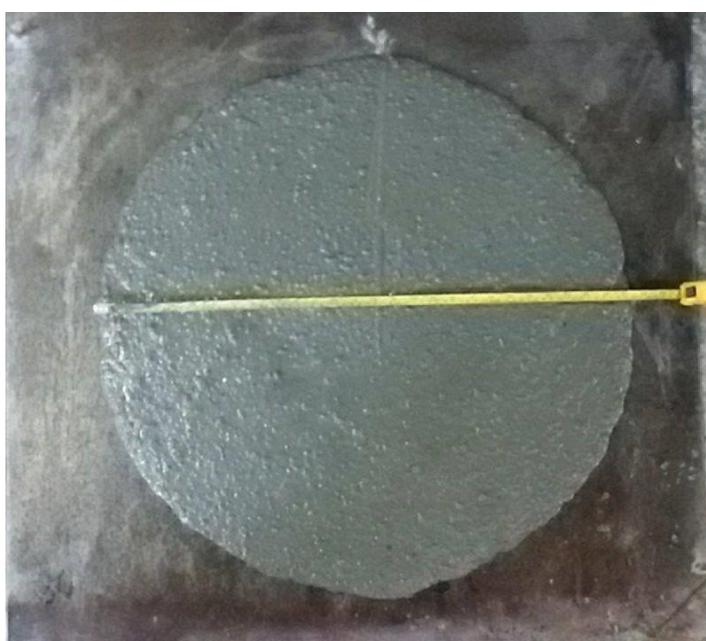
- ✓ Quarta tentativa de obter o CAA (nova mistura):
 - Teor de argamassa de 62%;
 - Teor de aditivo de 1,2%;
 - Espalhamento de 775 mm;
 - Classe de estabilidade visual IEV 1 (estável): sem evidência de segregação e leve exsudação

Figura B. 6 - Quarta tentativa - α 62%. Ensaio de espalhamento (a) e verificação da ocorrência de leve exsudação (b)



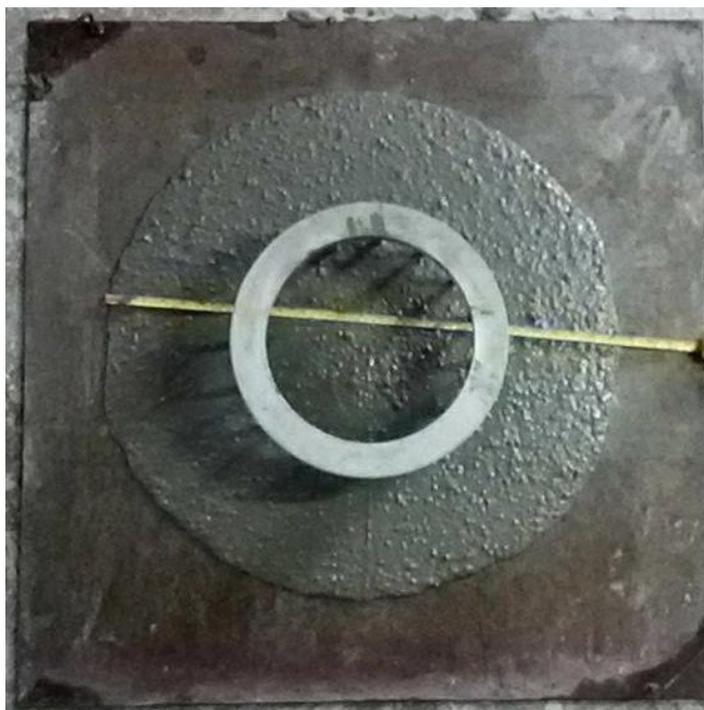
- ✓ Quinta tentativa de obter o CAA (nova mistura):
 - Teor de argamassa de 65%;
 - Teor de aditivo de 1,9%. Nesta etapa optou-se por substituir o aditivo superplastificante, buscando uma maior manutenção da trabalhabilidade da mistura, sendo empregado o Silicon NS MIX 400;
 - Espalhamento de 720 mm;
 - Classe de estabilidade visual IEV 0 (altamente estável): sem evidência de segregação ou exsudação.

Figura B. 7 - Quinta tentativa - α 65%



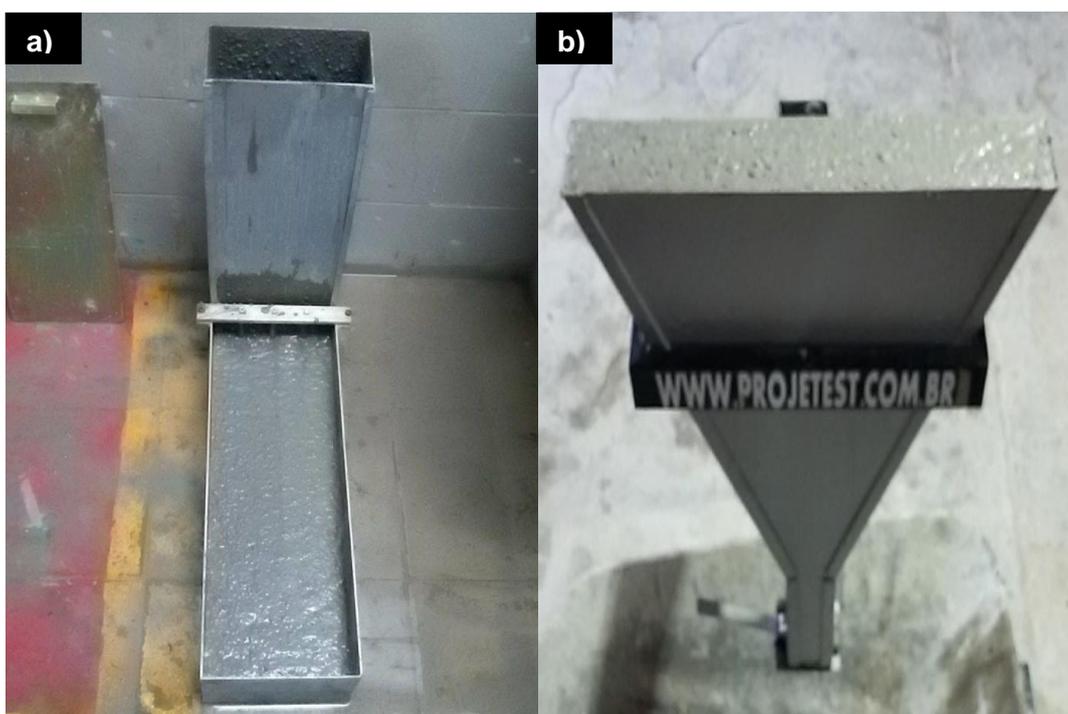
Após a definição do teor de argamassa (α), teor de substituição (T); teor de aditivo e relação água/cimento (a/c), tendo sido obtido o primeiro parâmetro no estado fresco que é o espalhamento, prosseguiu-se com a realização dos demais ensaios para classificação do concreto no estado fresco, sendo: anel J , caixa L , funil V e coluna de segregação, conforme apresentado nas figuras B.8, B.9 e B.10.

Figura B. 8 – Determinação da habilidade passante – Método do Anel J



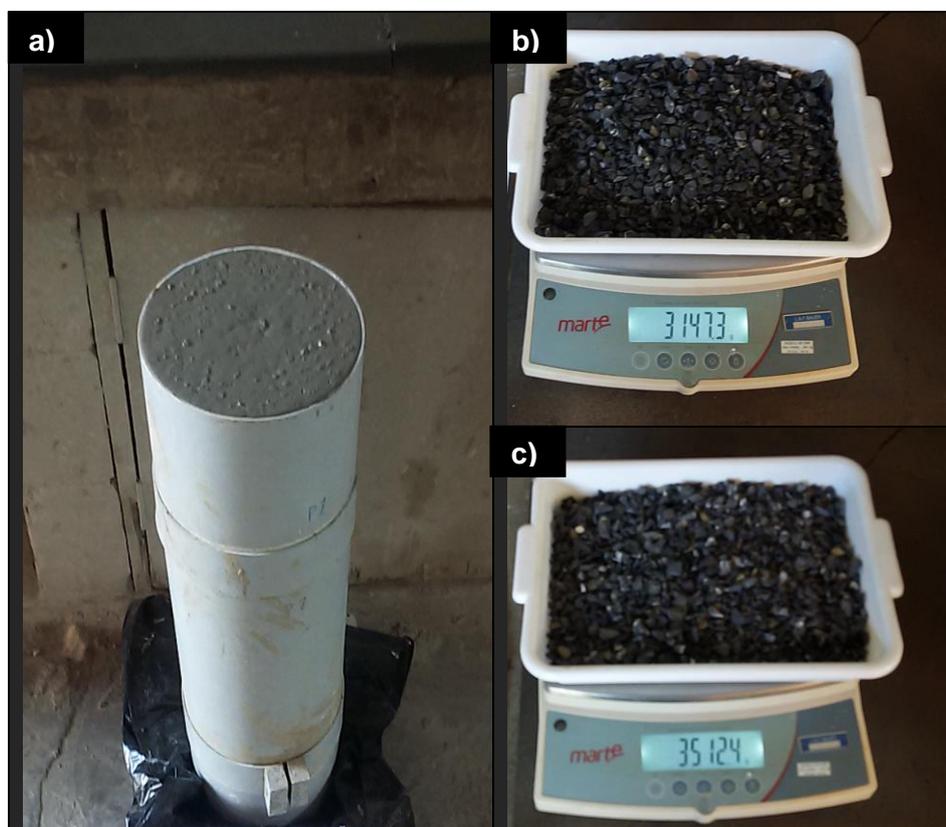
Os ensaios para determinação da habilidade passante pelo método da Caixa L e determinação da viscosidade pelo método do funil V são apresentados na Figura B.9.

Figura B. 9 - Determinação da habilidade passante pelo método da caixa L (a) e determinação da viscosidade pelo método do funil V (b)



O ensaio para determinação da resistência à segregação pelo método da coluna é apresentado na Figura B.10.

Figura B. 10 - Coluna de segregação: preenchimento da coluna (a), determinação da massa de agregado no topo (P1), determinação da massa na base (P2)



Conforme apresentado nas imagens, o traço do CAA referência foi submetido a ensaios para avaliação e classificação no estado fresco, cujos resultados são apresentados a Tabela B.1.

Tabela B. 1- Classificação do concreto no estado fresco

Ensaio	Resultado obtido	Classificação NBR 15823-1
Espalhamento (mm)	720	SF 2
T 500 (s)	1,91	VS 1
Índice de estabilidade visual	Sem evidência de segregação ou exsudação	IEV 0
Anel J (mm)	0	PJ 1
Caixa L (H2/H1)	0,94	PL 1
Funil V (s)	3,88	VF 1
Coluna de segregação (%)	10,96	SR 2

O consumo de materiais em massa para a produção de 1 m³ de concreto é apresentado na Tabela B.2 e o traço unitário na Tabela B.3.

Tabela B. 2 - Proporção dos materiais constituintes do concreto de referência

Material	Quantidade
Cimento - C (kg/m ³)	421
Fíler Calcário - FC (kg/m ³)	62
AMN MF 1,07 (kg/m ³)	441
AMN MF 2,47 (kg/m ³)	441
AGN MF 5,42 (kg/m ³)	738
Água (kg/m ³)	211
Aditivo superplastificante - SP (kg/m ³)	8,0
Relação A/C	0,50
FC/C (%)	14,7
FC/AM (%)	7,0
SP/C (%)	1,9
Teor de argamassa (%)	65

Tabela B. 3 - Traço unitário

Concreto	m	Cimento	Fíler calcário	AMN MF 1,07	AMN MF 2,47	AGN MF 5,42
AN REF	4	1	0,15	1,05	1,05	1,75

APÊNDICE C

RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DOS CONCRETOS ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela C. 1 - Resistência à compressão - AN REF, AGR 30 e AGR 50

Corpo de prova	AN REF			AGR 30			AGR 50		
	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)
CP1	34,34	39,59	50,10	32,84	39,83	49,03	32,45	41,95	50,51
CP2	33,68	40,13	45,56	33,63	39,79	50,04	33,66	37,80	51,02
CP3	34,07	39,12	47,57	33,51	41,05	48,98	33,38	40,47	50,15
\bar{X}^* (MPa)	34,03	39,61	47,74	33,33	40,22	49,35	33,16	40,07	50,56
σ^* (MPa)	0,33	0,51	2,27	0,43	0,72	0,60	0,63	2,10	0,44
fc, mín. (Mpa)	33,68	39,12	45,56	32,84	39,79	48,98	32,45	37,80	50,15
fc, máx. (Mpa)	34,34	40,13	50,10	33,63	41,05	50,04	33,66	41,95	51,02

Tabela C. 2 - Resistência à compressão - AGR 100, AMR 30 e AMR 50

Corpo de prova	AGR 100			AMR 30			AMR 50		
	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)	fc 3 dias (MPa)	fc 7 dias (MPa)	fc 28 dias (MPa)
CP1	37,20	44,05	54,19	34,82	42,80	43,90	34,37	40,23	45,01
CP2	36,57	42,58	52,92	34,20	39,28	45,53	33,85	35,75	47,08
CP3	36,33	43,09	52,13	38,21	40,21	45,22	31,71	39,56	47,74
\bar{X}^* (MPa)	36,70	43,24	53,08	35,74	40,76	44,88	33,31	38,51	46,61
σ^* (MPa)	0,45	0,75	1,04	2,16	1,82	0,87	1,41	2,42	1,42
fc, mín. (Mpa)	36,33	42,58	52,13	34,20	39,28	43,90	31,71	35,75	45,01
fc, máx. (Mpa)	37,20	44,05	54,19	38,21	42,80	45,53	34,37	40,23	47,74

Tabela C. 3 - ANOVA - Resistência à compressão aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	128,7499	5	25,74998	16,123186	5,82E-05	3,105875
Dentro dos grupos	19,16493	12	1,597078			
Total	147,9148	17				Significativo

Tabela C. 4 - Teste t: Resistência à compressão aos 28 dias

Parâmetro	AN	AGR	AN	AGR	AN	AGR	AN	AMR	AN	AMR
	REF	30	REF	50	REF	100	REF	30	REF	50
Média	47,74	49,35	47,74	50,56	47,743	53,08	47,743	44,883	47,743	46,61
Variância	5,175	0,3577	5,175	0,1911	5,1754	1,0801	5,1754	0,7492	5,1754	2,0289
Observações	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Variância agrupada	2,767		2,683		3,1278		2,9623		3,6022	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0		0	
gl	4		4		4		4		4	
Stat t	-1,183		-2,106		-3,696		2,0351		0,7313	
P(T<=t) bi-caudal	0,302		0,103		0,0209		0,1116		0,5051	
t crítico bi-caudal	2,776		2,776		2,7764		2,7764		2,7764	

Tabela C. 5 - Resumo do teste t: Resistência à compressão aos 28 dias

Traços	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
AN REF	Não	Não	Sim	Não	Não

Obs: não = não significativo / Sim = significativo

APÊNDICE D

RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela D. 1 - Tração por compressão diametral

Corpo de prova	Idade de 28 dias					
	AN REF	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
CP1	3,58	3,13	3,49	3,40	3,96	3,76
CP2	3,26	3,44	3,82	3,76	3,92	3,60
CP3	3,77	2,79	3,03	3,52	3,64	3,84
\bar{X}^* (MPa)	3,53	3,12	3,45	3,56	3,84	3,73
σ^* (MPa)	0,25	0,32	0,40	0,18	0,17	0,12
<i>fct, mín.</i> (Mpa)	3,26	2,79	3,03	3,40	3,64	3,60
<i>fct, máx.</i> (Mpa)	3,77	3,44	3,82	3,76	3,96	3,84

Tabela D. 2 - ANOVA: Tração por compressão diametral aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,936967	5	0,187393	2,779646	0,068146	3,105875
Dentro dos grupos	0,808995	12	0,067416			
Total	1,745962	17				não significativo

Tabela D. 3 - Teste t: Tração por compressão diametral aos 28 dias

Parâmetro	AN	AGR	AN	AGR	AN	AGR	AN	AMR	AN	AMR
	REF	30	REF	50	REF	100	REF	30	REF	50
Média	3,534	3,119	3,534	3,448	3,534	3,561	3,534	3,838	3,534	3,733
Variância	0,065	0,105	0,065	0,157	0,065	0,034	0,065	0,03	0,065	0,014
Observações	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Variância agrupada	0,085		0,111		0,049		0,047		0,039	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0		0	
gl	4		4		4		4		4	
Stat t	1,748		0,314		-0,15		-1,71		-1,23	
P(T<=t) bi-caudal	0,155		0,769		0,887		0,162		0,286	
t crítico bi-caudal	2,776		2,776		2,776		2,776		2,776	

APÊNDICE E

MÓDULO DE ELASTICIDADE DOS CONCRETOS ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela E. 1 - Módulo de elasticidade aos 28 dias

Corpo de prova	Idade de 28 dias					
	AN REF	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
CP1	34,00	35,66	37,88	28,69	27,70	29,33
CP2	34,40	32,04	31,05	27,48	33,63	30,81
CP3	37,18	34,40	32,39	28,73	29,98	30,47
\bar{X}^* (GPa)	35,19	34,03	33,77	28,30	30,44	30,20
σ^* (GPa)	1,73	1,84	3,62	0,71	2,99	0,78
<i>fc, mín.</i> (Mpa)	34,00	32,04	31,05	27,48	27,70	29,33
<i>fc, máx.</i> (Mpa)	37,18	35,66	37,88	28,73	33,63	30,81

Tabela E. 2 - ANOVA: Módulo de elasticidade aos 28 dias

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	110,513867	5	22,1027733	4,49125196	0,01539353	3,10587524
Dentro dos grupos	59,0555333	12	4,92129444			
Total	169,5694	17				significativo

Tabela E. 3 - Teste t: Módulo de elasticidade aos 28 dias

Parâmetro	AN	AGR	AN	AGR	AN	AGR	AN	AMR	AN	AMR
	REF	30	REF	50	REF	100	REF	30	REF	50
Média	35,193	34,033	35,193	33,773	35,193	28,3	35,193	30,437	35,193	30,203
Variância	3,0001	3,3769	3,0001	13,097	3,0001	0,5047	3,0001	8,9476	3,0001	0,6009
Observações	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Variância agrupada	3,1885		8,0488		1,7524		5,9739		1,8005	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0		0	
gl	4		4		4		4		4	
Stat t	0,7956		0,613		6,3776		2,3835		4,5546	
P(T<=t) bi-caudal	0,4708		0,573		0,0031		0,0757		0,0104	
t crítico bi-caudal	2,7764		2,7764		2,7764		2,7764		2,7764	

Tabela E. 4 - Resumo do teste t: Módulo de elasticidade aos 28 dias

Traços	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
AN REF	Não	Não	Sim	Não	Sim

Obs: não = não significativo / Sim = significativo

APÊNDICE F

ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DOS CONCRETOS ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela F. 1 - Absorção de água por imersão

Corpo de prova	Idade de 28 dias					
	AN REF	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
CP1	3,14	3,53	4,76	6,54	6,18	7,04
CP2	2,90	3,95	4,64	6,75	5,88	6,92
CP3	3,01	3,51	4,29	6,54	6,01	6,89
\bar{X} * (%)	3,02	3,66	4,56	6,61	6,02	6,95
σ * (%)	0,12	0,25	0,24	0,12	0,15	0,08
A, mín. (%)	2,90	3,51	4,29	6,54	5,88	6,89
A, máx. (%)	3,14	3,95	4,76	6,75	6,18	7,04

Tabela F. 2 - ANOVA: Absorção de água por imersão

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	39,71664	5	7,943329	265,6138	7,47361E-12	3,105875
Dentro dos grupos	0,358867	12	0,029906			
Total	40,07551	17				significativo

Tabela F. 3 - Teste t: Absorção de água por imersão

Parâmetro	AN REF	AGR 30	AN REF	AGR 50	AN REF	AGR 100	AN REF	AMR 30	AN REF	AMR 50
Média	3,017	3,663	3,017	4,563	3,017	6,61	3,017	6,023	3,017	6,95
Variância	0,014	0,062	0,014	0,06	0,014	0,015	0,014	0,023	0,014	0,006
Observações	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Variância agrupada	0,038		0,037		0,015		0,019		0,01	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0		0	
gl	4		4		4		4		4	
Stat t	-4,058		-9,843		-36,46		-27,05		-47,31	
P(T<=t) bi-caudal	0,015		6E-04		3E-06		1E-05		1E-06	
t crítico bi-caudal	2,776		2,776		2,776		2,776		2,776	

Tabela F. 4 - Resumo do teste t: Absorção de água por imersão

Traços	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
AN REF	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Obs: não = não significativo / Sim = significativo

APÊNDICE G

ÍNDICE DE VAZIOS DOS CONCRETOS ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela G. 1 - Índice de vazios

Corpo de prova	Idade de 28 dias					
	AN REF	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
CP1	7,08	7,89	10,45	14,06	13,11	14,83
CP2	6,56	8,75	10,21	14,49	12,83	14,71
CP3	6,83	7,84	9,49	14,06	12,91	14,57
\bar{X}^* (%)	6,82	8,16	10,05	14,20	12,95	14,70
σ^* (%)	0,26	0,51	0,50	0,25	0,14	0,13
<i>lv, mín.</i> (%)	6,56	7,84	9,49	14,06	12,83	14,57
<i>lv, máx.</i> (%)	7,08	8,75	10,45	14,49	13,11	14,83

Tabela G. 2 - ANOVA: Índice de vazios

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	162,1775	5	32,43549	286,9128	4,72758E-12	3,105875
Dentro dos grupos	1,3566	12	0,11305			
Total	163,5341	17				significativo

Tabela G. 3 - Teste t: Índice de vazios

Parâmetro	AN	AGR	AN	AGR	AN	AGR	AMR		AN	AMR
	REF	30	REF	50	REF	100	AN	REF	30	REF
Média	6,823	8,16	6,823	10,05	6,823	14,2	6,823	12,95	6,823	14,7
Variância	0,068	0,262	0,068	0,25	0,068	0,062	0,068	0,021	0,068	0,017
Observações	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Variância agrupada	0,165		0,159		0,065		0,044		0,042	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0		0	
gl	4		4		4		4		4	
Stat t	-4,03		-9,92		-35,6		-35,7		-46,9	
P(T<=t) bi-caudal	0,016		6E-04		4E-06		4E-06		1E-06	
t crítico bi-caudal	2,776		2,776		2,776		2,776		2,776	

Tabela G. 4 - Resumo do teste t: Índice de vazios

Traços	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
AN REF	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Obs: não = não significativo / Sim = significativo

APÊNDICE H

MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS ANÁLISE ESTATÍSTICA

Tabela H. 1 - Massa específica

Corpo de prova	Idade de 28 dias					
	AN REF	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
CP1	2,323	2,313	2,300	2,289	2,268	2,255
CP2	2,328	2,303	2,303	2,293	2,283	2,272
CP3	2,338	2,314	2,310	2,292	2,277	2,261
\bar{X}^* (MPa)	2,330	2,310	2,304	2,291	2,276	2,263
σ^* (MPa)	0,01	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01
<i>P, mín.</i> (kg/m ³)	2,323	2,303	2,300	2,289	2,268	2,255
<i>P, máx.</i> (kg/m ³)	2,338	2,314	2,310	2,293	2,283	2,272

Tabela H. 2 - ANOVA: Massa específica

Fonte da variação	SQ	gl	MQ	F	valor-P	F crítico
Entre grupos	0,008793	5	0,001759	41,00518	3,89603E-07	3,105875
Dentro dos grupos	0,000515	12	4,29E-05			
Total	0,009308	17				significativo

Tabela H. 3 - Teste t: Massa específica

Parâmetro	AN	AGR	AN	AGR	AN	AGR	AN	AMR	AN	AMR
	REF	30	REF	50	REF	100	REF	30	REF	50
Média	2,3297	2,310	2,3297	2,304	2,3297	2,291	2,3297	2,276	2,3297	2,263
Variância	6E-05	4E-05	6E-05	3E-05	6E-05	4E-06	6E-05	6E-05	6E-05	7E-05
Observações	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Variância agrupada	5E-05		4E-05		3E-05		6E-05		7E-05	
Hipótese da diferença de média	0		0		0		0		0	
gl	4		4		4		4		4	
Stat t	3,4887		4,7687		8,3872		8,6554		10,075	
P(T<=t) bi-caudal	0,0252		0,0088		0,0011		0,001		0,0005	
t crítico bi-caudal	2,7764		2,7764		2,7764		2,7764		2,7764	

Tabela H. 4 - Resumo do teste t: Massa específica

Traços	AGR 30	AGR 50	AGR 100	AMR 30	AMR 50
AN REF	Sim	Sim	Sim	Sim	Sim

Obs: não = não significativo / Sim = significativo

ANEXO A

RELATÓRIO DE ENSAIOS CIMENTO CP V ARI RS

		RELATÓRIO DE ENSAIOS DE CIMENTO TIPO / CLASSE : CP V ARI RS FÁBRICA BARROSO				
ENSAIOS	PERÍODO	02.10.2017 26.10.2017	30.10.2017 16.11.2017	27.11.2017 21.12.2017		LIMITES NBR 5733 / 5737
ENSAIOS FÍSICOS						
# 400 (%) IT Holcim	Média Desv. Pad. Nº Amostras	1,6 0,44 8	1,9 0,24 8	1,6 0,26 8		
# 325 (%) NBR 9202	Média Desv. Pad. Nº Amostras					
Blaine (cm²/g) NBR NM 76	Média Desv. Pad. Nº Amostras	4683 61 8	4681 72 8	4701 54 8		≥ 3000
Início Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras	173 9 8	172 7 8	168 5 8		≥ 60
Fim Pega (min) NBR NM 65	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 600
Exp. Quente (mm) NBR 11582	Média Desv. Pad. Nº Amostras					≤ 5
R 1 dia (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	22,9 0,73 8	21,7 0,37 8	22,8 1,29 8		≥ 11,0
R 3 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	34,5 1,42 8	33,0 1,02 8	33,7 1,65 8		≥ 24,0
R 7 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	40,4 1,36 8	39,4 0,64 8	40,6 1,58 7		≥ 34,0
R 28 dias (MPa) NBR 7215	Média Desv. Pad. Nº Amostras	50,1 1,31 8	49,3 1,51 8			
ANÁLISE QUÍMICA (%)						
PF 1000°C	NBR NM 18	1,96	2,00	2,02		≤ 4,5
SiO₂	NBR 14656	22,85	23,05	22,79		
R.I.	NBR NM 15	0,66	0,56	0,62		≤ 1,0
Al₂O₃	NBR 14656	6,05	6,25	6,21		
Fe₂O₃	NBR 14656	2,42	2,51	2,57		
CaO	NBR 14656	60,87	59,83	60,31		
MgO	NBR 14656	2,28	2,34	2,25		
SO₃	NBR 14656	2,68	2,72	2,70		≤ 4,5
CO₂	NBR NM 20					≤ 3,0
K₂O	NBR 14656	0,79	0,79	0,79		
PF 500°C	IT Holcim	0,79	0,84	0,83		
C₃A (Teórico)	Equação Bogue	6,29			6,28	
OBSERVAÇÕES:						
1. IT = Intrusão de Trabalho						
2. Resíduo na peneira #200: ≤ 6,0% (NBR 11579)						
						
						Eng. Fabricio Carlos França Assessoria Técnica MG
APLO_CP_V_ARI_RS_VENDAS.xls		5 janeiro, 2018				

ANEXO B

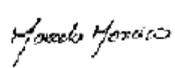
ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTO FÍLER CALCÁRIO

	ESPECIFICAÇÃO DE PRODUTO ACABADO	Revisão: 03
	BRM F 14 - EPA 17.00 – CALCÁRIO 126/325	Data: 04/06/14
		Página: 1/1

1- CARACTERÍSTICAS INFORMATIVAS	
1.1 – Composição Básica:	Carbonato de Cálcio (CaCO ₃)
1.2 – Características Químicas Típicas – Referencial	
CaO	55,69 %
Al ₂ O ₃	0,16 %
Fe ₂ O ₃	0,02 %
MgO	0,26 %
SiO ₂	0,11 %
A análise química é uma média de vários lotes e não é controlada lote a lote, portanto serve somente como referencial.	

2- PROPRIEDADES CONTROLADAS		
CARACTERÍSTICAS	LIMITE DE VARIAÇÃO	MÉTODO DE ENSAIO
Absorção DOP (%)	24,0 a 30,0	IT BRM 03
Absorção Óleo Linhaça (%)	17,0 a 23,0	IT BRM 02
Cor	Cinza	IT BRM 19
Densidade Aparente Compactada (g/cm ³)	1,15 a 1,35	IT BRM 20
Perda ao Fogo (850°C) (%)	Máx. 45,0	IT BRM 11
Peso Específico (g/cm ³)	2,55 a 2,75	IT BRM 7
pH (solução aquosa 5%)	8,5 a 10,5	IT BRM 9
Retenção # 325 mesh (0,045 mm) (%)	Máx. 1,0	IT BRM 8
Umidade (%)	Máx. 1,0	IT BRM 10

3 – EMBALAGEM: Sacos de papel kraft de 2 folhas com peso líquido de 25 kg por saco
4 – MANUSEIO E ESTOCAGEM Manuseio e armazenamento em local seco e arejado. Empilhamento máximo de 2 pallets.
5 – PRAZO DE VALIDADE: 5 anos

ELABORAÇÃO/REVISÃO	ANÁLISE CRÍTICA	APROVAÇÃO
Nome: Alberto S. Santos	Nome: Reginaldo da Silva	Nome: Marcelo Monaco da Cunha
Data: 03/07/06	Data: 03/07/06	Data: 03/07/06
Assinatura: 	Assinatura: 	Assinatura: 

CONTROLE DE REVISÕES		
Revisão	Descrição	Data
00	Emissão inicial.	14/07/00
01	Padronização estética para documentos da qualidade. Atualizações nas propriedades físicas e químicas	03/07/06
02	Atualização da numeração do método de ensaio	23/10/07
03	Alteração peso/embalagem de 40 kg para 25 kg	04/06/14

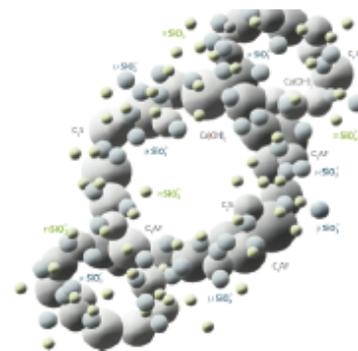
rev 01

ANEXO C

FICHA TÉCNICA ADITIVO SUPERPLASTIFICANTE

Silicon ns mix 400

ADITIVO PARA CONCRETO USINADO



O **Silicon ns mix 400** é um aditivo super plastificante à base de policarboxilato de última geração modificado com nanosilica estalizada. Este aditivo é desenvolvido especificamente para seu uso em usinas de concreto. O produto **Silicon ns mix 400** possibilita a fabricação de concreto de alta qualidade sem ou com estabilizador de pega, com manutenção do abatimento em até 4 horas.

Este aditivo atende as especificações da NBR 11.768.

Benefícios:

A ação conjunta da nanosilica e dos policarboxilatos de última geração (*tecnologia exclusiva Silicon*), sempre que os aditivos sejam dosados corretamente, confere ao concreto as seguintes propriedades:

No concreto:

Maior coesão sem perda de abatimento, menor segregação e menor exsudação, porosidade e permeabilidade (tanto à água como aos gases), maior resistência mecânica inicial e final (especialmente a tração e flexo-tração) e módulo de elasticidade.

Para as usinas de concreto:

Possibilidade de otimização do traço do concreto, economizando seu processo de produção, manutenção de abatimento em até 4 horas desde sua fabricação, reduzindo assim a quantidade de concreto descartado ou redosado, aumentando a capacidade de entrega, produção de concreto com baixo fator *a/c* sem perda de trabalhabilidade, facilidade na escolha entre os diferentes aditivos desta linha para satisfazer as especificações do concreto (tempo aberto, bombeamento, fatos *a/c*, resistência mecânica, etc).

Para projetista:

Segurança de que o concreto atinge as especificações de projeto e a possibilidade de projetar com concreto durável de elevada qualidade, satisfazendo sobre tudo as necessidades de módulo de elasticidade.

Para o aplicador:

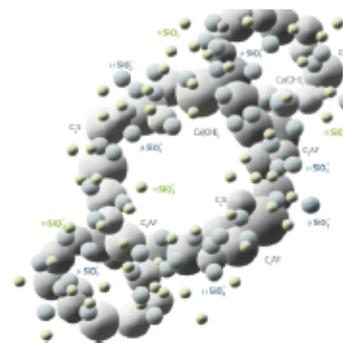
Facilidade de lançamento e bombeamento do concreto, garantia de homogeneidade nas propriedades dos concretos especificados e produzidos pela usina e economia na obra ou projeto sem desperdícios e/ou retrabalho.

Modo de utilização:

O **Silicon ns mix 400** deve ser adicionado diretamente na massa do concreto depois da mistura dos materiais com a água; ou com a última fração da água da mistura. Estes aditivos nunca devem ser incorporados ao concreto sobre os materiais secos. O tempo de mistura necessário para os aditivos desenvolverem todo seu poder dispersante/fluidificante dependem do método utilizado e dos materiais que compõem o concreto. O concreto resultante deve submeter-se a cura adequada, conforme as normas de construção estabelecidas.

Silicon ns mix 400

ADITIVO PARA CONCRETO USINADO



Embalagem: Tambor de plástico de 220 kg; IBC/Tanque de 1.100 kg; Granel.

Validade: Pode ser armazenado por até 6 meses em sua embalagem original e intacto, em local protegido do Sol, entre 5 e 35 °C.

Especificações: A tabela a seguir contém as especificações do aditivo **Silicon ns mix 400**.

Produto:	Recomendações técnicas para aplicação	Dosagem p/ cada 100 kg cimento	Aspecto / cor	Teor de cloretos	pH	Massa específica (g/cm³)	
Silicon ns mix 400	Aditivo para a manutenção da plasticidade de 200 min. à 4h.	Especialmente desenvolvido para sua aplicação em concretos usinados.	[480 ml - 1.960 ml] Recomendação Inicial: 860 ml	Líquido homogêneo /mel claro	< 0,16%	3,0 ± 1,0	1,04 ± 0,02

Instrução de Segurança: Apesar ser classificados como produtos não perigosos, deve-se evitar o contato direto com a pele, a inalação ou ingestão. No caso de reação severa, consulte um médico. Para maior informação sobre o uso de equipamentos de proteção individual (EPI) apropriados para manuseio, e outras informações adicionais consultar a Ficha de Informações de Segurança de Produtos Químicos (FISPQ) correspondente.

www.silicon.ind.br - silicon@silicon.com.br - tel. 5511 4496.6464

Silicon Ind. e Com. Produtos Químicos - Rua Américo Simões, 119 São Roque da Chave - 13296 000 - Itupeva - SP - Brasil

Silicon
alto desempenho em concretos