

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E
AMBIENTAL**

**PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM USO DE FÍLER
CALCÁRIO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI**

UILIANA MÁRCIA DA SILVA MERCÊS FARIAS

FEIRA DE SANTANA, BA– BRASIL

MARÇO DE 2017

PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM USO DO FÍLER
CALCÁRIO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI

Uiliana Márcia da Silva Mercês Farias

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL.

Aprovada por:



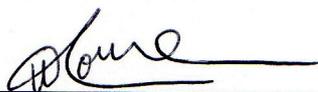
Prof.^a. Mônica Batista Leite, D.Sc.

(Universidade Estadual de Feira de Santana)



Prof. Guilherme Chagas Cordeiro, D.Sc.

(Universidade Estadual do Norte Fluminense)



Prof. Washington Almeida Moura, D.Sc.

(Universidade Estadual de Feira de Santana)

FEIRA DE SANTANA, BA – BRASIL

MARÇO DE 2017

Ficha Catalográfica – Biblioteca Central Julieta Carteado

F238p Farias, Uiliana Márcia da Silva Mercês
Produção de concreto autoadensável com uso de fíler calcário de resíduo de serragem de Pedra Cariri / Uiliana Márcia da Silva Mercês Farias. – Feira de Santana, 2017.
171 f. : il.

Orientador a: Mônica Batista Leite .

Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Feira de Santana, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental , 2017.

1. Concreto autoadensável. 2. Resíduo de serragem de Pedra Cariri .
I. Leite, Mônica Batista , orient. II. Universidade Estadual de Feira de Santana. III. Título.

CDU: 624.012.45

AGRADECIMENTOS

Este estudo foi possível graças à colaboração de pessoas especiais que pude contar ao longo dessa jornada.

Agradeço ao Pai Maior, pela sabedoria, força e luz divina a me guiar.

Agradeço ao meu esposo Caio, sempre tão compreensivo, companheiro e pronto a me ajudar no que fosse possível. Não teria conseguido sozinha. Agradeço aos meus filhos Manoel e Vinicius que aceitaram de modo tranquilo a minha ausência. Obrigada por vocês fazerem parte da minha vida.

A minha família Mercês, sempre disponível e ajudando na tarefa de dar atenção aos meus filhos, para eles não sentirem tanto minha falta. Em especial a minha mãe Conceição, sempre tão dedicada e exemplo de mulher guerreira. As minhas irmãs Carla e Andréa, pelo apoio incondicional.

A minha família Farias, pelo apoio e compreensão. Em especial, a minha cunhada Sandra, sempre tão prestativa e com uma energia vibrante.

A minha amiga e orientadora Mônica Leite, sem você eu não teria conseguido chegar ao fim. Obrigada por toda dedicação, paciência, tranquilidade e profissionalismo. Você é uma profissional excelente e um ser humano melhor ainda.

Obrigada, aos colegas do mestrado Durval, Safira, Mercurie, Pedro, Ana Amélia, Ana Paula, Mailson, com vocês este período ficou mais leve e divertido.

Obrigada aos funcionários do LABOTEC I, pelo apoio, torcida e compreensão. Em especial ao Sr. Nilson, Rosana, Nice, Rose, Adriano e Jorge Luis. Às técnicas do Laboratório de Materiais de Construção pela ajuda na parte experimental desse estudo, Carine, Fernanda e Layla.

A minha amiga Myrella pelo incentivo e momentos de gargalhadas.

A minha companheira de laboratório, “minha IC” Brendhy Torres, você não imagina como me ajudou, obrigada. Aos alunos de iniciação científica Amanda e John.

Agradeço ao PPGCEA, pela oportunidade. Agradeço aos professores do programa, em especial ao professor Washington Moura, obrigada pelos ensinamentos. Às funcionárias do mestrado, Mariana e Cátia, sempre prontas a ajudar. Obrigada pelo carinho.

Meu agradecimento a Grace Brasil Ltda pela doação do aditivo químico utilizado nesse estudo. E ao CNPq pelo suporte financeiro ao projeto de pesquisa.

A CAPES pelo suporte financeiro ao PPGCEA.

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGECEA/UEFS como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL COM USO DE FÍLER CALCÁRIO DE RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI

Uiliana Márcia da Silva Mercês Farias

Março/2017

Orientador: Prof^ª. Dr^ª. Mônica Batista Leite

Programa: Engenharia Civil e Ambiental

No sentido de promover a sustentabilidade do setor da construção civil, procura-se alternativas para diminuir o impacto ambiental gerado, através da descoberta de novos materiais alternativos, como os resíduos da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais. Dentre os tipos de rochas ornamentais exploradas no Brasil, destaca-se um calcário laminado conhecido como “Pedra Cariri”, que é explorado no estado do Ceará. Assim, esse trabalho foi desenvolvido com o objetivo de estudar a produção de concreto autoadensável (CAA) utilizando resíduos de serragem de pedra Cariri (RSPC) em substituição parcial ao agregado miúdo natural. Utilizando a metodologia de Melo (2005) para produção de CAA, foram definidas as relações a/c (0,57-0,70). O estudo se deu em três etapas: caracterização dos materiais, fase argamassa e fase CAA. No estado fresco, o CAA foi avaliado quanto à fluidez, viscosidade plástica, habilidade passante e resistência à segregação, por meio do ensaio de espalhamento, funil V, Anel J, Caixa L e coluna de segregação. No estado endurecido, o CAA foi avaliado quanto à resistência à compressão axial, à resistência à tração por compressão diametral e à absorção de água, índice de vazios e massa específica. Os resultados indicaram a possibilidade da aplicação de até 10% de RSPC na produção de CAA.

Palavras-chave: Concreto autoadensável. Aproveitamento de resíduos. Fíler calcário.

Abstract of Dissertation presented to PPGECEA/UEFS as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

PRODUCTION OF SELF-CONSOLIDATING CONCRETE USING LIMESTONE
FILLER OF CARIRI STONE SAWDUST WASTE

Uiliana Márcia da Silva Mercês Farias

March/2017

Advisor 1: Professor Doctor Mônica Batista Leite

Department: Civil and Environment Engineering

The use of waste from Dimension Stone Industry as an inert material can be a good way to promote the sustainability of the construction sector. The Cariri stone is one of the dimension stones explored in state of Ceara, in Brazil. Thus, this work was developed with the main goal of studying a self-compacting concrete production (SCC) using Cariri stone sawdust waste (CSSW) in partial replacement with the natural fine aggregate. The SCC was designed using the method proposed by Melo (2005) considering two w/c ratios (0.57-0.70), and 10% of CSSW. The study was carried out in three stages: material characterization, mortar phase evaluation and SCC phase evaluation. In the fresh state, SCC was evaluated for fluidity, plastic viscosity, blocking capacity and segregation resistance, using V funnel, J-Ring, L-box and segregation column. In the hardened state, the SCC was evaluated for axial compressive strength, splitting tensile strength and water absorption, void index and specific density. The results showed that CSSW improve SCC cohesiveness and homogeneity, and it is feasible to apply up to 10% of CSSW in SCC production.

Keywords: Self-compacting concrete. Limestone Filler. Waste management.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Obras executadas com CAA: (a) Ponte Akashi Kaikyo, Japão (Fonte: ENGENHARIA ONLINE, 2011); (b) Elementos arquitetônicos com CAA (Fonte: TUTIKIAN, 2007); (c) Museu Iberê Camargo, Porto Alegre, Brasil (Fonte: FUNDAÇÃO IBERÊ CAMARGO, 2003).....	26
Figura 2	Arena de Pernambuco (Fonte: DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2013)	27
Figura 3	Escoamento da água, óleo, mel e lama (Fonte: COUSSOT, 1997, citado por KIRYU, 2006).....	28
Figura 4	Deformação de um fluido (Fonte: SCHRAMM, 2006)	29
Figura 5	Tipos de comportamentos de fluxo (Fonte: HOPPE <i>et al.</i> , 2008).....	31
Figura 6	Modelo de Bingham e de Newton (Fonte: KRAUS, 2006)	32
Figura 7	Parâmetros reológicos de vários tipos de concreto (Fonte: NUNES, 2001) 35	
Figura 8	Faixas referenciais de valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica para o CAA segundo Wallevik (2003) (Fonte: KRAUS, 2006).....	35
Figura 9	Efeitos dos componentes do concreto sobre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica (Fonte CORRADI; KHURANA; MARGAROTO, 2003).....	37
Figura 10	Quantidade de pasta necessária para promover a dispersão dos agregados (Fonte: KRAUS, 2006).....	37
Figura 11	Ensaio de espalhamento: (a) Equipamento utilizado (dimensões em mm) (Fonte: GOMES; BARROS, 2009); (b) CAA sem segregação; (c) CAA com segregação visível (Fonte: TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008)	41
Figura 12	Funil V (Fonte: NUNES, 2001).....	43
Figura 13	Modelo da Caixa L (Fonte: MARQUES, 2011).....	44
Figura 14	Anel J em conjunto com o teste de espalhamento (Fonte: LEITE, 2007) 45	
Figura 15	Coluna de segregação (Fonte: ALENCAR, 2008)	46
Figura 16	Faixas granulométricas usuais para CAA e composições dos agregados utilizados por Melo (2005): (a) agregado miúdo (b) agregado graúdo	49
Figura 17	Resultados de resistência à compressão do concreto vibrado e do CAA (Fonte: TENNICH <i>et al.</i> , 2015).....	51
Figura 18	Resultados de resistência à tração do concreto vibrado e CAA (Fonte: TENNICH <i>et al.</i> , 2015)	51
Figura 19	Resultados da resistência à compressão do CAA com diferentes tipos de adições (Fonte: ELYAMANY; ELMOATY; MOHAMED, 2014).....	52

Figura 20	Resultados das propriedades mecânicas obtidos aos 28 e 90 dias: (a) resistência à tração; (b) módulo de elasticidade (Fonte: PARRA <i>et al.</i> , 2011).....	57
Figura 21	Fluxograma do método de dosagem Repette-Melo (Fonte: MELO, 2005)..	64
Figura 22	Mapa do estado do Ceará destacando os municípios de maior produção de Pedra Cariri, Santana do Cariri e Nova Olinda (Fonte: VIDAL <i>et al.</i> , 2005)	65
Figura 23	Aspectos da rocha de Pedra Cariri: (a) Jazida de rocha em camadas estratificadas (Fonte: VIAJENACHAPADA, 2014); (b) Tom creme; (c) Tom acinzentado (Fonte: BASTOS, 2014).....	66
Figura 24	Fósseis encontrados na Pedra Cariri: (a) Dastiselbe Elongatus, localmente conhecido como “piaba” (Fonte: BASTOS, 2014); (b) Dastiselbe Elongatus junto a uma espécie vegetal (Fonte: MOCHIUTTI <i>et al.</i> , 2012).....	67
Figura 25	Utilização da Pedra Cariri em áreas molhadas (Fonte: BASTOS, 2014).	67
Figura 26	Utilização não convencional da Pedra Cariri: (a) Móveis (Fonte: CASTRO, 2009); (b) Artigo de decoração (Fonte: BASTOS, 2014).....	68
Figura 27	Fluxograma das etapas de processo produtivo da Pedra Cariri e geração de resíduos (RCVSRE- Resíduo de cobertura vegetal, solo e rocha exposta; RCBPC- Resíduo de Corte dos Blocos de Pedra Cariri; RSPC- Resíduo de Serragem de Pedra Cariri; RPC- Resíduo de Pedra Cariri) (Fonte: Adaptado de BASTOS, 2014).....	69
Figura 28	Frente de lavra obstruída pelos rejeitos do processo produtivo da Pedra Cariri (Fonte: CASTRO, 2009)	70
Figura 29	Exploração de Pedra Cariri: (a) Área de lavra do calcário (Fonte: BASTOS, 2014); (b) Lavra manual (Fonte: VIDAL <i>et al.</i> , 2005); (c) Aspecto da pedreira com processo semimecanizado (Fonte: MENDES FILHO, 2009); (d) Aspecto da frente de lavra (Fonte: CLEMENTE <i>et al.</i> , 2016); (e) Camada de matracão (Fonte: CASTRO, 2009); (f) Caverna de dissolução cárstica (Fonte: CASTRO, 2009); (g) Desplacamento manual (Fonte BASTOS, 2014).....	71
Figura 30	Beneficiamento da Pedra Cariri: (a) Calibragem manual (Fonte: BASTOS, 2014); (b) Esquadrejamento na serraria (Fonte: CASTRO, 2009); (c) Local de estoque após o esquadrejamento (Fonte: MENDES FILHO, 2009).....	72
Figura 31	Deposição dos resíduos de pedra Cariri: (a) Aspecto das pilhas de RPC (Fonte: SUASSUNA <i>et al.</i> , 2012); (b) Aspecto da deposição do RSPC (Fonte: BASTOS, 2014); (c) Aspecto da lagoa de lama de RSPC (Fonte: BASTOS, 2014).....	73

Figura 32	Aspecto da área exploração de Pedra Cariri: (a) e (b) Pilhas de rejeitos (Fonte: BASTOS, 2014); (c) Córrego assoreado (Fonte: CASTRO, 2009).....	74
Figura 33	Difratograma de raios-X do RSPC: (a) Estudo de Menezes <i>et al.</i> (2010); (b) Estudo de Suassuna <i>et al.</i> (2012), no qual o RSPC é a amostra ANAAM5; (c) Estudo de Moura <i>et al.</i> (2013).....	75
Figura 34	Micrografias de microscopia eletrônica de varredura do RSPC (a) resíduo amarelo (b) resíduo cinza (Fonte: MENEZES <i>et al.</i> , 2010).....	75
Figura 35	Resistência à compressão dos concretos produzidos com incorporação de RSPC: (a) 7 dias; (b) 28 dias (Fonte: BASTOS, 2014).....	78
Figura 36	Resultados da resistência à tração por compressão diametral de concretos convencionais com incorporação de RSPC: (a) 7 dias; (b) 28 dias (Fonte: BASTOS, 2014)	79
Figura 37	Resultados referentes aos ensaios de absorção: (a) taxa de absorção capilar; (b) absorção por imersão (Fonte: BASTOS, 2014).....	79
Figura 38	Curva granulométrica do cimento Portland.....	83
Figura 39	Perfil granulométrico dos agregados miúdos naturais.....	84
Figura 40	Perfil granulométrico da brita 9,5mm	85
Figura 41	Coleta do RSPC (BASTOS, 2014).....	86
Figura 42	Processo de beneficiamento do RSPC: (a) Aspecto do resíduo coletado retirado da baía do laboratório durante a secagem; (b) Britador de mandíbulas utilizado no primeiro destorroamento; (c) Aparência do resíduo após o destorroamento; (d) Aparência do resíduo após o peneiramento em malha de 4,8mm; (e) Moinho de bolas de eixo vertical excêntrico utilizado no segundo destorroamento; (f) Aspecto do RSPC após o beneficiamento	87
Figura 43	Difratograma da amostra de RSPC.....	88
Figura 44	Curva granulométrica da amostra do RSPC e do cimento CII Z -32.....	89
Figura 45	Ensaio de compatibilidade cimento/aditivo: (a) Cone de Marsh; (b) Resultados obtidos.....	91
Figura 46	Curvas granulométricas do agregado miúdo e faixa ideal proposta por Melo (2005)	92
Figura 47	Aspecto da argamassa com 70% de areia fina e 30% de areia média	92
Figura 48	Curva granulométrica do agregado graúdo e faixa ideal proposta por Melo (2005)	93

Figura 49	Equipamentos utilizados para a produção e ensaios da AA: (a) Mini cone; (b); Funil V para argamassas; (c) Argamassadeira com capacidade para 5 litros; (d) Argamassadeira com capacidade para 20 litros.....	96
Figura 50	Ensaio nas AAs: (a) Moldagem; (b) Ensaio de capilaridade; (c) Prensa hidráulica; (d) Ensaio de resistência à compressão	99
Figura 51	Ensaio no CAA no estado fresco: (a) e (b) Determinação do espalhamento – Método do cone de Abrams; (c) Funil V; (d) Anel J.....	102
Figura 52	Ensaio da determinação da habilidade passante – Método da caixa L: (a) Aspecto do ensaio antes da abertura da comporta; (b) Vista frontal do CAA na câmara horizontal; (c) Medição das alturas H1 e H2.....	103
Figura 53	Ensaio da coluna de segregação: (a) Equipamento preenchido com a amostra de CAA; (b) Lavagem da amostra sobre uma peneira com abertura da malha de 5mm; (c) Secagem superficial dos agregados graúdos; (d) Pesagem da amostra de agregado graúdo na condição saturado superfície seca (SSS).....	104
Figura 54	Ensaio de ruptura no CAA: (a) Prensa utilizada; (b) Ensaio de resistência à compressão; (c) Ensaio de resistência à tração por compressão diametral.....	105
Figura 55	Aspecto do espalhamento das AA com relação a/c 0,70, variando o volume de AM e o teor de aditivo SP: (a) 40% AM; (b) 45% AM; (c) 50% AM	108
Figura 56	Aspecto do espalhamento das AA com relação a/c 0,57, variando o volume de AM e o teor de aditivo SP: (a) 40% AM; (b) 45% AM; (c) 50% AM	108
Figura 57	Aspecto do espalhamento das AA com relação a/c 0,46, para o volume de AM 40% e variando o teor SP: (a) 0,10%SP; (b) 0,20%SP; (c) 0,25%SP.....	110
Figura 58	Comportamento das argamassas com relação a/c 0,70 no ensaio de espalhamento: (a) 5%RSPC; (b) 10%RSPC; (c) 15%RSPC; (d) 20%RSPC	112
Figura 59	Comportamento das argamassas com relação a/c 0,57 no ensaio de espalhamento: (a) 5%RSPC; (b) 10%RSPC; (c) 15%RSPC; (d) 20%RSPC	113
Figura 60	Comportamento das argamassas com relação a/c 0,46 no ensaio de espalhamento: (a) 5%RSPC; (b) 10%RSPC; (c) 15%RSPC; (d) 20%RSPC	114
Figura 61	Aspecto das argamassas autoadensáveis com substituição parcial do agregado miúdo por RSPC com relação a/c 0,46 após a moldagem: (a) argamassa dentro da forma, onde é possível verificar a falta de autoadensabilidade da mistura; (b) argamassa apresentando segregação em camadas	115
Figura 62	Curvas de comportamento na resistência à compressão axial das argamassas autoadensáveis devido à influência das variáveis estudadas: relação a/c, teor	

de substituição do agregado miúdo natural por RSPC e idade: (a) aos 7 dias; (b) aos 28 dias	119
Figura 63 Resultados dos ensaios nas argamassas autoadensáveis: (a) Absorção de água; (b) Índice de vazios.....	121
Figura 64 Curvas de comportamento do coeficiente de capilaridade nas argamassas autoadensáveis, aos 28 dias, devido à influência das variáveis estudadas: relação a/c e teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC	123
Figura 65 Comportamento do CAA (a/c 0,70) no ensaio de espalhamento durante o ajuste de agregado graúdo: (a) 27,0% de agregado graúdo; (b) 30,0% de agregado graúdo	126
Figura 66 Curva granulométrica dos sólidos constituintes do CAA.....	129
Figura 67 Aspecto do CAA nos ensaios: (a) Espalhamento; (b) Anel J.....	132
Figura 68 Influência das variáveis estudadas (relação a/c, RSPC e idade) na resistência à compressão axial dos CAA: (a) aos 7 dias; (b) aos 28 dias.....	135
Figura 69 Influência das variáveis estudadas (relação a/c, uso do RSPC e idade na resistência à tração por compressão diametral dos CAA: (a) aos 7 dias; (b) aos 28 dias... ..	138
Figura 70 Influência das variáveis analisadas (relação a/c e RSPC) nos CAA estudados, aos 28 dias, referentes aos ensaios: (a) Taxa de absorção de água; (b) Índice de vazios	141
Figura 71 Comparação múltipla de médias entre os valores de absorção de água das AA	168

LISTA DE QUADROS

Quadro 1	Propriedades do CAA no estado fresco e seus mecanismos	38
Quadro 2	Propriedades do CAA no estado endurecido comparadas ao concreto convencional	60
Quadro 3	Relação dos principais métodos de dosagem do CAA encontrados na literatura internacional	62
Quadro 4	Relação de estudos em CAA realizados no Brasil, em ordem cronológica, e o respectivo método de dosagem adotado	63
Quadro 5	Critérios para escolha do teor de agregado miúdo com base nos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Equações dos comportamentos dos fluidos.....	32
Tabela 2	Reologia da pasta de cimento, argamassa, concreto convencional e CAA..	35
Tabela 3	Resultados do ensaio de espalhamento encontrados na literatura.....	42
Tabela 4	Resultados do ensaio do funil V encontrados na literatura	43
Tabela 5	Resultados para o ensaio da caixa L.....	44
Tabela 6	Resultados para o ensaio no anel J	45
Tabela 7	Resultados para o ensaio de coluna de segregação.....	46
Tabela 8	Composição dos concretos estudados por Tennich <i>et al.</i> (2015)	50
Tabela 9	Composição dos concretos estudados por Parra <i>et al.</i> (2011).....	56
Tabela 10	Composição dos concretos e resultados obtidos no estudo de Barros (2008)	59
Tabela 11	Faixas usuais dos constituintes do CAA para o seu correto proporcionamento.....	61
Tabela 12	Resultados de composição química dos RSPC encontrados na literatura	76
Tabela 13	Resultados de resistência média à compressão, aos 28 dias, das argamassas avaliadas	77
Tabela 14	Resultado do índice de atividade pozolânica do RSPC.....	80
Tabela 15	Caracterização física e mecânica do cimento CP II Z-32.....	82
Tabela 16	Composição química do cimento Portland CII-Z-32	83
Tabela 17	Resultados da caracterização dos agregados miúdos naturais.....	84
Tabela 18	Resultados da caracterização do agregado graúdo	85
Tabela 19	Composição química do RSPC	88
Tabela 20	Resultados da caracterização do RSPC	90
Tabela 21	Parâmetros e métodos usados para o CAA no estado fresco.....	101
Tabela 22	Ensaio realizados para avaliar o CAA no estado endurecido	105
Tabela 23	Resultados de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do teor de agregado miúdo e % de SP das AA	107
Tabela 24	Resultados médios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do ajuste do teor de RSPC e % de SP das AA	111

Tabela 25	Composição final das argamassas autoadensáveis: teor de agregado miúdo, teor de aditivo SP e seus respectivos resultados médios nos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V	115
Tabela 26	Consumo de materiais (kg) para a produção de 1m ³ de argamassa autoadensável	116
Tabela 27	Resultados médios de resistência à compressão das argamassas autoadensáveis, aos 7 e 28 dias, desvio padrão e coeficiente de variação	117
Tabela 28	Análise de variância dos efeitos da relação a/c, da substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC e da idade sobre a resistência à compressão das argamassas autoadensáveis.....	118
Tabela 29	Resultados médios da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, desvio padrão e o coeficiente de variação para as argamassas autoadensáveis estudadas	119
Tabela 30	Análise de variância dos efeitos da relação a/c e do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC sobre a absorção de água, aos 28 dias, nas argamassas autoadensáveis.....	120
Tabela 31	Análise de variância dos efeitos da relação a/c e do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC sobre o índice de vazios nas argamassas autoadensáveis	121
Tabela 32	Resultados médios das argamassas autoadensáveis obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias	122
Tabela 33	Análise de variância dos efeitos da relação a/c e do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC sobre o coeficiente de capilaridade das argamassas autoadensáveis aos 28 dias	123
Tabela 34	Resultados dos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para definição do teor de agregado graúdo para produção do CAA.....	125
Tabela 35	Composição final do CAA: teor de agregado miúdo e graúdo, aditivo SP e percentual de substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC	127
Tabela 36	Traço unitário, em massa e volume, e consumo de materiais para a produção de 1m ³ de CAA	128
Tabela 37	Resultados dos ensaios realizados no CAA de referência (C-R) e CAA com substituição parcial do agregado miúdo natural por RSPC (C-RSPC), no estado fresco	130

Tabela 38	Resultados médios de resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias, desvios padrão e coeficientes de variação para os CAA estudados	133
Tabela 39	Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e RSPC sobre a resistência à compressão axial dos CAA estudados	134
Tabela 40	Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral, aos 7 e 28 dias, desvios padrão e coeficientes de variação para os CAA estudados	136
Tabela 41	Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e uso do RSPC sobre a resistência à tração por compressão diametral dos CAA estudados.....	137
Tabela 42	Resultados da absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos CAA estudados .	139
Tabela 43	Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e uso do RSPC sobre a taxa de absorção de água, aos 28 dias, dos CAA estudados.....	140
Tabela 44	Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e uso do RSPC sobre o índice de vazios, aos 28 dias, dos CAA estudados.....	140
Tabela 45	Resultados individuais de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do teor de agregado miúdo e % de SP das AA	163
Tabela 46	Resultados individuais de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do ajuste do teor de RSPC e % de SP das AA	164
Tabela 47	Resultados individuais de resistência à compressão das argamassas autoadensáveis, aos 7 e 28 dias	166
Tabela 48	Resultados individuais da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, das argamassas autoadensáveis estudadas.....	167
Tabela 49	Resultados individuais das argamassas autoadensáveis obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias	169
Tabela 50	Resultados individuais de resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias dos CAA estudados	170
Tabela 51	Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 7 e 28 dias dos CAA estudados.....	171
Tabela 52	Resultados individuais da absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, dos CAA estudados.....	172

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	VI
LISTA DE QUADROS	XI
LISTA DE TABELAS.....	XII
1 INTRODUÇÃO	19
1.1 OBJETIVOS	21
1.1.1 Objetivo geral	21
1.1.2 Objetivos específicos.....	21
1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....	21
2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL	23
2.1 HISTÓRICO	24
2.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO CAA.....	27
2.2.1 Reologia.....	27
2.2.1.1 Tensão	28
2.2.1.2 Taxa de deformação ou taxa de cisalhamento.....	29
2.2.1.3 Viscosidade	30
2.2.1.4 Modelos reológicos	30
2.2.1.5 Reologia do concreto.....	32
2.3 PRINCIPAIS PARÂMETROS DO CAA.....	38
2.3.1 Formas de avaliação dos principais parâmetros do CAA no estado fresco..	39
.....	39
2.4 MATERIAIS QUE COMPÕEM O CAA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A PRODUÇÃO E AS PROPRIEDADES DESSE TIPO DE CONCRETO.....	46
2.4.1 Cimento	46
2.4.2 Agregados.....	47
2.4.3 Adições minerais	49
2.4.4 Aditivos químicos.....	52
2.4.5 Água	54

2.5	PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO ENDURECIDO	55
2.6	DOSAGEM E PRODUÇÃO DO CAA	60
3	RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI.....	65
3.1	GERAÇÃO DE RESÍDUOS	68
3.2	CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI	74
4	PROGRAMA EXPERIMENTAL	82
4.1	SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	82
4.1.1	Cimento Portland.....	82
4.1.2	Agregado miúdo	83
4.1.3	Agregado graúdo	85
4.1.4	RSPC	86
4.1.4.1	Coleta, obtenção e beneficiamento do RSPC.....	86
4.1.4.2	Características químicas	88
4.1.4.3	Características físicas	89
4.1.5	Água	90
4.1.6	Aditivo superplastificante.....	90
4.2	DOSAGEM EXPERIMENTAL	91
4.2.1	Determinação da composição das misturas	91
4.2.2	Determinação da relação água/cimento	93
4.2.3	Estudo da fase argamassa	94
4.2.1	Produção do CAA.....	99
5	APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	106
5.1	ESTUDO DA FASE ARGAMASSA	106
5.1.1	Ajuste do teor de agregado miúdo na argamassa	106
5.1.2	Ajuste do teor de adição na argamassa.....	110
5.1.3	Definição e produção das argamassas autoadensáveis	114
5.1.4	Resultados das propriedades das argamassas no estado endurecido	116

5.1.4.1	Resistência à compressão axial	116
5.1.4.2	Absorção de água, índice de vazios e massa específica.....	119
5.1.4.3	Absorção de água por capilaridade	121
5.2	ESTUDO DA FASE CONCRETO.....	123
5.2.1	Ajuste do teor de agregado graúdo e do aditivo SP.....	124
5.2.2	Definição e proporção do CAA	127
5.2.3	Propriedades dos CAA no estado fresco	130
5.2.4	Propriedades dos CAA no estado endurecido	132
5.2.4.1	Resistência à compressão axial	133
5.2.4.2	Resistência à tração por compressão diametral.....	136
5.2.4.3	Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica....	
	
	139
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	142
6.1	CONCLUSÃO	142
6.2	PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS	144
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	146
APÊNDICE 1	– RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO E NO FUNIL V NAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA).....	163
APÊNDICE 2	– RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO E NO FUNIL V DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS COM RSPC	164
APÊNDICE 3	– RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL NAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA).....	166
APÊNDICE 4	– RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA)	167

APÊNDICE 5 – RESULTADO DA COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA).....	168
APÊNDICE 6 - RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA).....	169
APÊNDICE 7 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS (CAA).....	170
APÊNDICE 8 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS (CAA).....	171
APÊNDICE 9 - RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS (CAA).....	172

1 INTRODUÇÃO

O concreto autoadensável (CAA) é um tipo de concreto que possui a capacidade de autoadensar, passar pelos obstáculos (armaduras e eletrodutos) sem ocorrer bloqueio ou segregação (OKAMURA; OUCHI, 2003). Além disso, o CAA representa uma evolução dos concretos especiais, beneficiando a construção economicamente, tecnologicamente e ambientalmente (MELO, 2005). Este tipo de concreto tem como vantagens: redução da mão de obra e equipamentos, garantia do adensamento mesmo em seções densamente armadas, eliminação do ruído produzido pelos vibradores, aumento da durabilidade das formas e melhor acabamento superficial em relação ao concreto vibrado (GIROTTO, 2012; CALADO *et al.*, 2015). O CAA reduz o custo da mão de obra, aumenta a qualidade e durabilidade das estruturas de concreto e melhora o ambiente de trabalho (TUTIKIAN, 2004).

O CAA é composto, fundamentalmente, pelos materiais comumente empregados na produção do concreto convencional. A escolha dos materiais que compõem o CAA precisa ser criteriosa de modo a atender as propriedades requeridas para este tipo de concreto (MARQUES, 2011). Seu desenvolvimento foi possível devido, principalmente, ao surgimento dos aditivos superplastificantes, os quais proporcionaram concretos mais fluidos, com resistências elevadas, sem o aumento do consumo de cimento (EFNARC, 2002; MARQUES, 2011; ZENDE ; KHADIRNAIKAR, 2014).

O uso de resíduos como adição mineral no CAA tem se mostrado altamente promissor. Para Gomes (2002), o desenvolvimento de concretos especiais, como o CAA, que utilizam alta taxa de resíduos sólidos industriais na forma de finos, contribui para o desenvolvimento sustentável do concreto.

Nesse contexto, viabilizar o uso de materiais alternativos como os resíduos da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais, pode ampliar a disponibilidade de materiais para a produção de CAA. O aproveitamento dos resíduos gerados na produção de rochas ornamentais vem sendo utilizado em pesquisas para produção de argamassas e concretos (MOURA *et al.*, 2009; ELMOATY, 2013; BACARJI *et al.*, 2013; CRUZ *et al.*, 2003; GONÇALVES, 2000; SOARES, 2014; CALMON *et al.*; 2005; YAHIA *et al.*, 2005; DE SCHUTTER, 2011; UYGUNOGLU *et al.*, 2014; SILVA; BRITO, 2016; ALYAMAC *et al.*, 2017; TENNICH *et al.*; 2017).

O Brasil é um grande exportador de rochas ornamentais. No período de janeiro-dezembro de 2016, foram exportadas 2.458.880,58 toneladas de rochas ornamentais (ABIROCHAS, 2017). Dentre os tipos de rochas ornamentais exploradas no Brasil, destaca-se um calcário laminado conhecido como “Pedra Cariri”, que é explorado no estado do Ceará, sendo esta a principal atividade econômica dos municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda. Esse material é um tipo de rocha sedimentar que se apresenta em camadas estratificadas de calcário, composto basicamente de carbonato de cálcio, utilizado, principalmente, como revestimento em pisos e paredes. Estima-se reservas de cerca de 97 milhões de m³, o que equivale a 241 milhões de toneladas deste calcário (CORREIA *et al.*, 2005).

Na exploração e beneficiamento da Pedra Cariri ocorre uma grande perda de material, cerca de 70%, gerando uma grande quantidade de resíduos que pode chegar a três milhões de toneladas (VIDAL *et al.*, 2007). Durante a etapa de beneficiamento, no processo de serragem das placas, é gerado o resíduo de serragem de Pedra Cariri - RSPC (BASTOS, 2014), que consiste de um material fino, na forma de pó.

Algumas pesquisas já foram realizadas com a finalidade de viabilizar o uso do RSPC como adição mineral para produzir argamassa (SILVA, 2008), blocos e telhas cerâmicos (MENEZES *et al.*, 2010), placas cerâmicas para revestimento (SUASSUNA *et al.*, 2012), pastas (GUIMARÃES, 2014), concretos convencionais (BASTOS, 2014), argamassas (MERCÊS *et al.*, 2016) e misturas autoadensáveis (GALVÃO *et al.*, 2016). Os estudos demonstraram que o RSPC possui um potencial de uso como adição tipo fíler. Nesse contexto, acredita-se que o uso de RSPC na composição do CAA possa aumentar a coesão das misturas, melhorando a resistência à segregação e estabilidade do concreto.

Diante do exposto, pretende-se, com este estudo, ampliar o conhecimento sobre a produção do CAA, além de apontar um novo material disponível para a produção deste tipo de concreto, incentivando, assim, a reciclagem do RSPC e contribuindo para a sustentabilidade no setor da construção civil.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

O objetivo principal deste trabalho é estudar a produção de concreto autoadensável utilizando resíduos de serragem de Pedra Cariri (RSPC) em substituição parcial ao agregado miúdo.

1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desse trabalho são:

- caracterizar o RSPC;
- estudar a influência de diferentes teores de resíduo em substituição parcial ao agregado miúdo natural na produção de CAA;
- avaliar as propriedades dos CAA:
 - no estado fresco, quanto à fluidez, viscosidade plástica e habilidade passante;
 - no estado endurecido, quanto à resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral, massa específica, absorção de água e índice de vazios.

1.2 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

O texto da dissertação está estruturado em 6 capítulos.

No capítulo 1 é apresentada uma introdução ao tema, apontando a justificativa e relevância e os objetivos do estudo.

Os aspectos gerais do CAA são apresentados no segundo capítulo. Nesse capítulo são discutidos o histórico, as vantagens decorrentes do uso deste tipo de concreto e as possibilidades de aplicação. Em seguida, são descritas as principais características e as propriedades do CAA no estado fresco e endurecido. Além disso, são abordados os aspectos reológicos do CAA e as suas formas de avaliação. E, por fim, a dosagem do CAA, mostrando os principais aspectos da mistura, métodos de dosagem e uma breve explanação sobre o método adotado para esta pesquisa.

O terceiro capítulo apresenta o resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC), descrevendo a geração, propriedades e utilização deste material na construção civil.

O capítulo 4 apresenta o programa experimental, descrevendo a metodologia utilizada para a caracterização dos materiais utilizados e os resultados obtidos, a dosagem para produção do concreto e os métodos de ensaios aplicados para avaliar as propriedades do CAA, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

No capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos, assim como sua análise e discussão.

Por fim, no sexto capítulo são feitas as considerações finais do estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 CONCRETO AUTOADENSÁVEL

O concreto autoadensável (CAA) é considerado um tipo de concreto especial, sendo definido como uma mistura capaz de fluir através das formas, passando pelos obstáculos e preenchendo os vazios, sob a ação de seu peso próprio, sem utilizar vibração externa, mantendo-se homogêneo (ROLS *et al.*, 1999; GOMES, 2002; EFNARC, 2005; MENEZES, 2006; SHI *et al.*, 2015; NAGARATNAM *et al.*, 2016).

Segundo o EFNARC (2002), o concreto para ser considerado autoadensável precisa apresentar três propriedades:

- capacidade de preenchimento;
- habilidade passante;
- resistência à segregação.

A capacidade de preenchimento é a propriedade que caracteriza a habilidade do CAA de fluir ao longo das formas, preenchendo todos os espaços entre as armaduras. O mecanismo que governa esta propriedade é a alta fluidez e coesão da mistura (GOMES, 2002).

A habilidade passante é a capacidade de escoar pela forma, passando através das armaduras sem obstrução de fluxo e segregação (MARQUES, 2011). Para Gomes (2002), esta propriedade depende de viscosidade moderada da mistura e da dimensão máxima característica do agregado graúdo.

A resistência à segregação está relacionada à capacidade do concreto se manter uniforme ao longo do percurso, não havendo separação de seus constituintes. A resistência à segregação é influenciada pela viscosidade e coesão do CAA (GOMES, 2002).

O CAA é considerado uma grande descoberta para o campo da construção. Segundo Gomes (2002), o CAA aumenta a produtividade, reduz a mão de obra e melhora o ambiente de trabalho. Giroto (2012) afirma que os fatores que levaram ao aumento da utilização do CAA ao longo do tempo estão relacionados à garantia de adensamento do concreto, mesmo em locais de alta concentração de armaduras, diminuição de ruído,

devido a não utilização de vibradores, e rapidez de aplicação. O CAA é uma evolução dos concretos especiais, na medida em que traz benefícios econômicos, tecnológicos e ambientais (MELO, 2005).

2.1 HISTÓRICO

O CAA surgiu no final da década de oitenta, no Japão, devido à perda de qualidade nas estruturas de concreto, ocasionada por falhas de concretagem, decorrentes da deficiência no adensamento e da grande quantidade de armaduras utilizadas para suportar os abalos sísmicos da região. Além disso, a falta de trabalhadores especializados para executar o adensamento adequado do concreto levou à criação de um concreto sem necessidade de vibração (OKAMURA; OUCHI, 2003; REPETTE, 2011). Segundo Marques (2011), o CAA foi também desenvolvido para garantir a durabilidade das estruturas, através da qualidade do processo de construção.

O uso dos aditivos superplastificantes, principalmente os de terceira geração, permitiu o surgimento de concretos mais fluidos, com maiores resistências e menor quantidade de cimento. Assim, os estudos foram direcionados para a trabalhabilidade do concreto. O primeiro CAA foi desenvolvido por Ozawa, em 1988, na Universidade de Tóquio, a partir dos estudos de Okamura (BARROS, 2008; GOMES, 2002; MARQUES, 2011; OKAMURA, 2003; TUTIKIAN, 2004). Desde então, o CAA vem sendo difundido e utilizado no mundo inteiro. De acordo com Ouchi *et al.* (2003), a partir do ano 2000, no Japão, a quantidade deste tipo de concreto utilizado na indústria de pré-moldados e usinas de concreto foi cerca de 400.000 m³.

Segundo Corinaldesi e Moriconi (2011), o desenvolvimento do CAA é considerado um marco na tecnologia do concreto devido a várias vantagens como:

- bom desempenho das propriedades no estado fresco e endurecido (alta fluidez e resistência à segregação, baixa porosidade, alta resistência mecânica e durabilidade, e melhor acabamento da superfície);
- racionalização dos processos produtivos (elementos estruturais mais complexos, com menores seções e alta densidade de armaduras);

- economia devido à facilidade de aplicação (velocidade de execução, redução de mão de obra, energia e custos com equipamentos);
- melhoria nas condições ambientais (utilização de adições provenientes de subprodutos de outras indústrias, diminuição do ruído e melhoria nas condições do ambiente de trabalho).

A eliminação da vibração ocasiona economia de energia elétrica e mão de obra, além da redução do ruído que causa malefícios à saúde do operário. Outro ponto positivo da ausência de adensamento é o aumento da vida útil das formas. A praticidade e os benefícios em saúde e segurança tornam o CAA uma solução adequada para a indústria de pré-moldados, principalmente, e da construção civil (MANUEL, 2005). Outra vantagem do CAA é a redução do custo final da obra quando são mensurados os ganhos com o uso deste concreto (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

Calado *et al.* (2016) estudaram a viabilidade econômica do CAA em comparação ao concreto convencional. Os autores verificaram que o custo do CAA em relação aos materiais componentes, lançamento, transporte, adensamento e acabamento são similares ao do concreto convencional.

Todavia, o CAA também apresenta algumas desvantagens: maior necessidade de controle durante sua aplicação, maior controle tecnológico, menor tempo de aplicação que o concreto convencional, maior controle no transporte para evitar a segregação (LISBÔA, 2004).

Segundo Melo (2005), o campo de aplicação do CAA corresponde às obras onde há impossibilidade de realizar o adensamento, compreendendo elementos de formas complexas e de alta densidade de armaduras, obras de grandes dimensões, devido à velocidade de execução, eliminação do adensamento e a qualidade final do concreto, e em obras onde é necessária a diminuição do ruído. O CAA é utilizado, geralmente, em pontes, túneis, barragens, indústrias de pré-moldados, regiões de abalos sísmicos, trabalhos de recuperação de estruturas com alta densidade de armaduras, tanques e elementos de construção vertical.

Dentre as obras executadas com o CAA, cita-se a ponte Akashi Kaikyo, de 1998, no Japão (Figura 1a), na qual houve redução no tempo de execução (OUCHI, 2001). Na

indústria de pré-moldados foram confeccionados elementos arquitetônicos utilizando o CAA branco. De acordo com Tutikian (2007), ocorreu uma melhor distribuição da cor devido à melhor homogeneidade do CAA (Figura 1b).

No Brasil, os estudos com o CAA começaram no início do ano 2000 (MARQUES *et al.*, 2009). A primeira concretagem com CAA foi realizada em 2004, em Goiânia (GIROTTO, 2012). Em Porto Alegre, na obra do Museu Iberê Camargo, inaugurado em maio de 2008, também foi utilizado o CAA (Figura 1c).

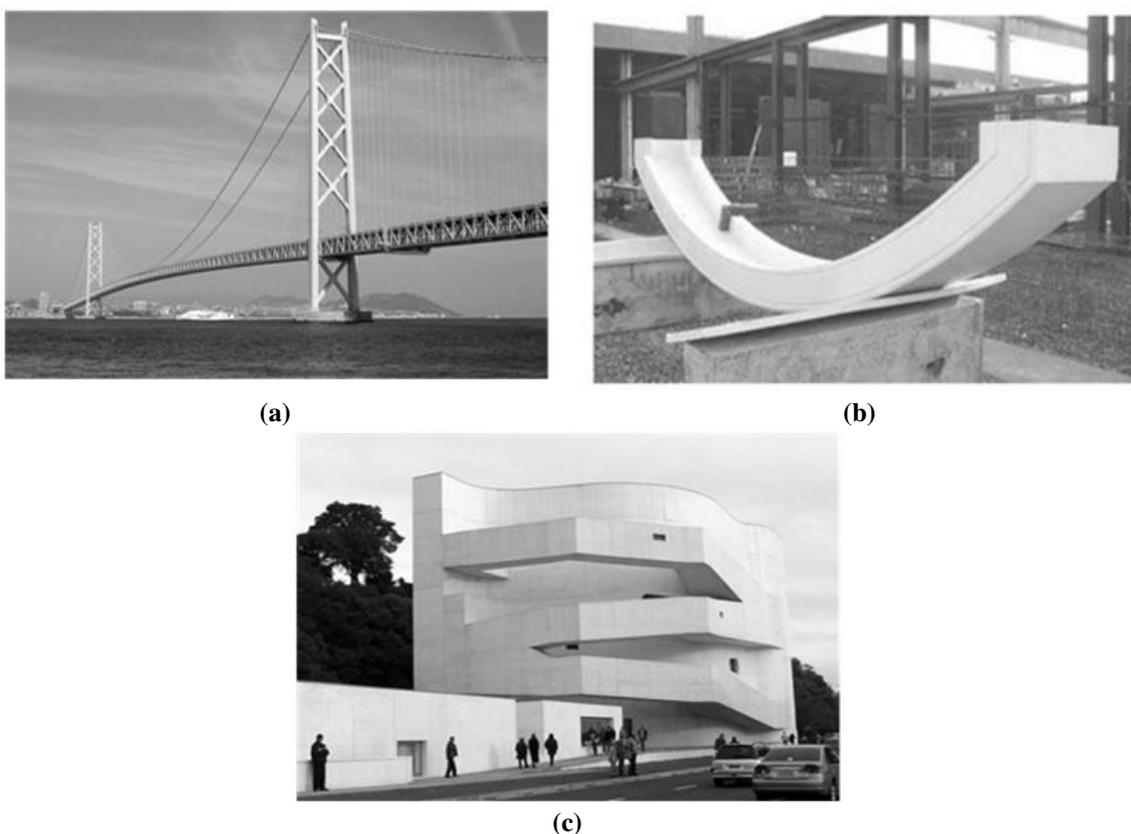


Figura 1 Obras executadas com CAA: (a) Ponte Akashi Kaikyo, Japão (Fonte: ENGENHARIA ONLINE, 2011); (b) Elementos arquitetônicos com CAA (Fonte: TUTIKIAN, 2007); (c) Museu Iberê Camargo, Porto Alegre, Brasil (Fonte: FUNDAÇÃO IBERÊ CAMARGO, 2003)

O CAA foi usado na construção da Arena Pernambuco (Figura 2), localizada no município de São Lourenço da Mata, na Região Metropolitana de Recife, região de clima quente e ambiente mais agressivo (atmosfera marinha). Esta obra consumiu em torno de 58.000m^3 de concreto, sendo 40% correspondente ao CAA (CALADO *et al.*, 2015). Calado *et al.* (2015) realizaram um estudo de caso nesta obra e verificaram a viabilidade técnica do uso do CAA em lugar do concreto convencional.



Figura 2 Arena de Pernambuco (Fonte: DIÁRIO DE PERNAMBUCO, 2013)

2.2 COMPORTAMENTO REOLÓGICO DO CAA

Pileggi e Pandolfelli (2002) definem o concreto como um material cujas propriedades são determinadas pela interação do conjunto de grãos grossos imersos em uma matriz fluida. Segundo Ferraz (2009), a matriz é responsável pela coesão do sistema e por garantir a lubrificação e disponibilidade de espaço para o movimento dos agregados. Devido à natureza bifásica do concreto, a contribuição da presença dos agregados deve ser considerada no comportamento reológico do concreto. Para Castro e Pandolfelli (2009), a distribuição granulométrica, o índice de forma e a textura superficial dos agregados são de suma importância, na medida em que promovem o empacotamento das partículas e, juntamente com a matriz fluida, determinam as propriedades reológicas do concreto no estado fresco.

Assim como no concreto convencional, no estado fresco, o CAA é considerado um sistema de duas fases, que consiste de partículas de agregados (fase sólida) suspensas na pasta viscosa (fase líquida) (GHANBARI ; KARIHALOO, 2009). Desse modo, para um melhor entendimento do comportamento do CAA no estado fresco, a seguir estão apresentados alguns dos conceitos relacionados com reologia, seus principais componentes e os fatores que governam esses componentes.

2.2.1 Reologia

Reologia é a ciência que estuda os materiais ditos complexos, que não são classificados unicamente como sólido, líquido ou gás. É a ciência da deformação e fluidez da matéria, com relação direta entre tensão, deformação e tempo (FERRAZ, 2009; GIROTTO, 2012; HOCEVAR; KAVCIC; BOKAN-BOSILJKOV, 2013; REIS, 2008). Para Tattersall e Banfill (1983), a reologia quantitativa se refere às relações entre tensão,

deformação, tempo e influência de outros fatores sobre os materiais, como a temperatura.

Segundo Reis (2008), para a compreensão do comportamento reológico do concreto e das argamassas é necessário o conhecimento sobre a teoria da viscoelasticidade linear, a qual consiste em uma generalização da mecânica do corpo perfeitamente elástico (Lei de Hooke) e do fluido puramente viscoso (Lei de Newton). Os líquidos, na sua maioria, possuem comportamento reológico que os classificam em um local entre líquido ideal e sólido ideal, sendo então considerados viscoelásticos (FERRAZ, 2009). No estado fresco, o concreto se comporta como um fluido (TATTERSALL; BANFILL, 1983). Para uma melhor compreensão da reologia do concreto no estado fresco, é necessário o conhecimento dos conceitos de tensão, deformação e viscosidade.

2.2.1.1 Tensão

As forças que atuam em um fluido ocorrem devido ao seu movimento, à ação da gravidade, aos gradientes de pressão e às interações entre o fluido (BRETAS; D'AVILA, 2000). O surgimento de tensão pode provocar o escoamento do fluido, modificando seu comportamento reológico. Segundo Kiryu (2006), há uma tensão abaixo da qual o fluido pode resistir a tensões superficiais sem ocorrer escoamento, essa tensão é chamada de tensão crítica de cisalhamento ou tensão de escoamento. Para Ferraris (1999), a tensão de escoamento é a tensão inicial necessária para começar o fluxo. Na Figura 3 são mostrados os escoamentos de quatro fluidos distintos (água, óleo, mel e lama). Observa-se que a velocidade do escoamento é diferente para cada fluido, e ela é tanto menor quanto maior é a viscosidade do material. Tal fato é explicado pela presença da tensão de escoamento, que limita a deformação inicial do fluxo (KIRYU, 2006).



Figura 3 Escoamento da água, óleo, mel e lama (Fonte: COUSSOT, 1997, citado por KIRYU, 2006)

A tensão de cisalhamento é a força por unidade de área, dada pela Equação 1:

$$\tau = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \Delta F / \Delta A \quad (1)$$

Onde:

τ = tensão devido às forças atuantes no fluido (Pa);

$\lim \Delta F / \Delta A$ = limite da força em função da área.

2.2.1.2 Taxa de deformação ou taxa de cisalhamento

Para Reis (2008), a deformação é uma modificação da forma original da matéria. A deformação viscosa é definida em termos de taxa de cisalhamento, que é a mudança de velocidade no escoamento, medida em determinados ângulos na direção do fluxo (CASTRO, 2007). A Figura 4 mostra a deformação de um fluido ao se aplicar uma tensão de cisalhamento. A velocidade de escoamento é máxima na camada superficial do fluido, e vai diminuindo à medida que atravessa o material, até chegar a zero na camada próxima à placa estacionária. Um líquido de baixa viscosidade, como a água, apresenta alta taxa de cisalhamento, e um líquido de alta viscosidade, como a lama, apresenta baixa taxa de cisalhamento. O gradiente de velocidade é a taxa de cisalhamento (SCHRAMM, 2006). Para Schramm (2006), esse gradiente de velocidade é definido como uma equação diferencial da velocidade pela distância y , como mostra a Equação 2. Pelo Sistema Internacional, a taxa de cisalhamento é dada em s^{-1} .

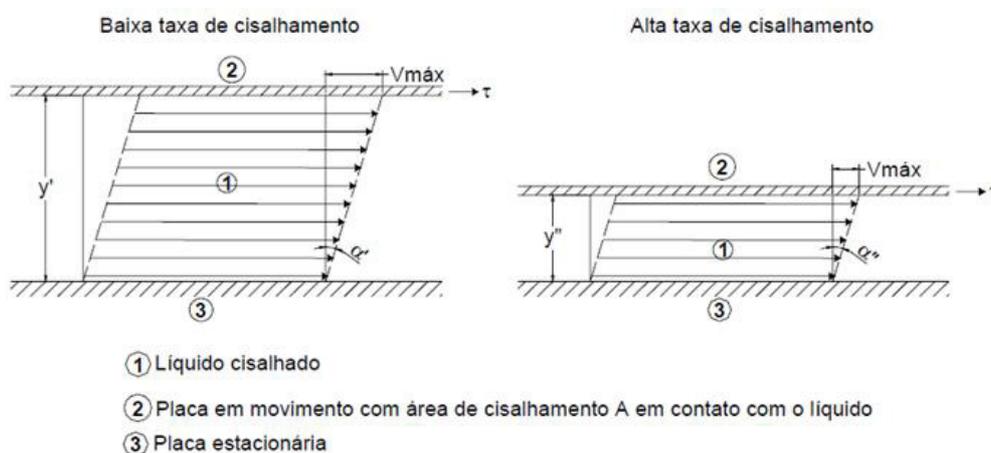


Figura 4 Deformação de um fluido (Fonte: SCHRAMM, 2006)

$$\gamma = \frac{dv}{dy} \quad (2)$$

Onde:

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1});

dv/dy = derivada da velocidade (m/s) pela distância (m).

2.2.1.3 Viscosidade

A viscosidade mede a resistência interna das partículas quando um fluido sofre uma deformação (REIS, 2008). Para Castro (2007), a viscosidade está relacionada com a velocidade de deformação de um corpo, ou ainda, é um indicativo da coesão entre as moléculas que compõem um fluido. A viscosidade é a constante de proporcionalidade que relaciona a tensão de cisalhamento (τ) com a taxa de cisalhamento (γ) (Equação 3) (FERRARIS, 1999). Quando uma força é aplicada em um líquido, a taxa de cisalhamento (gradiente de velocidade) é induzida neste líquido (FERRARIS, 1996).

$$\frac{F}{A} = \tau = \mu \cdot \gamma \rightarrow \mu = \frac{\tau}{\gamma} \quad (3)$$

Onde:

F = força aplicada ao líquido (N);

A = área (m^2);

μ = viscosidade plástica (Pa.s);

τ = tensão de cisalhamento (N/m^2);

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

2.2.1.4 Modelos reológicos

As relações entre tensão e deformação caracterizam reologicamente um material e podem apresentar diferentes comportamentos como visto na Figura 3. Em função desse comportamento, os fluidos podem ser classificados em newtonianos e não newtonianos.

Fluidos newtonianos são aqueles que possuem uma relação constante entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento, ou seja, apresentam viscosidade constante e tensão de escoamento nula (KIRYU, 2006; GIROTTO, 2012). Os fluidos newtonianos são caracterizados pela tensão de cisalhamento ser diretamente proporcional à taxa de cisalhamento, independente da deformação e do tempo (REIS, 2008), como mostrado na curva 5 da Figura 5. De acordo com a lei de Newton de viscosidade, esta expressão é dada pela Equação 4:

$$\tau = \mu\gamma \quad (4)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

μ = viscosidade plástica (Pa.s);

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

Os fluidos não newtonianos não apresentam linearidade entre a tensão e taxa de cisalhamento, como ocorre nas curvas 1, 2, 3, 4 e 6 da Figura 5. Nestes tipos de fluidos, a viscosidade deixa de ser constante e depende da taxa de cisalhamento e de outros fatores como a concentração volumétrica de sólidos e as características físicas das partículas (distribuição granulométrica, forma, densidade, área superficial específica, rugosidade, entre outras) (FERRAZ, 2009).

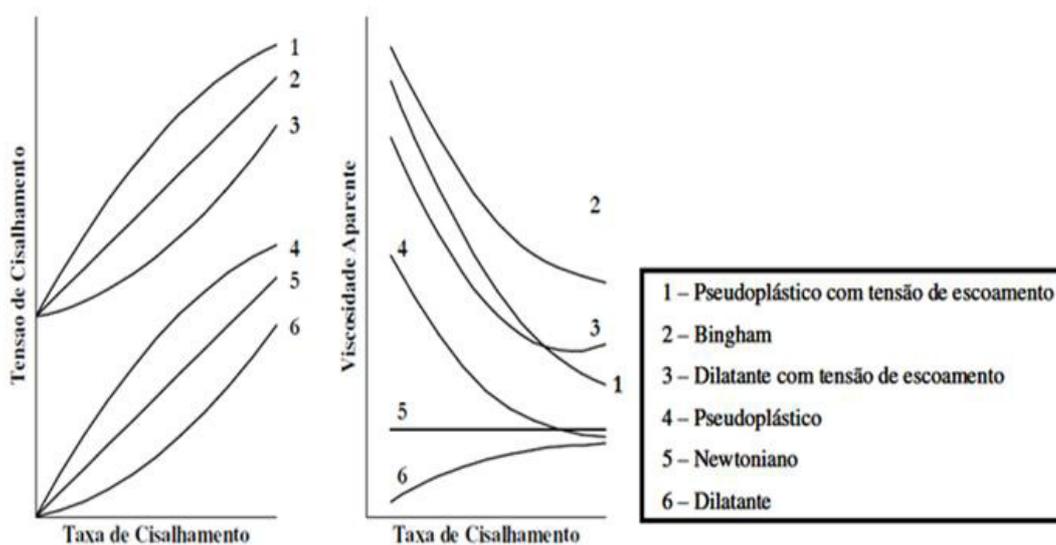


Figura 5 Tipos de comportamentos de fluxo (Fonte: HOPPE *et al.*, 2008)

Várias equações empíricas têm sido propostas para os fluidos, com o objetivo de representar a relação entre a tensão e a taxa de cisalhamento, como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1		Equações dos comportamentos dos fluidos	
Modelos		Equações	
Newton		$\tau = \mu\gamma$	
Bingham		$\tau = \tau_0 + \mu B\gamma$	
Herschel- Bulkley		$\tau = \tau_0 + K.\gamma^n$	
Lei das Potências	$\tau = A\gamma^n$	$n=1$, para fluido newtoniano $n>1$, para fluido dilatante $n<1$, para fluido pseudoplástico	
Vom Berg		$\tau = \tau_0 + Bsen^{-1}(\gamma/C)$	
Oswald-de-Waele		$\tau = a\gamma + Bsen^{-1}(\gamma/C)$	
Eyring		$\tau = a(\gamma+C)b$	
Robertson-Stiff <i>et al.</i>		$\gamma = \alpha\tau^2 + \beta\tau + \delta$	
Atzeni			
Definição das variáveis:	τ -	Tensão de cisalhamento	
	τ_0 -	Tensão de escoamento	
	γ -	Taxa de cisalhamento	
	A, a, B, b, C, K, α , β , δ	Constantes	

Fonte: Ferraris (1996).

2.2.1.5 Reologia do concreto

O comportamento reológico das pastas, argamassas e concretos são considerados complexos. O concreto se comporta como um fluido não newtoniano, na medida em que para se movimentar é necessária a aplicação de uma tensão de cisalhamento mínima inicial - τ_0 (CASTRO, 2007). Para alguns autores, o modelo que melhor descreve o comportamento do concreto no estado fresco é o modelo de Bingham, representado no gráfico da Figura 6 (FERRARIS, 1999; FIGUERÊDO FILHO, 2011; REIS, 2008).

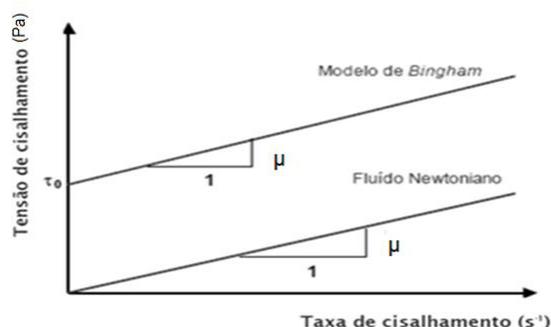


Figura 6 Modelo de Bingham e de Newton (Fonte: KRAUS, 2006)

A curva do modelo de Bingham é linear como a dos fluidos newtonianos, mas existe uma tensão de escoamento (τ_0) necessária para iniciar o fluxo (Figura 6), cujo modelo é dado pela Equação 5 (FERRARIS, 1999; BANFILL, 2006):

$$\tau = \tau_0 + \mu\gamma \quad (5)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 = tensão de escoamento (Pa);

μ = viscosidade plástica (Pa.s);

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1}).

Entretanto, outras equações de modelos reológicos têm sido utilizadas para descrever o concreto, já que em algumas circunstâncias a equação de Bingham não é obedecida (FERRARIS, 1999). Vários autores afirmam que o concreto pode ser melhor descrito pelo modelo de Herschel-Bulkley, que caracteriza o material por três parâmetros físicos: τ_0 , k e n (ALENCAR, 2008; BARBOZA *et al.*, 2011; CASTRO, 2007; SANTOS, 2010; DE LARRARD, 1999). Esse modelo descreve o comportamento do fluido com tensão de escoamento (τ_0) e relação não linear entre a tensão de cisalhamento (τ) e a taxa de cisalhamento (γ) (Equação 6).

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n \quad (6)$$

Onde:

τ = tensão de cisalhamento (Pa);

τ_0 = tensão de escoamento (Pa);

γ = taxa de cisalhamento (s^{-1});

k , n = constantes que dependem do fluido.

Quando o valor do expoente n é maior que 1, o fluido é considerado dilatante¹, e quando n for menor que 1, o fluido é pseudoplástico² (YAHIA; KHAYAT, 2003). Segundo De Larrard (1999), o modelo de Bingham é o modelo de Herschel-Bulkley com $n=1$ e o parâmetro k se torna a viscosidade plástica (μ).

O concreto poderá parecer um fluido tixotrópico³ durante o período de hidratação, mas a vibração é capaz de alterar esse comportamento. O concreto pode apresentar, ainda, um comportamento dilatante, que pode estar relacionado aos materiais constituintes, e a melhor maneira de limitar a dilatância é aumentar o volume de finos (CASTRO, 2007; HU; DE LARRARD, 1996). Desse modo, o modelo de Bingham ainda é o mais aceito, pois os parâmetros utilizados para seu cálculo são fatores que podem ser medidos independentemente, e na maioria dos casos, esta equação consegue descrever o fluxo real do concreto (FERRARIS, 1999).

Nas argamassas e concretos convencionais no estado fresco, não é usual utilizar a reologia para avaliar suas propriedades. No concreto convencional, por exemplo, o único parâmetro medido é o abatimento do tronco de cone, que está relacionado com a tensão de escoamento (BARBOSA *et al.*, 2011). Segundo Castro (2007), a trabalhabilidade não é uma propriedade inerente do concreto, estando relacionada ao tipo de construção e aos métodos de lançamento, adensamento e acabamento do material. A trabalhabilidade é composta de pelo menos dois parâmetros principais: fluidez, que descreve a facilidade de movimentação do concreto no estado fresco, e coesão, que está relacionada à resistência à segregação e à exsudação (MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Os parâmetros reológicos do CAA são diferentes do concreto convencional. No primeiro, a tensão de escoamento deve ser baixa, de modo a garantir o aumento da fluidez, e apresentar viscosidade moderada, para favorecer a estabilidade, enquanto no segundo, a tensão de escoamento é maior e a viscosidade mais baixa (GOMES, 2002). Na Figura 7 são mostrados os parâmetros reológicos de vários tipos de concretos, conforme a aplicação. O CAA está localizado na região de baixa tensão de escoamento

¹ Fluido dilatante – “é aquele cuja viscosidade aumenta à medida que aumenta a taxa de cisalhamento” (REIS, 2008, p.68)

² Fluido pseudoplástico – “são fluidos que demonstram um decréscimo na viscosidade com um aumento na tensão de cisalhamento” (REIS, 2008, p.68)

³ Fluido tixotrópico – “são fluidos cuja consistência depende tanto da duração do cisalhamento quanto da taxa do cisalhamento” (CASTRO, 2007, p.44).

e maiores viscosidades plásticas, enquanto no concreto fluido a tensão de cisalhamento inicial é maior e a viscosidade menor.

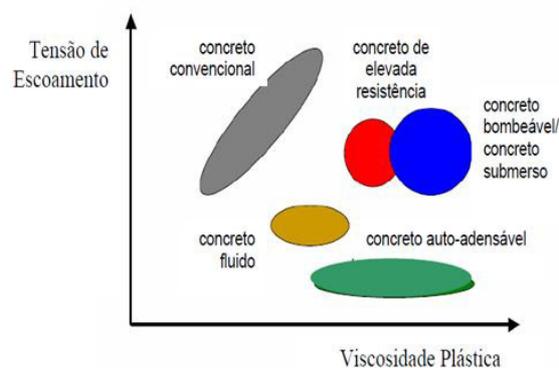


Figura 7 Parâmetros reológicos de vários tipos de concreto (Fonte: NUNES, 2001)

Segundo Wallevik (2003), como referência, o CAA com desempenho adequado apresenta tensão de escoamento menor que 70Pa e viscosidade plástica entre 10 e 120Pa.s, como mostra a Figura 8.

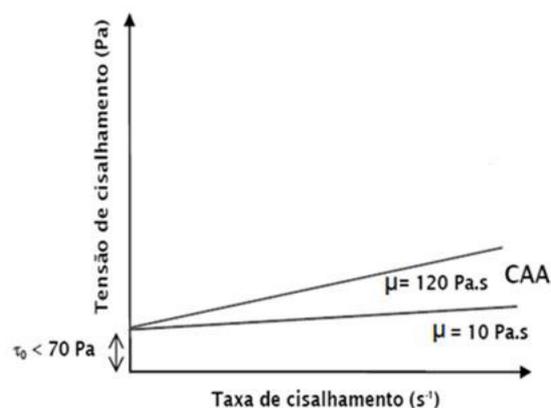


Figura 8 Faixas referenciais de valores de tensão de escoamento e viscosidade plástica para o CAA segundo Wallevik (2003) (Fonte: KRAUS, 2006)

Na Tabela 2 são mostradas as faixas de valores para caracterizar reologicamente diferentes misturas. Se comparada ao CAA, a argamassa necessita de uma tensão de escoamento muito maior para iniciar o fluxo, enquanto na pasta de cimento esse intervalo é mais próximo ao apresentado pelo CAA.

Tabela 2 Reologia da pasta de cimento, argamassa, concreto convencional e CAA

Parâmetro reológico	Pasta de cimento	Argamassa	Concreto fluido	CAA	Concreto convencional
Tensão de escoamento (Pa)	10-100	80-400	400	50-200	500-2000
Viscosidade plástica (Pa.s)	0,01-1	1-3	20	20-100	50-100

Fonte: Banfill (2003), citado por Leite (2007).

Na confecção do CAA são utilizados altos volumes de pasta quando comparado ao concreto convencional. Logo, o estudo do comportamento das propriedades reológicas da pasta e da argamassa é de extrema importância, principalmente para verificar o efeito dos aditivos químicos e das adições minerais (FERRAZ, 2009). A redução da viscosidade plástica é conferida pelo aditivo superplastificante e pela água, e a tensão de escoamento é resultante dos finos dos materiais, inclusive do cimento, que contribuem para aumentar a taxa de cisalhamento (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Segundo Kraus (2006), quando o volume de aditivo SP é aumentado, a tensão de escoamento diminui, enquanto um aumento na quantidade de água reduz tanto a tensão de escoamento quanto a viscosidade plástica. Os finos adicionados ao CAA adsorvem parte da água de amassamento e reprimem o escoamento da mistura (KUMAYAMA, 2014).

Em seus estudos, Corradi, Khurana e Margarroto (2003) verificaram a influência dos componentes do CAA e seus efeitos na tensão de escoamento e na viscosidade plástica (Figura 9). Os efeitos observados nos parâmetros reológicos foram:

- o teor de finos afetou a tensão de escoamento e um pouco da viscosidade plástica;
- o teor de ar atingiu, principalmente, a viscosidade plástica;
- a quantidade de água afetou os dois parâmetros;
- a dosagem de aditivo SP modificou a tensão de escoamento e pouco influenciou a viscosidade;
- o aditivo modificador de viscosidade alterou a viscosidade plástica.

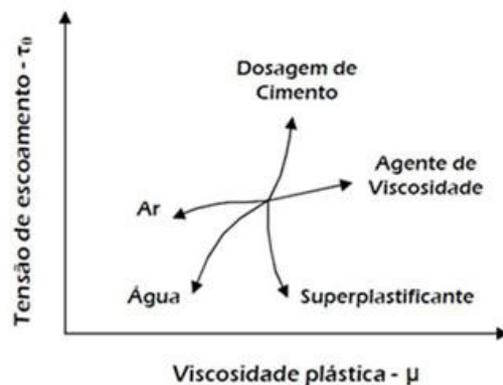


Figura 9 Efeitos dos componentes do concreto sobre a tensão de escoamento e a viscosidade plástica (Fonte CORRADI; KHURANA; MARGAROTO, 2003)

Segundo Repette (2006), a alta fluidez do CAA é conseguida através da pasta do CAA que deve lubrificar e espalhar adequadamente os agregados, para evitar que a colisão interna dos mesmos não comprometa o escoamento do concreto. Kraus (2006) afirmou que, os principais mecanismos que influenciam a reologia são o atrito interno das partículas e a quantidade de água livre, que dependem da tensão superficial e da dispersão das partículas. Esta dispersão é alterada pela adição de pasta na mistura, que modifica a interação entre os agregados, que são afastados um do outro (Figura 10).

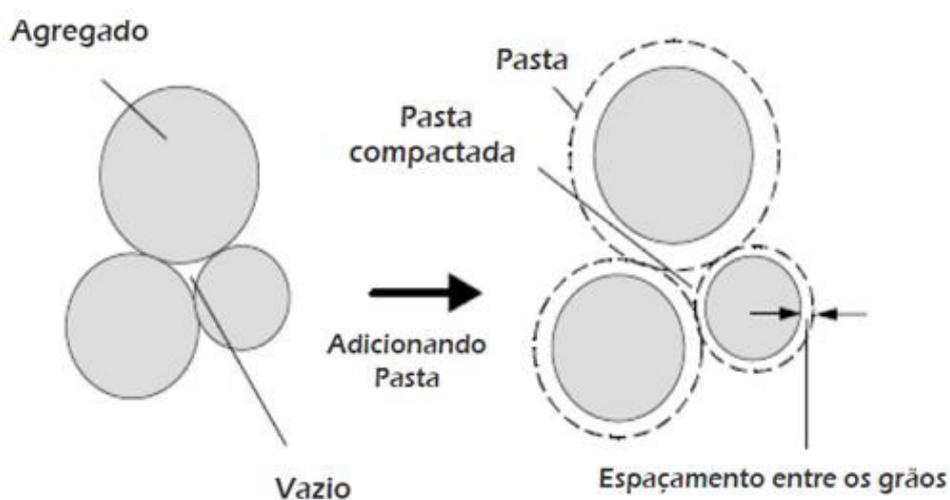


Figura 10 Quantidade de pasta necessária para promover a dispersão dos agregados (Fonte: KRAUS, 2006)

Há um volume mínimo de pasta para envolver os agregados impedindo a colisão direta entre eles, lubrificando as partículas e promovendo no CAA a alta fluidez e a viscosidade moderada (KRAUS, 2006). O efeito de lubrificação da fricção entre os agregados diminui com o aumento da viscosidade (PILEGGI; PANDOLFELLI, 2002).

No CAA, as partículas dos agregados graúdos devem possuir uma distribuição granulométrica contínua, formas arredondadas e devem ser usados em menor teor, quando comparado ao concreto convencional. E desse modo, promover um maior rolamento dos grãos, uns em relação aos outros e dentro da pasta (GHANBARI; KARIHALOO, 2009; KRAUS, 2006), e juntamente com o aditivo SP garantir a redução na tensão de escoamento (GIROTTI, 2012).

2.3 PRINCIPAIS PARÂMETROS DO CAA

Considerando as características reológicas do CAA, esse tipo de concreto deve apresentar três propriedades principais que não são exigidas no concreto convencional: habilidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação. Para Gomes (2002), tais propriedades são governadas por mecanismos, os quais são apresentados no Quadro 1.

Quadro 1 Propriedades do CAA no estado fresco e seus mecanismos

Propriedade	Mecanismos que governam a propriedade
Habilidade de preenchimento	Fluidez elevada e coesão da mistura
Habilidade de passagem	Viscosidade moderada da pasta e propriedades do agregado
Resistência à segregação	Viscosidade e coesão da mistura

Fonte: Gomes (2002).

Para o concreto conseguir se espalhar e preencher todos os espaços sob a ação de seu peso próprio é necessária alta deformabilidade, que é governada pela fluidez e coesão da mistura (GOMES, 2002). A alta deformabilidade ocorre em função da dispersão dos finos, que é possível devido ao uso dos aditivos superplastificantes (KRAUS, 2006).

Nas áreas congestionadas pelas armaduras, pode haver um bloqueio ao fluxo, devido ao acúmulo de partículas sólidas. O bloqueio ocorre devido ao contato entre as partículas do agregado graúdo, que se aproximam uma da outra, promovendo o surgimento de tensões de cisalhamento na argamassa (OKAMURA; OUCHI, 2003). O CAA possui a habilidade de passar por estas restrições, devido à moderada viscosidade e ao controle das características dos agregados, relacionadas como tamanho e volume dos agregados graúdos empregados nas misturas (GOMES, 2002).

Quando o CAA não apresenta coesão adequada poderá ocorrer a separação da pasta de cimento e dos agregados, caracterizando a segregação. No caso do concreto, a diferença dos tamanhos das partículas e da massa específica dos materiais são as principais causas

da segregação (NEVILLE; BROOKS, 2013). De acordo com Ferraz (2009), a resistência à segregação é adequada quando ocorre a distribuição uniforme das partículas dos agregados no concreto. A resistência à segregação é essencial para se atingir a autocompactabilidade, pois uma compactação total não ocorre em concreto segregado.

Conforme Kumayama (2014), a exsudação, que é a separação da água dos constituintes sólidos do concreto, pode ser considerada uma forma especial de segregação. Segundo Mehta e Monteiro (2014), a exsudação é consequência da incapacidade dos materiais constituintes reterem toda a água de amassamento em um estado disperso, resultando no assentamento dos sólidos mais pesados. As misturas com menor relação água/cimento são menos propensas à segregação (NEVILLE; BROOKS, 2013).

2.3.1 Formas de avaliação dos principais parâmetros do CAA no estado fresco

O CAA no estado fresco é avaliado através de vários ensaios e equipamentos diferentes dos empregados para o concreto convencional. Estes ensaios avaliam os principais parâmetros do CAA: capacidade de preenchimento, habilidade passante, resistência à segregação e propriedades reológicas.

O ensaio do abatimento de tronco de cone não é usado para caracterizar o CAA, na medida em que esse ensaio é recomendado para concretos com abatimentos entre 25 e 175mm (CASTRO, 2007), e o valor do espalhamento do CAA é igual ou superior a 550mm (REPETTE, 2011).

Os equipamentos utilizados para o CAA não medem sozinhos todos os requisitos, sendo necessários grupos de equipamentos (EFNARC, 2002; TUTIKIAN, 2004). Um exemplo é o uso combinado do ensaio de espalhamento com o ensaio do funil V, que permite uma descrição da reologia das argamassas autoadensáveis (KLEIN, 2008). No Brasil, a partir de 2010 foram estabelecidas as especificações para a realização de ensaios do CAA decorrentes de sua aplicação, que estão discutidos nesse item.

a. Medida de tensão de escoamento e viscosidade com uso do Reômetro

Os parâmetros reológicos do concreto são normalmente medidos em reômetros. Segundo Ferraz (2009), os reômetros são aparelhos que medem as propriedades reológicas de fluidos e suspensões, permitindo estudar o comportamento da viscosidade

e da tensão de escoamento em função de variáveis como temperatura, tempo, entre outros. O uso de reômetro ainda é limitado devido ao elevado custo do equipamento, além da diversidade de modelos, dificultando a comparação de resultados obtidos (KRAUS, 2006; REPETTE, 2011). Segundo Gomes (2002), os valores obtidos de tensão crítica e viscosidade plástica, das curvas de fluxo do CAA, dependem do equipamento utilizado.

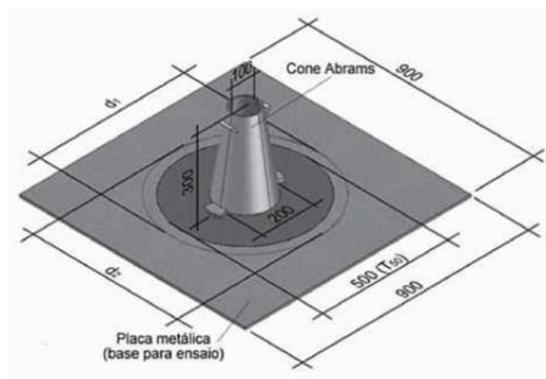
No entanto, a determinação dos parâmetros reológicos exclusivamente é insuficiente para o conhecimento do comportamento do CAA no estado fresco, já que os resultados não expressam todas as propriedades deste tipo de concreto como, por exemplo, a habilidade passante (REPETTE, 2011). De acordo com Kraus (2006), os ensaios do cone de Marsh, funil V e espalhamento, que são simples, de fácil execução e de acesso econômico, promovem grandes correlações com os parâmetros reológicos do CAA.

b. Ensaios de espalhamento (“Slump flow test”) e T_{500}

O ensaio de espalhamento consiste em determinar a dimensão limite atingida pelo espalhamento do concreto (Figura 11a) pela ação do seu peso próprio, sem segregar (Figura 11 b e c). Esse ensaio é utilizado para verificar a capacidade de preenchimento e a resistência à segregação do CAA e está ligado à sua fluidez (GOMES; BARROS, 2009; KLEIN, 2008). O ensaio T_{500} é realizado simultaneamente com ensaio de espalhamento e também mede a velocidade do fluxo e da viscosidade (EFNARC, 2005). No Brasil, estes ensaios são especificados pela norma NBR 15823-2 (ABNT, 2010).

Segundo Klein (2008), a avaliação visual da segregação é realizada através dos agregados graúdos, que permanecem centralizados na mistura quando não há resistência à segregação, e a exsudação é caracterizada pela presença de uma auréola de pasta em torno do concreto ou argamassa.

A norma brasileira NBR 15823-1 (ABNT, 2010) especifica os valores para estes ensaios de acordo com a classe do concreto estabelecido nessa norma. Segundo o EFNARC (2005), este ensaio não é apropriado quando a dimensão do agregado graúdo excede 40mm.



(a)



(b)



(c)

Figura 11 Ensaio de espalhamento: (a) Equipamento utilizado (dimensões em mm) (Fonte: GOMES; BARROS, 2009); (b) CAA sem segregação; (c) CAA com segregação visível (Fonte: TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008)

A Tabela 3 mostra os limites inferiores e superiores do ensaio de espalhamento encontrados na literatura. De acordo com Tutikian (2004), quando o ensaio de espalhamento apresentar valores abaixo do limite mínimo, indica que o CAA está pouco fluido necessitando que seja incorporada água ou aditivo superplastificante à mistura. Se ocorrer o contrário, resultados acima do limite máximo, deve-se tornar o concreto mais coeso adicionando finos à mistura. De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), o valor de espalhamento considerado mínimo é de 550mm, e o máximo de espalhamento é de 850mm.

Tabela 3 Resultados do ensaio de espalhamento encontrados na literatura

Referências	Espalhamento (mm)	
	Mínimo	Máximo
Petersson (1999) ¹	600	800
Tviksta (2000) ¹	550	700
Coppola (2000) ¹	650	725
Palma (2001) ¹	600	-
Gomes (2002) ¹	600	700
Araújo <i>et al.</i> (2002) ¹	650	800
Gomes <i>et al.</i> (2003) ¹	600	750
EFNARC (2005) ²	550	850
Melo (2005) ²	600	700
Alencar (2008) ²	650	780
Ferraz (2009) ²	600	670
Almeida Filho <i>et al.</i> (2010) ²	570	740
Santos (2010)	570	800
Mendes (2015)	600	730
Anjos <i>et al.</i> (2015)	625	700
Kumayama <i>et al.</i> (2015)	618	700
Medeiros (2016)	630	790
Pereira (2016)	565	592

Fonte: Adaptado de:¹ Citado por Tutikian (2004); ² Citado por Marques (2011).

c. Ensaio do funil V (“V-Funnel test”)

O ensaio do funil V verifica a viscosidade plástica do CAA, além de simular a capacidade de passagem da mistura através do estreitamento de uma seção, sob a ação do seu peso próprio (GOMES; BARROS, 2009). Neste ensaio é medido o tempo que o CAA leva para escoar através do funil. Os procedimentos e dimensões do equipamento são estabelecidos pela NBR 15823-5 (ABNT, 2010), que classifica o CAA em função dos resultados obtidos (Figura 12). Os limites superiores e inferiores, deste ensaio, encontrados na literatura são apresentados na Tabela 4. Um tempo de escoamento maior indica maior viscosidade da mistura, e desse modo a mesma pode perder a capacidade de preenchimento e de fluir pelas formas (TAKADA, 2004). De acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2010), o valor máximo para o tempo de escoamento é de 25s, enquanto o valor mínimo deve ser menor que 9s. Para Gomes (2002), um baixo tempo de fluxo é favorável à capacidade ou facilidade de fluxo.

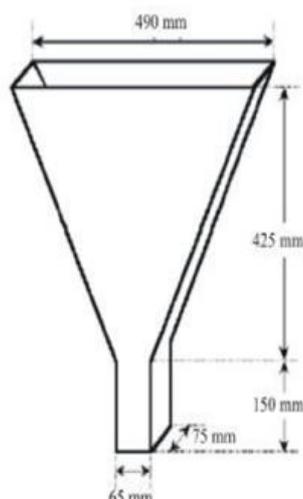


Figura 12 Funil V (Fonte: NUNES, 2001)

Tabela 4 Resultados do ensaio do funil V encontrados na literatura

Referências	Tempo (s)	
	Mínimo	Máximo
Petersson (1998 e 1999) ¹	5,0	15,0
Gomes (2002) ¹	10,0	15,0
Araújo <i>et al.</i> (2002) ¹	6,0	12,0
Gomes <i>et al.</i> (2003) ¹	7,0	13,0
EFNARC (2002) ¹	6,0	12,0
Melo (2005) ²	-	10,0
Alencar (2008) ²	2,8	7,2
Ferraz (2009) ²	4,2	4,5
Almeida Filho <i>et al.</i> (2010) ²	2,5	5,5
Santos (2010)	5,2	18,3
Mendes (2015)	4,9	7,0
Kumayama <i>et al.</i> (2015)	3,0	5,0
Pereira (2016)	4,7	6,5
Medeiros (2016)	2,4	19,4
Vicentini <i>et al.</i> (2017)	3,0	8,0

Fonte: Adaptado de:¹ Citado por Tutikian (2004); ² Citado por Marques (2011).

d. Caixa L (“L - Box test”)

O ensaio com a Caixa L avalia a capacidade do CAA de passar por restrições, através da simulação das armaduras, assim como a resistência ao bloqueio e resistência à segregação (MELO, 2005). A Figura 13 mostra o equipamento utilizado para a realização do ensaio. Segundo Leite (2007), os limites adotados para o coeficiente de bloqueio (H_2/H_1) variam entre 0,80 a 0,90. A norma brasileira que descreve a metodologia e o equipamento deste ensaio é a NBR 15823-4 (ABNT, 2010).

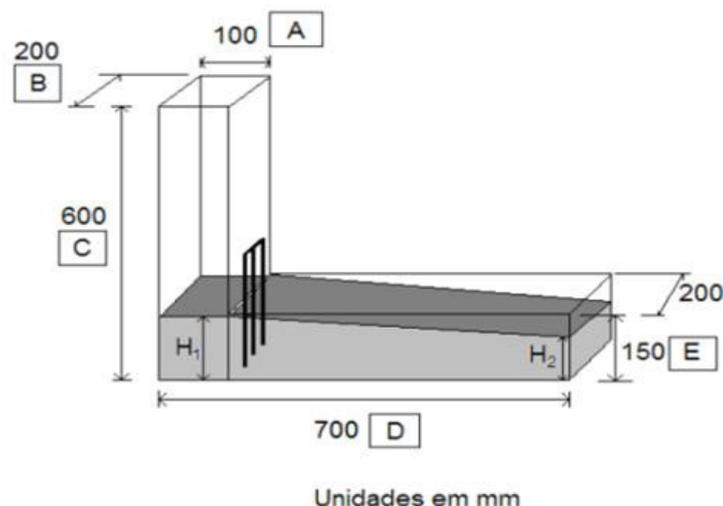


Figura 13 Modelo da Caixa L (Fonte: MARQUES, 2011)

A segregação do concreto é avaliada pelo acúmulo do agregado graúdo nas proximidades das armaduras, o qual deverá estar uniformemente distribuído ao longo do canal horizontal do equipamento (KLEIN, 2008). Segundo Marques (2011), a comparação dos resultados obtidos neste ensaio é dificultada pelas dimensões adotadas neste equipamento. Na Tabela 5 são listados os resultados e as dimensões do equipamento, encontrados na literatura.

Tabela 5 Resultados para o ensaio da caixa L

Referências	H ₂ /H ₁	Dimensões (mm)				
		A	B	C	D	E
Petersson (1998 e 1999) ¹	0,80	100	200	600	700	150
Tviksta (2000) ¹	0,85	100	200	600	-	150
Coppola (2000) ¹	0,90	120	300	600	780	150
Gomes (2002) ¹	0,80	100	200	600	700	150
Gomes <i>et al.</i> (2003) ¹	0,80	100	200	600	700	150
EFNARC (2005) ²	0,80	100	200	600	700	150
Melo (2005) ²	0,80	100	200	600	800	150
Anjos <i>et al.</i> (2015)	0,86-1,00	-	-	-	-	-
Kumayama <i>et al.</i> (2015)	0,76-0,85	-	-	-	-	-
Pereira (2016)	0,78-0,88	-	-	-	-	-
Medeiros (2016)	0,46-0,96	-	-	-	-	-
Vicentini <i>et al.</i> (2017)	0,72-0,95	-	-	-	-	-

Fonte: Adaptado de:¹ Citado por Tutikian (2004); ² Citado por Marques (2011).

Pode-se observar que apesar da diferença nas dimensões, as relações H₂/H₁ apresentam resultados iguais ou próximos a 0,80. O valor indicado para o coeficiente de segregação pela NBR 15823-1 (ABNT, 2010) é $\geq 0,80$. Este valor é considerado satisfatório, indicando um CAA com fluidez adequada e sem bloqueio (GOMES, 2002).

e. Ensaio do anel J (“J- Ring test”)

Este ensaio é aplicado em conjunto com o ensaio de espalhamento, utilizando um anel (Figura 14), com o objetivo de verificar a resistência ao bloqueio. O ensaio do Anel J mede três parâmetros: extensão de fluxo, tempo de fluxo e o bloqueio (GOMES; BARROS, 2009). Segundo Diniz (2010), este ensaio é uma complementação do ensaio de espalhamento, podendo ser realizado com o cone de Abrams ou com o funil V. Os procedimentos do ensaio e descrição do equipamento são estabelecidos na NBR 15823-3 (ABNT, 2010).



Figura 14 Anel J em conjunto com o teste de espalhamento (Fonte: LEITE, 2007)

Na Tabela 6 são mostrados os resultados de ensaio do anel J encontrados na literatura. O valor da diferença entre o diâmetro médio obtido no ensaio de espalhamento e do anel J devem estar entre 0 e 50 mm, de acordo com a NBR 15823-1 (ABNT, 2010).

Tabela 6 Resultados para o ensaio no anel J

Referências	Valores limites (mm)
EFNARC (2002) ¹	10
Gomes (2002) ¹	10
Araújo (2003) ¹	10
Gomes <i>et al.</i> (2003) ¹	10
Tutikian (2007) ¹	10
Gomes e Barros (2009) ¹	10
Leite (2007)	10
Menezes (2006)	14
Anjos <i>et al.</i> (2015)	5
Medeiros (2016)	13

Fonte: Adaptado de ¹ Diniz (2010).

f. Ensaio da coluna de segregação (“Column segregation test”)

Este ensaio determina a resistência à segregação do CAA, pela diferença das massas de agregado graúdo existentes no topo e na base da coluna, sendo estabelecido pela NBR

15823-6 (ABNT, 2010). Ao final deste ensaio, se obtêm o índice de resistência à segregação (SR), que é considerado aceitável para valores de até 20%. Quando o concreto é muito viscoso ou com agregados leves pode resultar um SR negativo (REPETTE, 2011). Segundo a NBR 15823-6 (ABNT, 2010), este ensaio não é aplicável a CAA contendo agregado leve ou fibras. A Figura 15 mostra o esquema de realização do ensaio. A Tabela 7 apresenta resultados obtidos na literatura.

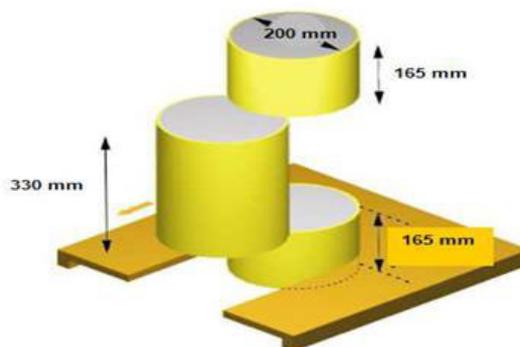


Figura 15 Coluna de segregação (Fonte: ALENCAR, 2008)

Tabela 7 Resultados para o ensaio de coluna de segregação

Referências	Valores limites (%)
Santos (2010)	8
Fochs (2011)	20

2.4 MATERIAIS QUE COMPÕEM O CAA E SUA INFLUÊNCIA SOBRE A PRODUÇÃO E AS PROPRIEDADES DESSE TIPO DE CONCRETO

O CAA é produzido com os mesmos materiais empregados no concreto convencional, diferindo apenas pelo elevado teor de finos (cimento e adições minerais) na sua composição e uma maior quantidade de aditivos superplastificantes e/ou agentes modificadores de viscosidade (REPETTE, 2011). Outro fator que diferencia o CAA é a redução da quantidade e da dimensão máxima característica do agregado graúdo (GOMES, 2002). Estas características tornam a microestrutura do CAA mais uniforme e sua zona de transição menos porosa que a do concreto convencional. Nesse item serão discutidos os materiais constituintes do CAA e suas características.

2.4.1 Cimento

De acordo com o EFNARC (2005), para a produção de CAA pode ser utilizado qualquer tipo de cimento. Contudo, deve ser considerado o teor de aluminato tricálcico

(C₃A), a granulometria do cimento e sua capacidade de adsorver os aditivos empregados na composição da mistura. Os cimentos com elevados teores de C₃A podem gerar uma perda mais rápida de fluidez do CAA (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Segundo Fochs (2011), quanto maior a quantidade de C₃A no cimento, maior será a quantidade de aditivo superplastificante necessária para atingir uma baixa tensão de escoamento. O EFNARC (2005) recomenda o uso de cimentos com teores de C₃A inferiores a 10%, para garantir a adequada adsorção do aditivo na superfície do grão e otimização do seu desempenho.

Em relação à finura, quanto maior a superfície específica do cimento maior a colisão entre as partículas, reduzindo a tensão de escoamento e aumentando a viscosidade da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

O EFNARC (2002) estabelece um consumo de cimento na faixa entre 350 a 500kg/m³, pois consumos superiores podem causar retração. Consumos inferiores a 350kg/m³, só são possíveis com a inclusão de outros finos, como adições minerais. Devido a este fato, no CAA é comum o uso de cimento mais uma adição mineral (composição binária) ou com dois tipos de adições minerais (composição ternária) (MELO, 2005).

2.4.2 Agregados

Para garantir as propriedades do CAA (fluidez, habilidade passante e resistência à segregação) é necessário diminuir a porcentagem e dimensão máxima característica do agregado graúdo. Segundo Melo (2005), o volume total de agregados e o proporcionamento entre os agregados graúdos e miúdos influenciam muito as propriedades reológicas do CAA. A quantidade de partículas dentro da mistura determina a distância entre elas, diminuindo a fricção interpartícula e contribuindo para a fluidez do concreto (MORAES, 2010). Para alguns pesquisadores, as principais características do agregado graúdo que influenciam as propriedades do CAA no estado fresco são a dimensão máxima e o volume (GOMES, 2002; KRAENKEL *et al.*, 2009; LEITE, 2007; OUCHI, 2001; JAWAHAR *et al.*, 2012). Beygi *et al.* (2014) verificaram que a dimensão máxima do agregado afeta o comportamento da ruptura neste tipo de concreto.

Para Gomes e Barros (2009), o volume de agregado graúdo no CAA deve variar de 28 a 35% do volume total de concreto e deve ser usada uma relação agregado

gráudo/concreto de 32 a 40%, em massa. O volume de agregado miúdo deve variar entre 40 e 50% do volume da argamassa.

A forma e dimensão dos agregados também desempenham um papel importante na produção do CAA. Conforme o EFNARC (2002), a dimensão máxima característica do agregado deve ser 20mm e as partículas dos agregados com diâmetro inferior a 0,125mm contribuem para o teor de finos. O agregado deve apresentar composição granulométrica contínua, pois produz misturas com menor consumo de materiais finos e água, ocasionando melhoria na durabilidade (EFNARC, 2002). Para Moraes (2010), deve-se utilizar uma maior quantidade de finos ou utilizar aditivos modificadores de viscosidade no CAA, com o objetivo de minimizar os efeitos da má distribuição granulométrica dos agregados.

Segundo levantamento realizado por Zende e Khadirnaikar (2014), os agregados arredondados são os preferidos para a produção do CAA, porque aumentam a fluidez da mistura para um teor menor de cimento, quando comparados aos agregados angulares.

Em seu estudo, Melo (2005) determinou a composição ideal entre os agregados miúdos e gráudos. O autor fez uma adequação das curvas granulométricas dos agregados utilizados em sua pesquisa, comparadas a uma faixa granulométrica obtida através de curvas usuais dos agregados utilizados para produção do CAA, apresentadas na literatura. Melo (2005) verificou que, para o agregado miúdo, as composições satisfatórias são de 20% de areia fina e 80% de areia média, e, para o agregado gráudo, 30% de brita 0 ($D_{máx}=12,5\text{mm}$) e 70% de brita 1 ($D_{máx}=19\text{mm}$). A Figura 16 (a e b) mostra as faixas granulométricas e as curvas obtidas por Melo (2005) para as composições dos agregados miúdos e gráudos, respectivamente.

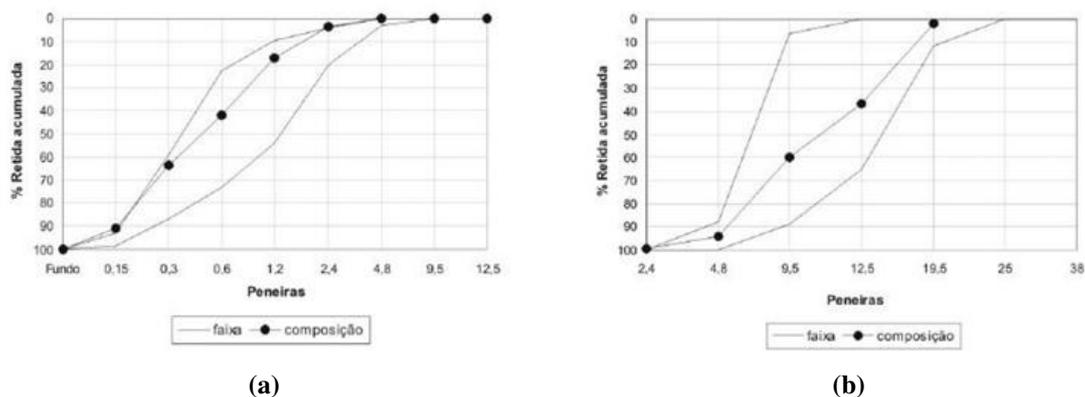


Figura 16 Faixas granulométricas usuais para CAA e composições dos agregados utilizados por Melo (2005): (a) agregado miúdo (b) agregado graúdo

2.4.3 Adições minerais

As adições minerais são utilizadas na produção do CAA a fim de aumentar a quantidade de finos, sem aumentar o consumo de cimento nas misturas, contribuindo para melhorar a coesão e resistência à segregação do CAA (EFNARC, 2005; REPETTE, 2011). O uso de adições minerais, nas misturas de concreto, tende a melhorar a estrutura interna da pasta cimentícia e da zona de transição agregado/pasta. As adições podem reduzir a porosidade capilar do concreto e diminuem o calor de hidratação, que é responsável pelas fissuras de origem térmica. Além disso, as adições podem reduzir a exsudação e segregação do concreto em função do maior volume de finos (MELO, 2005; VITA *et al.*, 2010).

O conhecimento das características físicas (tamanho médio, superfície específica, forma e densidade das partículas) e das características químicas (reatividade) da adição a ser utilizada na composição do CAA é necessário para obter uma dosagem adequada dos finos (VITA *et al.*, 2010). Segundo Barros (2008), a viscosidade da mistura aumentará quanto maior for a superfície específica das adições.

Vita *et al.* (2010) analisaram a influência de diferentes adições minerais (microssílica, metacaulim e fíler calcário) no comportamento reológico e na fluidez do CAA, e verificaram que as características físicas e químicas das adições proporcionaram comportamentos diferentes de fluidez, tensão de cisalhamento e viscosidade.

De acordo Desnerck *et al.* (2014), tanto as adições pozolânicas quanto os fíleres são utilizados na produção do CAA, sendo os mais empregados: o fíler calcário, a cinza volante, a escória de alto forno e a sílica ativa. Segundo Tutikian e Dal Molin (2008), as

adições pozolânicas ultrafinas (sílica ativa, metacaulim, cinza da casca de arroz) contribuem mais eficazmente para o aumento da coesão, resistência e durabilidade do CAA. Para Tutikian e Dal Molin (2008), a incorporação de fíler no CAA deve ser feita pela substituição do agregado miúdo, devido à maior finura deste material, melhorando o empacotamento do esqueleto granular e a coesão das misturas.

Várias pesquisas já foram realizadas para observar o comportamento do CAA com diferentes adições, como: resíduo de rocha ornamental (CALMON *et al.*, 2005; TENNICH; KALLEL; OUEZDOU, 2015; UYGUNOGLU; TOPÇU; ÇELIK, 2014), cinza volante e fíler calcário (SILVA; BRITO, 2015; NAGARATNAM *et al.*, 2016; MOHAMMED; DAWSON; THOM, 2013; ÇELIK *et al.*, 2014; BENJEDDOU *et al.*, 2017), sílica ativa, cinza volante e cinza da casca de arroz (BENAICHA *et al.*, 2015; NURUDDIN; CHANG; AZMEE, 2014; MENDES, 2015; ALTOUBAT *et al.*, 2017); resíduo de alumina (SUA-IAM; MAKUL, 2013), resíduos plásticos (HAMA; HILAL, 2017) e resíduos de construção (KUMAR *et al.*, 2017).

Tennich *et al.* (2015) avaliaram a incorporação de resíduos do corte do bloco de mármore (W1), resíduo do corte de pisos de mármore (W2) e resíduo das aparas do piso de mármore (W3) como adição mineral na composição do CAA. Além dos CAA com estes resíduos (CAAW), foram confeccionados um concreto convencional vibrado (CV) e um CAA com fíler calcário (CAAR), com o objetivo de comparar as propriedades dos concretos no estado endurecido. A relação a/c adotada foi de 0,51, o consumo de cimento e a quantidade de água foram fixados em 350kg/m³ e 180kg/m³ respectivamente, e o aditivo SP foi fixado em torno de 1%. A Tabela 8 mostra a composição das misturas utilizadas no estudo.

Tabela 8 Composição dos concretos estudados por Tennich *et al.* (2015)

Mistura	Areia (kg)	Brita (kg)	Cimento (kg)	Fíler calcário (kg)	W1 (kg)	W2 (kg)	W3 (kg)	Água (kg)	Dosagem do SP (%)
CV	738	1119	350	-	-	-	-	181	0,4
CAAR	791	800	350	250	-	-	-	180	1,0
CAAW1	790	799	350	-	200	-	-	175	1,2
CAAW2	801	810	350	-	-	200	-	190	1,3
CAAW3	809	818	350	-	-	-	150	180	1,0
CAAW12	816	825	350	-	138	50	-	180	1,4
CAAW13	807	816	350	-	150	-	50	190	1,4
CAAW23	829	838	350	-	-	100	150	213	1,6

Fonte: Tennich *et al.* (2015).

Observou-se que a presença do resíduo de mármore (W1) na mistura do CAA aumentou a resistência à compressão do concreto em 6,7% em relação ao concreto convencional vibrado (Figura 17). Em relação à resistência à tração, o CAA com o resíduo W3 aumentou em 4% a sua resistência em relação ao CV, enquanto com o resíduo W1 esse aumento foi de 42% (Figura 18) (TENNICH *et al.*, 2015). Os autores observaram ainda, que as propriedades mecânicas melhoraram com a adição dos resíduos (W1 e W2), mas o comportamento do CAA com fíler calcário obteve os maiores valores para todas as propriedades avaliadas.

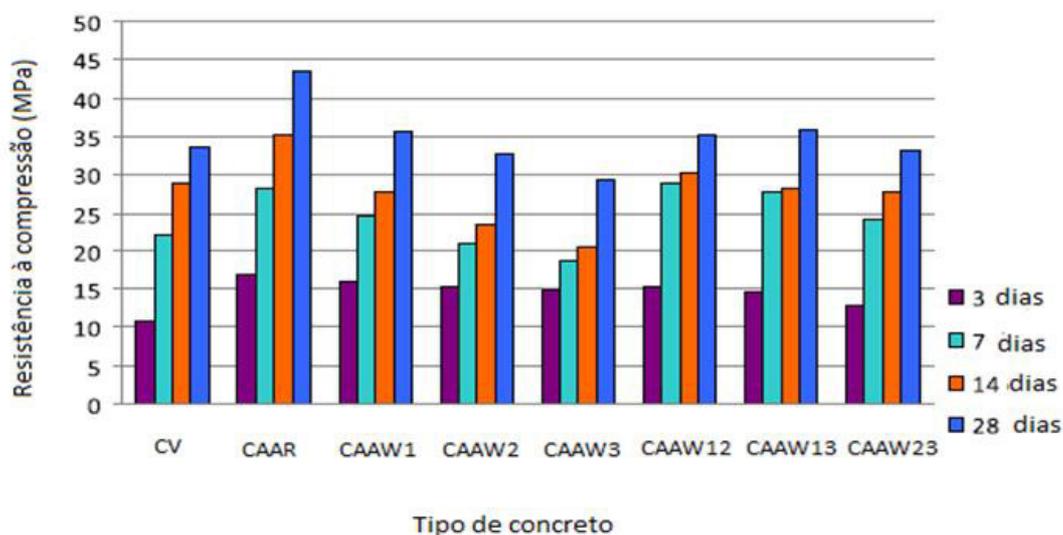


Figura 17 Resultados de resistência à compressão do concreto vibrado e do CAA (Fonte: TENNICH *et al.*, 2015)

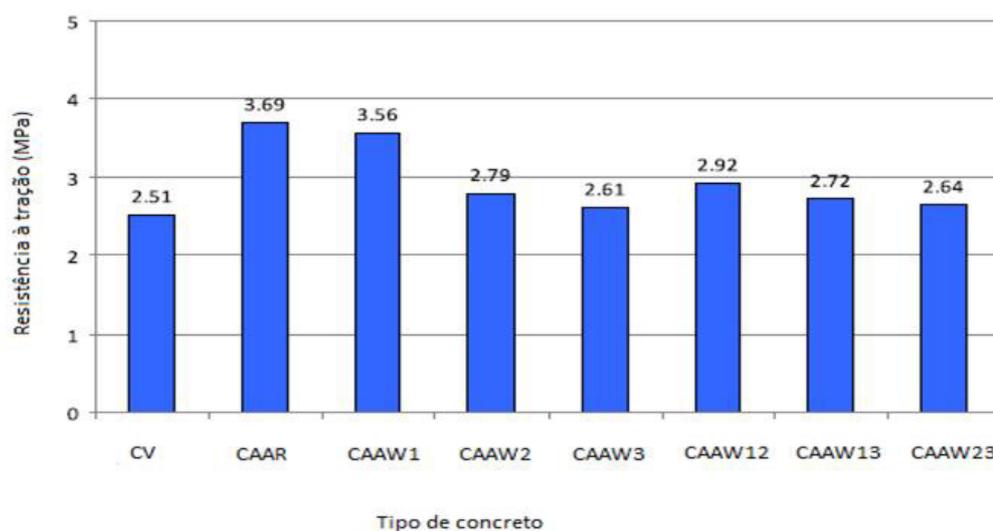


Figura 18 Resultados de resistência à tração do concreto vibrado e CAA (Fonte: TENNICH *et al.*, 2015)

Elyamany, Elmoaty e Mohamed (2014) estudaram o efeito do tipo de adição nas propriedades físicas, mecânicas e microestruturais do CAA. No estudo, utilizaram sílica ativa e metacaulim (adições tipo pozolânicas), e fíler calcário, resíduo de granito e resíduo de mármore (adições tipo fíleres). Os autores observaram que o tipo e teor de adição influenciam as propriedades do CAA no estado fresco: as adições tipo fíler reduziram a segregação e exsudação da mistura em comparação às misturas com as adições pozolânicas. Além disso, o tipo e teor de adição influenciam a massa específica, a absorção de água e o índice de vazios do CAA. As adições do tipo fíler não tem influência significativa na resistência à compressão, como mostra a Figura 19. Em relação à microestrutura, as misturas com adições tipo pozolânicas apresentam uma menor quantidade de hidróxido de cálcio e etringita comparadas às misturas com adições do tipo fíler.

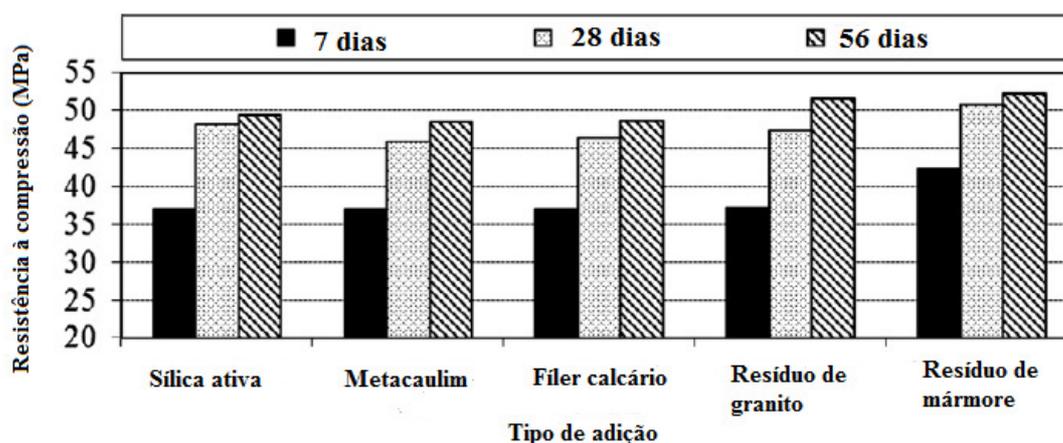


Figura 19 Resultados da resistência à compressão do CAA com diferentes tipos de adições (Fonte: ELYAMANY; ELMOATY; MOHAMED, 2014)

Mendes (2015) estudou misturas de concreto vibrado em mesa vibratória em comparação com o CAA com diferentes teores de cinza da casca de arroz em substituição ao cimento. Os CAA compostos com a cinza da casca de arroz obtiveram resultados satisfatórios no estado fresco, a microestrutura das misturas com a cinza da casca de arroz apresentou uma melhor zona de transição contribuindo para o melhor desempenho mecânico quando comparadas ao concreto vibrado.

2.4.4 Aditivos químicos

Os aditivos superplastificantes (SP) são componentes essenciais na produção do CAA, garantindo as principais propriedades desse concreto no estado fresco. O uso de aditivos

SP na produção do CAA tem como objetivo a obtenção de boa viscosidade e alta deformabilidade das misturas, resultando em uma baixa relação água/finos (OKAMURA, 2003). Desse modo, os aditivos mais recomendados para este tipo de concreto são os SP de terceira geração, à base de policarboxilatos, pois dispersam e defloculam as partículas de cimento com maior eficiência, pois suas cadeias são mais longas e mais ramificadas (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008; GIROTTI, 2012).

Os aditivos SP são redutores de água de alta eficiência, capazes de reduzir até três a quatro vezes a quantidade de água de amassamento do concreto (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Segundo Ferraz (2009), as vantagens de se utilizar os superplastificantes incluem uma melhor trabalhabilidade do concreto, uma maior redução de água, melhor durabilidade, maior resistência mecânica, maior fluidez. Como já mencionado no item 2.4.1, a eficiência dos aditivos redutores de água é influenciada pela composição química do cimento, em especial pelo teor de aluminato tricálcico (C_3A) (COUTINHO, 2012).

Para Schmidt *et al.* (2014), a reologia do CAA não só depende do processo de hidratação do cimento, mas também da adsorção do aditivo SP. A densidade e o teor de sólidos do aditivo SP são os parâmetros principais para as propriedades do concreto no estado fresco, além disso, o desempenho do aditivo é afetado pela temperatura ambiente. Lazniewska-Piekarczyk (2014) verificou que o tipo de aditivo SP também influencia o teor de ar da mistura do CAA.

A dosagem do aditivo SP é fundamental para que seja estabelecido o teor máximo que promove o aumento da fluidez sem causar segregação e exsudação no concreto. Esse teor é denominado ponto de saturação, o qual é definido por meio do ensaio de compatibilidade com o cimento, usando o Cone de Marsh (MELO, 2005).

Os CAA também são produzidos utilizando-se aditivos modificadores de viscosidade, Viscosity Modifier Admixture (VMA). Os VMA são produtos à base de polissacarídeos, com cadeias poliméricas de alto peso molecular ou de base inorgânica que agem no concreto, melhorando a coesão, impedindo a segregação e evitando a exsudação, na medida em que limitam a perda de água, além de contribuírem para a homogeneidade da mistura (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008).

O VMA pode substituir ou reduzir o uso de adições minerais no concreto, em alguns casos em que não há disponibilidade de adição no local de produção do CAA ou em locais onde essas adições possuem alto custo. Em seu estudo, Benaicha *et al.* (2015) obtiveram as mesmas características reológicas e mecânicas do CAA substituindo a sílica ativa pelo VMA. Os resultados mostraram que tanto o aditivo VMA quanto a adição mineral utilizada aumentaram a tensão de escoamento e a viscosidade plástica, para uma relação a/c e um teor de aditivo constantes. Além disso, os pesquisadores concluíram que, dependendo da disponibilidade dos materiais, o aditivo VMA pode substituir a sílica ativa.

Para Zende e Khadirnaikar (2014), o uso de VMA e de um aditivo superplastificante são essenciais para a fluidez e controle da segregação. O VMA permite obter misturas estáveis e de grande fluidez quando utilizados conjuntamente com aditivos superplastificantes, sendo necessários ensaios para verificar a compatibilidade entre aditivos, de modo a evitar retardamento de pega, alteração no desenvolvimento da resistência inicial, coesão excessiva, incorporação de ar e aumento da retração por secagem. Além disso, pode ser necessário o uso de maiores dosagens de SP devido à competição entre os dois aditivos por lugares de adsorção sobre as partículas do cimento (BARROS, 2008). Lazniewska-Piekarczyk (2014) investigou o comportamento de aditivos VMA e aditivos incorporadores de ar no CAA, verificando a importância da compatibilidade entre os aditivos, independente da composição química ser parecida.

Outros tipos de aditivos como incorporadores de ar, aceleradores e retardadores de pega, podem ser usados da mesma forma como no concreto convencional, dependendo da necessidade do produto final (EFNARC, 2005).

2.4.5 Água

Conforme o EFNARC (2002), a água, para a produção de CAA, deve atender os mesmos requisitos de qualidade da água usada no concreto convencional. A demanda de água é calculada em função da relação água/finos empregada na mistura e deve estar entre 0,80 a 1,10, em volume. No caso do CAA, uma parte da água pode ser substituída pelo uso dos aditivos superplastificantes, para se manter as condições de fluidez sem alterar a resistência mecânica (MELO, 2005).

2.5 PROPRIEDADES DO CAA NO ESTADO ENDURECIDO

Segundo Aslani e Nejadi (2012), as principais diferenças entre o CAA e o concreto convencional são grande quantidade de finos, elevado teor de aditivo redutor de água, além de redução do tamanho e volume de agregado graúdo. Tais características afetam o comportamento do concreto no estado endurecido. A maior quantidade de finos e a menor dimensão dos agregados causam alterações no esqueleto granular, influenciando a resistência à compressão, a resistência à tração e o módulo de elasticidade (CAVALCANTI, 2006; HEMALATHA *et al.*, 2015; AKINPELU *et al.*, 2017).

Segundo Repette (2011), as propriedades de resistência à compressão e resistência à tração do CAA são semelhantes às do concreto convencional. Os resultados de estudos mostram que há um aumento na resistência à compressão do CAA, nas primeiras idades, comparado ao concreto convencional com mesma relação *a/c*. Este comportamento é atribuído à zona de transição melhorada do CAA (NIKBIN *et al.*, 2014).

A resistência à compressão do concreto depende de fatores como a relação *a/c*, composição da mistura, propriedades mecânicas da pasta de cimento e sua adesão na zona de transição, tempo de hidratação, propriedades dos agregados, entre outras (NEVILLE; BROOKS, 2013). Em seu estudo, Domone (2007) observou que o tipo e teor de finos afetam mais a resistência à compressão do CAA do que a relação *a/c*.

Nikbin *et al.* (2014) avaliaram a influência da relação *a/c* e o teor de finos nas propriedades mecânicas do CAA. Além disso, verificaram se as relações e deduções do concreto convencional são aplicáveis no CAA. Para isso, utilizaram dezesseis misturas de CAA com diferentes relações *a/c* e teor de finos. Foi verificado que o aumento da relação *a/c* de 0,35 para 0,70 ocasionou uma queda nos valores da resistência à compressão em 66%, o mesmo acontecendo com a resistência à tração que diminuiu 51%, e o valor do módulo de elasticidade reduziu em 44%. Os autores observaram que o efeito da relação *a/c* é maior na resistência à compressão e na resistência à tração do que no módulo de elasticidade do CAA. Em relação ao teor de finos, Nikbin *et al.* (2014) observaram que com o aumento do teor de pó de calcário de 25 para 100% a resistência à compressão aumentou em 20 e 38%, para a relação *a/c* 0,60 e 0,47, respectivamente. Ocorreu, também, um aumento da resistência à tração em 17 e 12%

para as relações a/c 0,60 e 0,47, respectivamente. Foi observado ainda, que nas relações a/c mais baixas, a influência do teor de pó de calcário na resistência é mais perceptível. Os autores concluíram ainda que as relações propostas pelo ACI e CEB-FIP podem ser utilizadas para o CAA.

Felekoglu *et al.* (2007) verificaram que o uso de pó de calcário na mistura do CAA aumentou a resistência à tração e diminuiu o módulo de elasticidade comparado ao concreto convencional, com relação a/c entre 0,37 e 0,60.

Parra *et al.* (2011) analisaram a resistência à tração e o módulo de elasticidade do CAA em diferentes idades. Foram produzidos quatro traços de CAA e quatro de concreto convencional, com diferentes tipos de cimento (um com resistência de 32MPa e outro de 42MPa) e relação a/c de 0,45, 0,55 e 0,65. As características de cada mistura são mostradas na Tabela 9. A nomenclatura para cada concreto segue a seguinte ordem: tipo de concreto (S-CAA e N-concreto convencional); relação a/c (65, 55, 45) e tipo de cimento (32 ou 42). Os resultados mostraram que os CAA tiveram uma resistência à tração por compressão diametral, em média, 15% menor que a dos concretos convencionais (CV) (Figura 20a). Enquanto, os valores dos módulos de elasticidade dos CAA diminuíram em torno de 2% em relação aos dos CV (Figura 20b).

Tabela 9 Composição dos concretos estudados por Parra *et al.* (2011)

Composição	S-65-32	S-55-32	S-55-42	S-45-42	N-65-32	N-55-32	N-55-42	N-45-42
Tipo de Cimento	CEM-32,5	CEM-32,5	CEM-42	CEM-42	CEM-32,5	CEM-32,5	CEM-42	CEM-42
Cimento (kg)	275	325	325	400	275	325	325	400
Pó calcário (kg)	212	198	198	180	170	167	167	162
Total de partículas finas (kg)	487	523	523	580	445	492	492	562
a/c	0.65	0.55	0.55	0.45	0.65	0.55	0.55	0.45
Água (l)	179	179	179	180	179	179	179	180
Agregado graúdo (kg)	816	798	798	769	816	798	798	770
Areia grossa (kg)	191	373	373	540	955	934	934	901
Areia fina (kg)	721	529	529	340	-	-	-	-
Aditivo (kg)	4.68	5.20	4.88	6.00	1.93	2.28	1.63	2.00
Volume da pasta (dm ³)	353	364	364	384	335	350	349	373

Fonte: Parra *et al.* (2011).

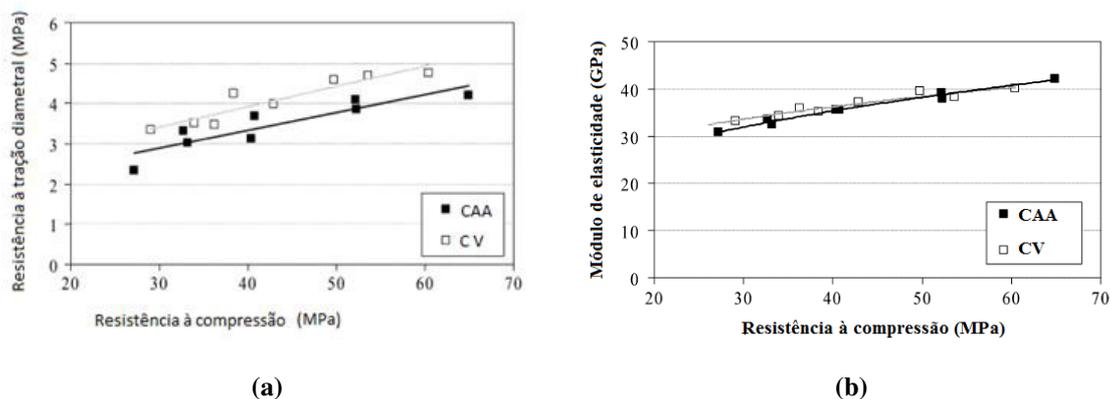


Figura 20 Resultados das propriedades mecânicas obtidos aos 28 e 90 dias: (a) resistência à tração; (b) módulo de elasticidade (Fonte: PARRA *et al.*, 2011)

Domone (2007), analisando os resultados de outras pesquisas, verificou que os CAA com baixas resistências apresentaram valores de módulos de elasticidade cerca de 40% mais baixos que os dos concretos convencionais, e para os CAA de elevadas resistências, essa taxa cai para 5%. O autor atribuiu este comportamento ao baixo teor de agregado graúdo do CAA quando comparado ao concreto convencional. Observou-se que o módulo de elasticidade do CAA tendia a sofrer redução, devido à influência do módulo de elasticidade de cada componente da mistura, em especial do agregado graúdo que tem sua quantidade e tamanho reduzidos neste tipo de concreto (GIROTTI, 2012). Mas, com o desenvolvimento dos novos métodos de dosagem, estes resultados foram modificados tornando-se similares aos resultados dos concretos convencionais (DESNERCK *et al.*, 2014).

Holschemacher (2004) analisando os resultados de resistência à compressão, resistência à tração e módulo de elasticidade dos CAA de várias publicações, avaliou o comportamento de modelos de previsão de resistência, criados para o concreto convencional. O autor verificou que o Código Modelo CEB-FIB 1990 subestima os valores da resistência à tração do CAA, mas não estima valores a menor, aspecto favorável à segurança das estruturas. Em relação aos módulos de elasticidade do CAA, os resultados analisados ficaram dentro da faixa do modelo, mas abaixo dos valores médios do concreto convencional.

Desnerck *et al.* (2011) desenvolveram um banco de dados com as propriedades do CAA no estado fresco e no estado endurecido, usando os resultados de pesquisas realizadas entre 1990 e 2011. Estes pesquisadores observaram que a relação água/cimento do CAA influencia a resistência à compressão, assim como ocorre no concreto convencional.

Verificaram, ainda, que para a resistência à tração e para o módulo de elasticidade o número de pesquisas é limitado. Dentre os valores encontrados, a resistência à tração direta do CAA variou entre 2,4 e 9,1MPa, e a tração na flexão entre 3,5 e 11,0MPa. Enquanto os valores do módulo de elasticidade das misturas de CAA foram encontrados em torno de 22,5 e 45,0GPa, aos 28 dias de idade.

Em relação à durabilidade, o CAA apresenta uma microestrutura homogênea, devido ao teor de finos (cimento e adições) utilizado, o que ocasiona uma menor quantidade de vazios, e conseqüentemente, uma menor porosidade (CAVALCANTI, 2006; REPETTE, 2011). Ye *et al.* (2007) investigaram a microestrutura do CAA, do concreto convencional e do concreto de alto desempenho, estudando a porosidade da pasta e observaram que a estrutura do poro, volume total, distribuição e diâmetro dos poros do CAA são similares ao concreto de alto desempenho. Assié *et al.* (2007) verificaram, através dos ensaios de difusão de ácido clorídrico e absorção de água, que as propriedades de transporte do CAA e do concreto convencional são similares. Ramezani pour *et al.* (2014) afirmaram que as adições minerais causam uma melhoria na durabilidade do CAA.

Barros (2008) avaliou as propriedades de durabilidade do CAA com resíduo de corte de mármore e granito (CAA-RCMG) e obteve resultados superiores ao do concreto convencional de referência. Na Tabela 10 são mostradas as composições dos concretos estudados e os resultados obtidos. Com base nos resultados apresentados verificou-se que o CAA-RCMG obteve a maior resistência média à compressão em relação aos concretos convencionais com mesma relação a/c e mesmo consumo de cimento. Barros (2008) atribuiu este resultado ao uso da adição que proporcionou melhor preenchimento dos vazios da estrutura do CAA no estado endurecido. Observou-se ainda que o CAA-RCMG apresentou uma taxa de absorção 36% menor em comparação ao concreto de referência, e conseqüentemente, maior resistência capilar. Segundo Barros (2008), o melhor desempenho do CAA-RCMG mostra que este tipo de concreto possui uma estrutura de poros mais fechada ou com menor continuidade.

Tabela 10 Composição dos concretos e resultados obtidos no estudo de Barros (2008)

Composição e Ensaio	Concreto referência (kg)	CAA-RCMG	Concreto com inibidor de corrosão (C-I- COMP)
Cimento	392	392	392
Areia	887	783	887
Brita	895	795	895
Água (a/c = 0,5)	191	191	191
Aditivo	2,55	6,86	2,55
RCMG(f/c=0,5)	-	196	-
Inibidor de corrosão: Molibdato de sódio(2%)	-	-	7,84
Tiouréia (0,67%)	-	-	2,63
Resistência à compressão média (MPa)	35,2	36,4	28,3
Taxa de absorção média (g/cm^2 $h^{1/2}) \times 10^{-2}$)	13,55	8,73	12,86
Resistência capilar média (h/m^2)	5.121	13.437	6.403

Fonte: Barros (2008).

A retração no CAA é maior do que no concreto convencional, apresentando valores em torno de 5 a 15% maiores (HOLSCHEMACHER, 2004). Esta característica juntamente com a fluência do CAA reflete maior preocupação, devido ao alto teor de pasta e argamassa comparadas ao do concreto convencional.

Giroto (2012) investigou o mecanismo da retração plástica e fissuração nas primeiras idades da argamassa do CAA, verificando a influência do teor do aditivo SP e da adição mineral na composição das mesmas. Analisou o comportamento reológico das fases pasta e argamassa e verificou que as adições com diferentes reatividades apresentam comportamentos distintos com o aumento do teor do aditivo SP, influenciando a retração plástica e a fissuração nas idades avaliadas. A medida da retração plástica foi realizada pela leitura das deformações feitas por três sensores laser. O comportamento reológico das misturas estudadas demonstrou que a diminuição da tensão de escoamento minimiza os efeitos da retração plástica e da fissuração.

Diante da diversidade dos resultados encontrados nas pesquisas sobre as propriedades do CAA no estado endurecido, Zende e Khadirnaikar (2014) relacionaram as diferenças entre as propriedades do CAA e as do concreto convencional, baseados nos resultados encontrados na literatura (Quadro 2).

Quadro 2 Propriedades do CAA no estado endurecido comparadas ao concreto convencional

Propriedade do CAA	Comparação com o concreto convencional
Resistência à compressão	não difere
Retração e fluência	não difere
Retração em idades iniciais	alta
Tração e módulo de elasticidade	não difere
Durabilidade	melhor

Fonte: Zende e Khadimaikar (2014).

2.6 DOSAGEM E PRODUÇÃO DO CAA

Para Neville e Brooks (2013), a dosagem de um concreto pode ser definida como o processo de seleção e proporção dos constituintes adequados, a fim de se obter um material econômico, trabalhável, resistente e durável. Os métodos de dosagem do CAA diferem daqueles utilizados para o concreto convencional, pois o CAA apresenta uma grande quantidade de finos, conseqüentemente, maior volume de pasta, menor relação água/finos, aumento dos consumos de adições minerais e aditivos superplastificantes, redução na quantidade e dimensão máxima do agregado graúdo e, opcionalmente, aditivos modificadores de viscosidade.

Segundo Kraus (2006), a dosagem dos materiais constituintes é fundamental para se obter um CAA capaz de fluir e não segregar, mantendo-se homogêneo. Moraes (2010) salienta que é de suma importância otimizar as fases pasta, argamassa e concreto para a produção do CAA, com a finalidade de ajustar os parâmetros em cada fase. Alguns aspectos da dosagem da mistura do CAA, de acordo com o EFNARC (2005), são:

- avaliar a demanda de água e otimizar o fluxo e a estabilidade da pasta;
- determinar a proporção de agregado miúdo e o teor de aditivos a fim de se obter uma consistência estável;
- verificar a estabilidade a pequenas variações de proporções;
- acrescentar uma quantidade adequada de agregados graúdos;
- produzir o CAA em laboratório, realizando os ensaios necessários no estado fresco;
- realizar ensaios para determinação das propriedades do CAA no estado endurecido.

Outro aspecto que deve ser considerado na dosagem do CAA é o alcance de um menor custo. Para isso, medidas como utilizar materiais disponíveis na região de aplicação do concreto, reduzir o consumo de cimento e teor de aditivos devem ser adotadas. Entretanto, deve-se lembrar que a viabilidade do uso deste concreto não se dá apenas no custo unitário, mas no custo total do serviço de concretagem e da obra (LEITE, 2007). Na Tabela 11 estão expressas as faixas mais usuais de proporcionamento de materiais constituintes do CAA, segundo pesquisas encontradas na literatura.

Tabela 11 Faixas usuais dos constituintes do CAA para o seu correto proporcionamento

	Cimento (kg/m³)	Água/finos	Finos	Água	Agregado gráudo	Agregado miúdo
Okamura (1997)	-	0,90-1,0 (em volume)	-	-	50% do vol. de sólidos	40% do vol. da argamassa
Coppola (2001)	-	0,85-1,20 (em volume)	170-195 (l/m ³)	-	< 340 (l/m ³)	-
EFNARC (2002)	350-450	0,80-1,10 (em volume)	160-240 (l/m ³) ou 400-600 (kg/m ³)	< 200 (l/m ³)	28-35% do vol. do concreto	-
Gomes (2002)	200-400	-	400-650 (kg/m ³)	150-180 (kg/m ³)	30-35% do vol. do concreto ou 750-920 (kg/m ³)	40-50% do vol. da argamassa ou 710-900 (kg/m ³)
EFNARC (2005)	350-450	0,85-1,10 (em volume)	380-600 (kg/m ³)	150-210 (l/m ³)	27- 36% do vol. do concreto	-
Repette (2005)	350-450	0,8-1,10 (em volume)	150-250 (kg/m ³)	-	25-35% do vol. do concreto	35-50% do vol. da argamassa
Domone (2005)	-	0,28-0,42 (em massa)	445-600 (kg/m ³)	-	29,1-34,8% do vol. do concreto ou 770-925 (kg/m ³)	41-52% do vol. da argamassa

Fonte: Kraus (2006)

A produção do CAA requer um controle mais rigoroso do que o empregado na produção de concreto convencional. Deve ser observado a variação da granulometria e umidade dos agregados, o tempo de mistura (o CAA demanda mais tempo que o concreto convencional) e tipo de misturador, o tempo disponível entre o início da mistura e o final do adensamento nas formas e a temperatura. Durante o lançamento do CAA, a pressão nas formas é aumentada devido a maior fluidez e taxa de preenchimento desse tipo de concreto. Antes de iniciar a concretagem, deve-se realizar os ensaios para verificar o atendimento das características de autoadensabilidade. A concretagem deve ser de forma contínua para evitar a perda da fluidez (MELO, 2005).

Desde o surgimento do CAA, inúmeros métodos de dosagem foram propostos, alguns deles são antieconômicos e apresentam alguns problemas como baixo valor do módulo de elasticidade (TUTIKIAN; DAL MOLIN, 2008). Os primeiros métodos de dosagem foram baseados apenas na obtenção das propriedades do concreto no estado fresco, como a fluidez, e apresentavam elevado volume de pasta (MELO, 2005). O primeiro método proposto para a dosagem do CAA foi o de Okamura (GOMES, 2002). Para Repette (2005), os métodos de dosagem devem ser divididos em três etapas: preenchimento do esqueleto de agregado, controle da segregação e incorporação de agregado em pasta.

Shi *et al.* (2015) classificaram os métodos de dosagem em cinco categorias: dosagem empírica, resistência à compressão, empacotamento do agregado, modelo estatístico fatorial e reologia da pasta, além de relacionarem os principais métodos internacionais (Quadro 3). Segundo estes autores, o método de dosagem é um passo determinante para a qualidade do CAA, que deve considerar aspectos de aplicabilidade, sustentabilidade, custo, entre outros.

Quadro 3 Relação dos principais métodos de dosagem do CAA encontrados na literatura internacional

Categorias	Método de dosagem (autor, ano)
Dosagem empírica	Okamura e Ozawa (1995) Edmatsa, Sugamata e Ouchi (2003) Domone (2009) Khaleel e Razak (2014)
Resistência à compressão	Ghazi e Al Jadiri (2010) Dinakar, Sethy e Sahoo (2013)
Empacotamento do agregado	Hwang, e Tsai (2005) Petersson, Billberg e Van (1996) Su, Hsu e Chai (2001) Sedran e De Larrard (1996) Shi e Yang (2005) Sebaibi, Benzerzour, Sebaibi e Abriak (2013) Kanadasan e Razak (2014)
Modelo estatístico fatorial	Khayat, Ghezal e Hadriche (1999) Ozbay, Oztas, Baykasoglu e Ozbebek (2009) Bouziani (2013)
Modelo de reologia da pasta	Saak, Jennings e Shah (2001) Bui, Akkaya e Shah (2002) Ferrara, Park e Shah (2007)

Fonte: Shi *et al.*(2015).

Os métodos de dosagem nacionais encontrados na literatura são listados no Quadro 4. Observando esse quadro, verifica-se que a partir de 2008, no Brasil, o método mais utilizado foi o Repette-Melo. O método de dosagem Repette-Melo é diferenciado pela

otimização dos materiais, utilização da resistência à compressão como parâmetro inicial e consideração da reologia da pasta e da argamassa para a confecção do concreto (GIROTTO, 2012). Desse modo, é possível produzir CAA com resistências mais baixas, aproximando-o da realidade das construções correntes.

Quadro 4 Relação de estudos em CAA realizados no Brasil, em ordem cronológica, e o respectivo método de dosagem adotado

Referências	Método adotado
Araujo (2003)	EFNARC (2002)
Lisbôa (2004)	Gomes (2002)
Tutikian. (2004)	Tutikian (2004)
Manuel (2005)	Tutikian (2004)
Cavalcanti (2006)	Gomes (2002)
Kraus (2006)	Repette-Melo (2005)
Menezes (2006)	Gomes (2002)
Almeida Filho (2006)	Gomes (2002)
Hastenpflug (2007)	Repette-Melo (2005)
Leite (2007)	Gomes (2002)
Tutikian (2007)	Tutikian e Dal Molin (2008)
Barros (2008)	Gomes (2002)
Simonetti (2008)	Tutikian (2004)
Klein (2008)	Okamura (1995) e Repette-Melo (2005)
Ferraz (2009)	Repette-Melo (2005)
Santos (2010)	Repette-Melo (2005)
Moraes (2010)	Repette-Melo (2005)
Diniz (2010)	Tutikian (2004) e Gomes (2002)
Fochs (2011)	Tutikian e Dal Molin (2008) e Alencar e Helene (2006)
Tojal (2011)	Gomes (2002)
Giroto (2012)	Repette-Melo (2005)
Branco (2012)	Tutikian (2004)
Moreira (2014)	ABCP
Vicentini <i>et al.</i> (2017)	Tutikian (2004)

Para Gomes e Barros (2009), o método Repette-Melo é baseado na racionalização da dosagem a partir do estabelecimento da relação água/aglomerante, conforme exigências de resistência à compressão e durabilidade. O estudo das fases pasta e argamassa através do estudo reológico dos materiais tornam a dosagem mais coerente, resultando nas propriedades de autoadensabilidade requeridas pelo CAA e também resultados satisfatórios no estado endurecido (GIROTTO, 2012).

De acordo com Repette (2011), CAA produzidos com mesmos materiais constituintes e resistências foram comparados, e o CAA dosado pelo método Repette-Melo foi o que obteve menor custo em relação ao CAA dosado pelo método de Okamura. Para Kraus (2006), o método Repette-Melo se destaca dos demais métodos propostos, por ajustar os componentes do concreto com ensaios rápidos e acessíveis economicamente.

Na Figura 21 é apresentado um fluxograma que resume o método de dosagem de Repette-Melo (2005).

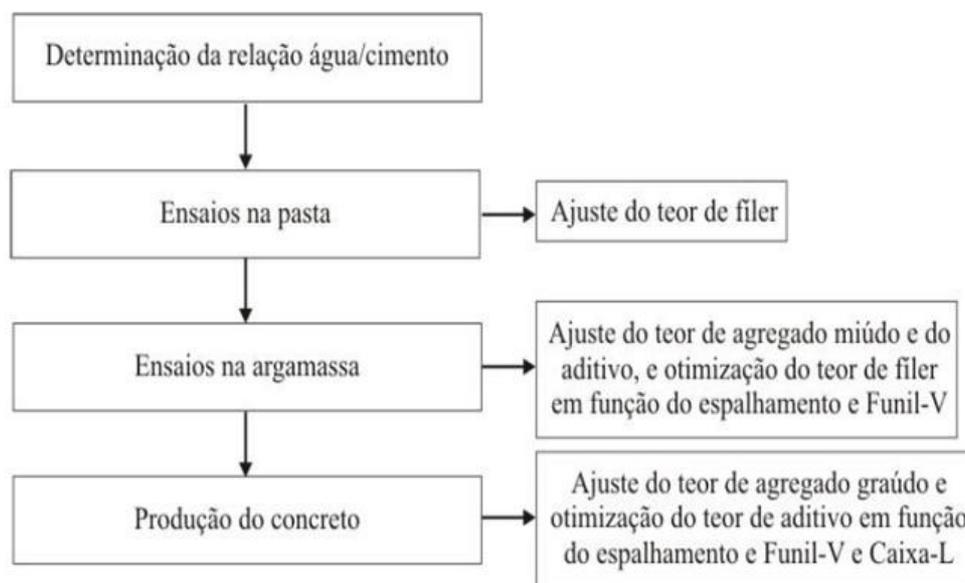


Figura 21 Fluxograma do método de dosagem Repette-Melo (Fonte: MELO, 2005)

De acordo com Ferraz (2009), o método Repette-Melo consiste, inicialmente, em selecionar e caracterizar os materiais. A relação água/cimento deve ser estabelecida em função da resistência à compressão, utilizando curvas de Abrams de acordo com o tipo de cimento adotado. Na fase pasta, determina-se o teor ótimo do aditivo superplastificante na mistura. Ainda nesta fase, é definido o teor de filler, dotado de partículas menores que 0,075mm, de maneira que não ocorra segregação ou exsudação nesta mistura.

Na fase argamassa, é definida a relação volumétrica agregado miúdo/argamassa, através do ensaio de espalhamento, compreendendo uma faixa de abertura entre 200 a 280mm, e escoamento através do ensaio de funil V com faixa delimitada de 5 a 10s, variando o teor de aditivo. O teor inicial de agregado miúdo é de 40% sobre o volume da mistura. Nesta fase, é confirmado o teor de adição mineral através da autocompactabilidade da mistura (GIROTTI, 2012; SANTOS, 2010).

Na fase concreto, é estabelecido o teor de agregado graúdo e o ajuste final do aditivo, de maneira a se obter misturas adequadas em função dos ensaios de espalhamento, em uma faixa de 600 a 700mm, funil V, com intervalo menor que 10s, e caixa L com razão de bloqueio $(H2/H1) \geq 0,80$ (MELO, 2005).

3 RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI

O Brasil é um dos maiores produtores de rochas ornamentais do mundo, sendo o sétimo exportador no cenário mundial. Segundo a ABIROCHAS (2017), a rocha ornamental é o quinto produto de base mineral exportado pelo Brasil, atrás apenas do minério de ferro, do minério de cobre, do ouro e do ferro-nióbio. No sul do estado do Ceará, localiza-se uma grande reserva de calcário laminado, pertencente à Bacia Sedimentar do Araripe, localizada no interior da Formação Santana, formada no Mesozoico, mais precisamente no período Cretáceo Inferior (a cerca de 120 milhões de anos) (VIANA *et al.*, 2006; VIDAL *et al.*, 2005). A reserva possui em torno de 97 milhões de metros cúbicos de rocha, abrangendo principalmente os municípios de Santana do Cariri e Nova Olinda (Figura 22), onde o calcário explorado é conhecido como “Pedra Cariri”. A exploração dessa rocha é a principal atividade econômica destes municípios, gerando cerca de 1500 empregos diretos (VIDAL *et al.*, 2007; MOURA *et al.*, 2013) e mais de 4000 empregos indiretos (CASELLI; GOMES, 2015).



Figura 22 Mapa do estado do Ceará destacando os municípios de maior produção de Pedra Cariri, Santana do Cariri e Nova Olinda (Fonte: VIDAL *et al.*, 2005)

Nessa região, o calcário se apresenta em camadas sedimentares estratificadas (Figura 23a), de cor amarelada a creme, amarronzada ou cinza-azulada, dependendo da sua composição química (Figura 23 *b e c*), intercaladas com camadas de materiais argilosos. O calcário é composto basicamente de carbonato de cálcio (VIDAL *et al.*, 2005). Segundo Clemente *et al.* (2016), este material apresenta propriedades físicas e mecânicas compatíveis a calcários de alta densidade, os quais apresentam as menores taxas de absorção de água e maiores resistências quando solicitados mecanicamente.

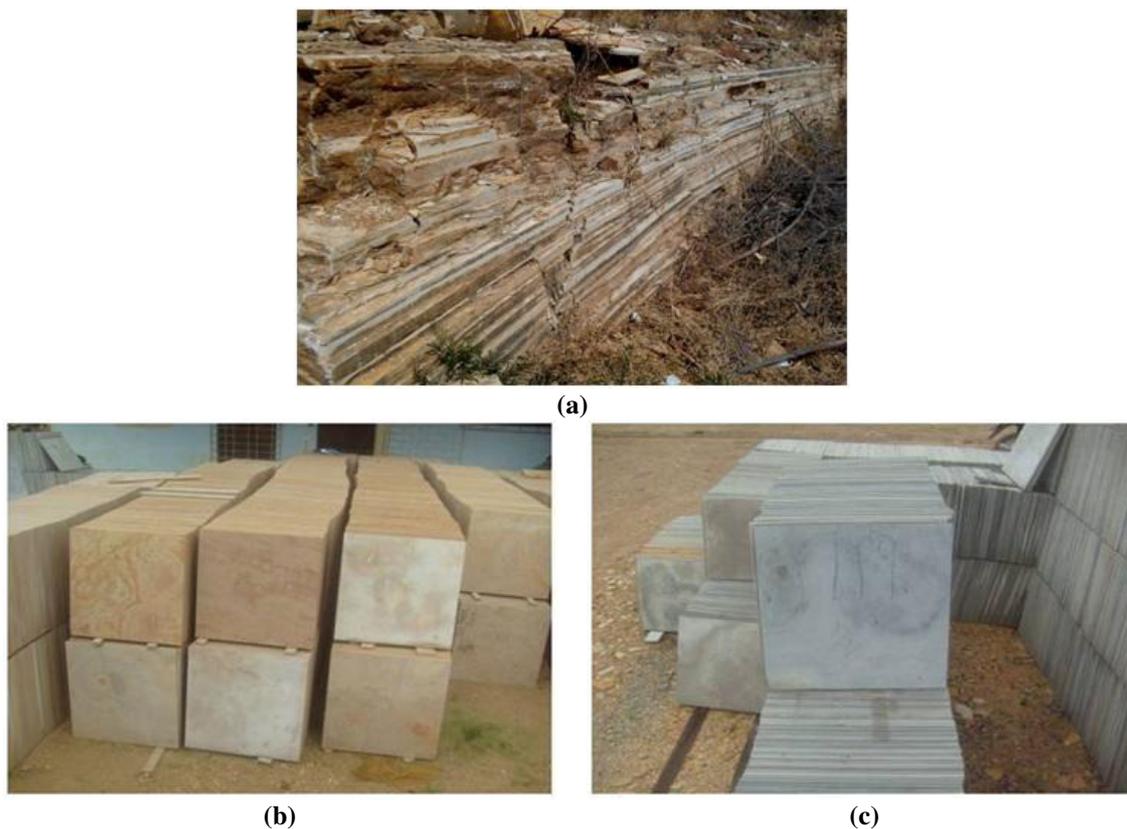


Figura 23 Aspectos da rocha de Pedra Cariri: (a) Jazida de rocha em camadas estratificadas (Fonte: VIAJENACHAPADA, 2014); (b) Tom creme; (c) Tom acinzentado (Fonte: BASTOS, 2014)

De acordo com Silva (2008), a Bacia Sedimentar do Araripe é uma das mais importantes do mundo, pois se constitui em um grande sítio geológico e paleontológico do Brasil. Segundo Bastos (2014), a incidência de achados de fósseis na pedra Cariri é muito alta. Bezerra (2015) aponta para uma grande diversidade de fósseis de espécies diferentes encontrados nesta região, pois havia neste local, lagos de águas calmas, com brejos, onde se desenvolveram uma grande biodiversidade e que foram preservados nas finas lâminas de calcários depositados há 120 milhões de anos.

Dentre os fósseis mais encontrados, destacam-se: crustáceos, insetos, conchostráceos, caranguejos, escorpiões, aracnídeos, peixes, pterossauros, crocodilianos, aves, anuros e vegetais (MOCHIUTTI *et al.*, 2012) (Figura 24 *a* e *b*). A Formação Santana é caracterizada por depósitos fossilíferos protegidos pelo Centro de Pesquisas Paleontológicas da Chapada do Araripe (DNPM-CE), conforme relatório de gestão do DNPM (2009).



Figura 24 Fósseis encontrados na Pedra Cariri: (a) *Dastiselbe Elongatus*, localmente conhecido como “piaba” (Fonte: BASTOS, 2014); (b) *Dastiselbe Elongatus* junto a uma espécie vegetal (Fonte: MOCHIUTTI *et al.*, 2012)

Estima-se que as reservas do calcário laminado, nos municípios de Nova Olinda e Santana do Cariri, correspondem a cerca de 114,5 milhões de m³, equivalendo a 275 milhões de toneladas deste calcário (VIDAL *et al.*, 2005).

A pedra Cariri é usada, geralmente, *in natura*, sem polimento ou acabamento superficial, em revestimento externo de fachadas, muros, pisos e paredes, bancadas, e em áreas de lazer, como bordas de piscinas (Figura 25), devido ao seu aspecto rústico (BASTOS, 2014; BEZERRA, 2015). Segundo Clemente *et al.* (2013), este tipo de rocha não é recomendável para uso em pisos de ambientes de alto tráfego pois possui uma baixa resistência à abrasão, assim como em ambientes úmidos (banheiros) e em fachadas expostas a ambientes agressivos.

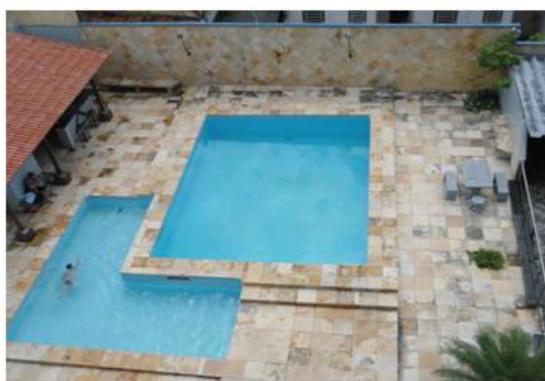


Figura 25 Utilização da Pedra Cariri em áreas molhadas (Fonte: BASTOS, 2014)

Segundo Bastos (2014), a Pedra Cariri é ainda utilizada para fabricação de móveis e artigos de decoração (Figura 26 *a* e *b*), aumentando o valor econômico deste produto.



Figura 26 Utilização não convencional da Pedra Cariri: (a) Móveis (Fonte: CASTRO, 2009); (b) Artigo de decoração (Fonte: BASTOS, 2014)

3.1 GERAÇÃO DE RESÍDUOS

O processo produtivo da pedra Cariri ocorre em três etapas: exploração, beneficiamento e comercialização, como mostrado na Figura 27. A geração de resíduos ocorre em todas as etapas desse processo, incluindo o resíduo da quebra de placas durante o transporte ou estocagem. Tal fato causa vários danos ao meio ambiente (BASTOS, 2014). O alto índice de perda de material se deve às técnicas inadequadas de exploração e à falta de acompanhamento técnico especializado (VIDAL *et al.*, 2005).

A exploração da pedra Cariri se inicia com a retirada de uma camada composta pela cobertura do solo, camadas argilosas e do calcário que sofreu intempéries. A profundidade desta camada pode variar de alguns centímetros a aproximadamente 10 a 15 metros, dependendo do afloramento da rocha (SILVA, 2008; CASTRO, 2009).

O material de cobertura retirado é depositado nas pedreiras e regiões vizinhas da lavra, não existindo locais apropriados para seu destino final (BASTOS, 2014). Os resíduos da extração do calcário, lajotas e aparas oriundas do esquadrejamento nas serras, são depositados junto a este material retirado da cobertura (Figura 28), causando problemas ambientais e impedindo o avanço da frente de lavra no local (CASTRO, 2009).

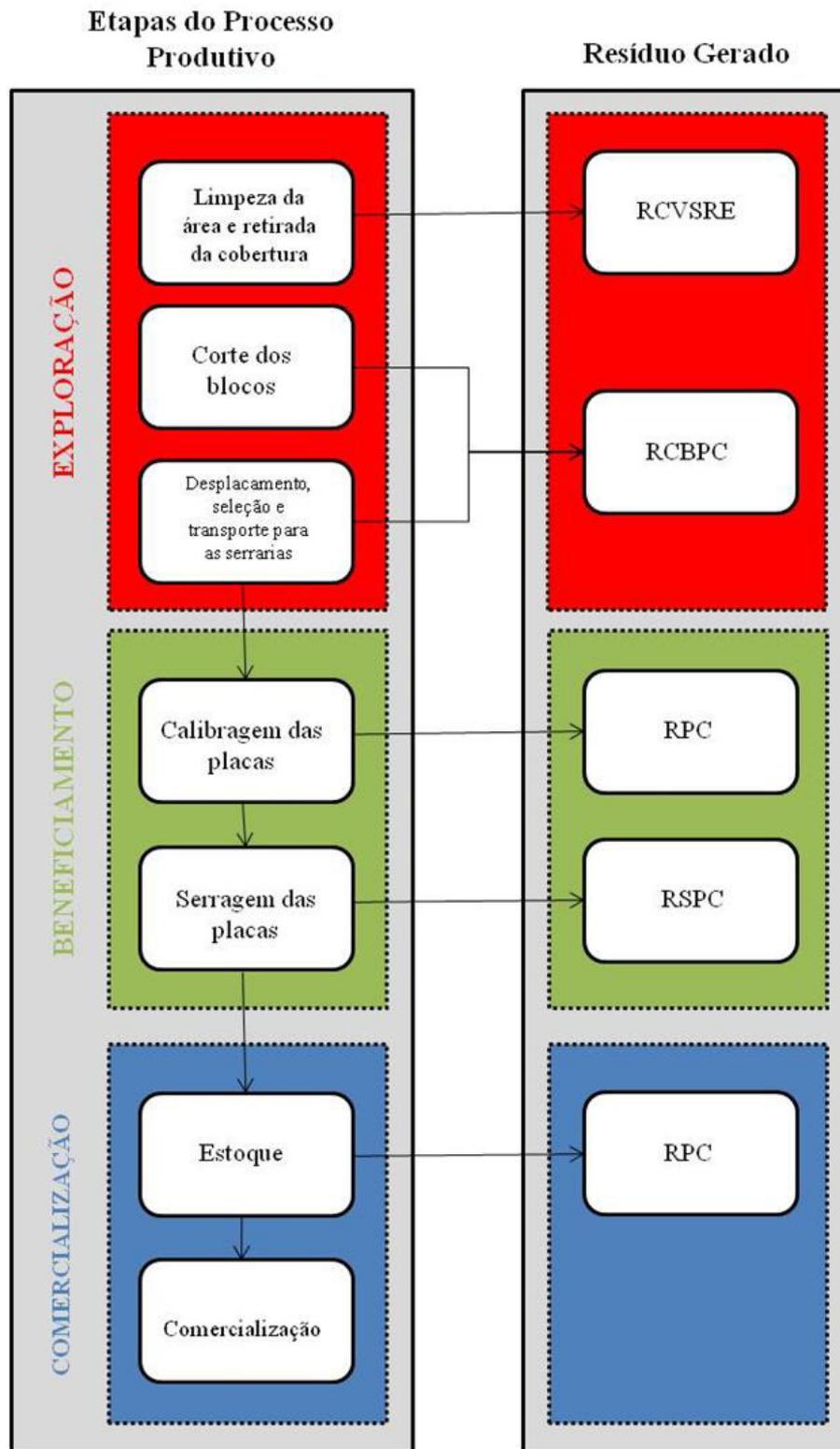


Figura 27 Fluxograma das etapas de processo produtivo da Pedra Cariri e geração de resíduos (RCVSRE- Resíduo de cobertura vegetal, solo e rocha exposta; RCBPC- Resíduo de Corte dos Blocos de Pedra Cariri; RSPC- Resíduo de Serragem de Pedra Cariri; RPC- Resíduo de Pedra Cariri) (Fonte: Adaptado de BASTOS, 2014)



Figura 28 Frente de lavra obstruída pelos rejeitos do processo produtivo da Pedra Cariri (Fonte: CASTRO, 2009)

A lavra é realizada de modo seletivo, a céu aberto, em forma de salão, em áreas com dimensões de 20 a 30m de largura por 30 a 40m de comprimento (Figura 29a), podendo se desenvolver para os lados e para baixo (SILVA, 2008; BEZERRA, 2015). Segundo Silva (2008), até a década de noventa, a lavra era realizada através de técnicas rudimentares, utilizando alavancas, pixotes e marretas (Figura 29b). A partir do ano 2000, a lavra passou a ser semimecanizada, utilizando-se máquinas de corte móveis, dotadas de motores elétricos, com disco diamantado (CASTRO, 2009) (Figura 29c). Segundo Mendes Filho (2009), a extração manual das lajotas foi praticamente eliminada, sendo que 95% das pedreiras operam com serras de piso. A Figura 29d mostra o aspecto da frente de lavra durante a exploração do material.

Dentro dos calcários, pode ser encontrado um material dolomítico mais compacto, chamado de matracão (Figura 29e), considerado como rejeito pelos produtores, e identificado como um dos motivos para abandonar a frente de lavra. Outros motivos que obrigam a mudança da frente de lavra são a presença de materiais quebradiços e argilosos e de cavernas de dissolução cárstica (Figura 29f) (BASTOS, 2014).

Após a lavra das rochas, o próximo processo consiste no deslocamento da rocha em forma de placas com espessura de 1 a 3cm, realizado por um operador com o auxílio de uma espátula (Figura 29g) (BASTOS, 2014). Esta etapa ainda é realizada de maneira rudimentar, dificultando o controle da espessura da placa, o que reduz o seu valor comercial e de uso (CASTRO, 2009).



Figura 29 Exploração de Pedra Cariri: (a) Área de lavra do calcário (Fonte: BASTOS, 2014); (b) Lavra manual (Fonte: VIDAL *et al.*, 2005); (c) Aspecto da pedreira com processo semimecanizado (Fonte: MENDES FILHO, 2009); (d) Aspecto da frente de lavra (Fonte: CLEMENTE *et al.*, 2016); (e) Camada de matrão (Fonte: CASTRO, 2009); (f) Caverna de dissolução cárstica (Fonte: CASTRO, 2009); (g) Desplacamento manual (Fonte BASTOS, 2014)

Após o processo de deslocamento, as placas são calibradas manualmente com o auxílio de um martelo e uma espátula (Figura 30a), e posteriormente, são selecionadas manualmente e transportadas para o esquadrejamento nas serrarias (Figura 30b). Nas pedreiras de menor porte, que não possuem serras em seu interior, a calibração manual é o fim do processo produtivo. Tais pedreiras vendem seus produtos para as pedreiras de grande porte ou para compradores (MENDES FILHO, 2009). Nas serrarias, as placas são esquadrejadas em dimensões compatíveis à sua aplicação, geralmente medindo 40 X 40cm, 50 X 50cm, 30 X 30cm, 20 X 20cm e 15 X 30cm, ou em placas de 60 X 60cm, sob encomenda (CASTRO, 2009). Após o esquadrejamento, as placas são estocadas (Figura 30c).



Figura 30 Beneficiamento da Pedra Cariri: (a) Calibragem manual (Fonte: BASTOS, 2014); (b) Esquadrejamento na serraria (Fonte: CASTRO, 2009); (c) Local de estoque após o esquadrejamento (Fonte: MENDES FILHO, 2009)

De acordo com Bastos (2014), na etapa de esquadrejamento é gerado um alto volume de resíduos na forma de filetes de rochas, denominado Resíduo de Pedra Cariri (RPC), e na forma de pasta ou lama, conhecido como Resíduo de Serragem de Pedra Cariri (RSPC). Esta pasta ou lama é gerada durante o corte das placas, pois este processo é realizado com disco de corte e utiliza água para o resfriamento do mesmo.

Esse material é disposto em depressões, formando lagoas para decantação da pasta ou lama (BASTOS, 2014). A Figura 31a mostra o aspecto de deposição do RPC, e a Figura 31 (b e c) mostra as lagoas de lama de RSPC.



Figura 31 Deposição dos resíduos de pedra Cariri: (a) Aspecto das pilhas de RPC (Fonte: SUASSUNA *et al.*, 2012); (b) Aspecto da deposição do RSPC (Fonte: BASTOS, 2014); (c) Aspecto da lagoa de lama de RSPC (Fonte: BASTOS, 2014)

De acordo com Vidal *et al.* (2007), durante as etapas de exploração e beneficiamento da pedra Cariri ocorre uma grande perda deste material, cerca de 70%, gerando uma grande quantidade de resíduos que chega a três milhões de toneladas. Silva (2008) aponta que a quantidade de rejeitos gerados durante o esquadrejamento da placa (RPC) no município de Santana do Cariri é de 275.000 m³ e em Nova Olinda, é de 755.000 m³. Estima-se que a quantidade de RSPC gerado é de cerca de 850 toneladas/ano (BASTOS, 2014).

A exploração dos calcários laminados aumenta o desmatamento da região. As pilhas de rejeitos acumuladas, provenientes da lavra e dos resíduos sólidos do beneficiamento (Figura 32 a e b) causam poluição ambiental e visual, acarretam o assoreamento de riachos e do rio Cariús, principal rio da região (Figura 32c), provocam mudanças no pH das águas, aumento da erosão das encostas e destruição do patrimônio fossilífero (SILVA, 2008; CASTRO, 2009; PRADO *et al.*, 2012; BEZERRA, 2015). Além disso,

pode provocar problemas de saúde na população, principalmente doenças respiratórias. Os locais de extração das placas também não passam por um processo de recomposição após o fim da exploração, podendo ser observadas verdadeiras crateras na paisagem, sujeitas ao intemperismo, causando erosão e deslizamentos (BEZERRA, 2015).

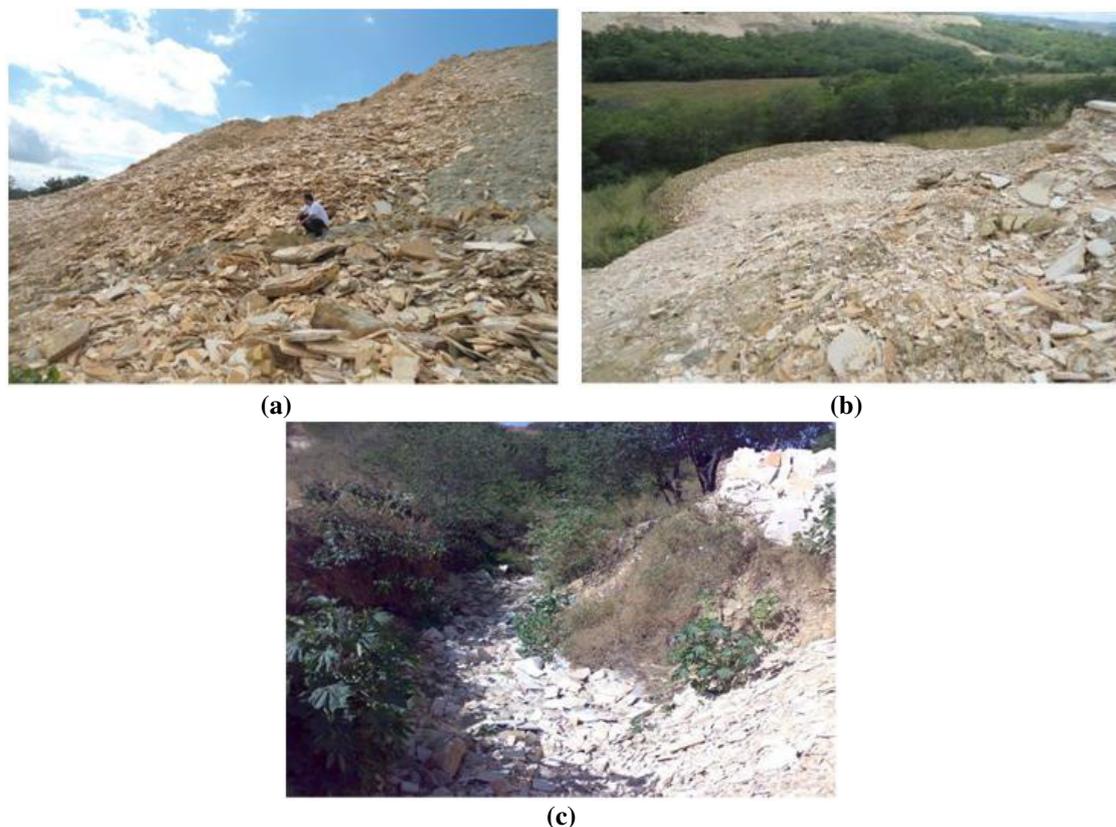


Figura 32 Aspecto da área exploração de Pedra Cariri: (a) e (b) Pilhas de rejeitos (Fonte: BASTOS, 2014); (c) Córrego assoreado (Fonte: CASTRO, 2009)

3.2 CARACTERÍSTICAS E APLICAÇÃO DO RESÍDUO DE SERRAGEM DE PEDRA CARIRI

Na tentativa de contribuir para o desenvolvimento sustentável da construção civil, várias pesquisas tem sido realizadas com o objetivo de viabilizar o uso do resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) como adição mineral para produção de materiais à base de cimento.

Menezes *et al.* (2010) realizaram um estudo objetivando a caracterização do resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC). Nessa pesquisa, foram utilizados dois tipos de resíduos denominados “Amarelo” e “Cinza”, de acordo com sua tonalidade, ambos oriundos da serragem da Pedra Cariri. Para sua caracterização foram realizados os ensaios de difração de raios-X (Figura 33), análise térmica diferencial, distribuição de

tamanho de partículas e análise morfológica por microscopia eletrônica de varredura (Figura 34 *a* e *b*). A Tabela 12 apresenta a composição química dos resíduos estudados.

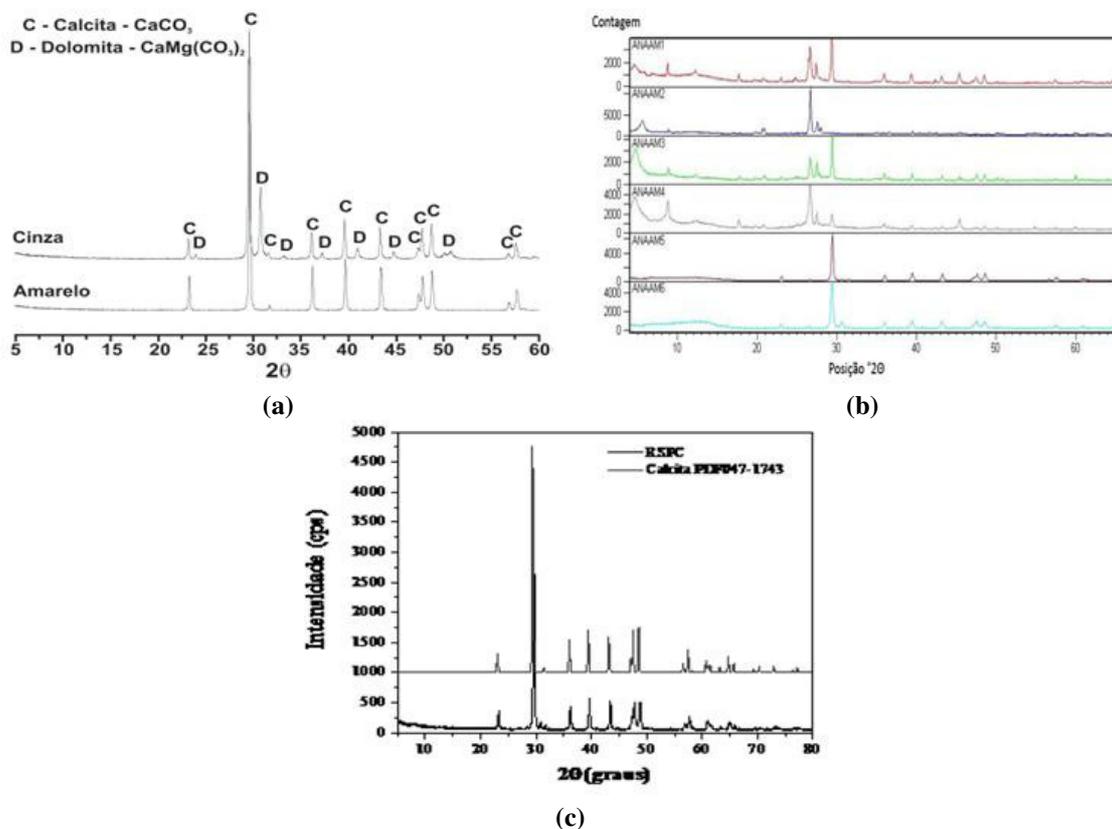


Figura 33 Difratoograma de raios-X do RSPC: (a) Estudo de Menezes *et al.* (2010); (b) Estudo de Suassuna *et al.* (2012), no qual o RSPC é a amostra ANAAM5; (c) Estudo de Moura *et al.* (2013)

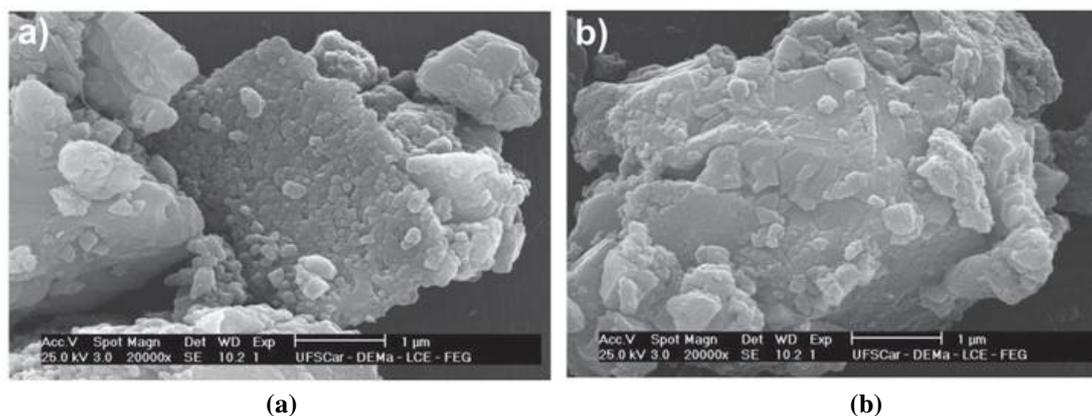


Figura 34 Micrografias de microscopia eletrônica de varredura do RSPC (a) resíduo amarelo (b) resíduo cinza (Fonte: MENEZES *et al.*, 2010)

Após as análises dos resultados obtidos, Menezes *et al.* (2010) concluíram que o RSPC é composto por calcita (resíduo amarelo) e calcita e dolomita (resíduo cinza), possuindo elevada finura, com tamanho médio de partícula em torno de 5 μm, e que seus constituintes se apresentam aglomerados. Através das micrografias, os autores

verificaram, ainda, que as partículas menores possuem forma lamelar, enquanto as maiores aparentam ser formadas por camadas, fato relacionado à formação geológica da rocha (sedimentos estratificados).

Tabela 12 Resultados de composição química dos RSPC encontrados na literatura

Amostra	CaO	SiO ₂	MgO	Fe ₂ O ₃	MnO	ZnO	SrO	CuO	K ₂ O	PF	Referência
RSPC Amarelo	54,39	0,85	-	0,66	0,22	0,03	0,09	0,01	-	43,74	Menezes <i>et al.</i> (2010)
RSPC Cinza	51,79	0,57	2,04	0,41	0,34	0,01	0,08	0,01	-	43,75	
RSPC	95,51	1,96	0,00	1,59	0,45	-	-	-	0,23	41,40	Suassuna <i>et al.</i> (2012)
RSPC	95,27	1,37	-	1,33	0,43	0,05	0,25	0,03	-	-	Moura <i>et al.</i> (2013)

Suassuna *et al.* (2012) analisaram amostras das diversas etapas do processo de extração e beneficiamento da pedra Cariri. Foram realizadas análises químicas e mineralógicas, além da determinação do pH e da perda ao fogo. Os resultados referentes à amostra do resíduo de serragem da pedra Cariri (RSPC) mostraram que este resíduo é fonte de calcita de alta pureza (Tabela 12 e Figura 33b). O resultado do ensaio de pH foi 8,84, classificando o resíduo como não perigoso, e a perda ao fogo foi igual 41,4%. Segundo estes autores, a perda ao fogo pode ser devida à decomposição do carbonato de cálcio (CaCO₃), à liberação de água estrutural, à decomposição de matéria orgânica e à decomposição de outros carbonatos, como dolomita – Mg.Ca(CO₃)₂.

Moura *et al.* (2013) também determinaram as características químicas e físicas do RSPC, através da difração de raios-X, determinação da massa específica e índice de pozolanicidade. Os autores observaram que cerca de 95% do resíduo é composto por óxido de cálcio e sua fase cristalina corresponde à calcita (Tabela 12 e Figura 33c). O valor da massa específica do RSPC foi de 2,67g/cm³ e o tamanho médio da partícula foi de 5,23µm. Os autores verificaram que o resíduo não pode ser considerado pozolânico, pois o resultado do índice de pozolanicidade foi de 56%, e sua estrutura é cristalina, não atendendo os requisitos da NBR 5752 (ABNT, 1992).

No que tange a aplicação, os rejeitos gerados pelo processo produtivo da Pedra Cariri são empregados em aterros, na melhoria de estradas vicinais da região de exploração nos períodos chuvosos, e na fabricação de cimento, sendo usado pela Indústria Barbalhense de Cimento Portland (IBACIP), pertencente ao grupo João Santos,

localizada na cidade de Barbalha, 70km do local de extração (VIDAL *et al.*,2005). Estima-se que a IBACIP consome cerca de 7.000 toneladas/mês de rejeito (VIDAL; PADILHA; OLIVEIRA, 2005). Bezerra (2015) afirmou que, o RSPC possui alto potencial como matéria-prima para produção de materiais à base de cimento.

Silva (2008) realizou um estudo utilizando o rejeito de calcário laminado, proveniente de Santana do Cariri, em argamassas. Os materiais utilizados foram resíduo, com granulometria retida na peneira de 300µm, cimento CP V ARI-RS e areia média. O traço utilizado para a argamassa foi 1,00:3,00, com relação a/c 0,60. A pesquisa foi realizada em duas etapas: uma com substituição do agregado miúdo pelo resíduo nas proporções 5, 10, 15, 20 e 25% do peso da areia, e a segunda com substituição do cimento pelo resíduo, nas mesmas proporções. Os valores obtidos para a resistência à compressão para ambas as etapas do estudo estão apresentados na Tabela 13.

Tabela 13 Resultados de resistência média à compressão, aos 28 dias, das argamassas avaliadas

Teor de resíduo (%)	Argamassas com substituição da areia (MPa)	Argamassas com substituição do cimento (MPa)
0	17,2	19,9
5	16,5	13,6
10	14,2	13,5
15	14,2	15,4
20	13,5	14,5
25	15,7	10,8

Fonte: Silva (2008).

O autor concluiu que é viável o uso do rejeito como substituto parcial da areia em argamassas, pois a resistência à compressão se manteve acima de 14MPa. Em relação à substituição do cimento, o autor verificou que as resistências à compressão não atenderam ao valor mínimo especificado na norma brasileira, exceto para os teores de 15 e 20%.

Menezes *et al.* (2010) avaliaram a aplicabilidade do RSPC como matéria-prima para produção de blocos e telhas cerâmicas, substituindo a argila vermelha (constituída por caulinita, quartzo e mica) pelo RSPC. Os autores verificaram que a taxa absorção de água dos corpos de prova contendo RSPC aumentou e o módulo de elasticidade diminuiu com o aumento da quantidade de resíduo na mistura. E observaram também que é possível incorporar até 10% do RSPC na produção de telhas e blocos cerâmicos.

Guimarães (2014) avaliou o comportamento de blocos de argamassa produzidos com o RSPC. Foram produzidas cinco misturas: uma de referência (sem o resíduo), duas

misturas com substituição parcial do cimento Portland pelo RSPC, com teores de 10 e 15%, e duas misturas com substituição parcial do agregado miúdo pelo resíduo, em teores de 20 e 30%. Os blocos foram avaliados quanto às dimensões, à resistência mecânica, aos 7 e 28 dias, à absorção de água, aos 28 dias de idade. O autor concluiu que, dentre os teores estudados, os blocos com até 10% de RSPC como substituto parcial do cimento são tecnicamente viáveis. Em relação aos blocos com substituição parcial do agregado miúdo pelo RSPC, os melhores resultados foram observados para as misturas com teor de 30%.

Bastos (2014) avaliou a viabilidade do uso de RSPC, como substituto parcial do cimento na produção de concretos convencionais. Para a execução dos concretos foram utilizados teores de substituição do cimento pelo RSPC de 10 e 20%, em massa, e relações a/c de 0,45, 0,55 e 0,65. A incorporação do RSPC melhorou a coesão das misturas de concreto no estado fresco. Bastos (2014) atribuiu este fato ao efeito físico proporcionado pelo resíduo utilizado. Os resultados de resistência à compressão demonstraram que a substituição parcial do cimento pelo resíduo causou uma redução na resistência à compressão em relação ao concreto de referência (Figura 35 *a e b*). Para a resistência à tração por compressão diametral, aos 28 dias, não houve variações entre os concretos com substituição de cimento por RSPC e o concreto de referência para as relações a/c 0,55 e 0,65 (Figura 36 *a e b*) (BASTOS, 2014).

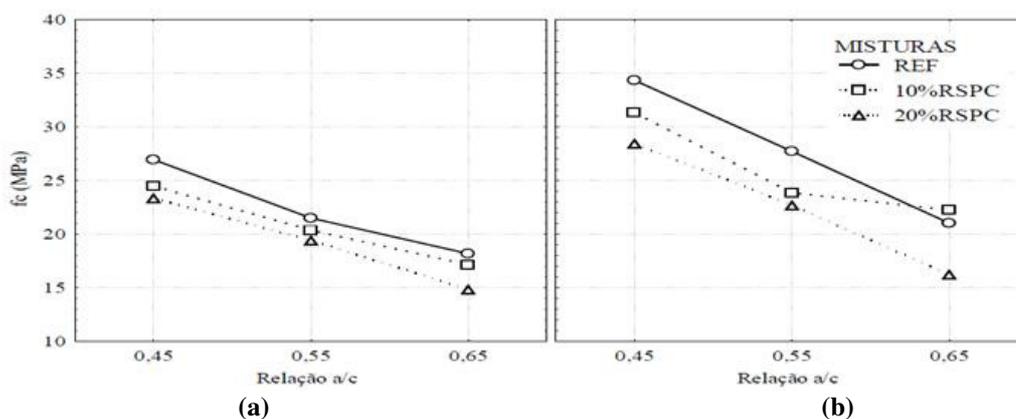


Figura 35 Resistência à compressão dos concretos produzidos com incorporação de RSPC: (a) 7 dias; (b) 28 dias (Fonte: BASTOS, 2014)

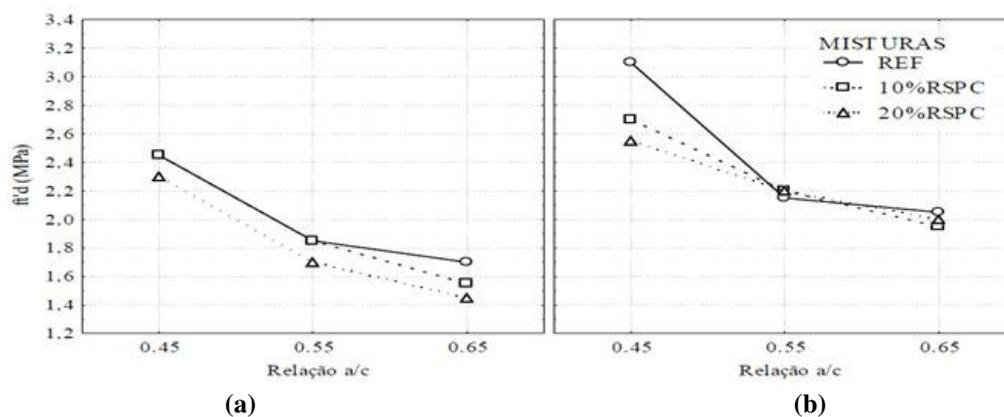


Figura 36 Resultados da resistência à tração por compressão diametral de concretos convencionais com incorporação de RSPC: (a) 7 dias; (b) 28 dias (Fonte: BASTOS, 2014)

Em relação à durabilidade, Bastos (2014) verificou através dos ensaios de absorção capilar e absorção por imersão, que os concretos com RSPC apresentaram desempenho compatível ao concreto de referência (Figura 37 a e b). Para Bastos (2014), sob o ponto de vista técnico, não é viável a utilização do RSPC como substituição parcial do cimento em concretos convencionais. Todavia, devem-se considerar as vantagens da reciclagem do resíduo, além das características de durabilidade alcançadas pelos concretos com RSPC. O autor sugere a avaliação do concreto com um teor de substituição de 5% do cimento pelo resíduo.

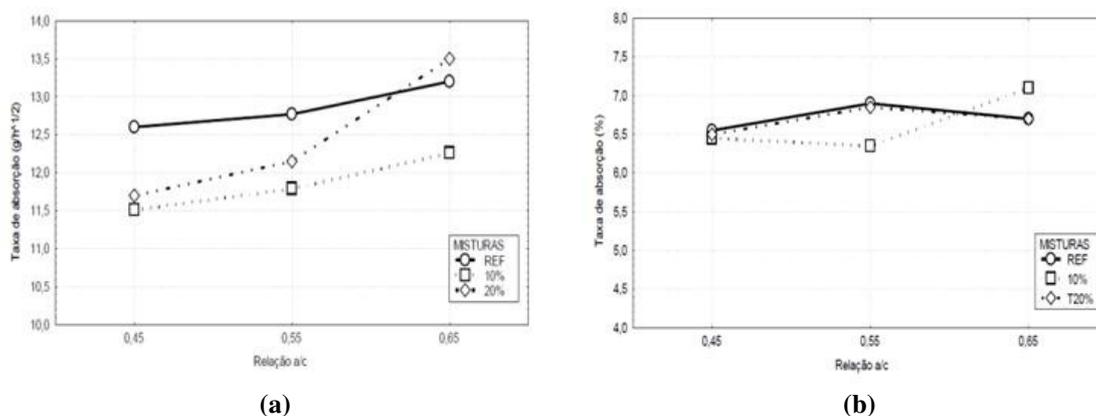


Figura 37 Resultados referentes aos ensaios de absorção: (a) taxa de absorção capilar; (b) absorção por imersão (Fonte: BASTOS, 2014)

Oliveira *et al.* (2016) investigaram a viabilidade técnica do uso de resíduo da pedra Cariri (RPC) em camadas granulares de pavimentos. Para isso, os autores confeccionaram quatro curvas granulométricas enquadradas nas faixas do DNIT. O RPC apresentou resultado satisfatório, mas se mostrou muito frágil no ensaio de abrasão Los Angeles, apresentando um valor de perda por abrasão de 75%, quando o recomendado é 40%. Assim, os autores concluíram que o RPC pode ser usado em

camada de base de baixo volume de tráfego e sub-base.

Galvão *et al.* (2016) avaliaram o uso do RSPC em argamassas autoadensáveis, substituindo parcialmente o agregado miúdo em teores de 15, 20, 25 e 30%, em massa. Produziram cinco misturas com traço 1,00:2,00, em massa. A relação a/c foi definida em função do ensaio do espalhamento modificado, dentro do limite da faixa estabelecida de 200 a 280mm. Além disso, também foram realizados os ensaios do funil V, resistência à compressão, resistência à tração na flexão e absorção de água, índice de vazios e massa específica. Os autores concluíram que é viável o uso de RSPC na produção de argamassas autoadensáveis, pois o resíduo melhorou a coesão e promoveu uma maior estabilidade nas misturas. Observaram, também, uma melhoria nas resistências e redução da porosidade nas argamassas autoadensáveis com substituição parcial do RSPC em relação à mistura de referência, sendo 15% o teor que apresentou melhor desempenho.

Mercês *et al.* (2016) verificaram o comportamento de argamassas com substituição parcial do cimento pelo RSPC. O traço utilizado foi 1,00:3,00, em massa, e a relação a/c 0,48. Os teores de substituição do cimento pelo RSPC foram de 5 e 10%, em massa. As argamassas foram avaliadas quanto à resistência à compressão e absorção de água, índice de vazios e massa específica. Foi realizado, ainda, o ensaio do índice de atividade pozolânica do resíduo com o cimento. O resultado do ensaio de determinação do índice de pozolanicidade com o cimento Portland está apresentado na Tabela 14.

Tabela 14 Resultado do índice de atividade pozolânica do RSPC

Mistura	Índice de consistência (mm)	Resistência média (MPa)	I _{cimento} (%)
REF	178	31,3	-
ARSPC	176	27,1	86

REF: argamassa de referência sem resíduo; ARSPC: argamassa com RSPC (Fonte: MERCÊS *et al.*, 2016).

Com base nos resultados, apresentados na Tabela 14, os autores verificaram que o RSPC não possui atividade pozolânica, pois apresentou um índice de atividade pozolânica de 86%, valor inferior ao limite estabelecido pela NBR 12653 (ABNT, 2014), que determina um valor mínimo de 90%. A amostra de RSPC analisada por Moura *et al.* (2013) apresentou um índice de 56%, não sendo, também, considerada como material pozolânico.

Mercês *et al.* (2016) observaram ainda, uma melhoria na resistência à compressão de

diferentes argamassas com RSPC em relação à argamassa de referência (sem resíduo). A utilização de 10% de RSPC em substituição parcial ao cimento, proporcionou um aumento em torno de 7% na resistência à compressão axial, em relação à argamassa de referência. Em relação ao ensaio de absorção, as argamassas com RSPC apresentaram valores semelhantes à argamassa de referência.

De acordo com os estudos realizados com o RSPC em argamassas e concretos convencionais, este resíduo possui potencial de uso como adição mineral tipo fíler. A dimensão média da partícula do RSPC é da ordem de 5 μ m (BASTOS, 2014), o que pode contribuir para o aumento da viscosidade da mistura em função do preenchimento dos vazios pelas partículas da adição mineral (MENEZES *et al.*, 2010). Os estudos indicaram, ainda, que o uso de RSPC como adição mineral aumentou a coesão da mistura de concreto convencional (BASTOS, 2014). Como para a produção de CAA é necessária uma grande quantidade de finos para promover a viscosidade adequada e aumentar a resistência à segregação (EFNARC, 2005), o RSPC mostra-se com um potencial para a produção deste tipo de concreto.

4 PROGRAMA EXPERIMENTAL

Para alcançar os objetivos propostos neste trabalho, foi realizado um programa experimental visando a otimização da dosagem do CAA com a incorporação de resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC), em substituição de parte do agregado miúdo natural. Além do RSPC, foram utilizados cimento Portland composto (CP-II Z-32) e agregados miúdo e graúdo naturais, comumente comercializados na cidade de Feira de Santana.

É importante ressaltar que este trabalho faz parte do projeto de pesquisa intitulado “Estudo do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri para a produção de Concreto Autoadensável”, financiado pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), Processo N.º 457738/2014-6.

4.1 SELEÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Cimento Portland

O cimento utilizado para a produção do CAA foi o Cimento Portland Composto com Pozolana (CP II Z-32), da marca NASSAU. Este tipo de cimento foi escolhido devido à facilidade de comercialização na região do estudo. A caracterização do cimento foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Feira de Santana (UEFS), de acordo com as especificações das normas brasileiras vigentes. Os resultados obtidos são apresentados na Tabela 15, e foram avaliados com base na norma de especificação, NBR 11578 (ABNT, 1997).

Tabela 15 Caracterização física e mecânica do cimento CP II Z-32

Propriedade avaliada	Resultados	Limites da NBR 11578 (ABNT, 1997)
Massa específica - NBR NM 23 (ABNT, 2001)	2,93g/cm ³	-
Índice de finura - NBR 11579 (ABNT, 2013)	2,7%	≤12,0%
Tempo de pega - NBR NM 65 (ABNT, 2003)	Início	≥1h
	Fim	≤10h
Resistência à compressão - NBR 7215 (ABNT, 1997)	3 dias	≥10MPa
	7 dias	≥20MPa
	28 dias	≥32MPa
Granulometria a laser	D ₁₀	-
	D ₅₀	-
	D ₉₀	-

Na Figura 38 é mostrada a curva granulométrica do cimento Portland utilizado nesse estudo. Este ensaio foi realizado no laboratório da COPPE-UFRJ, utilizando um granulômetro a laser da marca Malvern Mastersizer 2000, com tempo de dispersão de 15min, usando o etanol como dispersante.

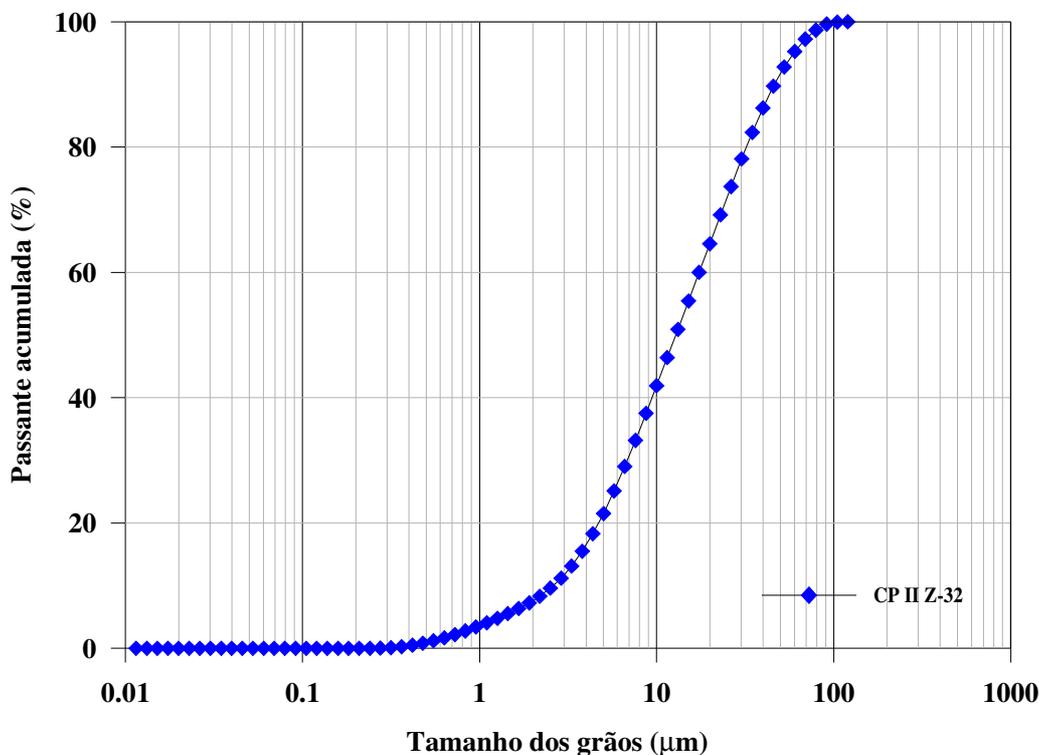


Figura 38 Curva granulométrica do cimento Portland

De acordo com a curva granulométrica obtida para o cimento Portland, o diâmetro médio do grão foi de $12,8\mu\text{m}$.

Na Tabela 16 é apresentada a composição química do cimento CP-II-Z-32. O ensaio foi realizado em um equipamento Shimadzu EDX-600, no laboratório da UENF. O ensaio de perda ao fogo foi realizado no forno Mufla (950°C).

Tabela 16 Composição química do cimento Portland CII-Z-32

Composto	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	ZnO	PF
Teor (%)	62,1	17,2	5,8	4,3	2,2	2,2	0,3	0,0	0,0	5,7

Nota: PF- Perda ao fogo.

4.1.2 Agregado miúdo

Para a produção do CAA foram utilizados dois tipos de agregados miúdos naturais: uma areia fina quartzosa, de deposição eólica, oriunda da cidade de Alagoinhas-Ba, e uma areia média quartzosa de rio, oriunda do Rio Paraguaçu (Santo Estevão-Ba). A

caracterização dos agregados miúdos foi realizada no Laboratório de Materiais de Construção da UEFS, de acordo com os métodos normatizados e avaliados conforme os requisitos da norma de especificação, NBR 7211 (ABNT, 2009).

Os resultados obtidos na caracterização estão apresentados na Tabela 17, os quais atenderam os limites da norma de especificação NBR 7211 (ABNT, 2009). As curvas de distribuição granulométrica das areias utilizadas são apresentadas na Figura 39.

Tabela 17 Resultados da caracterização dos agregados miúdos naturais

Propriedades avaliadas	Resultados encontrados		Limites da NBR 7211 (ABNT, 2009)	
	AF	AM		
Dimensão máxima característica - NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,2 mm	2,4 mm		
Módulo de finura - NBR NM 248 (ABNT, 2003)	1,77	2,86		
Absorção de água - NBR NM 30 (ABNT, 2001)	0,1 %	0,8 %		
Massa Específica - NBR NM 52 (ABNT, 2009)	Aparente	2,61 kg/dm ³	2,54 kg/dm ³	-
	S.S.S.	2,62 kg/dm ³	2,57 kg/dm ³	-
	Agregado Seco	2,62 kg/dm ³	2,61 kg/dm ³	-
Massa Unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,60 kg/dm ³	1,42 kg/dm ³		
Material Pulverulento - NBR NM 46 (ABNT, 2003)	2,1 %	0,6 %		
Impurezas Orgânicas - NBR NM 49 (ABNT, 2001)	Mais clara	Mais clara	Mais clara	
Torrões de argila - NBR 7218 (ABNT, 1987a)	0,00%			
Inchamento - NBR 6467 (ABNT, 2003)	Coeficiente de inchamento médio			
	1,30	1,24		
	Umidade crítica			
	1,50 %	2,5 %		

Nota: AF -Areia fina e AM- Areia média.

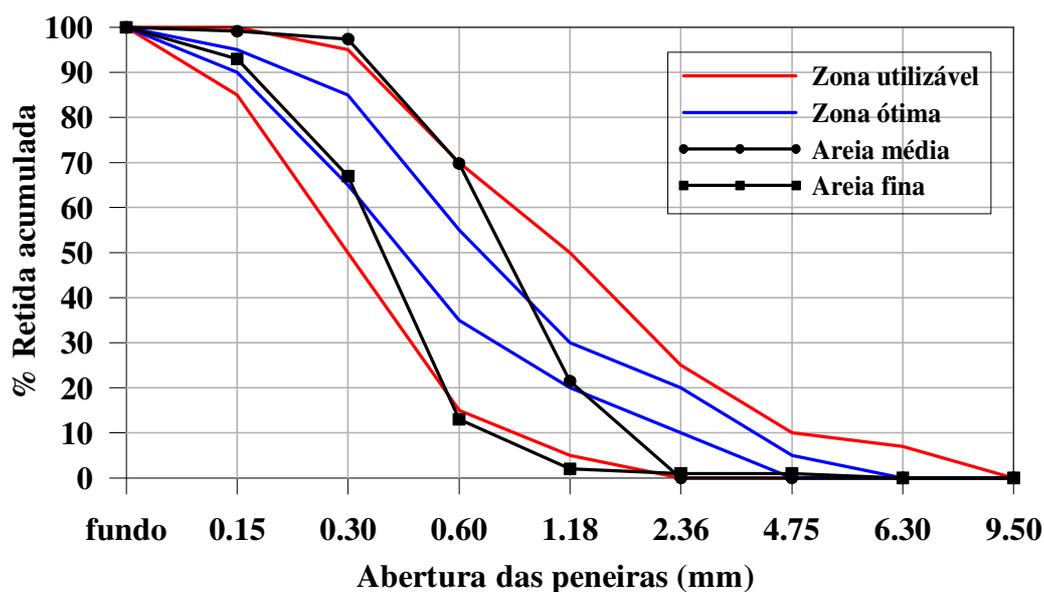


Figura 39 Perfil granulométrico dos agregados miúdos naturais

4.1.3 Agregado graúdo

O agregado graúdo utilizado foi uma brita de origem granítica, com dimensão máxima característica de 9,5mm. Os ensaios de caracterização foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UEFS e são apresentados na Tabela 18, assim como as metodologias utilizadas. A Figura 40 mostra a curva de composição granulométrica deste material.

Tabela 18 Resultados da caracterização do agregado graúdo

Propriedades avaliadas	Resultados encontrados	Limites da NBR 7211 (ABNT, 2009)
Dimensão máxima característica - NBR NM 248 (ABNT, 2003)	9,5mm	-
Módulo de finura - NBR NM 248 (ABNT, 2003)	5,35	-
Massa Específica - NBR NM 53 (ABNT, 2003e)	Aparente	2,73kg/dm ³
	S.S.S.	2,70kg/dm ³
	Agregado Seco	2,69kg/dm ³
Massa Unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006)	1,38kg/dm ³	-
Material Pulverulento - NBR NM 46 (ABNT, 2003)	1,26%	< 1%
Índice de forma - NBR NM 7809 (ABNT, 2006)	2,74	≤ 3
Abrasão Los Angeles - NBR NM 51 (ABNT, 2001)	19,7%	< 50%
Absorção de água - NBR NM 53 (ABNT, 2003)	0,5%	-

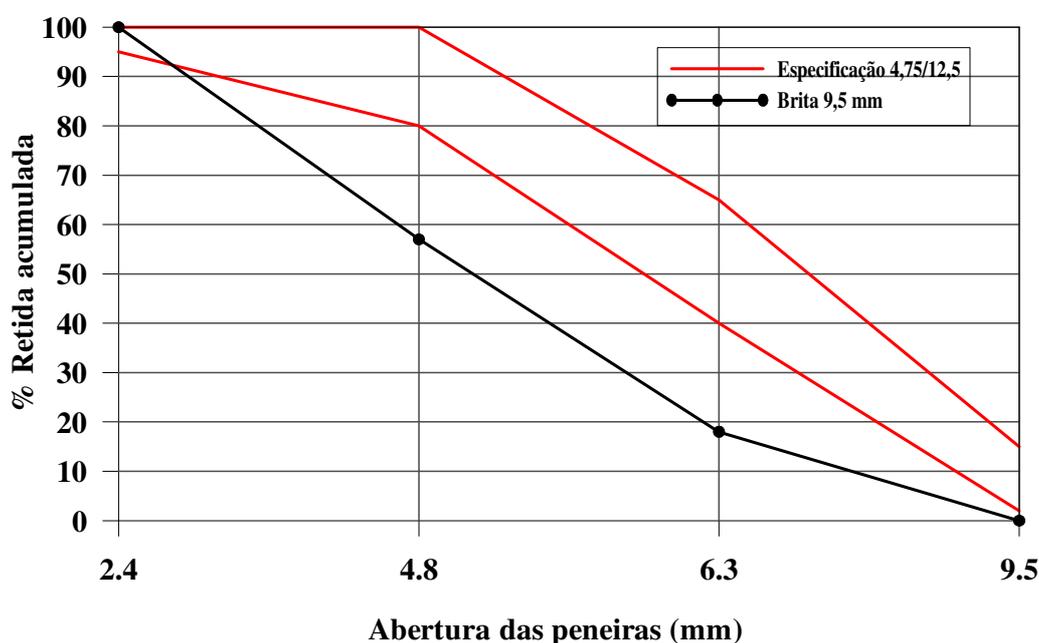


Figura 40 Perfil granulométrico da brita 9,5mm

4.1.4 RSPC

4.1.4.1 Coleta, obtenção e beneficiamento do RSPC

O RSPC utilizado neste trabalho corresponde ao material que faz parte da amostra coletada por Bastos (2014). Segundo o autor, a coleta do resíduo foi realizada de acordo com as prescrições da norma NBR 10007 (ABNT, 2004). O material foi coletado na região de Nova Olinda, estado do Ceará, e transportado para o Laboratório de Materiais de Construção da UEFS. O volume do resíduo transportado, em sacos de rafia, foi de cerca de 1m^3 . A Figura 41 mostra a coleta do RSPC realizada por Bastos (2014).



Figura 41 Coleta do RSPC (BASTOS, 2014)

No laboratório, o RSPC passou por um processo de beneficiamento que foi dividido em duas etapas: secagem e destorroamento. No processo de secagem, inicialmente, o RSPC foi exposto ao ar durante 48 horas (Figura 42a) e, posteriormente levado à estufa com temperatura de 110°C por mais 24 horas. Após a secagem, o RSPC passou por um britador de mandíbulas (Figura 42b), com o objetivo de diminuir o tamanho dos torrões (Figura 42c). Em seguida, o RSPC foi peneirado na malha # 4,8mm. A Figura 42d mostra o aspecto do resíduo após o peneiramento. O RSPC passante foi novamente destorroado agora utilizando um moinho de bolas de eixo vertical excêntrico, modelo CT 242 Servitech (Figura 42e), o que conferiu ao resíduo o aspecto desejável para a utilização como agregado miúdo em argamassas e concretos (Figura 42f). O tempo de destorroamento no moinho foi de 2 minutos, o mesmo adotado por Bastos (2014), e utilizou-se 700g de corpos moedores de alumina e a mesma quantidade de resíduo, para obter uma melhor homogeneização do material.



Figura 42 Processo de beneficiamento do RSPC: (a) Aspecto do resíduo coletado retirado da baía do laboratório durante a secagem; (b) Britador de mandíbulas utilizado no primeiro destorroamento; (c) Aparência do resíduo após o destorroamento; (d) Aparência do resíduo após o peneiramento em malha de 4,8mm; (e) Moinho de bolas de eixo vertical excêntrico utilizado no segundo destorroamento; (f) Aspecto do RSPC após o beneficiamento

Após o processo de beneficiamento, o RSPC foi enviado para caracterização nos laboratórios especializados da COPPE-UFRJ e da UENF, para determinação da composição química e das características físicas.

4.1.4.2 Características químicas

Na Tabela 19 é apresentada a composição química do RSPC. O ensaio foi realizado no laboratório da UENF, usando um equipamento Shimadzu EDX-600, o ensaio de perda ao fogo foi realizado no forno Mufla (950°C).

Tabela 19 Composição química do RSPC

Composto	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MnO	ZnO	PF
Teor (%)	54,7	0,7	0,0	0,5	0,4	0,8	0,0	0,2	0,0	42,7

Nota: PF-Perda ao fogo.

A partir dos resultados obtidos na determinação da composição química, observa-se que o RSPC é constituído basicamente de óxido de cálcio (55%). A fim de conhecer a estrutura dos compostos encontrados no RSPC, foi realizada a análise química por meio da difração de raios-X (Figura 43), utilizando o Rigaku Miniflex 600, com intervalo angular de 8-70 graus, velocidade angular de 10 graus/s, voltagem de 40kV e corrente 15mA. A análise dos picos foi realizada no programa PDXL (Rigaku).

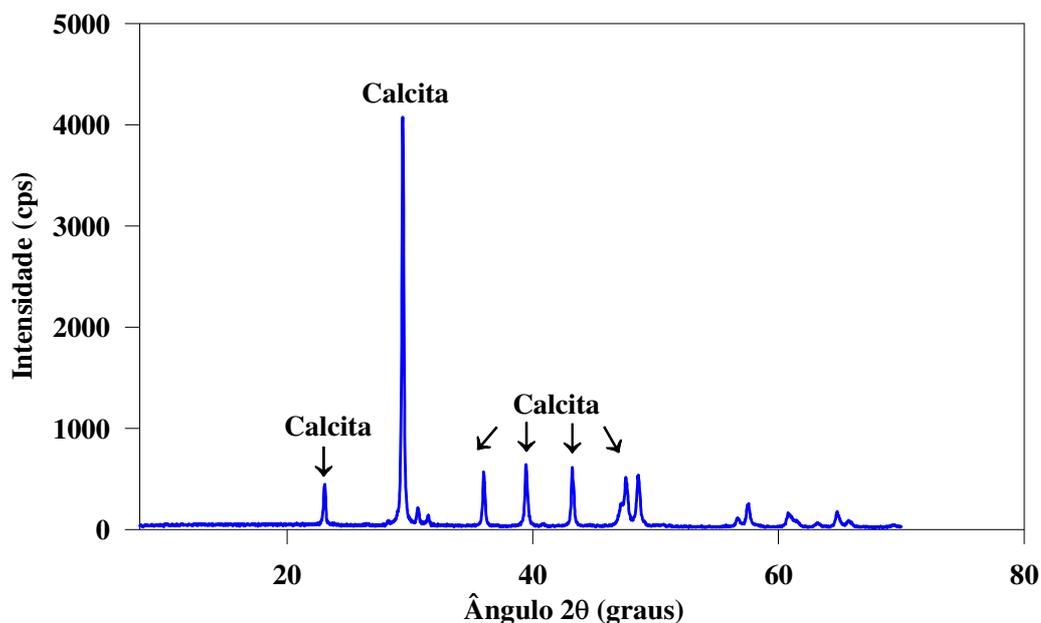


Figura 43 Difratograma da amostra de RSPC

Com base no difratograma obtido com a amostra de RSPC, verificou-se que o resíduo estudado possui uma estrutura tipicamente cristalina correspondente à

calcita. Logo o RSPC é um material inerte e não reage quimicamente, característica das adições tipo fíler.

4.1.4.3 Características físicas

Os ensaios de granulometria, massa específica, finura e índice de finura foram realizados para caracterizar fisicamente o RSPC. Na Figura 44 é mostrada a curva granulométrica do resíduo e do cimento utilizados nesse estudo. A granulometria do RSPC foi realizada no laboratório da COPPE-UFRJ, e foi utilizado um granulômetro a laser da marca Malvern Mastersizer 2000, com tempo de dispersão de 15min, usando a água deionizada como dispersante.

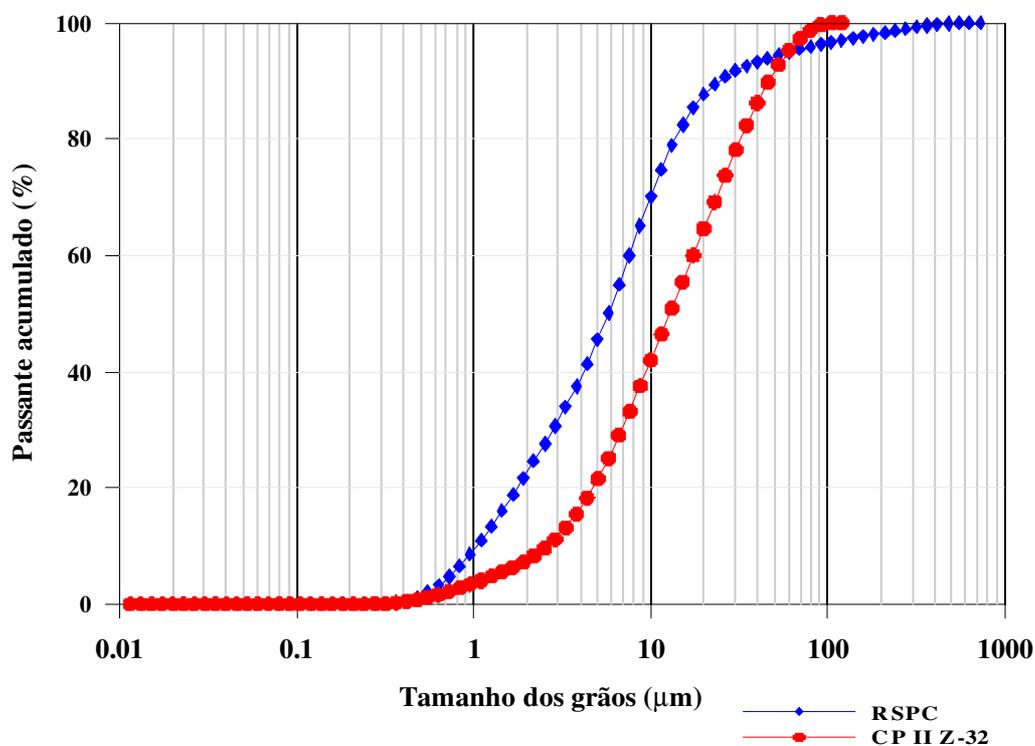


Figura 44 Curva granulométrica da amostra do RSPC e do cimento CII Z-32

O RSPC apresentou uma dimensão média de $5,74\mu\text{m}$, muito menor que o diâmetro do cimento Portland utilizado ($12,8\mu\text{m}$), o que pode contribuir para uma maior densificação da estrutura de grãos das misturas produzidas.

Os ensaios de massa específica, finura e índice de finura foram realizados no Laboratório de Materiais de Construção da UEFS (Tabela 20). A massa específica do RSPC, determinada conforme a NBR NM 23 (ABNT, 2001) foi de $2,69\text{kg}/\text{dm}^3$.

O RSPC apresentou um índice de finura de 33,54%.

Tabela 20 Resultados da caracterização do RSPC

Propriedades avaliadas		Valores encontrados
Massa específica - NBR NM 23 (ABNT, 2001)		2,69kg/dm ³
Massa unitária - NBR NM 45 (ABNT, 2006)		0,94 kg/dm ³
Índice de finura - NBR 11579 (ABNT, 2013)		33,54%
Granulometria a laser	D ₁₀	1,0µm
	D ₅₀	5,7µm
	D ₉₀	24,2µm

4.1.5 Água

A água utilizada na produção do CAA foi proveniente da rede de abastecimento de água da UEFS.

4.1.6 Aditivo superplastificante

Na produção do CAA foi utilizado um aditivo superplastificante à base de policarboxilatos, o ADVA CAST 525, da Grace Brasil Ltda, indicado pelo fabricante para a produção deste tipo de concreto devido ao seu efeito altamente dispersante. O ADVA atende às especificações da NBR 11768 (ABNT, 2011) como aditivo tipo SP II. Esse aditivo possui massa específica de 1,06g/cm³ e teor de sólidos entre 29,5 a 31,5%, conforme dados do fabricante. A dosagem do aditivo superplastificante (SP) recomendada pelo fabricante é de 0,4 a 1,2% do material cimentício, podendo variar de acordo com o tipo de aplicação, do modo de mistura, das características dos agregados, além do tipo e consumo do cimento empregado.

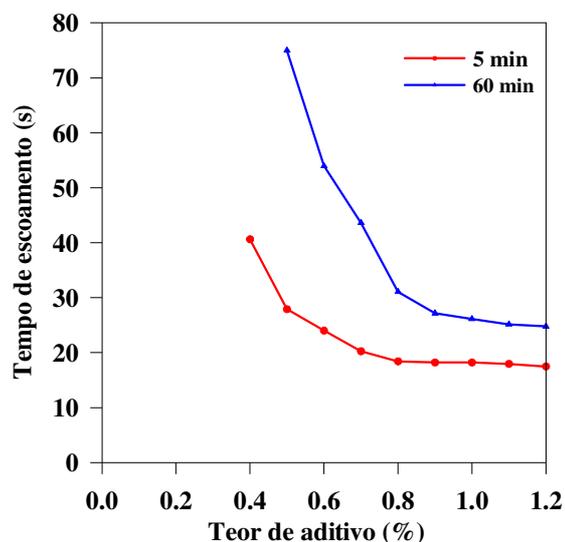
Para o ensaio de compatibilidade cimento/aditivo foi utilizado o método do Cone de Marsh (Figura 45a), conforme metodologia descrita por Aitcin (2000). Este ensaio mediu o tempo de escoamento de 1,0 litro de pasta em um funil com diâmetro de 10mm, sendo utilizada uma relação a/c 0,40. Este estudo é importante, pois podem ocorrer reações químicas indesejáveis, entre o aditivo SP e o cimento a ser utilizado, que diminuem ou eliminam a eficiência do aditivo, como: retardo do tempo de pega,

incorporação excessiva de ar, segregação, exsudação, perda de trabalhabilidade e aumento excessivo da viscosidade plástica (MENEZES, 2006).

A Figura 45b mostra as curvas obtidas com diferentes dosagens do aditivo SP, expressas em porcentual da massa de cimento, versus o tempo de escoamento da mistura após 5 e 60 minutos (tempo contado a partir da colocação do cimento na água).



(a)



(b)

Figura 45 Ensaio de compatibilidade cimento/aditivo: (a) Cone de Marsh; (b) Resultados obtidos

Avaliando as curvas obtidas, pode-se concluir que o ponto de saturação do cimento Portland CP II Z-32 com o aditivo SP foi 0,9%. Ponto a partir do qual qualquer quantidade a mais de SP não influencia na reologia da pasta (AITCIN, 2000). A dosagem do aditivo SP sugerida pelo fabricante varia de 0,4 a 1,2%.

4.2 DOSAGEM EXPERIMENTAL

O método de dosagem utilizado para a produção do CAA foi baseado na metodologia Repette-Melo (MELO, 2005). A determinação da relação a/c é o ponto de partida, sendo relacionado à resistência à compressão, aos 28 dias, de um concreto convencional.

4.2.1 Determinação da composição das misturas

Para a produção do CAA é muito importante a definição das faixas granulométricas ideais, com o objetivo de promover um preenchimento maior dos vazios e um distanciamento adequado entre as partículas (MELO, 2005).

Para a determinação da composição dos agregados miúdos (areia fina e areia média), foram traçadas as curvas granulométricas (Figura 46) dentro da faixa ideal estabelecida pelo método adotado para o CAA, citada no item 2.4.2. Além disso, foram confeccionadas argamassas para realização dos ensaios de espalhamento para verificar a fluidez e coesão das misturas. Assim, verificou-se que o proporcionamento dos agregados miúdos mais adequados foi de 70% da areia fina e 30% da areia média (Figura 47).

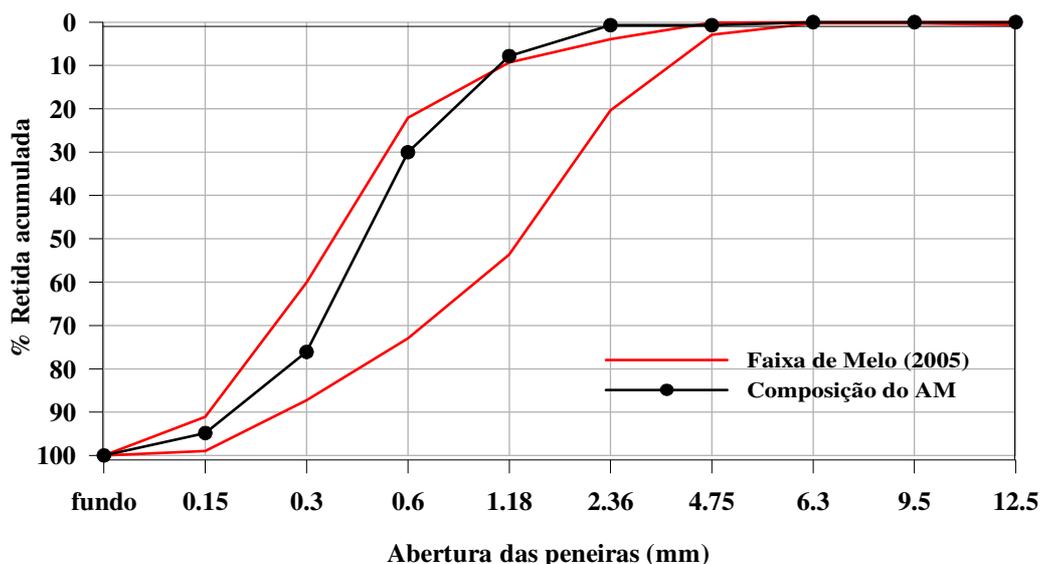


Figura 46 Curvas granulométricas do agregado miúdo e faixa ideal proposta por Melo (2005)

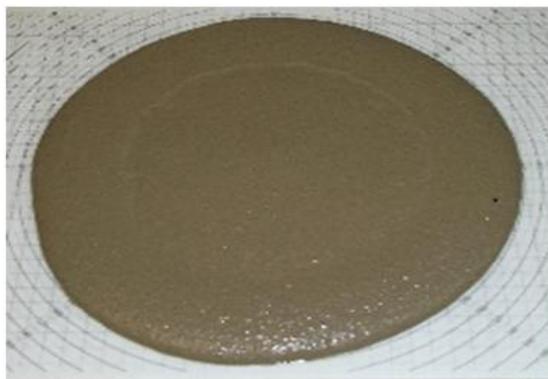


Figura 47 Aspecto da argamassa com 70% de areia fina e 30% de areia média

Inicialmente, tentou-se utilizar como agregado graúdo uma brita de 19mm, mas durante a produção do CAA, ao longo do desenvolvimento do projeto de pesquisa se verificou a necessidade da mudança para um agregado graúdo com menor granulometria devido à segregação do CAA. Assim, adotou-se uma brita com dimensão máxima característica de 9,5mm. A Figura 48 mostra a curva de composição granulométrica do agregado

gráudo adotado para a produção do CAA e a faixa ideal para este tipo de agregado proposta por Melo (2005).

Observa-se que o agregado gráudo adotado não está dentro da faixa ideal proposta por Melo (2005), mas a mistura do CAA com este material não apresentou segregação, mostrando-se coesa, com boa fluidez e estabilidade.

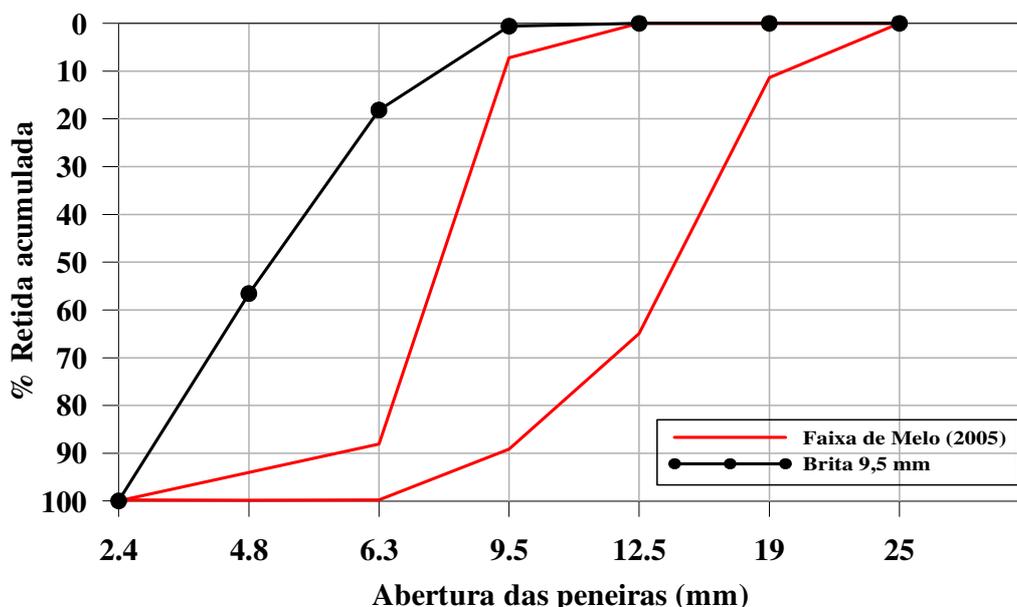


Figura 48 Curva granulométrica do agregado gráudo e faixa ideal proposta por Melo (2005)

4.2.2 Determinação da relação água/cimento

A próxima etapa do estudo consistiu na produção do concreto convencional, que foi dosado pelo método do IPT/EPUSP (HELENE; TERZIAN, 1992). Os concretos foram dosados com os materiais descritos anteriormente. Nesta etapa, o RSPC não foi incorporado na produção dos concretos.

Foram estabelecidos como parâmetros de dosagem para o concreto convencional, de acordo com dados da literatura:

- abatimento de 100 ± 20 mm;
- 0,3% de aditivo SP em relação ao volume de cimento.

Após a obtenção dos resultados da resistência à compressão aos 28 dias do concreto convencional, foi traçado o diagrama de dosagem e obtida a relação água/cimento

através da Lei de Abrams (Equação 7) considerando três faixas de resistências à compressão de 25, 30 e 35MPa.

$$a/c = \frac{\log \frac{70,08}{f_{c28}}}{0,5211} \quad (7)$$

Onde:

a/c = relação água / cimento a ser determinada

f_{c28} = resistência à compressão aos 28 dias (MPa)

As relações água/cimento utilizadas para a produção do CAA foram de 0,57 para a resistência à compressão de 35MPa, de 0,70 para 30MPa e de 0,47 para 40MPa, aos 28 dias.

De acordo com a metodologia adotada, a etapa seguinte seria a fase de estudo da pasta de cimento para ajustar o teor de adição mineral (RSPC). Mas, esta etapa não foi realizada neste trabalho, pois o RSPC foi utilizado em substituição parcial do agregado miúdo natural.

4.2.3 Estudo da fase argamassa

A etapa seguinte do estudo experimental foi a produção de argamassas autoadensáveis (AA) para cada relação a/c adotada, com o objetivo de definir os teores adequados da composição do agregado miúdo, do aditivo SP e da adição mineral (RSPC).

O traço da argamassa foi calculado através da Equação 8:

$$V_{arg} = V_{cim} + V_{areia} + V_{água} \quad (8)$$

Onde:

V_{arg} = volume de argamassa (dm^3);

V_{cim} = volume de cimento (dm^3);

V_{areia} = volume de agregado miúdo (dm^3);

V_{água} = volume de água (dm³).

Assim, obteve-se a Equação 9:

$$M_c = \frac{(1000 - V_{\text{vareia}})}{\left(\frac{1}{\gamma_c}\right) + a/c} \quad (9)$$

Onde,

M_c = consumo de cimento (kg) para 1000dm³;

V_{vareia} = volume de agregado miúdo (sendo 70% areia fina+30% areia média) (kg);

γ_c = massa específica do cimento (kg/dm³);

a/c = relação água/cimento.

Esta etapa da argamassa foi dividida em duas fases:

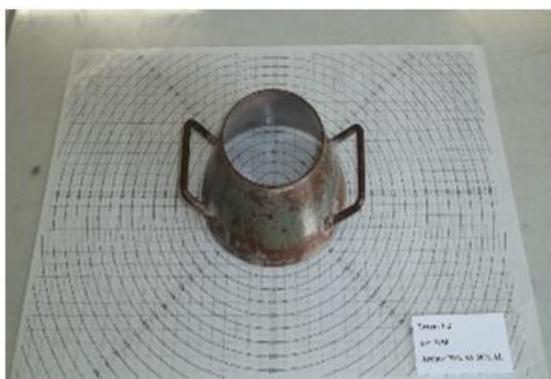
a. Ajuste do teor de agregado miúdo

Nessa fase foi definido o teor de agregado miúdo em relação ao volume total de argamassa e o teor de aditivo superplastificante. Para o CAA, o volume de agregado miúdo deve estar compreendido no intervalo de 35-55% em relação ao volume total da argamassa (MELO, 2005).

Para a definição do teor ideal de agregado miúdo foram produzidas AA com diversos teores. Iniciou-se com 40% de agregado miúdo, valor este mais provável de produzir uma argamassa autoadensável de acordo com as observações de Melo (2005), e aplicaram-se incrementos de 5% até obter o teor adequado.

As AA foram avaliadas através dos ensaios de espalhamento (Figura 49a) e do funil V modificado (Figura 49b), incorporando-se aditivo SP com teor inicial de 0,1%. O teor de aditivo considerado ideal foi aquele para o qual a argamassa apresentou um diâmetro de espalhamento entre 200 a 280mm e tempo de escoamento entre 3,5 a 10 segundos (GOMES, 2002).

As AA foram preparadas na argamassadeira mecânica de eixo planetário, com capacidade para 5 litros (Figura 49c) para o ensaio de espalhamento, e, para o ensaio do funil V foi utilizada uma argamassadeira de eixo planetário com capacidade para 20 litros (Figura 49d).



(a)



(b)



(c)



(d)

Figura 49 Equipamentos utilizados para a produção e ensaios da AA: (a) Mini cone; (b); Funil V para argamassas; (c) Argamassadeira com capacidade para 5 litros; (d) Argamassadeira com capacidade para 20 litros

As misturas foram realizadas conforme o procedimento da metodologia adotada, alterando apenas o tempo da mistura final de 1 para 4 minutos, a fim de garantir a homogeneização dos materiais e a perfeita ação do aditivo químico. O tempo total de mistura foi de 9 minutos, com a seguinte ordem:

- cimento e 80% da água misturados em velocidade lenta durante 30 segundos;
- adição da composição dos agregados miúdos previamente misturados, em velocidade lenta durante 30 segundos;
- mistura em velocidade rápida por 1 minuto;

- limpeza da pá e paredes da cuba, e descanso da mistura por 3 minutos;
- incorporação do aditivo e do restante da água, após 5 minutos do início da mistura;
- mistura final por 4 minutos, em velocidade rápida.

O volume de agregado miúdo adotado foi o maior teor possível deste material, escolhido dentre as misturas estudadas que atenderam aos requisitos de autoadensabilidade propostos por Gomes (2002). Este teor ideal permaneceu fixo para a produção do CAA. No Quadro 5 é mostrado um exemplo da escolha do teor do agregado miúdo e o teor ideal de aditivo. O teor ideal do agregado miúdo adotado no exemplo foi de 45% em relação ao volume total da argamassa e o teor do aditivo foi 0,20%.

Quadro 5 Critérios para escolha do teor de agregado miúdo com base nos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento

Teor de aditivo (%)	Teor de agregado miúdo (%)		
	40	45	50
0,10	Espalhamento: não Funil V: não	Espalhamento: não Funil V: não	Espalhamento: não Funil V: não
0,15	Espalhamento: ok Funil V: ok	Espalhamento: ok Funil V: não	Espalhamento: ok Funil V: não
0,20	-	Espalhamento: ok Funil V: ok	Espalhamento: ok Funil V: não
0,25	-	-	Espalhamento: não Funil V: ok

Fonte: Melo (2005)

b. Ajuste do teor de RSPC na argamassa

Nessa fase, foi realizado o ajuste do teor de RSPC na AA para as três relações a/c adotadas inicialmente. Foram utilizados os teores de 5, 10, 15 e 20%, em massa, de RSPC em substituição parcial do agregado miúdo. Este ajuste foi feito a partir da incorporação do aditivo SP, partindo-se do teor definido na alínea a, que variou com incrementos de 0,05%, ou menores, de acordo com o maior refinamento dos resultados.

As AA foram avaliadas pelos ensaios de espalhamento e funil V modificado, com as mesmas faixas de aceitação da fase anterior [diâmetro de espalhamento entre 200 a 280mm e tempo de escoamento entre 3,5 a 10 segundos, segundo GOMES (2002)]. Foram utilizados os mesmos equipamentos, e a sequência da mistura foi a seguinte:

- colocação do cimento e 80% da água, mistura em velocidade lenta durante 30 segundos;
- adição da composição dos agregados miúdos e o RSPC previamente misturados, mistura em velocidade lenta durante 30 segundos;
- mistura em velocidade rápida por 1 minuto;
- limpeza da pá e paredes da cuba, e descanso por 3 minutos;
- incorporação do aditivo e do restante da água, após 5 minutos do início da mistura;
- mistura final por 4 minutos, em velocidade rápida.

As AA que apresentaram as propriedades requeridas e os resultados dentro da faixa estabelecida foram moldadas e ensaiadas para avaliar a resistência à compressão (NBR 7215, ABNT, 1997), a absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica (NBR 9778, ABNT, 2009) e a absorção de água por capilaridade (NBR 15259, ABNT, 2005). Foram moldados quinze corpos de prova (CP) cilíndricos (50x100mm) (Figura 50a), sendo seis cps para o ensaio de resistência à compressão aos 7 dias de idade, seis CP para este ensaio aos 28 dias de idade, e três CP para o ensaio de absorção de água por imersão aos 28 dias (Figura 50b). Além disso, foram moldados três corpos de prova prismáticos (40x40x160mm) para o ensaio de capilaridade, aos 28 dias.

Os corpos de prova de argamassa não foram adensados, uma vez que se trata de misturas autoadensáveis, sendo desmoldados após 24 horas da sua moldagem, e foram submetidos à cura por imersão em solução saturada de hidróxido de cálcio até a idade do ensaio. O ensaio de resistência à compressão das AA foi realizado na prensa hidráulica da marca Shimadzu (Figura 50c e d).

A verificação da resistência à compressão aos 28 dias permitiu escolher o teor de RSPC mais adequado para a produção do CAA, ou seja, o que apresentou a maior resistência na AA. Além disso, para escolha do teor de RSPC foram considerados os parâmetros reológicos observados nas argamassas.

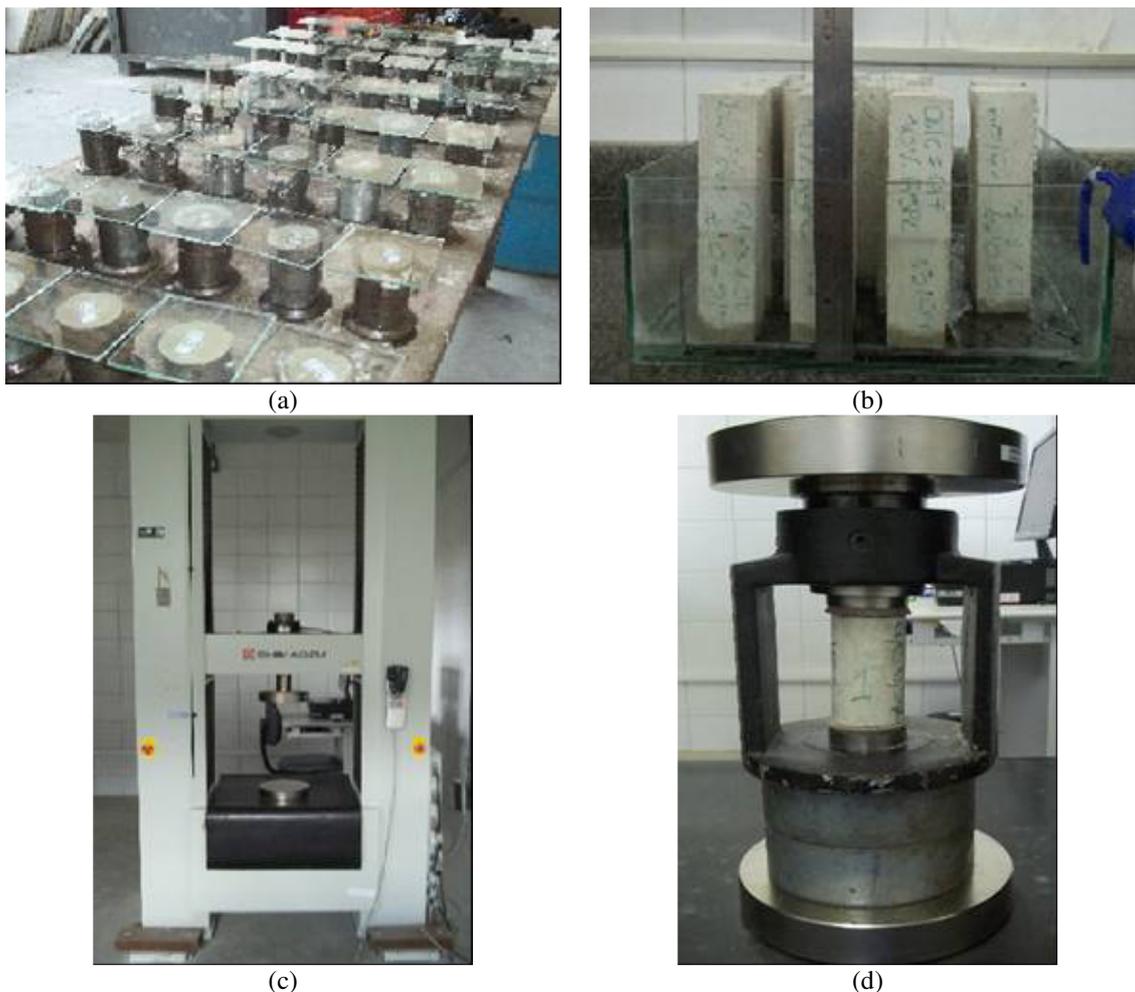


Figura 50 Ensaios nas AAs: (a) Moldagem; (b) Ensaio de capilaridade; (c) Prensa hidráulica; (d) Ensaio de resistência à compressão

4.2.1 Produção do CAA

Após os ajustes da fase argamassa, a etapa seguinte foi a produção do CAA. Foram produzidos dois CAA para cada relação a/c estudada: um CAA de referência (sem a substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC) e outro CAA com 10% de RSPC. Optou-se por produzir o CAA de referência (C-R) para avaliar melhor o comportamento do resíduo utilizado.

Nessa etapa, definiu-se o teor de agregado graúdo, o ajuste final do aditivo SP e a verificação das propriedades do CAA, no estado fresco e endurecido. Estes ajustes foram realizados apenas para os CAA com a incorporação do RSPC. Posteriormente, os mesmos traços foram utilizados na produção dos concretos de referência, sem resíduo. O proporcionamento final dos componentes aconteceu em duas fases:

a. Ajuste do teor de agregado graúdo

Nesta fase, foram produzidos CAA com diferentes teores de agregado graúdo para cada relação a/c adotada. O volume do agregado graúdo variou de 27 a 31,5%, com incrementos de 1,5% de acordo com a metodologia de Melo (2005). O volume do agregado graúdo foi determinado em relação ao volume total de concreto, de forma a se obter misturas autoadensáveis em função dos ensaios de espalhamento - NBR 15823-2 (ABNT, 2010) e do funil V - NBR 15823-5 (ABNT, 2010). O intervalo adotado para estes ensaios foi de 550-750mm para o espalhamento, e o tempo < 9s para o ensaio do funil V.

b. Ajuste final do aditivo

O teor inicial de aditivo SP para o ajuste do concreto foi aquele obtido na fase argamassa acrescido de 0,05%, com incrementos de 0,05%. O aditivo foi ajustado para cada teor de brita, ou sempre que houve perda das propriedades de autoadensabilidade.

Os CAA foram produzidos em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 320 litros. O procedimento de mistura do CAA foi realizado em 8,5 minutos, utilizando-se a seguinte sequência:

- colocação do agregado graúdo + 80% da água e mistura por 30 segundos;
- adição do cimento + 15% da água e mistura por 30 segundos;
- adição do aditivo e mistura por 2 minutos;
- adição do agregado miúdo + RSPC + 5% da água e mistura por 1,5 minutos;
- limpeza da betoneira por 2 minutos;
- mistura final por 2 minutos.

Após os ajustes, o CAA para cada relação a/c adotada, foi produzido e avaliado, no estado fresco, quanto aos requisitos de fluidez, viscosidade plástica, habilidade passante e resistência à segregação, de acordo com as determinações da norma de especificação NBR 15823-1 (ABNT, 2010). A Tabela 21 mostra os ensaios realizados e os respectivos

limites adotados para o CAA no estado fresco. As misturas de referência, para as duas relações a/c estudadas, não tiveram os ensaios de tempo de escoamento no Funil V e habilidade passante na caixa L realizados. A norma brasileira de especificação do CAA (NBR 15823-1, ABNT, 2010) estabelece que esses ensaios são facultativos na aceitação do concreto na obra em função da aplicação do concreto, devido a dificuldade de realização desses ensaios em campo.

Tabela 21 Parâmetros e métodos usados para o CAA no estado fresco

Propriedade avaliada	Ensaio	Faixa de trabalho	Método de ensaio
Fluidez e escoamento	Espalhamento	550 a 750mm	NBR 15823-2 (ABNT, 2010)
Viscosidade plástica	Funil V	< 9s	NBR 15823-5 (ABNT, 2010)
	Anel J	0 a 25mm	NBR 15823-3 (ABNT, 2010)
Habilidade passante	Caixa L	$\geq 0,80$, com três barras de aço	NBR 15823-4 (ABNT, 2010)
	Coluna de segregação	$\leq 20\%$	NBR 15823-6 (ABNT, 2010)

No ensaio da determinação do espalhamento (Figura 51 *a* e *b*) foi verificada a fluidez do CAA, empregando-se o cone de Abrams, através da média de duas medidas, perpendiculares entre si, da abertura do diâmetro do concreto. O ensaio do funil V (Figura 51c) foi realizado com o objetivo de verificar a viscosidade do CAA, através da medida de tempo que o concreto levou para escoar ao longo do funil. No ensaio do anel J foi avaliada a habilidade passante do CAA em fluxo livre, além de verificar visualmente a segregação do concreto (Figura 51d).



Figura 51 Ensaios no CAA no estado fresco: (a) e (b) Determinação do espalhamento – Método do cone de Abrams; (c) Funil V; (d) Anel J

No ensaio da caixa L foi verificada a habilidade do CAA de passar por obstáculos e permanecer coeso (Figura 52a). A habilidade passante (HP) é calculada pela razão entre as alturas da superfície do concreto nas extremidades (H_1 e H_2 , ver Figura 13, item 2.3.1d). A caixa L, utilizada neste ensaio, possuía três barras metálicas lisas com diâmetro de 12,5 mm (Figura 52 b e c).

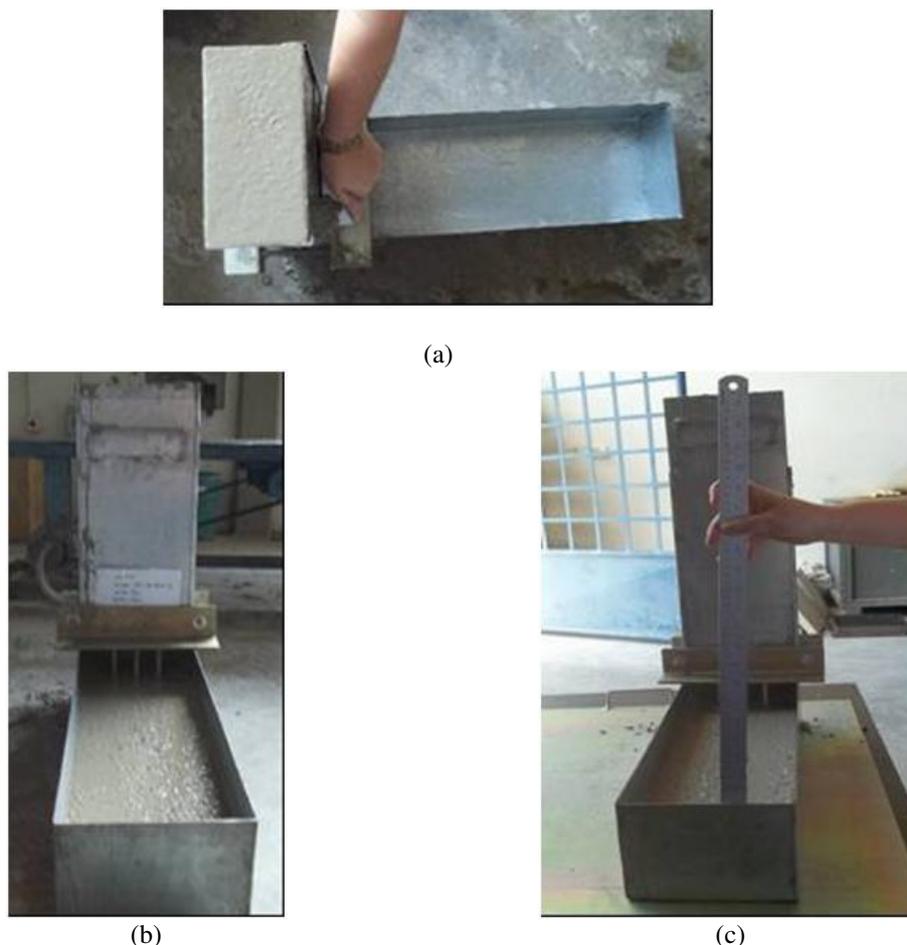


Figura 52 Ensaio da determinação da habilidade passante – Método da caixa L: (a) Aspecto do ensaio antes da abertura da comporta; (b) Vista frontal do CAA na câmara horizontal; (c) Medição das alturas H1 e H2

Para determinar a resistência à segregação do CAA, foi realizado o ensaio da coluna de segregação, que é dada pela diferença das massas de agregado gráudo existente na base e no topo do equipamento. Este equipamento é formado por um tubo de PVC (200mm de diâmetro e 660mm de altura), dividido em três partes (Figura 53a). Após 20min do preenchimento da coluna de segregação com a amostra de CAA, foi coletada porções do topo e da base da coluna. Cada amostra foi lavada separadamente sobre uma peneira com abertura de malha 4,8mm, separando a argamassa dos agregados gráudos (Figura 53b). Os agregados gráudos foram secos, superficialmente, com um pano para atingir a condição saturada superfície seca (SSS) (Figura 53c). Posteriormente, foram pesados. Após a pesagem foi calculada a resistência à segregação conforme estabelece a NBR 15823-6 (ABNT, 2010) (Figura 53d).



Figura 53 Ensaio da coluna de segregação: (a) Equipamento preenchido com a amostra de CAA; (b) Lavagem da amostra sobre uma peneira com abertura da malha de 5mm; (c) Secagem superficial dos agregados graúdos; (d) Pesagem da amostra de agregado graúdo na condição saturado superfície seca (SSS)

Além dos ensaios no estado fresco, o CAA foi avaliado no estado endurecido quanto à resistência à compressão axial (NBR 5739, ABNT, 2007), à resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222, ABNT, 2011) e à absorção de água, índice de vazios e massa específica (NBR 9778, ABNT, 2009). A Tabela 22 apresenta as propriedades, as idades de cura em que os concretos foram avaliados, o número de corpos de prova produzidos e os métodos adotados para cada ensaio. Os corpos de prova cilíndricos ($\phi 100 \times 200 \text{mm}$) foram moldados sem adensamento manual ou mecânico conforme a metodologia específica para o CAA (NBR 15823-1, ABNT, 2010), e submetidos à cura por imersão em solução de água saturada de hidróxido de cálcio após desmoldagem até

a data de ensaio, de acordo com as recomendações da NBR 5738 (ABNT, 2015). Os ensaios de ruptura do CAA foram realizados na prensa hidráulica da marca EMIC, com capacidade de 100 toneladas (Figura 54 *a a c*).

Tabela 22 Ensaios realizados para avaliar o CAA no estado endurecido

Propriedade avaliada	Idades (dias)	N. de CPs	Método de ensaio
Resistência à compressão axial	7 – 28	08	NBR 5739 (ABNT, 2007)
Resistência à tração por compressão diametral	7 – 28	08	NBR 7222 (ABNT, 2011)
Absorção de água, índice de vazios e massa específica	28	03	NBR 9778 (ABNT, 2009)



(a)



(b)



(c)

Figura 54 Ensaios de ruptura no CAA: (a) Prensa utilizada; (b) Ensaio de resistência à compressão; (c) Ensaio de resistência à tração por compressão diametral

5 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados apresentados nesse capítulo estão separados em função das etapas em que o estudo de dosagem e produção do CAA foi dividido. Ou seja, o estudo da fase argamassa e o estudo da fase concreto. Para cada uma dessas etapas, além das observações realizadas para produção das misturas, estão apresentados os resultados das propriedades do material no estado fresco e no estado endurecido.

5.1 ESTUDO DA FASE ARGAMASSA

Nessa fase foram produzidas argamassas autoadensáveis (AA) para cada relação a/c estudada (0,46 – 0,57 – 0,70), a fim de obter o teor adequado de agregado miúdo, do aditivo superplastificante (SP) e do resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC), em substituição às areias naturais.

5.1.1 Ajuste do teor de agregado miúdo na argamassa

As argamassas autoadensáveis foram produzidas com três teores de agregado miúdo (40, 45 e 50% do volume total de argamassa). O teor de agregado miúdo (AM) em relação ao volume total de argamassa foi definido por meio dos ensaios de espalhamento e do funil V modificado, com variação do teor de aditivo SP, como descrito no item 4.2.3a. O intervalo adotado para estes ensaios foi um diâmetro de espalhamento entre 200 a 280 mm e um tempo de escoamento entre 3,5 a 10 segundos, seguindo as recomendações de Gomes (2002). O AM foi composto por 70% de areia fina e 30% de areia média. Este percentual foi definido conforme descrito no item 4.2.1. Para cada mistura de argamassa foram realizadas três repetições de cada ensaio, para se obter um resultado representativo do comportamento das misturas no estado fresco.

O teor de aditivo SP inicial adotado para a produção das argamassas foi de 0,1%, em relação à massa de cimento. O aditivo foi ajustado até no máximo 0,3%, para essa fase, pois, segundo a metodologia adotada de Melo (2005), o teor de aditivo SP deve ser preferencialmente menor que 0,3% na etapa do concreto.

O resultado do ensaio de espalhamento foi utilizado como critério de decisão para realização do ensaio de tempo de escoamento no funil V. Ou seja, o ensaio no funil V só era executado se a argamassa apresentasse um diâmetro de espalhamento dentro do

limite estabelecido (200 a 280 mm). Quando a argamassa atingia o diâmetro de espalhamento e o tempo de escoamento especificados, o ajuste para o teor de AM da relação a/c em estudo era finalizado, passando-se para o próximo teor, com incremento de 5%.

Para cada relação a/c estudada, o volume de AM escolhido foi a maior quantidade possível deste material, escolhido dentre as misturas que apresentaram as características de autoadensabilidade exigidas (espalhamento de 200 a 280 mm e tempo de escoamento de 3,5 a 10 segundos). A Tabela 23 mostra os valores médios encontrados no ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento no funil V modificado para cada relação a/c estudada (0,46 – 0,57 – 0,70). Os valores com asterisco (*) correspondem ao teor de agregado miúdo adotado e respectivo teor de aditivo SP. Os resultados individuais destes ensaios são apresentados no Apêndice 1.

Tabela 23 Resultados de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do teor de agregado miúdo e % de SP das AA

a/c	AM (%)	SP (%)	D (mm)	F- V t (s)
0,70	40	0,10	347	nr
	45	0,10	291	nr
	50*	0,10	200	2,03
		0,20*	220	3,51
	0,57	40	0,10	250
0,20			282	3,14
0,25			294	3,17
0,30			316	3,09
45*			0,10	198
	0,20	226	3,42	
	0,25*	242	3,63	
	0,30	255	2,90	
0,46	50	0,10	125	nr
		0,20	135	nr
		0,30	174	nr
0,46	40*	0,10	149	nr
		0,20	188	nr
		0,25*	209	3,54

Nota: AM- teor de agregado miúdo, em volume; SP- aditivo superplastificante; D- diâmetro médio no ensaio de espalhamento; F-V- tempo de escoamento no funil V modificado.

De modo geral, pode-se observar que, para uma mesma relação a/c, à medida que se aumentou o volume de AM na mistura, e para um mesmo %SP, ocorreu uma

diminuição no diâmetro do espalhamento, como pode ser observado na Figura 55 e na Figura 56. Este fato pode estar relacionado ao aumento da tensão crítica, devido à maior quantidade de partículas de agregado miúdo, que ocasiona um maior atrito entre elas, assim como ocorreu no estudo de Santos (2010).

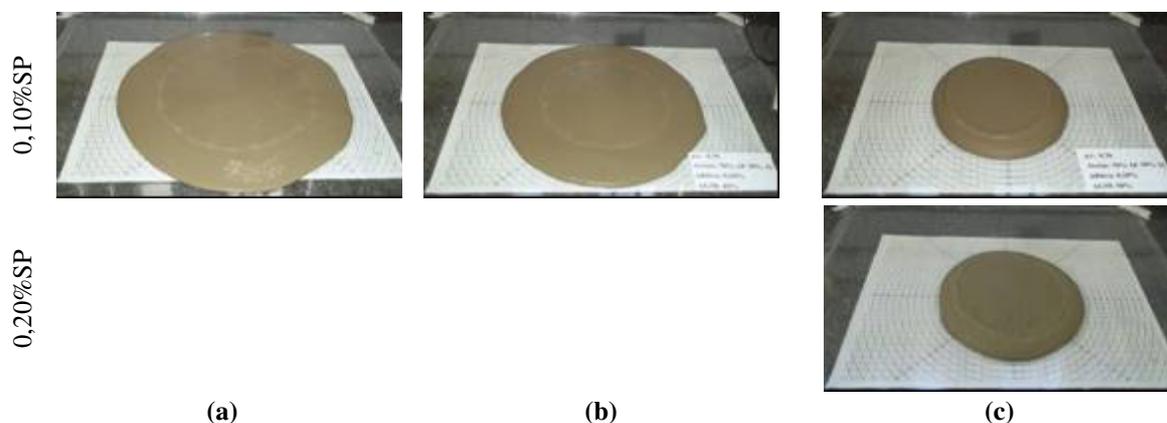


Figura 55 Aspecto do espalhamento das AA com relação a/c 0,70, variando o volume de AM e o teor de aditivo SP: (a) 40% AM; (b) 45% AM; (c) 50% AM

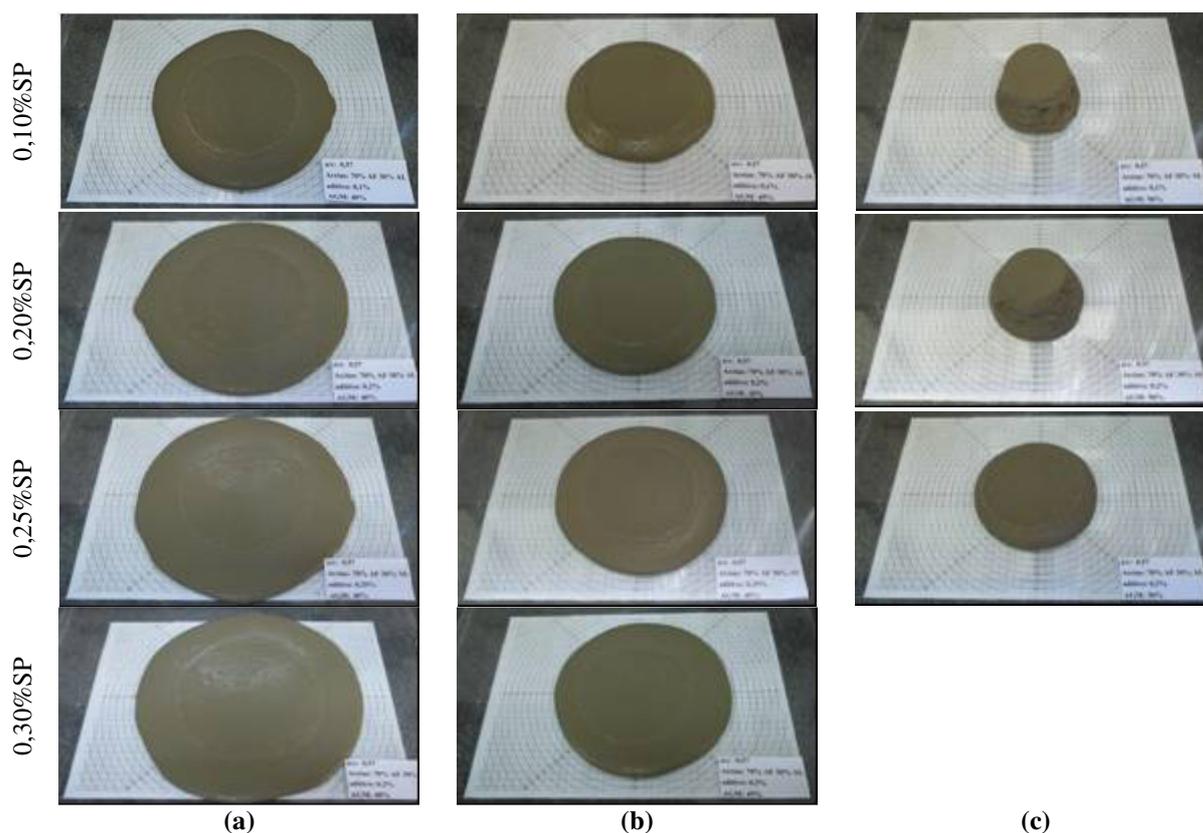


Figura 56 Aspecto do espalhamento das AA com relação a/c 0,57, variando o volume de AM e o teor de aditivo SP: (a) 40% AM; (b) 45% AM; (c) 50% AM

Para a relação a/c 0,70, o teor de AM escolhido foi de 50% sobre o volume de argamassa, com 0,2% de aditivo SP (Figura 55c). Esta mistura apresentou características de autoadensabilidade, resultados dos ensaios de espalhamento e do

tempo de escoamento no funil V dentro dos limites definidos, e maior volume de agregado miúdo na mistura, se comparada com as demais misturas que atenderam aos critérios anteriores. Ainda para esse teor de AM, com teor de 0,1% de aditivo SP, o tempo de escoamento foi inferior ao especificado, apesar de atender ao espalhamento (Tabela 23). Pode-se verificar que as misturas com teores de 40 e 45% de agregado miúdo apresentaram um diâmetro de espalhamento maior que o limite especificado, usando apenas 0,1% de SP, Figura 55a e Figura 55b, respectivamente, não sendo necessária a realização do ensaio do funil V.

Nas argamassas com relação a/c 0,57, o teor de AM escolhido foi de 45%, com teor de SP de 0,25%, em relação à massa do cimento. Nenhuma das argamassas com 50% de AM atingiu o diâmetro mínimo definido no ensaio de espalhamento (200mm), para qualquer dos teores de SP testados (Figura 56c). Além disso, o aumento do teor de SP implicaria em aumento excessivo do custo final da mistura para a fase concreto, além de poder apresentar segregação e/ou exsudação. Durante os ensaios, as argamassas com 40% de AM e %SP acima de 0,1% apresentaram exsudação e espalhamento acima do limite máximo (280 mm) (Figura 56a). A argamassa com 40% de AM e 0,1%SP (Figura 56a) atingiu os valores especificados, mas, vale lembrar que, segundo a metodologia descrita por Melo (2005), o volume ideal de AM é aquele que contém o maior teor deste material. E, por isso foi escolhido o teor de 45%, como já mencionado.

Para as argamassas com relação a/c 0,46, só foi possível ensaiar o teor de 40% de AM (Figura 57), pois para os demais teores estudados (45 e 50%) não houve espalhamento dentro do limite mínimo especificado (200mm), mesmo com o aumento do teor de SP até 0,3%. Além disso, as argamassas não apresentavam as características de autoadensabilidade exigidas. Tal fato pode estar relacionado à redução do teor de água na mistura, que ocasiona uma diminuição da tensão de escoamento e aumento da sua viscosidade. Desse modo, para relação a/c 0,46, adotou-se o teor de 40% de AM com 0,25% de aditivo SP, que obteve o diâmetro de espalhamento e tempo de escoamento no funil V dentro da faixa estabelecida.

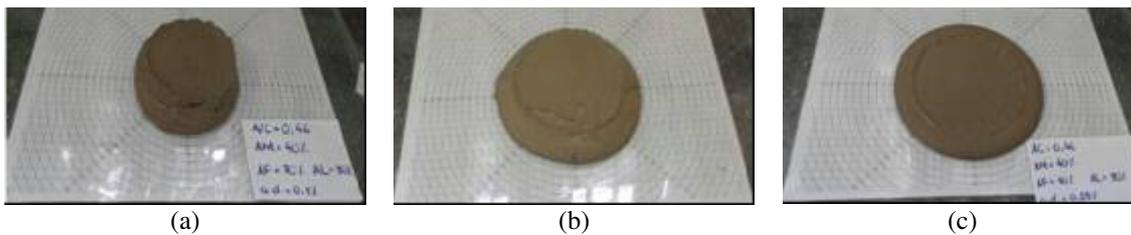


Figura 57 Aspecto do espalhamento das AA com relação a/c 0,46, para o volume de AM 40% e variando o teor SP: (a) 0,10%SP; (b) 0,20%SP; (c) 0,25%SP

De modo geral, observou-se que quanto maior a relação a/c, maior foi o teor de agregado miúdo e menor o consumo de aditivo SP. Tal fato pode estar relacionado à quantidade de água na mistura que afeta os dois parâmetros reológicos: tensão de escoamento e viscosidade, assim como foi observado por Corradi *et al.* (2003) em seus estudos.

5.1.2 Ajuste do teor de adição na argamassa

Após a determinação do teor de AM e %SP, foram produzidas argamassas com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC nos teores de 5, 10, 15 e 20%, em massa, para cada relação a/c estudada (0,46 – 0,57 – 0,70). As argamassas também foram avaliadas por meio do ensaio de espalhamento e do tempo de escoamento no funil V modificado, com a mesma faixa de limites da fase anterior, descrita no item 5.1.1. O teor de aditivo SP utilizado foi o valor definido na fase de determinação do teor de AM, acrescido de 0,05%, até obter o diâmetro de espalhamento estabelecido. Como foi feito na fase anterior, quando a argamassa não atingia a faixa especificada no ensaio de espalhamento, não era realizado o ensaio do funil V modificado.

Os resultados médios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V modificado das argamassas com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC, estão apresentados na Tabela 24. Os valores com asterisco (*) correspondem à mistura selecionada, a qual apresentou resultados dentro da faixa limite especificada para o ensaio de espalhamento (200 a 280mm) e o tempo de escoamento no funil V (3,5 a 10s). Os resultados individuais destes ensaios estão apresentados no Apêndice 2.

Analisando os resultados obtidos, observa-se que o aumento do teor de resíduo na mistura ocasionou uma diminuição no diâmetro do espalhamento das argamassas. O RSPC aumentou visivelmente a coesão das misturas. Isso tem como consequência um

aumento no consumo de aditivo SP, para qualquer dos teores de AM escolhidos e relação a/c estudada (Tabela 24). Além disso, esse aumento no %RSPC promoveu uma redução na relação água/finos das misturas, fazendo com que haja um aumento da sua viscosidade, como foi observado em outros estudos (RIZWAN; BIER, 2012; TÜRKEL; YIGIT, 2009; MELO, 2005).

Tabela 24 Resultados médios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do ajuste do teor de RSPC e % de SP das AA

a/c	AM (%)	RSPC (%)	SP (%)	D (mm)	F- V t (s)	
0,70	50	5	0,10	198	nr	
			0,15*	215	3,57	
			0,20	223	2,69	
		10	0,15	207	2,35	
			0,25	228	2,47	
			0,30*	228	3,99	
		15	0,30	211	2,47	
			0,35	222	2,83	
			0,40*	225	3,90	
		20	0,40	203	nr	
			0,45	211	2,62	
			0,50*	225	4,31	
0,57	45	5	0,25*	235	3,76	
			10	0,25	210	2,77
				0,30	223	3,09
		0,35*		232	3,68	
		15	0,35	199	nr	
			0,40	213	3,43	
0,45*	225		3,91			
0,46	40	20	0,45	186	nr	
			0,50	199	nr	
			0,55*	218	4,35	
		5	0,25	175	nr	
			0,35*	202	3,84	
		10	0,45	188	nr	
0,50*	207		4,11			
15	0,55	168	nr			
	0,65*	213	4,38			
20	0,70	176	nr			
	0,75*	205	4,05			

Nota: AM- teor de agregado miúdo, em volume; RSPC- teor de resíduo; SP- aditivo superplastificante; D- diâmetro médio no ensaio de espalhamento; F-V- ensaio no funil V modificado.

Uma vez que a relação a/c era fixa para cada grupo de misturas, o aumento no teor de SP se fazia necessário para obtenção de misturas que apresentassem menor atrito interno, e assim, maior capacidade de fluir. Sabe-se que o uso de aditivo promove uma maior dispersão entre as partículas de cimento, ocasionando menor tensão de escoamento e redução da viscosidade (CORRADI; KHURANA; MARGARROTO, 2003). O aumento do teor de finos nas misturas também contribuiu para o preenchimento de vazios do esqueleto granular das argamassas. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Bastos (2014), de Guimarães (2014) e de Galvão *et al.* (2016), que trabalharam com RSPC.

A Figura 58 (a a d), a Figura 59 (a a d) e a Figura 60 (a a d), mostram o comportamento do espalhamento das argamassas com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC nos teores estudados (5, 10, 15 e 20%), com relação a/c 0,70, 0,57 e 0,46, respectivamente.

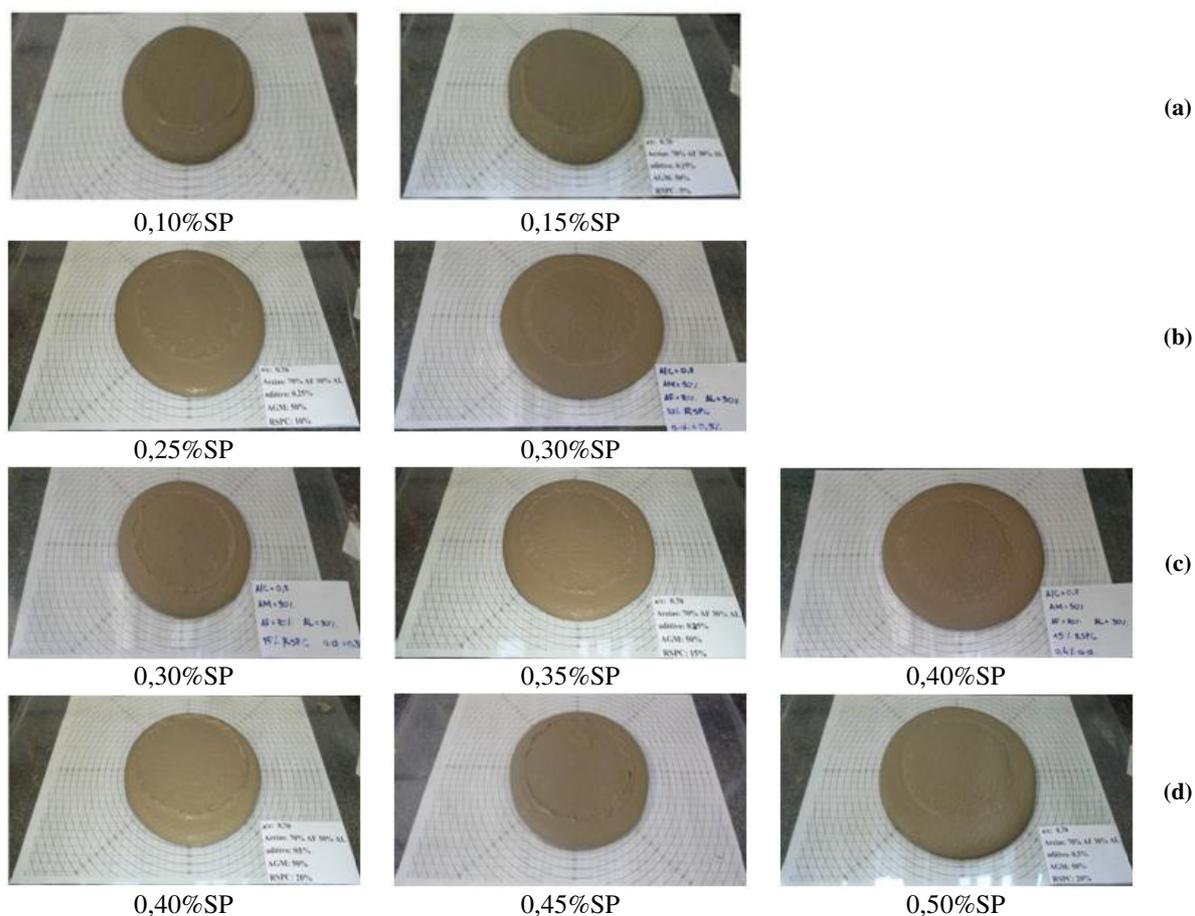


Figura 58 Comportamento das argamassas com relação a/c 0,70 no ensaio de espalhamento: (a) 5%RSPC; (b) 10%RSPC; (c) 15%RSPC; (d) 20%RSPC

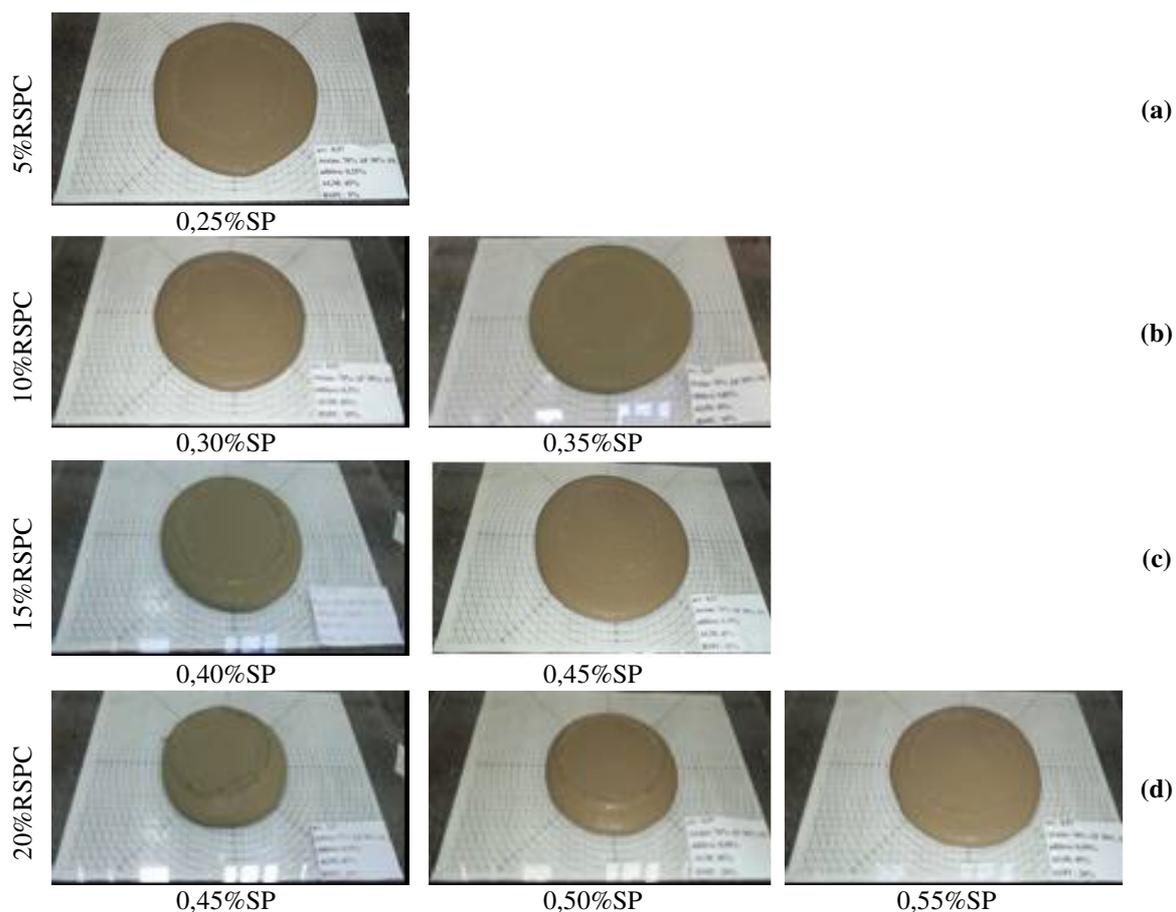


Figura 59 Comportamento das argamassas com relação a/c 0,57 no ensaio de espalhamento: (a) 5%RSPC; (b) 10%RSPC; (c) 15%RSPC; (d) 20%RSPC

A análise das imagens apresentadas na Figura 58 e na Figura 59 permite verificar que para as relações a/c 0,70 e 0,57, as argamassas com teores de 10 e 15% de RSPC (Figura 58 *b* e *c*, respectivamente, e Figura 59 *b* e *c*, respectivamente) apresentaram melhor aspecto no espalhamento, mostrando-se mais homogêneas e com menor espessura da argamassa espalhada, critérios qualitativos também utilizados nos estudos de Martins (2009) e Galvão *et al.* (2016) para avaliação de AA. Nas argamassas com relação a/c 0,46 (Figura 60) observa-se que as misturas apresentam ainda uma coesão muito elevada, mesmo para os teores de SP para os quais as misturas atenderam ao critério da faixa limite especificada (espalhamento de 200 a 280mm e tempo de escoamento de 3,5 a 10s). Observa-se que a espessura da mistura espalhada é ainda muito elevada, quando essas argamassas são comparadas com as misturas correspondentes das argamassas com relação a/c 0,57 e 0,70. Esse comportamento está relacionado com o elevado teor de finos e reduzido consumo de água das misturas com relação a/c 0,46. E a substituição do AM por RSPC aumenta ainda mais a quantidade de finos nas misturas, como já foi mencionado anteriormente, promovendo o aumento da

viscosidade e redução da capacidade da mistura de fluir sobre uma superfície plana e lisa.

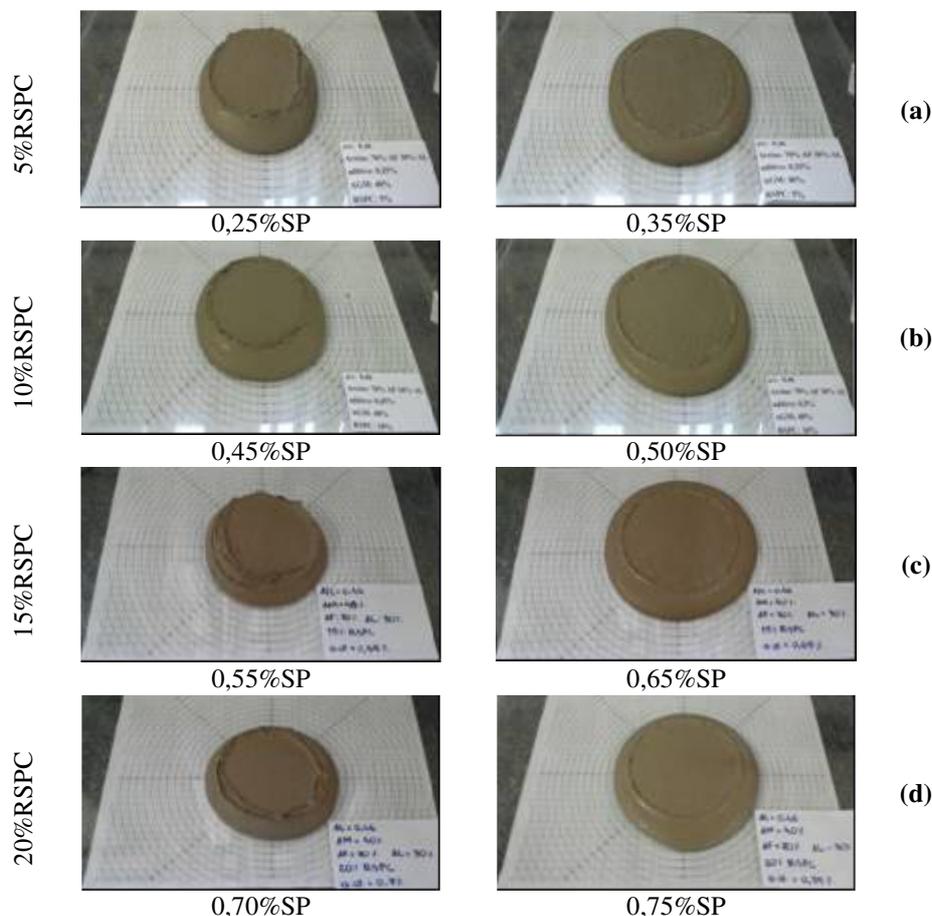


Figura 60 Comportamento das argamassas com relação a/c 0,46 no ensaio de espalhamento: (a) 5%RSPC; (b) 10%RSPC; (c) 15%RSPC; (d) 20%RSPC

5.1.3 Definição e produção das argamassas autoadensáveis

A Tabela 25 apresenta a composição das argamassas autoadensáveis, mostrando os teores de agregado miúdo e de aditivo SP adotados para cada percentual de substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC nos teores de 5, 10, 15 e 20%, para cada relação a/c estudada (0,46 – 0,57 – 0,70).

Como foi visto no item 5.1.2, as argamassas autoadensáveis com substituição parcial do agregado miúdo por RSPC com relação a/c 0,46 apresentaram, visualmente, uma maior viscosidade e consistência em relação às argamassas com relações a/c 0,70 e 0,57. Observou-se um diâmetro de espalhamento menor para a argamassa com relação a/c 0,46, mesmo quando foi aumentado o consumo de aditivo SP. Após as moldagens, foi verificado que estas argamassas não apresentaram homogeneidade e autoadensabilidade

suficiente (Figura 61 *a* e *b*), mostrando segregação e falta de capacidade de preenchimento da mistura durante o processo moldagem, descaracterizando a mistura autoadensável. Assim, após análise desses aspectos, concluiu-se que não seria possível prosseguir com os estudos das misturas com a relação a/c 0,46, mesmo que fosse utilizado maior teor de SP, pois isso tornaria a mistura mais cara, e poderia haver problemas de ordem técnica como segregação e/ou exsudação, por exemplo. Nesse caso, seria recomendado realizar um estudo alterando os materiais utilizados, principalmente o tipo de aditivo superplastificante e o cimento, de modo a viabilizar a produção das AA com menores relações a/c.

Tabela 25 Composição final das argamassas autoadensáveis: teor de agregado miúdo, teor de aditivo SP e seus respectivos resultados médios nos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V

a/c	AM (%)	RSPC (%)	SP (%)	D (mm)	F- V t (s)
0,70	50	5	0,15	215	3,57
		10	0,30	228	3,99
		15	0,40	225	3,90
		20	0,50	225	4,31
0,57	45	5	0,25	235	3,76
		10	0,35	232	3,68
		15	0,45	225	3,91
		20	0,55	218	4,35
0,46	40	5	0,35	202	3,84
		10	0,50	207	4,11
		15	0,65	213	4,38
		20	0,75	205	4,05

Nota: AM- teor de agregado miúdo, em volume; RSPC- teor de resíduo; SP- aditivo superplastificante; D- diâmetro médio no ensaio de espalhamento; F-V- ensaio no funil V modificado.



Figura 61 Aspecto das argamassas autoadensáveis com substituição parcial do agregado miúdo por RSPC com relação a/c 0,46 após a moldagem: (a) argamassa dentro da forma, onde é possível verificar a falta de autoadensabilidade da mistura; (b) argamassa apresentando segregação em camadas

O estudo das argamassas autoadensáveis permitiu avaliar a influência do teor de RSPC e do teor de aditivo no seu comportamento reológico, no estado fresco, e nas propriedades das argamassas no estado endurecido. As argamassas foram moldadas e ensaiadas a fim de avaliar a resistência à compressão (NBR 7215, ABNT, 1997), a absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica (NBR 9778, ABNT, 2009) e a absorção de água por capilaridade (NBR 15259, ABNT, 2005). A produção, desmoldagem e cura das argamassas foram realizadas conforme descrito no item 4.2.3.

Na Tabela 26 são mostrados os consumos de materiais para a produção de 1m^3 de argamassa autoadensável.

Tabela 26 Consumo de materiais (kg) para a produção de 1m^3 de argamassa autoadensável

a/c	Mistura	C	AF	AM	RSPC	Água	%SP
0,70	5RSPC	480	871	374	67	336	0,15
	10RSPC	480	825	354	134	336	0,30
	15RSPC	480	780	335	201	336	0,40
	20RSPC	480	734	315	268	336	0,50
0,57	5RSPC	604	786	333	60	344	0,25
	10RSPC	604	744	315	120	344	0,35
	15RSPC	604	703	298	180	344	0,45
	20RSPC	604	661	280	240	344	0,55

Nota: C- Cimento; AF- Areia fina; AM- Areia média; SP- aditivo superplastificante.

5.1.4 Resultados das propriedades das argamassas no estado endurecido

5.1.4.1 Resistência à compressão axial

Na Tabela 27 são apresentados os resultados médios de resistências à compressão axial, aos 7 e 28 dias, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação, para as argamassas autoadensáveis com substituição parcial do agregado miúdo por RSPC. Os resultados individuais deste ensaio são apresentados no Apêndice 3.

Com base nos resultados apresentados, pode-se verificar que as argamassas autoadensáveis com relação a/c 0,57 apresentaram maiores resistências para todos os teores de substituição do agregado miúdo natural por RSPC (5 - 10 - 15 - 20%), quando comparadas às argamassas com relação a/c 0,70. A mistura 10RSPC (a/c 0,57) apresentou um aumento na resistência, aos 28 dias, em torno de 49% em comparação à mistura 10RSPC (a/c 0,70). Tal fato pode estar relacionado, além do menor volume de água, à maior quantidade de finos nessa mistura, pois há um maior consumo de cimento e um menor teor de agregado miúdo em relação às misturas de relação a/c 0,70.

Tabela 27 Resultados médios de resistência à compressão das argamassas autoadensáveis, aos 7 e 28 dias, desvio padrão e coeficiente de variação

a/c	Mistura	$f_{c7} \pm Sd$ (C.V) MPa \pm MPa (%)	$f_{c28} \pm Sd$ (CV) MPa \pm MPa (%)	f_{c28}/f_{c7}	$f_{c28}/f_{c28(5RSPC)}$
0,70	5RSPC	15,6 \pm 0,3 (2,1)	20,6 \pm 0,1 (0,5)	1.32	-
	10RSPC	15,3 \pm 0,2 (1,6)	22,5 \pm 0,6 (2,6)	1.47	1.09
	15RSPC	14,9 \pm 0,3 (1,8)	21,7 \pm 0,6 (2,9)	1.46	1.05
	20RSPC	15,4 \pm 0,2 (1,5)	21,4 \pm 0,2 (1,0)	1.39	1.04
0,57	5RSPC	22,3 \pm 0,5 (2,2)	28,2 \pm 0,4 (1,6)	1.26	-
	10RSPC	22,8 \pm 0,3 (1,3)	33,5 \pm 0,4 (1,3)	1.47	1.19
	15RSPC	22,3 \pm 0,3 (1,2)	29,5 \pm 0,6 (2,0)	1.32	1.05
	20RSPC	22,8 \pm 0,3 (1,4)	31,3 \pm 1,5 (4,8)	1.37	1.11

Nota: f_{c7} - Resistência média à compressão, aos 7 dias; f_{c28} - Resistência média à compressão aos 28 dias; Sd- Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

De um modo geral, o ganho de resistência com a idade de hidratação foi maior para a família de argamassas produzidas com relação a/c 0,70, exceto para a mistura 10RSPC, cujo ganho se manteve em 47% para ambas as relações a/c estudadas (0,70 – 0,57). Este ganho de resistência com a idade já era esperado, tendo sido observado também nas argamassas autoadensáveis estudadas por Mello (2016).

Em relação à influência do RSPC na resistência à compressão das argamassas estudadas, observa-se que, de modo geral, ocorreu um ganho de resistência variando de 4 a 19% para todas as argamassas, quando comparada à mistura 5RSPC, para as duas relações a/c estudadas (0,70 – 0,57). Na mistura 10RSPC (a/c 0,57), o aumento da resistência à compressão, aos 28 dias, foi de 19%. Para a idade de 7 dias, não é perceptível a influência do resíduo sobre a resistência à compressão. Com o objetivo de verificar o efeito das variáveis estudadas, os resultados de resistência à compressão foram analisados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA), com a utilização do software Statistica. As variáveis analisadas foram: relação a/c (0,70 – 0,57), teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC (5 - 10 - 15 - 20%) e idade (7 – 28 dias). O resultado da ANOVA está apresentado na Tabela 28.

Verificou-se que todas as variáveis estudadas, assim como suas interações, têm significância estatística sobre a resistência à compressão das argamassas. Observa-se que a relação a/c é o principal fator de variação da resistência à compressão das argamassas autoadensáveis, pois apresentou o maior valor do $F_{calculado}$ (2782,94). Como se sabe, o aumento da relação a/c promove um enfraquecimento da matriz, causado pelo aumento da porosidade.

Tabela 28 Análise de variância dos efeitos da relação a/c, da substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC e da idade sobre a resistência à compressão das argamassas autoadensáveis

Fator	GDL	MQ	F _{calculado}	F _{0,05}	Significância
A- Relação a/c	1	799,52	2782,94	4,123	S
B- RSPC	3	7,71	26,85	2,898	S
C- idade	1	615,62	2142,83	4,123	S
AB	3	3,01	10,47	2,898	S
AC	1	9,45	32,90	4,123	S
BC	3	6,16	21,45	2,898	S
ABC	3	1,53	5,33		S
ERRO	32	0,29			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_{calculado} - Valor calculado de F; F_{0,05} - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; S - Significativo

Observa-se, que os maiores valores da resistência à compressão axial, aos 28 dias, ocorreram nas argamassas autoadensáveis 10RSPC, para ambas as relações a/c estudadas (0,70 – 0,57). O RSPC promoveu uma melhor distribuição granulométrica na mistura de AA, promovendo o refinamento dos poros da matriz. Este aumento da resistência à compressão com o uso de 10% de RSPC, também foi observado nos estudos de Bastos (2014), em concreto convencional para uma relação a/c 0,65, e nos estudos de Mercês *et al.* (2016) em argamassas vibradas com a/c 0,48. Em ambos os casos com substituição parcial do cimento pelo RSPC. Os autores atribuíram este comportamento ao efeito fíler do RSPC. Galvão *et al.* (2016) observaram um aumento da resistência à compressão de AA com substituição do agregado miúdo natural por 15% de RSPC. Contudo, nesse estudo houve variação da relação a/c, e a mistura com 15%RSPC apresentou uma redução de 6% no a/c, em comparação à argamassa usada como referência.

Verificou-se que a partir do teor de 10% de RSPC, ocorreu uma queda nos valores da resistência à compressão das argamassas autoadensáveis para ambas às relações a/c estudadas (0,70 – 0,57) (Figura 62). Tal ocorrência pode estar relacionada ao aumento da porosidade nas argamassas autoadensáveis com substituição parcial do agregado miúdo natural por RSPC nos teores de 15 e 20%. Tal fato foi confirmado no ensaio de absorção de água por imersão. Gonçalves (2000) observou um comportamento semelhante com o aumento de resíduo tipo fíler em misturas à base de cimento, e afirma que uma maior quantidade de partículas com menor dimensão na mistura pode ocasionar uma diminuição das ligações dos produtos hidratados, gerando falhas na estrutura da matriz.

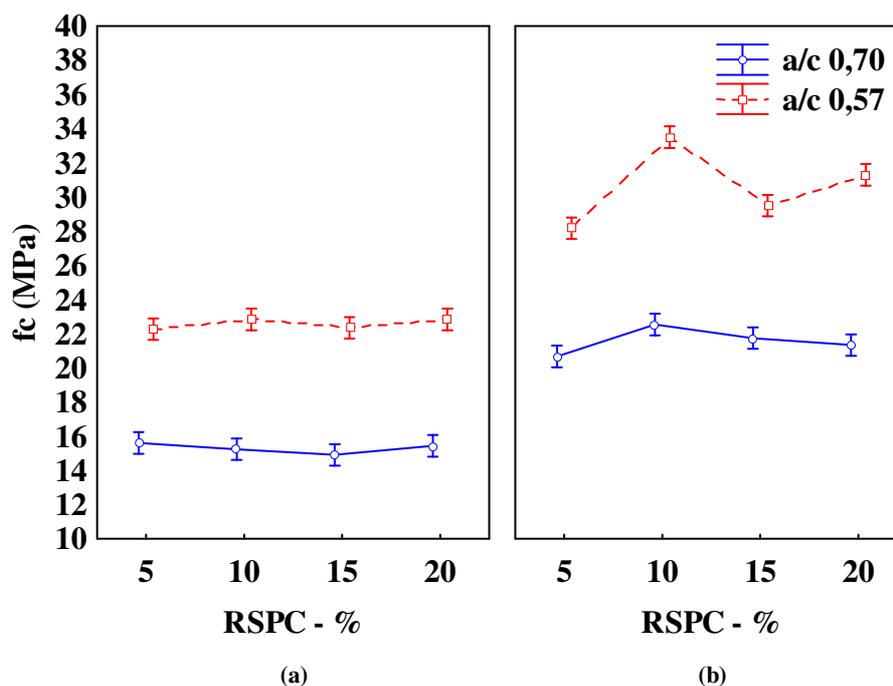


Figura 62 Curvas de comportamento na resistência à compressão axial das argamassas autoadensáveis devido à influência das variáveis estudadas: relação a/c, teor de substituição do agregado miúdo natural por RSPC e idade: (a) aos 7 dias; (b) aos 28 dias

5.1.4.2 Absorção de água, índice de vazios e massa específica

Na Tabela 29 são apresentados os resultados médios de absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação, das argamassas autoadensáveis, com substituição parcial do agregado miúdo natural por RSPC. Os resultados individuais deste ensaio são apresentados no Apêndice 4.

Tabela 29 Resultados médios da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, desvio padrão e o coeficiente de variação para as argamassas autoadensáveis estudadas

a/c	Mistura	A±Sd (CV) %±% (%)	IV±Sd (CV) %±% (%)	Massa específica - g/cm ³ ±g/cm ³ (%)		
				MEs±Sd (CV)	MEsat±Sd(CV)	MEreal±Sd (CV)
0,70	5RSPC	13,8±0,4(3,1)	26,4±0,7(2,5)	1,91±0,01(0,6)	2,17±0,01(0,3)	2,59±0,01(0,3)
	10RSPC	14,2±0,1(1,0)	27,0±0,2(0,8)	1,90±0,00(0,2)	2,16±0,00(0,1)	2,59±0,00(0,2)
	15RSPC	14,7±0,1(0,4)	27,8±0,1(0,3)	1,88±0,00(0,1)	2,16±0,00(0,1)	2,60±0,00(0,04)
	20RSPC	14,7±0,1(0,7)	27,7±0,2(0,5)	1,88±0,00(0,2)	2,16±0,00 (0,1)	2,61±0,00(0,2)
0,57	5RSPC	14,1±0,1(0,4)	26,7±0,1(0,6)	1,90±0,00(0,2)	2,17±0,00(0,2)	2,59±0,01(0,3)
	10RSPC	14,3±0,1(0,7)	27,1±0,1(0,5)	1,89±0,00(0,2)	2,16±0,00(0,2)	2,59±0,01(0,2)
	15RSPC	14,5±0,0(0,3)	27,3±0,1(0,3)	1,88±0,00(0,1)	2,16±0,00(0,1)	2,59±0,00(0,1)
	20RSPC	14,6±0,0(0,1)	27,4±0,1(0,2)	1,88±0,00(0,1)	2,15±0,00(0,1)	2,58±0,00(0,2)

Nota: A- Absorção de água por imersão; Sd- desvio padrão; CV – coeficiente de variação; IV – índice de vazios; MEs – massa específica seca; MEsat – massa específica saturada; MEreal – massa específica real.

Observa-se que os valores obtidos na absorção de água das argamassas autoadensáveis, com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC, aos 28 dias, foram próximos para as duas relações *a/c* estudadas (0,70 – 0,57), sendo que o comportamento esperado seria que o valor da absorção de água aumentasse com o aumento da relação *a/c*. Segundo Mello (2016), nas argamassas autoadensáveis, a absorção de água se mantém estável em função da relação *a/c*, devido à presença da adição mineral que age diminuindo os vazios, mesmo com o aumento da relação *a/c*.

Além disso, pode-se verificar que à medida que se aumentou o teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC, ocorreu um pequeno aumento tanto na absorção de água quanto no índice de vazios em todas as argamassas, quando comparadas à mistura 5RSPC, para as duas relações *a/c* estudadas (0,70 - 0,57). Nas misturas 15RSPC e 20RSPC (*a/c* 0,70) este aumento foi de 7% para a absorção de água. O aumento da absorção de água com o aumento do teor de substituição da adição mineral ocorreu, também, nos estudos de Soares (2014), que atribuiu esse comportamento à incorporação de ar ocorrida nessas misturas, com o uso de adições tipo *fíler*.

Em relação aos resultados de massa específica, observa-se que as AA apresentam valores muito próximos, para as duas relações *a/c* estudadas (0,70 – 0,57), independente do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC.

Os resultados de absorção de água por imersão e índice de vazios foram analisados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA). As variáveis analisadas foram: relação *a/c* (0,70 – 0,57) e teor de substituição do agregado miúdo natural por RSPC (5 - 10 - 15 - 20%) e a interação entre elas (Tabela 30 e Tabela 31).

Tabela 30 Análise de variância dos efeitos da relação *a/c* e do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC sobre a absorção de água, aos 28 dias, nas argamassas autoadensáveis

Fator	GDL	MQ	F_c	F_{0,05}	Sg
A- Relação <i>a/c</i>	1	0,000	0,0	4,494	NS
B- RSPC	3	0,647	22,4	3,239	S
AB	3	0,072	2,5	3,239	NS
ERRO	16	0,029			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_c - valor calculado de F; F_{0,05} - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; Sg - Significância; S - Significativo; NS - Não significativo.

Tabela 31 Análise de variância dos efeitos da relação a/c e do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC sobre o índice de vazios nas argamassas autoadensáveis

Fator	GDL	MQ	F _c	F _{0,05}	Sg
A- Relação a/c	1	0,03	0,4	4,494	NS
B- RSPC	3	1,40	19,9	3,239	S
AB	3	0,22	3,1	3,239	NS
ERRO	16	0,07			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_{calculado} - valor calculado de F; F_{0,05} - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; Sg - Significância; S - Significativo; NS - Não significativo.

Por meio da análise de variância dos resultados de absorção de água e índice de vazios, constatou-se que o teor de substituição parcial do agregado miúdo natural por RSPC é significativo. Observa-se pelos resultados que há um pequeno incremento de absorção de água e índice de vazios nas misturas até 15% de RSPC, e para as misturas com 20% de RSPC os resultados se mantêm (Figura 63a e b). Por isso, foi realizada uma análise por comparação múltipla de médias dos resultados, e constatou-se que não há diferenças significativas para as misturas 15RSPC e 20RSPC entre si. Isto significa que acima de 10% de substituição parcial do agregado miúdo natural por RSPC, os resultados não são afetados pelo resíduo. Os resultados da comparação múltipla de médias são apresentados no Apêndice 5.

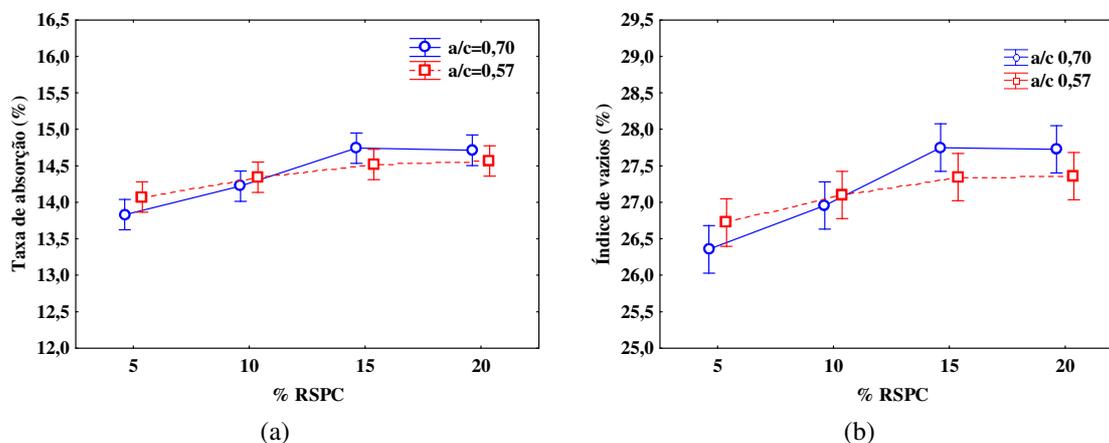


Figura 63 Resultados dos ensaios nas argamassas autoadensáveis: (a) Absorção de água; (b) Índice de vazios

5.1.4.3 Absorção de água por capilaridade

A Tabela 32 apresenta os resultados médios de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias, assim como o desvio padrão e o coeficiente de variação, para argamassas autoadensáveis, com substituição parcial do agregado miúdo por RSPC. Estes resultados correspondem aos valores médios obtidos no ensaio de três corpos de prova para cada mistura, e são apresentados no Apêndice 6.

Tabela 32 Resultados médios das argamassas autoadensáveis obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias

a/c	Mistura	$A_{10} \pm Sd$ (CV) (g/cm ²) ± (g/cm ²) (%)	$A_{90} \pm Sd$ (CV) (g/cm ²) ± (g/cm ²) (%)	$Cc \pm Sd$ (CV) (g/dm ² .min ^{1/2}) ± (g/dm ² .min ^{1/2})
0,70	5RSPC	0,3±0,0 (5,6)	0,7±0,0 (2,5)	6,5±0,0 (0,7)
	10RSPC	0,3±0,0 (7,7)	0,6±0,0 (4,4)	5,8±0,1 (2,5)
	15RSPC	0,3±0,0 (1,0)	0,6±0,0 (1,3)	5,7±0,1 (1,2)
	20RSPC	0,3±0,0 (2,6)	0,6±0,0 (1,1)	5,4±0,0 (0,5)
0,57	5RSPC	0,3±0,0 (5,7)	0,6±0,0 (4,8)	4,8±0,2 (4,1)
	10RSPC	0,2±0,0 (4,6)	0,5±0,0 (7,0)	4,4±0,4 (9,4)
	15RSPC	0,2±0,0 (2,5)	0,5±0,0 (2,7)	4,0±0,1 (2,9)
	20RSPC	0,3±0,0 (5,1)	0,5±0,0 (4,3)	3,8±0,1 (3,7)

Nota: A_{10} - Taxa de absorção de água por capilaridade aos 10 minutos do início do ensaio; A_{90} - Taxa de absorção de água por capilaridade aos 90 minutos do início do ensaio; Cc- Coeficiente de capilaridade; Sd- Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Verifica-se, na Tabela 32, que a taxa de absorção de água por capilaridade aos 10 e 90 minutos apresentaram valores próximos nas argamassas, independente do teor de RSPC e da relação a/c estudada. As argamassas autoadensáveis, com relação a/c 0,57, apresentaram menores coeficientes de capilaridade quando comparadas às argamassas com relação a/c 0,70. A mistura 5RSPC (a/c 0,57) apresentou uma redução no coeficiente de capilaridade, aos 28 dias, em torno de 26% em relação à mistura 5RSPC com relação a/c 0,70. Tal fato já era esperado, pois quanto maior a relação a/c maior é a porosidade aberta do material.

Em relação à influência do RSPC na absorção de água por capilaridade, observa-se que à medida que aumenta o teor de substituição parcial do agregado miúdo natural por RSPC na mistura, ocorreu uma redução no coeficiente de capilaridade em ambas as relações a/c estudadas. Na mistura 20RSPC (a/c 0,57), o coeficiente de capilaridade diminuiu em 21%, em relação à mistura 5RSPC (a/c 0,57). Este comportamento já era esperado, comprovando a ação da substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC, que propiciou um preenchimento de vazios, devido a melhoria do esqueleto granular das misturas, em função da sua finura, diminuindo a interconectividade entre os poros formados.

Os resultados do coeficiente de capilaridade foram analisados estatisticamente, por meio da análise de variância (ANOVA). As variáveis analisadas foram: relação a/c (0,70 – 0,57), teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC (5 - 10 - 15 - 20%) (Tabela 33).

Tabela 33 Análise de variância dos efeitos da relação a/c e do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC sobre o coeficiente de capilaridade das argamassas autoadensáveis aos 28 dias

Fator	GDL	MQ	Fc	F _{0,05}	Sg
A- Relação a/c	1	15,5204	459,30	4,494	S
B- RSPC	3	1,2250	36,25	3,239	S
AB	3	0,0321	0,95	3,239	NS
ERRO	16	0,0338			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_c- valor calculado de F; F_{0,05}- Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; Sg - Significância; S - Significativo; NS - Não significativo.

Por meio da análise de variância, verificou-se que tanto a relação a/c quanto o teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC influenciam significativamente o coeficiente de capilaridade. A Figura 64 mostra este comportamento de maneira mais visível, na qual os resultados do coeficiente de capilaridade são apresentados em função da variável significativa do teor de substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC. A elevada finura do RSPC (5,7µm) contribuiu para uma maior densificação da microestrutura, ocasionando uma redução na porosidade aberta das argamassas autoadensáveis. Enquanto, o aumento da relação a/c gera um efeito contrário.

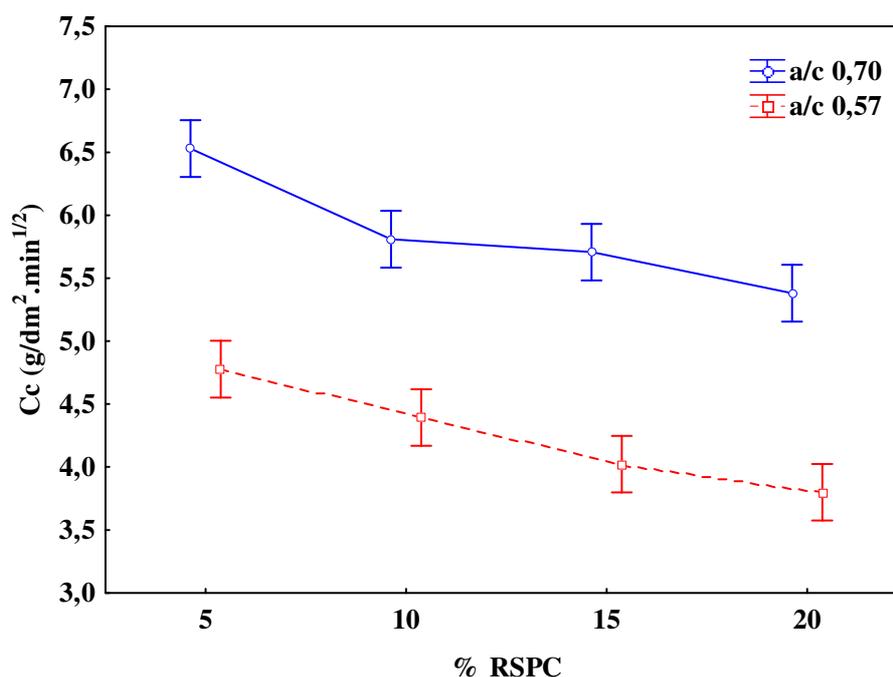


Figura 64 Curvas de comportamento do coeficiente de capilaridade nas argamassas autoadensáveis, aos 28 dias, devido à influência das variáveis estudadas: relação a/c e teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC

5.2 ESTUDO DA FASE CONCRETO

Após as definições dos teores de agregado miúdo e ajustes no aditivo SP na fase argamassa, passou-se para a próxima etapa do estudo que foi a produção do CAA.

Nessa fase, foi definido o teor de agregado graúdo, o ajuste final do aditivo SP e a verificação das propriedades do CAA, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido.

Os percentuais dos materiais obtidos na produção das argamassas autoadensáveis foram mantidos para a produção do CAA. Além disso, foi adotado o teor de 10% de substituição parcial de agregado miúdo natural pelo RSPC, pois este teor apresentou a maior resistência à compressão axial na argamassa autoadensável nas duas relações a/c estudadas (0,57 e 0,70), bem como resultados satisfatórios do ponto de vista das propriedades reológicas estudadas.

5.2.1 Ajuste do teor de agregado graúdo e do aditivo SP

Nesta fase, os CAA foram produzidos com diferentes teores de agregado graúdo para cada relação a/c adotada (0,57 e 0,70). O volume do agregado graúdo estabelecido variou de 27 a 31,5% em relação ao volume total de concreto, com incrementos de 1,5%, de acordo com a metodologia de Melo (2005), conforme descrito no item 4.2.1. O teor de agregado graúdo foi determinado em função dos ensaios de espalhamento e do tempo de escoamento no funil V, sendo adotado o intervalo de 550-750mm para o diâmetro de espalhamento e o tempo de escoamento menor que 9s para o funil V.

O teor de aditivo SP inicial para a produção do CAA foi o valor obtido com o estudo na fase argamassa (Tabela 25, item 5.1.3), acrescido de 0,05%, em relação à massa de cimento, com incrementos de 0,05%. No decorrer dessa etapa, verificou-se que este ajuste poderia ser com incrementos de 0,1% para o aditivo SP utilizado, sendo esse o procedimento adotado. O aditivo SP foi ajustado para cada teor de agregado graúdo, de acordo com as características requeridas para o CAA (capacidade de preenchimento, habilidade passante e resistência à segregação).

Assim como ocorreu na fase argamassa, o ensaio de espalhamento serviu como critério de decisão para realização do ensaio do funil V. Ou seja, este ensaio só foi executado quando o CAA atingia o limite definido para o diâmetro de espalhamento (550-750mm). O ajuste do teor de agregado graúdo era considerado finalizado quando o CAA apresentava um diâmetro de espalhamento dentro da faixa estabelecida e tempo de escoamento do funil V menor que 9s.

A Tabela 34 apresenta os valores encontrados nos ensaios de espalhamento e do tempo de escoamento no funil V para cada teor de agregado graúdo (27,0 - 28,5 - 30,0 - 31,5) e relação a/c (0,70 – 0,57) estudados.

Tabela 34 Resultados dos ensaios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para definição do teor de agregado graúdo para produção do CAA

a/c	RSPC (%)	AG (%)	SP (%)	D (mm)	F- V t (s)	
0,70	10	27,0	0,60	545	nr	
			0,65	537	nr	
			0,70	610	2,89	
		28,5	0,70	550	nr	
			0,80	584	4,09	
			30,0	0,70	450	nr
	0,80	539		nr		
	27,0	0,45		451	nr	
		0,50	468	nr		
		0,60	476	nr		
	0,57	10	28,5	0,65	493	nr
				0,40	400	nr
0,50				491	nr	
30,0			0,60	480	nr	
			0,70	520	nr	
			0,80	561	4,15	
			0,60	485	nr	
			0,70	533	nr	
			0,80	583	3,50	

Nota: AG- teor de agregado graúdo sobre o volume de CAA; SP- aditivo superplastificante; D- diâmetro médio no ensaio de espalhamento; F-V- tempo de escoamento no ensaio no funil V modificado.

Com os resultados obtidos nas misturas com relação a/c 0,70, observou-se que à medida que aumentou o teor de agregado graúdo em relação ao volume total do concreto, ocorreu uma redução no diâmetro do espalhamento, implicando em um aumento no consumo de aditivo SP. Este comportamento já era esperado, pois o aumento do volume de agregado graúdo na mistura do CAA ocasiona uma diminuição na sua fluidez.

A mistura de CAA com teor de 31,5% de agregado graúdo, em relação ao volume do concreto, não foi realizada devido ao alto consumo de aditivo SP apresentado nas misturas com menores teores de agregado graúdo. Constatou-se que seria uma mistura que poderia apresentar problemas de segregação e/ou exsudação, tornando este CAA inviável.

O teor ideal de agregado graúdo para a relação a/c 0,70 foi de 28,5%, do volume total do concreto, com teor de aditivo SP de 0,8%, em relação à massa de cimento. A mistura com teor de 27,0% de agregado graúdo e teor de 0,7% de aditivo SP apresentou um diâmetro de espalhamento dentro da faixa adotada, mas o tempo de escoamento no funil V não atingiu o tempo mínimo estabelecido ($< 9s$). Além disso, este CAA apresentou segregação no ensaio de espalhamento como mostra a Figura 65a. A mistura de CAA com teor de 30,0% de agregado graúdo e teor de 0,8% de aditivo SP, não alcançou os limites mínimos definidos para os ensaios de espalhamento e tempo de escoamento no funil V, além de apresentar segregação, como mostra a Figura 65b.



Figura 65 Comportamento do CAA (a/c 0,70) no ensaio de espalhamento durante o ajuste de agregado graúdo: (a) 27,0% de agregado graúdo; (b) 30,0% de agregado graúdo

O teor ideal de agregado graúdo dos concretos com relação a/c 0,57 foi de 30%, em relação ao volume de concreto, e teor de 0,8% de SP, em relação à massa de cimento. Esta mistura atendeu aos requisitos de autoadensabilidade propostos, determinados através dos ensaios de espalhamento e funil V. A mistura do CAA com 27% de teor de agregado graúdo não atingiu o limite mínimo especificado para o ensaio de espalhamento até o teor de 0,65% de SP. O CAA com teor de 28,5% de agregado graúdo e 0,8% de SP obteve resultados dentro da faixa definida para os ensaios realizados, mas segundo a metodologia adotada (MELO, 2005), o teor de agregado graúdo ideal é o maior teor possível deste material.

5.2.2 Definição e proporção do CAA

Após a definição do teor de agregado graúdo e do ajuste final de aditivo SP, foram produzidos a mistura de CAA com substituição parcial do agregado miúdo por 10% de RSPC (chamada de C-RSPC), para cada relação a/c adotada (0,70-0,57). Com base no método proposto por Melo (2005) não é necessário produzir a mistura de CAA sem o resíduo. Contudo, com o objetivo de fazer uma melhor avaliação do comportamento do resíduo, neste estudo foi executada a mistura CAA de referência sem o resíduo (chamada de C-R). Vale salientar que, para produzir a mistura C-R, não foi realizado um estudo específico das melhores proporções de agregado graúdo e teor de SP. A mistura C-R foi produzida utilizando-se o traço da mistura C-RSPC, sem que houvesse substituição das areias por 10%RSPC, para cada relação a/c estudada. A Tabela 35 apresenta a composição final do CAA com resíduo, para cada relação a/c estudada, mostrando os teores de agregado miúdo e graúdo, teor de aditivo SP e percentual de substituição parcial do agregado miúdo pelo RSPC.

Tabela 35 Composição final do CAA: teor de agregado miúdo e graúdo, aditivo SP e percentual de substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC

a/c	RSPC (%)	AM (%)	AG (%)	SP (%)
0,70	10	50	28,5	0,8
0,57	10	45	30,0	0,8

Nota: AM- teor de agregado miúdo natural, em relação ao volume de argamassa; AG- teor de agregado graúdo, em relação ao volume de concreto; SP- aditivo superplastificante.

O teor de aditivo SP, na fase concreto, excedeu o teor considerado ideal no método descrito por Melo (2005), que era de 0,3%. Contudo, o resultado encontrado neste estudo foi semelhante ao que ocorreu nos estudos de Kraus (2006), Ferraz (2009) e Santos (2010). Tal fato demonstra que a inserção do agregado graúdo na mistura modifica a relação entre os materiais. Assim, a definição dos teores de materiais não pode ser completamente estimada na fase argamassa, devendo considerar o teor de agregado miúdo, adição, cimento e a relação a/c empregada na mistura, sendo indispensável a avaliação das propriedades de autoadensabilidade do concreto através dos ensaios especificados para o CAA no estado fresco. Além disso, para cada tipo de aditivo SP utilizado, principalmente com diferentes bases químicas, com diferentes tipos de cimento, esse comportamento também deve variar.

Após os ajustes de teores de materiais, foram definidos os traços para a produção do CAA. Na Tabela 36 são apresentados os traços unitários, em massa e volume, e consumo de materiais para a produção de 1m^3 de CAA.

Tabela 36 Traço unitário, em massa e volume, e consumo de materiais para a produção de 1m^3 de CAA

Dosagem	Mistura	a/c	a/f	C	RSPC	AF	AM	B	Água	%SP
Traço, em massa		0,70	0,70	1,00	0,00	1,91	0,82	2,27	-	0,80
Consumo (kg)	C-R	0,70	0,70	343	0	656	282	778	240	2,74
Traço, em volume		2,05	2,05	1,00	0,00	2,14	0,92	2,44	-	
Consumo (l)		2,05	2,05	117	0	250	108	285	240	
Traço, em massa		0,70	0,58	1,00	0,28	1,72	0,74	2,27	-	0,80
Consumo (kg)	C-RSPC	0,70	0,58	343	96	590	253	778	240	2,74
Traço, em volume		2,05	1,67	1,00	0,31	1,93	0,83	2,44	-	
Consumo (l)		2,05	1,67	117	36	225	97	285	240	
Traço, em massa		0,57	0,57	1,00	0,00	1,37	0,58	1,94	-	0,80
Consumo (kg)	C-R	0,57	0,57	423	0	579	245	819	241	3,38
Traço, em volume		1,67	1,67	1,00	0,00	1,53	0,65	2,08	-	
Consumo (l)		1,67	1,67	144	0	221	94	300	241	
Traço, em massa		0,57	0,50	1,00	0,20	1,23	0,52	1,94	-	0,80
Consumo (kg)	C-RSPC	0,57	0,50	423	84	521	221	819	241	3,38
Traço, em volume		1,67	1,43	1,00	0,22	1,38	0,59	2,08	-	
Consumo (l)		1,67	1,43	144	32	199	85	300	241	

Nota: a/c- Relação água/cimento; a/f- Relação água/finos ; C- Cimento; AF- Areia fina; AM- Areia média; B- Brita. Obs.: No cálculo da relação a/f foi considerado apenas 75% do RSPC que corresponde à fração abaixo de $12\mu\text{m}$.

Comparando estes resultados com o proporcionamento de materiais para o CAA encontrado na literatura e exibido na Tabela 11 do item 2.6, verificou-se que:

- a relação a/f foi excedida em todas as misturas (limite superior de 1,10, em volume). Contudo, é importante lembrar que neste estudo o resíduo utilizado substituiu parcialmente os agregados miúdos, diferente do que acontece nos estudos de Melo (2005), Santos (2010), Giroto (2012) e Petry (2015), por exemplo, nos quais o resíduo substituiu o cimento Portland.
- o consumo de finos para a mistura com a/c 0,70 foi baixo, considerando a faixa de consumos apresentada na literatura (400-600kg). As misturas com relação a/c 0,57 apresentaram o consumo de finos dentro da faixa;
- o consumo de cimento foi inferior ao limite máximo estabelecido de 450kg para 1m^3 de concreto;

- o teor de agregado miúdo foi de 45 e 50% para a relação a/c 0,57 e 0,70 respectivamente. Estes teores estão dentro da faixa definida (35-50% do volume da argamassa);
- os teores de agregado graúdo definidos (28,5 e 30,0%) estão dentro da faixa estabelecida pela literatura (27-36% do volume do concreto).

Com base nesses resultados, foram elaboradas as curvas granulométricas dos CAA, considerando apenas os constituintes sólidos, para cada relação a/c estudada (0,70 - 0,57). As curvas estão apresentadas na Figura 66.

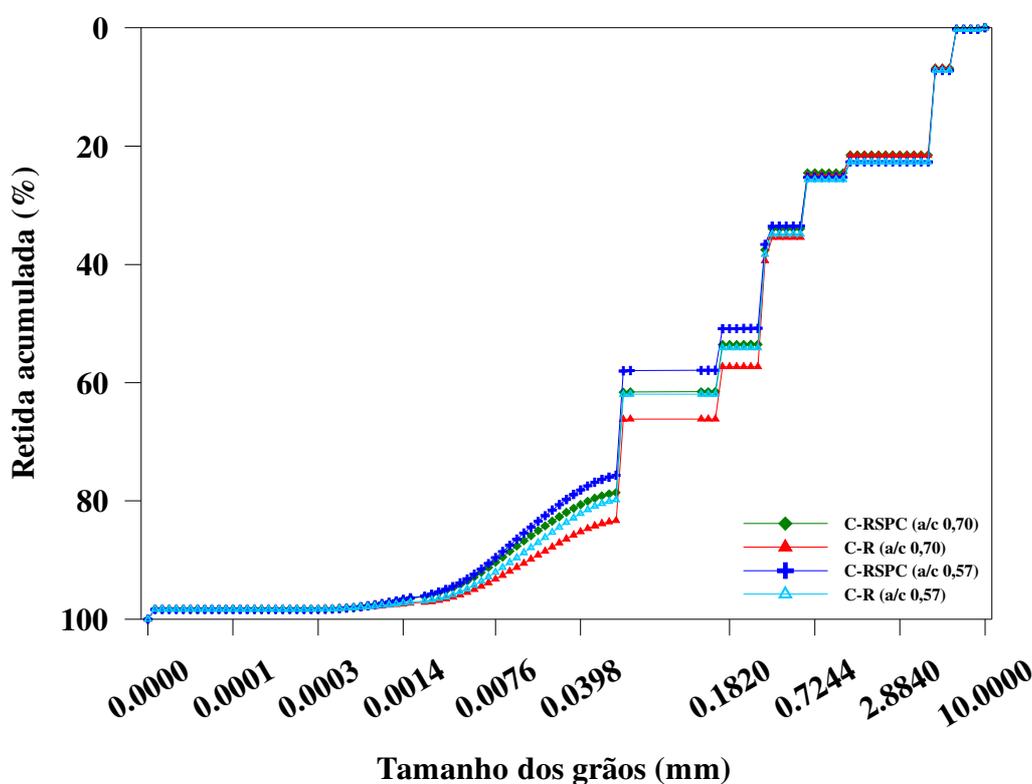


Figura 66 Curva granulométrica dos sólidos constituintes do CAA

Observa-se que ocorreu uma complementação de tamanho das partículas sólidas do CAA, visto que os agregados possuem grãos com dimensão na faixa acima 0,1mm, que é o limite superior do tamanho das partículas de cimento e RSPC. As curvas são equivalentes, demonstrando que esse comportamento é observado em todas as misturas do CAA. No estudo de Melo (2005), a curva granulométrica dos sólidos constituintes do CAA apresentou-se mais contínua, não apresentando as discontinuidades observadas nos tamanhos dos grãos de 0,0794 e 0,3000mm, as quais indicam uma tendência à segregação das misturas estudadas, como aconteceu na curva da Figura 66.

5.2.3 Propriedades dos CAA no estado fresco

O CAA produzido foi avaliado, no estado fresco, quanto à capacidade de preenchimento, resistência ao bloqueio e resistência à segregação, por meio dos ensaios de espalhamento (NBR 15823-2, ABNT, 2010), funil V (NBR 15823-5, ABNT, 2010), anel J (NBR 15823-3, ABNT, 2010), caixa L (NBR 15823-4, ABNT, 2010) e coluna de segregação (NBR 15823-6, ABNT, 2010). Os limites adotados foram descritos na Tabela 21, mostrada no item 4.2.1.

A Tabela 37 apresenta os resultados dos ensaios realizados no CAA, no estado fresco, para as relações a/c estudadas (0,57 e 0,70). Os valores obtidos estão dentro da faixa estabelecida pela NBR 15823-1 (ABNT, 2010) para todas as misturas avaliadas.

Tabela 37 Resultados dos ensaios realizados no CAA de referência (C-R) e CAA com substituição parcial do agregado miúdo natural por RSPC (C-RSPC), no estado fresco

Mistura	a/c	D (mm)	F-V t(s)	A-J (mm)		HP	SR(%)
				d _F	d		
C-R	0,70	562	nr	558	04	nr	14
C-RSPC		589	3,60	575	14	0,82	06
C-R	0,57	630	nr	619	11	nr	09
C-RSPC		608	4,40	606	02	0,83	11

Nota: D- diâmetro médio obtido no ensaio de espalhamento; F-V- tempo de escoamento no funil V modificado; A-J- espalhamento no Anel J; d_F- diâmetro final obtido no ensaio com o anel J; d - diferença entre os diâmetros de espalhamento obtido no ensaio de espalhamento e no anel J; HP - habilidade passante determinada pelo método da caixa L; SR - resistência à segregação do concreto obtida pelo método da coluna de segregação; nr - ensaio não realizado na mistura.

Analisando os resultados obtidos, verificou-se que quanto maior a relação a/c, menor foi o diâmetro de espalhamento. Esta redução foi de 11% para o C-R (a/c 0,70) em comparação ao C-R (a/c 0,57). Tal fato pode estar relacionado ao menor consumo de agregado miúdo e maior teor de pasta presente na mistura C-R (a/c 0,57). A pasta lubrificou, e pode ter reduzido o atrito entre as partículas dos agregados, promovendo uma maior fluidez da mistura. Este comportamento também foi observado nos estudos de Kraus (2006).

Observou-se que o uso do RSPC reduziu o diâmetro de espalhamento do C-RSPC (0,57) em 3% em relação a mistura C-R (a/c 0,57), ou seja, o resíduo aumentou visivelmente a coesão das misturas. Este comportamento já havia sido observado no estudo da fase argamassa. Os finos adicionados à mistura adsorvem parte da água de amassamento, limitando o espalhamento do CAA, conforme também relatado por Kumayama (2014).

Em referência ao ensaio no funil V, notou-se uma redução do tempo de escoamento do C-RSPC com o aumento da relação a/c. O C-RSPC (a/c 0,57) obteve um tempo de escoamento 22% maior em comparação ao C-RSPC (a/c 0,70). O aumento do teor de água reduziu a viscosidade plástica da mistura do CAA, e por isso, promoveu a redução do tempo de escoamento.

Com base nos resultados apresentados, pode-se verificar que o uso do RSPC tornou o concreto C-RSPC (a/c 0,57) mais coeso, ocasionando uma redução na diferença entre o diâmetro do espalhamento obtido nos ensaios de espalhamento e anel J (Figura 67). O aumento da relação a/c promoveu um aumento na relação água/finos fazendo com que houvesse uma redução da viscosidade. Consequentemente, o C-RSPC (a/c 0,70) apresentou uma maior habilidade passante, em fluxo livre em relação ao C-R (a/c 0,70).

A análise dos resultados obtidos no ensaio com a caixa L permite verificar que, para ambas as relações a/c estudadas (0,70-0,57), os concretos apresentaram uma habilidade passante, em fluxo confinado, adequada, apontando para um CAA com fluidez e sem bloqueio. Esse comportamento também foi observado nos estudos de Pereira (2016).

O C-R (a/c 0,70) apresentou a maior segregação, contrariando o comportamento esperado, pois este concreto apresenta uma maior quantidade de agregado miúdo comparado ao C-R (a/c 0,57). Segundo Fochs (2011), o maior valor de segregação está associado à menor quantidade de areia na mistura, como foi observado nas misturas com RSPC. A mistura C-RSPC (a/c 0,57) apresentou maior segregação em comparação à mistura C-RSPC (a/c 0,70) que possui um volume de AM de 50%.

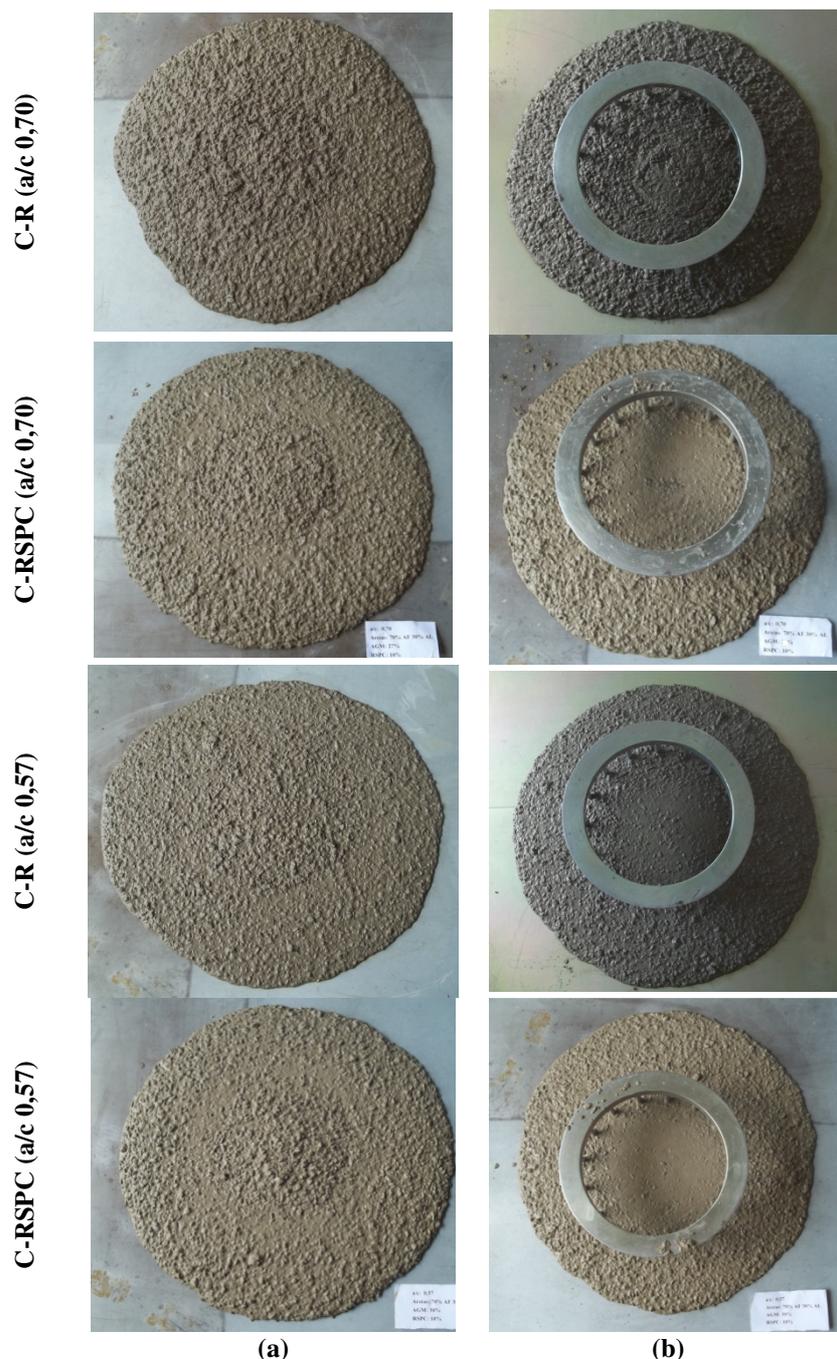


Figura 67 Aspecto do CAA nos ensaios: (a) Espalhamento; (b) Anel J

5.2.4 Propriedades dos CAA no estado endurecido

O CAA foi avaliado no estado endurecido por meio do ensaio de resistência à compressão axial (NBR 5739, ABNT, 2007), resistência à tração por compressão diametral (NBR 7222, ABNT, 2011) e absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica (NBR 9778, ABNT, 2009). A produção, desmoldagem e cura do CAA foram realizadas conforme descrito no item 4.2.1.

5.2.4.1 Resistência à compressão axial

A Tabela 38 apresenta os resultados médios de resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos CAA estudados. Os resultados individuais deste ensaio são apresentados no Apêndice 7.

Tabela 38 Resultados médios de resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias, desvios padrão e coeficientes de variação para os CAA estudados

a/c	Mistura	$f_{c7} \pm Sd$ (CV) MPa \pm MPa (%)	$f_{c28} \pm Sd$ (CV) MPa \pm MPa (%)	f_{c28}/f_{c7}	$f_{c28}/f_{c28(R)}$
0,70	C-R	17,0 \pm 0,4 (2,1)	22,3 \pm 0,4 (1,8)	1,31	-
	C-RSPC	13,5 \pm 0,7 (5,0)	19,1 \pm 0,2 (0,9)	1,41	0,86
0,57	C-R	24,1 \pm 0,3 (1,1)	31,3 \pm 1,0 (3,2)	1,30	-
	C-RSPC	21,3 \pm 0,3 (1,6)	27,6 \pm 0,7 (2,4)	1,30	0,88

Nota: f_{c7} - Resistência média à compressão axial, aos 7 dias; f_{c28} - Resistência média à compressão axial, aos 28 dias; $f_{c28(R)}$ - Resistência média à compressão axial do CAA de referência, aos 28 dias; Sd - Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação.

Com base nos resultados apresentados, pode-se verificar que os CAA com relação a/c 0,57 apresentaram as maiores resistências à compressão axial comparados aos CAA com relação a/c 0,70. A mistura C-RSPC (a/c 0,57), aos 28 dias, apresentou uma resistência à compressão axial cerca de 45% maior que a resistência da mistura C-RSPC (0,70). Tal comportamento pode estar relacionado à maior quantidade de cimento e maior teor de agregado graúdo, além da menor quantidade de água, nessa mistura em comparação ao CAA com relação a/c 0,70.

Observou-se que o ganho de resistência com a idade de hidratação aconteceu em todas as misturas estudadas, sendo maior para os CAA com relação a/c 0,70. O maior ganho de resistência com a idade de hidratação ocorreu na mistura C-RSPC (a/c 0,70), cerca de 41%, aos 28 dias. Esse comportamento foi o mesmo verificado na fase argamassa desse estudo (item 5.1.4.1) e também observado nos estudos de Melo (2005).

Em relação à influência do RSPC na resistência dos CAA estudados, verifica-se uma redução de f_c em ambas as relações a/c analisadas. A mistura C-RSPC (a/c 0,57), aos 28 dias, apresentou a menor redução na resistência, cerca de 12% em relação à mistura de referência (C-R a/c 0,57).

Para confirmar se o efeito da influência das variáveis estudadas sobre os resultados da resistência à compressão axial é significativo, foi realizada a análise de variância (ANOVA). As variáveis verificadas sobre a resistência foram: relação a/c (0,70-0,57),

idade (7-28 dias) e uso do resíduo (RSPC). O resultado da ANOVA é mostrado na Tabela 39.

Tabela 39 Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e RSPC sobre a resistência à compressão axial dos CAA estudados

Fator	GDL	MQ	F_c	F_{0,05}	Sg
A- Relação a/c	1	392,04	1332,72	4,494	S
B- idade	1	220,83	750,69	4,494	S
C- RSPC	1	65,34	222,12	4,494	S
AB	1	2,94	9,99	4,494	S
AC	1	0,03	0,09	4,494	NS
BC	1	0,08	0,28	4,494	NS
ABC	1	0,48	1,64	4,494	NS
ERRO	16	0,29			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_c - Valor calculado de F; F_{0,05} - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; Sg- Significância, S – Significativo; NS- Não significativo.

Os resultados da ANOVA mostram que todas as variáveis estudadas, bem como a interação entre a relação a/c e a idade têm efeito significativo sobre a resistência à compressão axial dos CAA. A relação a/c é o principal fator de influência na variação da resistência à compressão do CAA, pois apresentou o maior valor do F_{calculado} (1332,72). A relação a/c determina a porosidade da pasta de cimento, ou seja, quando a relação a/c aumenta ocorre um aumento da porosidade favorecendo o enfraquecimento da matriz.

Para compreender melhor o efeito das variáveis estudadas na resistência à compressão axial, observa-se o comportamento dos CAA no gráfico de interação apresentado na Figura 68.

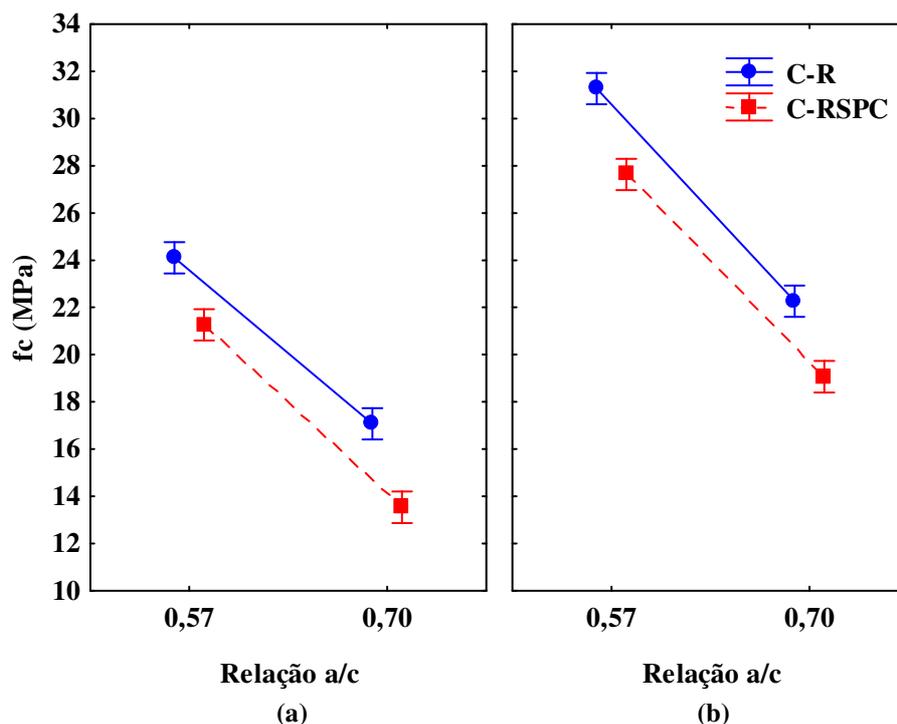


Figura 68 Influência das variáveis estudadas (relação a/c, RSPC e idade) na resistência à compressão axial dos CAA: (a) aos 7 dias; (b) aos 28 dias

Com base nos gráficos da Figura 68, verifica-se que a substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC causou uma redução na resistência à compressão axial dos CAA, independente da relação a/c e da idade avaliada. Tal fato pode estar relacionado à maior superfície específica da mistura com RSPC, devido ao maior teor de finos, causando uma redução na relação água/finos. A maior superfície específica do resíduo reduz a quantidade de água disponível na mistura para dispersar os grãos de cimento, e assim, há uma redução na capacidade de hidratação dessas partículas devido a sua maior floculação nas misturas com RSPC. Nas misturas de referência a dispersão dos grãos contribuiu com os maiores índices de resistência alcançados. Além disso, o RSPC pode não ter preenchido de forma adequada os espaços entre os grãos de areia, não ocorrendo o empacotamento granulométrico esperado pelo uso do resíduo. Assim, a resistência da zona de transição foi afetada pelo volume de vazios, o que foi confirmado no ensaio de absorção de água por imersão. Bastos (2014) observou um comportamento semelhante em concreto convencional vibrado com substituição parcial do cimento pelo RSPC. O autor atribuiu tal fato ao efeito fíler do resíduo não ser preponderante sobre o efeito cimentante do cimento.

Sabe-se que a distribuição granulométrica influencia, também, na quantidade de microfissuras na zona de transição. Segundo Mehta e Monteiro (2014), uma alteração na

distribuição granulométrica do agregado, pode alterar a resistência do concreto quando a consistência da mistura é alterada.

5.2.4.2 Resistência à tração por compressão diametral

Os resultados médios de resistência à tração por compressão diametral, aos 7 e 28 dias, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos CAA estudados são mostrados na Tabela 40. No Apêndice 8 são apresentados os resultados individuais deste ensaio.

Tabela 40 Resultados médios de resistência à tração por compressão diametral, aos 7 e 28 dias, desvios padrão e coeficientes de variação para os CAA estudados

a/c	Mistura	ft'D ₇ ±Sd (CV) MPa±MPa (%)	ft'D ₂₈ ±Sd (CV) MPa±MPa (%)	ft'D ₂₈ /ft'D ₇	ft'D ₂₈ /ft'D _{28(R)}	ft'D ₂₈ /f _{c28}
0,70	C-R	2,10±0,00 (0,07)	2,43±0,06 (2,55)	1,16		0,11
	C-RSPC	1,36±0,04 (3,02)	2,32±0,11 (4,94)	1,71	0,95	0,12
0,57	C-R	2,78±0,12 (4,41)	3,18±0,32 (9,97)	1,14		0,10
	C-RSPC	1,60±0,04 (2,66)	2,87±0,18 (6,38)	1,79	0,90	0,10

Nota: ft'D₇ - Resistência média à tração por compressão diametral, aos 7 dias; ft'D₂₈ - Resistência média à tração por compressão diametral, aos 28 dias; ft'D_{28(R)} - Resistência média à tração por compressão diametral do CAA de referência (sem resíduo), aos 28 dias; Sd- Desvio padrão; CV - Coeficiente de variação.

Com base nos resultados apresentados, observa-se que os CAA com relação a/c 0,57 obtiveram maiores resistências à tração por compressão diametral quando comparados aos CAA com relação a/c 0,70, assim como aconteceu no ensaio de resistência à compressão axial desse estudo (item 5.2.4.1). O aumento na resistência à tração da mistura C-R (a/c 0,57) foi cerca de 31% em comparação à mistura C-R (a/c 0,70), aos 28 dias.

A resistência à tração aumentou com a idade de hidratação para as duas relações a/c estudadas (0,70 - 0,57). Na mistura C-RSPC (a/c 0,57), o aumento da tração, aos 28 dias, foi de 79%. A relação entre tração e compressão (ft'D/fc) nas misturas C-RSPC é de 10 e 12%, para as relações 0,57 e 0,70, respectivamente. Assim, como ocorre no concreto sem resíduo, a relação ft'D/fc aumenta com o aumento da relação a/c.

Em relação à influência do RSPC na resistência à tração dos CAA estudados, observa-se uma redução de ft'D nas misturas com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC, em ambas as relações a/c analisadas (0,70 e 0,57). A mistura C-RSPC (a/c 0,57), aos 28 dias, apresentou uma redução na resistência em torno de 10% em relação à mistura C-R (a/c 0,57), enquanto para a relação 0,70 a redução foi de

apenas 5%, comparando as mesmas misturas. A análise de variância (ANOVA) foi realizada para avaliar se havia efeito significativo da substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC sobre os resultados da resistência à tração por compressão diametral. As variáveis verificadas sobre a resistência à tração foram: relação a/c (0,70 - 0,57), idade (7-28 dias) e o teor de RSPC. A Tabela 41 apresenta o resultado obtido com a ANOVA.

Tabela 41 Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e uso do RSPC sobre a resistência à tração por compressão diametral dos CAA estudados

Fator	GDL	MQ	F _c	F _{0,05}	Sg
A- Relação a/c	1	1,17723	58,459	5,318	S
B- idade	1	2,28010	113,227	5,318	S
C- RSPC	1	1,42803	70,914	5,318	S
AB	1	0,02723	1,352	5,318	NS
AC	1	0,08410	4,176	5,318	NS
BC	1	0,52563	26,102	5,318	S
ABC	1	0,01960	0,973	5,318	NS
ERRO	8	0,02014			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_c - Valor calculado de F; F_{0,05} - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; Sg- Significância, S - Significativo; NS- Não significativo.

Por meio da análise de variância, constatou-se que todas as variáveis estudadas têm efeito significativo sobre a resistência à tração por compressão diametral dos CAA. As interações entre variáveis não são significativas, exceto para a interação da idade com o teor de RSPC. A idade de hidratação é o principal fator de influência na variação da resistência à tração estudada no CAA, pois apresentou o maior F_{calculado} (133,227). O comportamento dos CAA é representado através do gráfico de interação das variáveis estudadas na resistência à tração por compressão diametral (Figura 69).

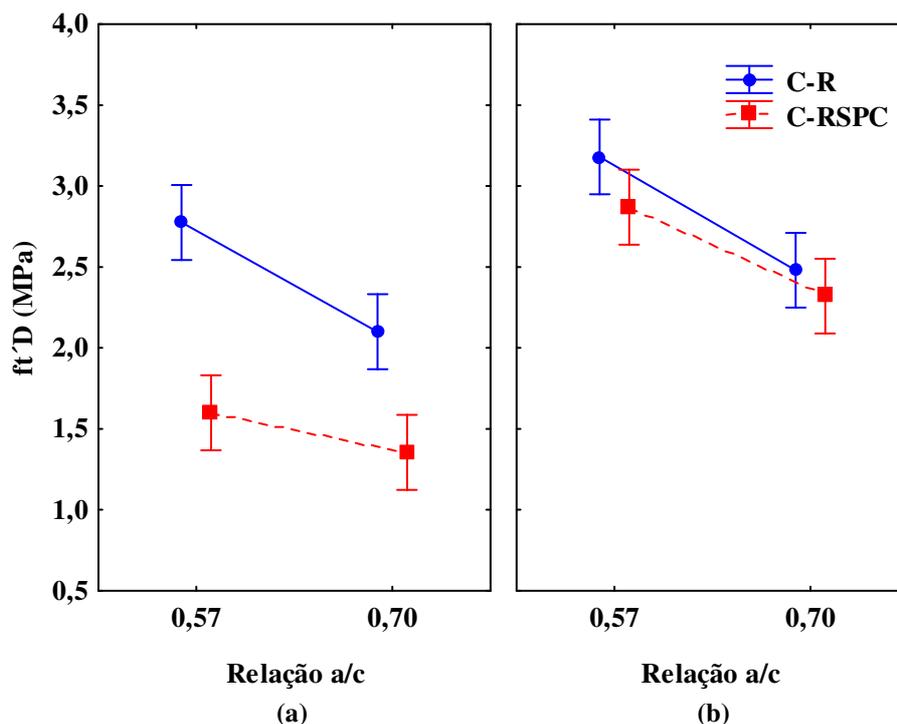


Figura 69 Influência das variáveis estudadas (relação a/c, uso do RSPC e idade na resistência à tração por compressão diametral dos CAA: (a) aos 7 dias; (b) aos 28 dias

Com o aumento da idade de hidratação, observa-se que as misturas C-RSPC, para ambas as relações a/c estudadas, apresentaram um maior ganho de resistência à tração por compressão diametral, em comparação com às misturas sem o resíduo (C-R). A alta finura do RSPC pode ter contribuído para o ganho na resistência a tração com o aumento da idade de hidratação. Esse comportamento também foi observado por De Schutter (2011) e Gesoglu *et al.* (2012).

Verificou-se que as misturas C-RSPC, em ambas as relações estudadas, apresentaram desempenho inferior ao CAA de referência (C-R). Esta redução na resistência à tração, também foi observada nos estudos de Gonçalves (2000), em concreto convencional com 20% de substituição parcial do cimento por resíduo de corte de granito (RCG). O autor atribuiu esse comportamento à maior dispersão dos produtos hidratados, diminuindo a ligação entre os mesmos e causando um enfraquecimento na estrutura da matriz. Parra *et al.* (2011) atribuíram esta redução da resistência à tração do CAA a fatores que afetam a interface pasta-agregado, como o elevado teor de finos na mistura e uso de aditivos superplastificantes.

5.2.4.3 Absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica

A Tabela 42 mostra os resultados médios de absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos CAA estudados. Os valores individuais deste ensaio são apresentados no Apêndice 9.

Tabela 42 Resultados da absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, bem como o desvio padrão e o coeficiente de variação dos CAA estudados

a/c	Mistura	A±Sd (CV) %±% (%)	IV±Sd (CV) %±% (%)	Massa específica - g/cm ³ ±g/cm ³ (%)		
				MEs±Sd (CV)	MEsat±Sd(CV)	MEreal±Sd (CV)
0,70	C-R	8,3±0,1 (1,4)	16,2±0,3 (2,0)	1,96±0,01 (0,7)	2,12±0,02 (0,8)	2,33±0,03 (1,1)
	C-RSPC	8,8±0,4 (4,6)	18,6±0,7 (3,6)	2,11±0,02 (0,9)	2,30±0,01 (0,5)	2,59±0,00 (0,8)
0,57	C-R	7,8±0,1 (1,4)	14,9±0,4 (2,5)	1,92±0,02 (1,2)	2,07±0,03 (1,3)	2,26±0,04 (1,6)
	C-RSPC	8,7±0,3 (2,9)	18,4±0,4 (2,3)	2,12±0,01 (0,7)	2,31±0,01 (0,4)	2,60±0,00 (0,2)

Nota: A - Absorção de água por imersão; IV – índice de vazios; MEs – massa específica seca; MEsat – massa específica saturada; MEreal – massa específica real; Sd - desvio padrão; CV – coeficiente de variação.

De um modo geral, o valor da taxa de absorção de água e do índice de vazios aumentou com o aumento da relação a/c. A mistura C-R (a/c 0,70) apresentou uma absorção de água cerca de 1.06 vezes maior que a mistura C-R (a/c 0,57). O volume e o tamanho de vazios capilares dependem da quantidade de água adicionada na mistura e do grau de hidratação do cimento, quanto maior a relação água/cimento maior a porosidade aberta (CANOVAS, 2002; MEHTA; MONTEIRO, 2014).

Observa-se que os CAA com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC apresentaram uma maior taxa de absorção de água e índice de vazios em ambas as relações a/c estudadas (0,70 - 0,57). Na mistura C-RSPC (a/c 0,57) esse aumento foi cerca de 1.12 vezes para a absorção de água e de 1.23 para o índice de vazios, em relação à mistura C-R de mesma relação a/c. Esperava-se que houvesse uma maior contribuição do RSPC na diminuição da permeabilidade e uma redução na porosidade total do CAA. De acordo com Castro e Pandolfelli (2009), a porosidade está relacionada com a densidade de empacotamento das partículas na mistura. Assim, o RSPC pode não ter influenciado a densidade de empacotamento das partículas do sistema, que era o comportamento esperado devido ao tamanho dos grãos do resíduo utilizado nesse estudo. Tal fato pode ser devido a fatores como: distribuição granulométrica inadequada na mistura, morfologia da partícula do RSPC e sua porosidade interna, dispersão inadequada das partículas finas. O empacotamento adequado, com menor porosidade, pode ser alcançado se os vazios existentes na mistura forem preenchidos por partículas

menores que os vazios já existentes. Mas, se as partículas introduzidas forem maiores que os vazios existentes, surgirão novos vazios, aumentando a porosidade e reduzindo a resistência (CASTRO; PANDOLFELLI, 2009). O RSPC substituiu os agregados miúdos naturais que possuem partículas bem maiores que o resíduo. Contudo, a redução da relação água/finos (a/f) pode ter contribuído para promover uma dispersão menos eficiente do resíduo, e assim, um aumento da porosidade total, devido a presença de grãos floculados de maior dimensão.

Com relação aos resultados de massa específica, verifica-se que as misturas apresentam valores próximos entre si, independente da relação a/c estudada. O uso do RSPC aumentou o valor da massa específica em 11 e 15% nas misturas C-RSPC em relação à mistura C-R, para as duas relações a/c estudadas, 0,70 e 0,57, respectivamente. O CAA sem resíduo apresentou uma massa específica menor que as misturas C-RSPC, como ocorreu nos estudos de Kraus (2006).

Os resultados de taxa de absorção e índice de vazios foram analisados estatisticamente (Tabela 43 e Tabela 44), por meio da análise de variância (ANOVA). As variáveis investigadas foram: relação a/c (0,70 – 0,57) e substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC.

Tabela 43 Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e uso do RSPC sobre a taxa de absorção de água, aos 28 dias, dos CAA estudados

Fator	GDL	MQ	F _c	F _{0,05}	Sg
A- Relação a/c	1	0,2988	4,75	5,318	NS
B- RSPC	1	1,5623	24,84	5,318	S
AB	1	0,1116	1,77	5,318	NS
ERRO	8	0,0629			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_c - Valor calculado de F; F_{0,05} - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; Sg- Significância, S - Significativo; NS- Não significativo.

Tabela 44 Análise de variância dos efeitos da relação a/c, idade e uso do RSPC sobre o índice de vazios, aos 28 dias, dos CAA estudados

Fator	GDL	MQ	F _c	F _{0,05}	Sg
A- Relação a/c	1	1,579	7,24	5,318	S
B- RSPC	1	25,933	118,86	5,318	S
AB	1	0,883	4,05	5,318	NS
ERRO	8	0,218			

Nota: GDL - Graus de liberdade; MQ - Média quadrada; F_c - Valor calculado de F; F_{0,05} - Valor tabelado de F para o nível de significância de 5%; Sg- Significância, S - Significativo; NS- Não significativo.

Por meio da análise de variância dos resultados de taxa de absorção de água, observou-se que apenas a substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC foi

significativa, pois apresentou o maior $F_{\text{calculado}}$ (24,84). Para o índice de vazios, constatou-se que tanto a relação a/c e quanto a substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC foram significativas. O principal fator de influência na variação do índice de vazios é o RSPC, que apresentou o maior valor de $F_{\text{calculado}}$ (118,86). Para compreender melhor o efeito das variáveis estudadas sobre a taxa de absorção de água e índice de vazios, observa-se o comportamento dos CAA apresentado na Figura 70.

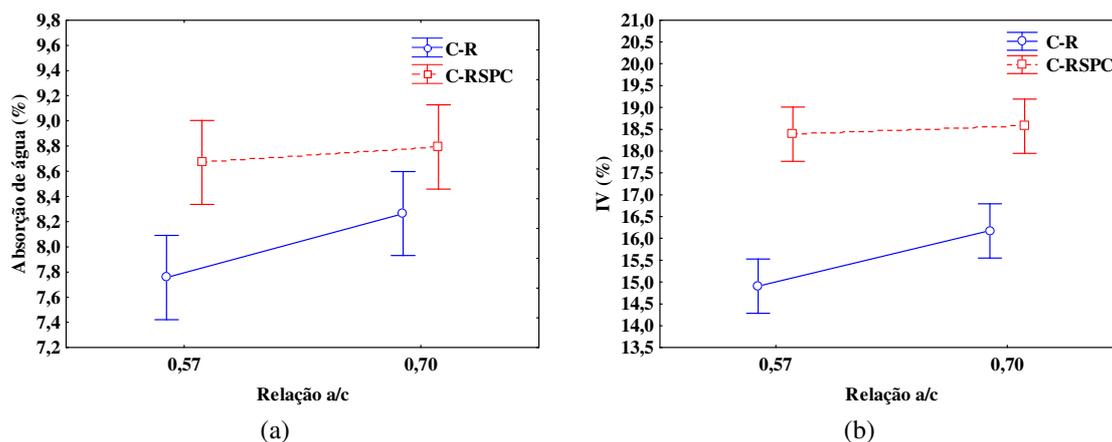


Figura 70 Influência das variáveis analisadas (relação a/c e RSPC) nos CAA estudados, aos 28 dias, referentes aos ensaios: (a) Taxa de absorção de água; (b) Índice de vazios

Observa-se a influência do resíduo nas duas propriedades avaliadas. Na taxa de absorção de água houve um aumento de 6 e 11% nas misturas C-RSPC, para a/c 0,70 e 0,57, respectivamente, em comparação as misturas C-R correspondentes. No caso do índice de vazios esse aumento foi bem maior, 15 e 25%, considerando as mesmas misturas, mostrando que o RSPC influenciou bem mais os resultados dessa propriedade. O comportamento dos CAA, na absorção de água, foi coerente com o comportamento na resistência à compressão axial desse estudo (item 5.2.4.1).

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

6.1 CONCLUSÃO

Os resíduos industriais são cada vez mais utilizados como matéria-prima para a indústria da construção, a fim de reduzir o alto consumo de energia, reduzir a poluição gerada, além de melhorar as características físicas dos materiais, principalmente dos materiais à base de cimento. Com a crescente preocupação relacionada a um desenvolvimento sustentável e o enquadramento do setor da construção aos padrões de sustentabilidade, essa pesquisa foi desenvolvida visando à utilização do resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) como alternativa em substituição parcial ao agregado miúdo natural para a produção de concreto autoadensável (CAA). Nesse sentido, essa pesquisa estudou a influência de diferentes teores de substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC na produção de argamassas autoadensáveis (5 – 10 – 15 – 20%) e na produção de CAA (10%), avaliou as propriedades do CAA, no estado fresco e no estado endurecido.

Através da análise dos resultados obtidos, foi possível chegar às seguintes conclusões:

– **Caracterização do RSPC**

O RSPC utilizado nessa pesquisa apresentou composição química formada basicamente por óxido de cálcio (54,7%), estrutura puramente cristalina, o que permite afirmar que esse resíduo pode ser considerado uma adição tipo fíler. O resíduo apresentou dimensão média de 5,74 μ m e massa específica de 2,69kg/dm³. Desse modo, sua aplicação na produção de misturas autoadensáveis pode ser bastante interessante, uma vez que esse material possui uma elevada finura, o que pode contribuir para aumentar a estabilidade e coesão desses materiais.

– **Fase argamassa autoadensável (AA)**

Com base nos resultados obtidos no estudo de argamassas autoadensáveis (AA) com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) foi possível observar que:

- a. o uso do resíduo aumentou visivelmente a coesão das misturas de AA no estado fresco, promovendo uma maior homogeneidade e fluidez no material;

- b. no estado endurecido, ocorreu um ganho de resistência à compressão axial para todas as misturas, em comparação à mistura 5RSPC, para as relações a/c estudadas. O uso do RSPC contribuiu para uma melhoria da composição granulométrica das misturas de argamassa, ocasionando uma redução na quantidade de vazios existentes, e conseqüentemente melhorando a resistência final da argamassa;
- c. a mistura 10RSPC apresentou os maiores valores de resistência à compressão axial, aos 28 dias, para quaisquer das relações a/c estudadas;
- d. o aumento do teor de substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC ocasionou um pequeno aumento da taxa de absorção de água e índice de vazios das AA, para as duas relações a/c estudadas (0,57 e 0,70);
- e. ocorreu uma redução no coeficiente de capilaridade das AA com o aumento do uso de RSPC, o que contribuiu para a comprovação da ação do resíduo, que propiciou um preenchimento de vazios, com conseqüente redução da interconectividade entre os poros abertos das misturas.

– **Fase concreto autoadensável (CAA)**

Em relação aos resultados obtidos no estudo de concretos autoadensáveis com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) foi possível concluir que:

- a. o uso do RSPC aumentou a coesão das misturas de CAA no estado fresco, promovendo uma redução no diâmetro de espalhamento, quanto maior a relação a/c avaliada. Além disso, aumentou a fluidez da mistura, reduzindo o tempo de escoamento no funil V com o aumento da relação a/c. O uso do resíduo melhorou a habilidade passante, em fluxo livre e confinado, e aumentou a resistência à segregação do CAA;
- b. no estado endurecido, com base nos resultados de resistência à compressão axial foi possível verificar que a substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC, no teor de 10%, causou uma redução na resistência dos CAA, para ambas as relações a/c estudadas. A relação a/c foi o principal fator de influência na variação da resistência à compressão do CAA;

- c. a substituição do agregado miúdo natural pelo RSPC, no teor de 10%, reduziu a resistência à tração por compressão diametral dos CAA, em comparação à mistura de referência (sem o resíduo), para ambas as relações a/c estudadas;
- d. o uso de RSPC promoveu um aumento da taxa de absorção de água e índice de vazios dos CAA, para as duas relações a/c estudadas (0,70 – 0,57).

Com base nos resultados alcançados, conclui-se que, apesar do uso do RSPC em substituição de parte dos agregados naturais ter promovido uma pequena redução do desempenho dos CAA no estado endurecido, houve uma melhoria das suas propriedades no estado fresco, com aumento da coesão, melhoria da fluidez e homogeneidade das misturas. As questões vinculadas com a redução do desempenho dos CAA no estado endurecido podem ser minimizadas a partir do desenvolvimento de outros estudos, que possam contribuir principalmente para melhoria da dispersão do resíduo, e assim favorecer o maior preenchimento de vazios.

Do ponto de vista ambiental, tanto da indústria de beneficiamento de rochas ornamentais, que apresenta grande passivo no que tange a quantidade de resíduo gerada, quanto da indústria da construção, que necessita de grande quantidade de matéria-prima, o uso de até 10% de RSPC em substituição parcial do agregado miúdo natural na produção de CAA pode ser considerada uma excelente alternativa. Desse modo, acredita-se ser possível a aplicação de até 10% de RSPC em substituição parcial do agregado miúdo natural na produção de CAA.

6.2 PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS

Com o objetivo de ampliar o conhecimento sobre o uso do resíduo de serragem de pedra Cariri na produção e no comportamento de concretos autoadensáveis, alguns estudos adicionais que poderão ser realizados, conforme apresentado a seguir:

- realizar um estudo do CAA com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC com outros métodos de dosagem;
- estudar a interface do CAA com substituição parcial do agregado miúdo natural pelo RSPC;

- /realizar ensaios de reologia da pasta do CAA com reômetros;
- determinar a forma das partículas do RSPC e do agregado miúdo, e sua influência sobre as propriedades do CAA;
- avaliar a retração por secagem das argamassas e concretos autoadensáveis produzidos com RSPC;
- determinar a relação custo/benefício para a utilização do RSPC em argamassas e concretos autoadensáveis.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABIROCHAS (Associação Brasileira da Indústria de Rochas Ornamentais). **Cenário Mundial do Setor de Rochas Ornamentais**. São Paulo, SP. 2016. Disponível em: <http://www.ivolution.com.br/mais/fotos/6/18/4061/Exp_Imp_12_2016.pdf>. Acesso em: 14fev. 2017.

AÏTCIN, P. C. **Concreto de Alto Desempenho**. São Paulo: PINI, 2000.

AKINPELU, M. A.; ODEYEMI, S. O.; OLAFUSI, O. S.; MUHAMMED, F. Z. Evaluation of splitting tensile and compressive strength relationship of self-compacting concrete. *Journal of King Saud University – Engineering Sciences*. 2017.

ALENCAR, R. dos S. A. de. **Dosagem do concreto auto-adensável: produção de pré-fabricados**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Construção Civil e Urbana) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3146/tde-19092008-161938/pt-br.php>>. Acesso em: 27 fev. 2016.

ALMEIDA FILHO, F. M. **Contribuição ao Estudo de Aderência Entre Barras de Aço e Concretos Auto-Adensáveis**. 2006. 291p. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

ALTOUBAT, S.; JUNAID, M. T.; LEBLOUBA, M.; BADRAN, D. Effectiveness of fly ash on the restrained shrinkage cracking resistance of self-compacting concrete. *Cement and Concrete Composites*. 79, p. 9-20, 2017.

ALYAMAC, K. E.; GHAFARI, E.; INCE, R. Development of eco-efficient self-compacting concrete with waste marble powder using the response surface method. *Journal of Cleaner Production*. 144, p. 192-202, 2017.

ANJOS, M.; CAMÕES, A.; JESUS, C.; CAMPOS, P. Avaliação da durabilidade de concretos autoadensáveis com reduzido teor de cimento e elevados teores de adições minerais. CONPAT, Lisboa, 2015.

ASLANI, F.; NEJADI, S. Mechanical properties of conventional and self-compacting concrete: An analytical study. *Construction and Building Materials*. 36, p. 330-347, 2012.

ASSIÉ, S.; ESCADEILLAS, G.; WARLLER, V. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability. *Construction and Building Materials*. 21, p. 1909-1917, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10007**: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11578**: Cimento Portland Composto - Especificação. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11579:** Cimento Portland — Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200). Rio de Janeiro, 2013.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 11768:** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland – Requisitos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 12653:** Materiais pozolânicos — Requisitos. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15259:** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-1:** Concreto auto-adensável Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-2:** Concreto auto-adensável Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo do escoamento – Método do cone de Abrams. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-3:** Concreto auto-adensável Parte 3: Determinação da habilidade passante – Método do anel J. Rio de Janeiro, 2010

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-4:** Concreto auto-adensável Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-5:** Concreto auto-adensável Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V. Rio de Janeiro, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15823-6:** Concreto auto-adensável Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação. Rio de Janeiro, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5738:** Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova- Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2015.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5739:** Concreto - Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos- Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 5752:** Materiais Pozolânicos - Determinação de atividade pozolânica com cimento Portland - Índice de atividade pozolânica com cimento . Rio de Janeiro, 1992.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 6467:** Agregados - Determinação do inchamento de agregado miúdo - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7211:** Agregados para concreto – Especificação. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7215:** Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão. Rio de Janeiro, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7222:** Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2011.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 7809:** Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio. Rio de Janeiro, 2008.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9778:** Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

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

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 248:** Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 30:** Agregado miúdo - Determinação da absorção de água. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 43:** Cimento portland - Determinação da pasta de consistência normal. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 45:** Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 46:** Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 49:** Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas. Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 51:** Agregado graúdo - Ensaio de abrasão "Los Angeles". Rio de Janeiro, 2001.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 52:** Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 53:** Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água. Rio de Janeiro, 2009.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR NM 65:** Cimento Portland - Determinação do tempo de pega. Rio de Janeiro, 2003.

BACARJI, E.; TOLEDO FILHO, R. D.; KOENDERS, E. A. B.; FIGUEIREDO, E. P.; LOPES, J. L. M. P. **Sustainability perspective of marble and granite residues as concrete.** Construction and Building Materials. 45, p. 1-10. Abril, 2013.

BANFILL, P. F. G. **The Rheology of Fresh Mortar - A Review.** In: Simpósio Brasileiro de Tecnologia das Argamassas, 6, International Symposium on Mortar Technology, 1. Florianópolis, 2005.

BANFILL, P. F. G. **Rheology of fresh Cement and Concrete.** Rheology Reviews. 2006. p. 61-130, 2006.

BARBOSA, M. P. *et al.*. Determinação de parâmetros reológicos de argamassas e concreto através de técnicas alternativas. **Revista IBRACON de Materiais e Estruturas.** 3, v. 4, p. 440-480, 2011.

BARROS, P. G. dos. S. **Avaliação das propriedades de durabilidade do concreto auto-adensável obtido com resíduo de corte de mármore e granito.** 2008. 101 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2008.

BASTOS, A. J. O. **Avaliação do uso de resíduo de serragem de Pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais.** 2014. 89 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, 2014.

BENAICHA, M. Influence of silica fume and viscosity modifying agent on the mechanical and rheological behavior of self compacting concrete. **Construction and Building Materials.** 84, p. 103-110, 2015.

BENJEDDOU, O. *et al.*. Experimental and theoretical study of the effect of the particle size of limestone fillers on the rheology of self-compacting concrete. **Journal of Building Engineering**. 10, p. 32–41, 2017.

BEYGI, M. H. A. *et al.* Evaluation of the effect of maximum aggregate size on fracture behavior of self compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 55, p. 202-211, 2014.

BEZERRA, L. M. A. Análise dos Impactos Socioambientais decorrentes da Mineração na Chapada do Araripe - Nova Olinda/Ceará. **Geosaberes**. 2, v. 6, p. 79-89, 2015.

BRETAS, R. E. S.; D' AVILA, M. A. Reologia de polímeros fundidos. São Carlos/SP: Editora da UFSCar, p. 196, 2000.

CALADO, C. F. de A.; CAMÕES, A.; ANDRADE, T.; RIBEIRO, J.; BARKOKÉBAS JÚNIOR, B. **Estudo de viabilidade econômica do Concreto autoadensável frente ao concreto convencional**. In: Congresso Luso-Brasileiro de Materiais de Construção Sustentáveis, 2. João Pessoa. 2016.

CALADO, C. F. de A.; CAMÕES, A.; ANDRADE, T.; RIBEIRO, J.; BARKOKÉBAS JÚNIOR, B. Self compacting Concrete and Conventional Concrete in the Arena Pernambuco: Comparative Study of Durability Indicators and Economic Feasibility. **Romanian Journal of Materials**. 45, p. 402-410, 2015.

CALADO, C. F. de A.; CAMÕES, A.; JALALI, SAID.; BARKOKÉBAS JÚNIOR, B. **Concreto Auto-Adensável (CAA), mais do que alternativa ao concreto convencional (CC)**. Recife: EDUPE, 2015.

CALMON, J. L. *et al.* **Self-compacting concrete using marble and granite sawing wastes as filler**. In: The 2005 World Sustainable Building Conference, Tokio, 2005.

CANOVAS, M. F. **Hormigon**. 6. ed. España, 2002.

CASELLI, F. de T. R.; GOMES, M. de L. B. **Formação de Arranjo Produtivo Local (APL) como promotor da competitividade de Micro e Pequenas Empresas – MPE's: Análise no APL Mineral – CE**. Revista Espacios, v. 36, 17, p. 5, 2015. Disponível em: <<http://www.revistaespacios.com/a15v36n17/15361705.html>>. Acesso: 09 dez. 2016.

CASTRO, A. L. de. **Aplicação de conceitos reológicos na tecnologia dos concretos de alto desempenho**. 2007. 302 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos-SP. 2007.

CASTRO, N. F.; CAMPOS, A. R.; VIDAL, F. W. H. Melhoras técnicas na lavra e na proteção do patrimônio e meio ambiente do Arranjo Produtivo Local de Calcários do Cariri - CE. In: Jornada do Programa de Capacitação Interna do CETEM, 1., Rio de Janeiro. **Anais...**Rio de Janeiro: CETEM, 2007.

CASTRO, A. L. de.; PANDOLFELLI, V. C. Revisão: Conceitos de dispersão e empacotamento de partículas para a produção de concretos especiais aplicados na construção civil. **Cerâmica**. 55, p. 18-32, 2009.

CAVALCANTI, D. J. de H. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. 2006. 141 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil: Estruturas) - Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2006.

CELIK, K. et al. High-volume natural volcanic pozzolan and limestone powder as partial replacements for Portland cement in self-compacting and sustainable concrete. **Cement & Concrete Composites**. 45, p. 136-147, 2014.

CLEMENTE, I. M.; ARTUR, A. C.; NOGUEIRA NETO, J. de A. Análise de imagens na avaliação do ataque químico em rochas carbonáticas das Bacias Potiguar e do Araripe. **Estudos Geológicos**, v. 23, n. 2, p. 29-44, 2013.

CLEMENTE, I. M.; ARTUR, A. C.; NOGUEIRA NETO, J. de A.; MONTIBELLER, C. C. **Petrografia e análise físico-mecânica de calcários ornamentais das Bacias Potiguar e do Araripe**. *Geociências*, v. 35, n. 3, p. 372-392, 2016.

CORINALDESI, V.; MORICONI, G. The role of industrial by products in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 25, p. 3181-3186, 2011.

CORRADI, R., KHURANA, R., MARGAROTO, R. **User friendly self-compacting concrete in precast production**. In: *Self Compacting Concrete: Proceedings of the 3rd RILEM Symposium*, O. Wallevik, and I. Nielsson, Eds. RILEM Publications, Reykjavik, Iceland, 2003, pp. 457-466. Disponível em: <<http://www.books.google.com.br/books?hl=pt-T&lr=&id=5k8AD9IRw1gC&oi=fnd&pg=PA457&dq=User+friendly+self-compacting+concrete+in+precast+production.&ots=58TDaXE6KY&sig=I4gcp1CyCBNwkp6hYkw6pawJx0#v=onepage&q&f=false>>. Acesso em: 14 fev. 2016.

CORREIA, J. C. G.; VIDAL, F. W. H.; RIBEIRO, R. C. C. **Caracterização tecnológica dos calcários do Cariri do Ceará**. In: *Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste*, 5, Recife, 2005.

COUTINHO, A. de S. **Fabrico e Propriedades do Betão**. 5. ed. Lisboa, 2012.

CRUZ, D. F. M. da. *et al.* **Estudo das propriedades mecânicas de argamassas produzidas utilizando-se resíduo do corte de mármore e granito**. VI Seminário Desenvolvimento Sustentável e a Reciclagem na Construção Civil. São Paulo. IBRACON (Instituto Brasileiro do Concreto) – CT 206 –Meio Ambiente, 2003.

DE SCHUTTER, G. **Effect of limestone filler as mineral addition in self-compacting concrete**. In: *Conference on Our World in Concrete & Structures*, 36. Singapore, 2011.

DE LARRARD, F. **Concrete Mixture Proportioning** - A scientific approach. Londres: E & FN Spon, 1999.

DESNERCK, P. *et al.* **Survey on the Mechanical Properties of SCC: 20 years of Research**. In: Conference on Our World in Concrete & Structures, 36. Singapore, 2011.

DESNERCK, P. *et al.* **Mechanical Properties of Self-Compacting Concrete**. RILEM State-of-the-Art Reports 14. 2014. p. 15-70.

DINIZ, M. A. **Concreto auto-adensável utilizando resíduos de caulim**. 2010. 122 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.

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

EFNARC. Specifications and Guidelines for Self-Compacting Concrete. Reino Unido, 2002. 32 p.

EFNARC. The European Guidelines for Self-Compacting Concrete: Specification, Production and Use. Reino Unido. 2005. 68 p.

ELMOATY, A. E. M. A. Mechanical properties and corrosion resistance of concrete modified with granite dust. **Construction and Building Materials**, 47, p. 743-752, Junho. 2013.

ELYAMANY, H. E.; ELMOATY, A. E. M. A.; MOHAMED, B. Effect of filler types on physical, mechanical and microstructure of self compacting concrete and Flow-able concrete. **Alexandria Engineering Journal**. 53, p. 295-307, 2014.

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

FERRARIS, C. F. Measurement of Rheological Properties of High Performance Concrete: State of the Art. **Building and Fire Research Laboratory**. 1996.

FERRARIS, C. F. **Measurement of Rheological Properties of Cement Paste: A New Approach**. RILEM International Symposium. Monterrey, Mexico, 1999. P. 333-342. 1999.

FERRAZ, A. L. N. **Avaliação de retração e fluência do concreto autoadensável para aplicação em elementos pré-moldados**. 2009. Tese (Doutorado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. Campinas, 2009.

FIGUERÊDO FILHO, J. G. L. **Avaliação da trabalhabilidade de concretos contendo agregado reciclado de argamassa.** 2011. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Bahia, 2011.

FOCHS, R. G. **Estudo comparativo entre métodos de dosagem de concreto autoadensável.** 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia de Materiais) – Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

GALVÃO, J. S. da S.; PITA, A. C. B. de O.; MERCÊS, U. M. da S.; MOURA, W. A.; LEITE, M. B.. **Estudo do uso de resíduo de serragem de pedra cariri na produção de misturas autoadensáveis.** In: Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído, 16, 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

GESOGLU, M.; GUNYISI, E.; KOCABAG, M. E.; BAYRAM, V.; MERMERDAS, K. **Fresh and hardened characteristics of self compacting concretes made with combined use of marble powder, limestone filler, and fly ash.** Construction and Building Materials. 37, p. 160-170, 2012.

GHANBARI, A.; KARIHALOO, B. L. Prediction of the plastic viscosity of self-compacting steel fiber reinforced concrete. **Cement and Concrete Research.** 39, p. 1209-1216, 2009.

GIROTTI, L. S. **Investigação da retração plástica e da fissuração da argamassa do concreto auto-adensável.** 2012. 221 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2012.

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

GOMES, P. C. C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.** 2002. 139 p. Tese (Doutorado) - Escola Técnica Superior D'Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.

GONÇALVES, J. P. **Utilização do resíduo de corte de granito (RCG) como adição para produção de concretos.** 135 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

GUIMARÃES, C. C. **Avaliação de blocos de argamassa produzidos com Resíduo de Serragem de Pedra Cariri.** 2014. 95 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Feira de Santana, Feira de Santana, 2014.

HAMA, S. M.; HILAL, N. N. Fresh properties of self-compacting concrete with plastic waste 4 as partial replacement of sand. **International Journal of Sustainable Built Environment,** 2017.

HELENE, P.; TERZIAN, P. **Manual de dosagem e controle do concreto**. 1 ed. São Paulo: PINI; Brasília. 1993.

HEMALATHA, T.; RAMASWANY, A.; KISHEN, J. M. C. Micromechanical analysis of self compacting concrete. **Materials and Structures**. 48, p. 3719-3734, 2015.

HOCEVAR, A.; KAVCIC, F.; BOKAN-BOSILJKOV, V. Rheological parameters of fresh concrete -Comparison of rheometers. **Građevinar**. 65, p. 99-109, 2013.

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

HU, C.; DE LARRARD, F. The rheology of fresh high-performance concrete. **Cement and Concrete Research**. 26, p. 283-294, 1996.

JAWAHAR, J. G. *et al.* Effect of coarse aggregate blending on fresh properties of self compacting concrete. **International Journal of Advances in Engineering & Technology**. v. 3, p. 456-466, 2012.

KIRYU, H. dos S. **Investigação reológica e análise mecânica de compósitos não-newtonianos**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2006.

KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. 2008. 155 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina. Londrina, 2008.

KRAENKEL, T.; LOWKE, D.; GEHLEN, C. **Effect of coarse aggregate on properties of Self-Compacting Concrete**. In: International Symposium on Design, Performance and use of Self-Consolidating Concrete, 2. p. 201-211. Beijing, China. 2009.

KRAUS, Z. F. **Investigação de misturas de argamassas para dosagem do concreto auto-adensável contendo ora fíler calcário, ora aditivo promotor de viscosidade em substituição ao fíler**. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

KUMAR, B. M. V.; ANANTHAN, H.; BALAJI, K. V. A. Experimental studies on utilization of coarse and finer fractions of recycled concrete aggregates in self compacting concrete mixes. **Journal of Building Engineering**. 9, p. 100–108, 2017.

KUMAYAMA, R. **Estudo da viabilidade do emprego do pó de mármore para produção de concreto auto-adensável e substituição parcial dos agregados por pérolas de poliestireno expandido (EPS)**. 2014. 111 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2014.

LAZNIIEWSKA-PIEKARCZYK, B. The methodology for assessing the impact of new generation superplasticizers on air content in self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 53, p. 488-502, 2014.

LAZNIIEWSKA-PIEKARCZYK, B. The type of air-entraining and viscosity modifying admixtures and porosity and frost durability of high performance self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 40, p. 659-671, 2013.

LEITE, F. C. M. **Influência do tipo de adição mineral e da dimensão máxima do agregado graúdo no comportamento do concreto auto-adensável**. 2007. 188 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Edificações e Saneamento) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2007.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. 121 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2004.

MANUEL, P. J. M. **Estudo da influência do teor de argamassa no desempenho de concretos autoadensáveis**. 2005. 178p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

MARQUES, A. C. **Concreto Auto-adensável: caracterização da evolução das propriedades mecânicas e de estudo da sua deformabilidade por solicitação mecânica**. 2011. 175 p. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2011.

MARQUES, A. C. *et al.* **Comparison of creep of Brazilian self-compacting concretes with different prediction models**. In: International Symposium on Design, Performance and Use of Self-Consolidation Concrete SCC'2009-China, 2, 2009, Beijing. China, 2009.

MARTINS, E. J. Procedimento para dosagem de pasta para argamassa auto-nivelante. 2009. 139p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, 2009.

MASTALI, M.; DALVAND, A.; SATTARIFARD, A. The impact resistance and mechanical properties of the reinforced self-compacting concrete incorporating recycled CFRP fiber with different lengths and dosages. **Composites Part B**. 112, p. 74-92, 2017.

MEDEIROS, F. K. de. **Estudo de concretos autoadensáveis com reduzidos teores de cimento e elevados teores de adições minerais**. 2016.133 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2016.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, Propriedades e Materiais**. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.

MELLO, A. B. A. de. **Argamassas autoadensáveis utilizando cinzas de casca de arroz como finos: comparação com o caso de argamassas vibradas.** 2016.86 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2016.

MELO, K. A. de. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de filer calcário.** 2005.183 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

MENDES, C. J. **Concreto autoadensável utilizando cinza da casca de arroz: estudo das propriedades mecânicas.** 2015. 93 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista- Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2015.

MENDES FILHO, E. **Uma Avaliação do Programa de Apoio ao Arranjo Produtivo Local da Pedra Cariri - Ceará.** 2009. 91 p. Dissertação (Mestrado Profissional em Economia do Setor Público) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2009.

MENEZES, C. M. de T. **Concreto auto-adensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais.** 2006. 121 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2006.

MENEZES, R. R. *et al.* **Reciclagem do resíduo de serragem de calcário laminado para produção de blocos cerâmicos.** Revista Escola de Minas, 63, p. 667-672, Out/Dez. 2010.

MERCÊS, U. M. S.; MOURA, W. A. **Comportamento mecânico de argamassas produzidas com resíduo de serragem de pedra Cariri.** In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 16, 2016, São Paulo. Anais... Porto Alegre: ANTAC, 2016.

MOCHIUTTI, N. F. *et al.* **Os valores da Geodiversidade: Geossítios do Geopark Araripe/CE.** Anuário do Instituto de Geociências – UFRJ, v. 35 – 1, p. 173-189, 2012.

MOHAMED, M. K.; DAWSON, A. R.; THOM, N. H. Production, microstructure and hydration of sustainable self-compacting concrete with different types of filler. **Construction and Building Materials.** 49, p. 84-92, 2013.

MORAES, K. A. de M. **Otimização do uso de adições minerais para a produção de concreto auto-adensável.** 2010.210 p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.

MOURA, W. A.; LEITE, M. B.; BASTOS, A. J. O. Avaliação do uso de resíduo de serragem de pedra Cariri (RSPC) para produção de concretos convencionais. **Ambiente Construído**, v. 13, n. 1, p. 7-24, Jan/Mar. 2013.

MOURA, W. A.; LIMA, M. B. L.; NOGUEIRA, J. L. C.; MORRATI, M. **Resíduos de serragem de rochas ornamentais para produção de peças pré-moldadas.**

Tecnologias construtivas inovadoras e gestão da cadeia produtiva. Barboza, A. da S. R.; Savastano, H. Porto Alegre, ANTAC, 2009.

NAGARATNAM, B. H. *et al.* Workability and heat of hydration of self-compacting concrete incorporating agro-industrial waste. **Journal of Cleaner Production.** 112, p. 882-894, 2016.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto.** 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NEVILLE, A. M; BROOKS, J. J. **Tecnologia do Concreto.** 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 2013.

NIKBIN, I. M. *et al.* A comprehensive investigation into the effect of aging and coarse aggregate size and volume on mechanical properties of self-compacting concrete. **Materials and Design.** 59, p. 199-210, 2014.

NUNES, S. *et al.* Rheological characterization of SCC mortars and pastes with changes induced by cement delivery. **Cement & Concrete Composites.** 33, p. 103-115, 2011.

NURUDDIN, M. F.; CHANG, K. Y.; NORZAIREEN, M. A. Workability and compressive strength of ductile self compacting concrete (DSCC) with various cement replacement. **Construction and Building Materials.** 55, p. 153-157, 2014.

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

OLIVEIRA, D. B. de. BARROSO, S. H. de A. **O uso do resíduo da pedra Cariri como material alternativo em camadas granulares de pavimentos.** In: 45^a RAPv – Reunião Anual de Pavimentação. 19^o ENACOR- Encontro Nacional de Conservação Rodoviária. 5^a ExpoPavimentação. 1^o Fórum de Pavimentação, de Trânsito e de Mobilidade. Brasília, 2016.

OUCHI, M. **Self-compacting concrete: development, applications and key Technologies.** Conference on Our World in Concrete & Structures, 26, Singapura, 2001.

OUCHI, M.; Nakamura, S.; Osterberg, T.; Hallberg, S.; Lwin M. **Applications of self-compacting concrete in Japan, Europe and United States.** ISHPC: 2003, 20p.

PARRA, C.; VALCUENDE, M.; GÓMEZ, F. Splitting tensile strength and modulus of elasticity of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials.** 25, p. 201-207, 2011.

PEREIRA, J. R. **Análise da produção de concreto auto adensável (CAA) e da adição do pó de poli tereftalato de etileno (PET) reciclado.** 2016. 107 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Tecnologia. Limeira, 2016.

PETRY, F. **Análise e otimização do método de dosagem Repette-Melo para concreto autoadensável através do modelo de empacotamento compressível de partículas (MEC)**. 2015. 103 p. Trabalho de conclusão de curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2015.

PILEGGI, R. G.; PANDOLFELLI, V. C Reologia e distribuição granulométrica de concretos refratários bombeáveis. **Cerâmica**. 48, p. 11-16, Jan/Fev/Mar 2002.

PRADO, A. C. A.; SUASSUNA, P. M.; SILVA, G. B. **Caracterização do rejeito da extração e beneficiamento da pedra cariri visando seu reaproveitamento**. In: Congresso Brasileiro de Cerâmica, 56, Congresso Latino- Americano de Cerâmica, 1, Brazilian Symposium on Glass and Related Materials, 9. Curitiba, 2012.

RAMEZANIANPOUR, A. M. *et al.* Influence of initial steam curing and different types of mineral additives on mechanical and durability properties of self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 73, p. 187-194, 2014.

REIS, J. F. A. **Determinação de parâmetros reológicos de concretos através do ensaio de abatimento de tronco de cone modificado: estudo de caso**. 2008. 177 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira, 2008.

REPETTE, W. L. **Concreto auto-adensável – características e aplicação**. 2006. Disponível em: <<http://www.techne.pini.com.br/engenharia-civil/135/artigo285721-1.aspx>>. Acesso em: 28 fev. 2016.

REPETTE, W. L. Concreto Autoadensável. **Concreto: Ciência e Tecnologia**. ISAIA, G. C. (Ed.). 1. ed. p. 1769-1806. 2 v. São Paulo, 2011.

REPETTE, W. L. Concretos de última geração: presente e futuro. **Concreto: ensino, pesquisa e realizações**. ISAIA, G. C. (Ed.). p.1509-1550. 2 v. São Paulo, 2005.

ROLS, W. *et al.* Effects of different viscosity agents on the properties of self-leveling concrete. **Cement and Concrete Research**. 29, p. 261-266, 1999.

RIZWAN, S.A.; BIER, T.A. **Blends of limestone powder and fly-ash enhance the response of self-compacting mortars**. *Construction and Building Materials*, v. 27, p.398-403, Fev. 2012.

SANTOS, L. F. dos. **A influência do patamar de cura térmica sobre a resistência dos concretos auto-adensáveis elaborados com diferentes tipos de cimento: avaliação pelo método da maturidade**. 2010. 280 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2010.

SCHMIDT, W. *et al.* Influences of superplasticizer modification and mixture composition on the performance of self-compacting concrete at varied ambient temperatures. **Cement & Concrete Composites**. 49, p. 111-126, 2014.

SCHRAMM, G. **Reologia e reometria: fundamentos teóricos e práticos**. Tradução de Cheila G. Mothé; Denise Z. Correia; Hans M. Petri; Michelle Gonçalves; Tatiana Carestiatto. São Paulo: Artliber Editora, p. 234, 2006.

SHI, C. *et al.* A review on mixture design methods for self-compacting concrete. **Construction and Building Materials**. 84, p. 387-398, 2015.

SILVA, A. D. A. da. **Aproveitamento de rejeito de calcário do Cariri Cearense na formulação de argamassa**. 2008. 79 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2008.

SILVA, P. R. da.; BRITO, J. de. Durability performance of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Materials and Structures**. 49, p. 2749-2766, 2016.

SILVA, P. R. da.; BRITO, J. de. Experimental study of the porosity and microstructure of self-compacting concrete (SCC) with binary and ternary mixes of fly ash and limestone filler. **Construction and Building Materials**. 86, p. 101-112, 2015.

SOARES, R. B. **Contribuição ao estudo de concretos produzidos com a incorporação de resíduo do beneficiamento de rochas ornamentais**. 2014. 163p. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2014.

SUA-IAM, G.; MAKUL, N. Use of increasing amounts of bagasse ash waste to produce self-compacting concrete by adding limestone powder waste. **Journal of Cleaner Production**. 57, p. 308-319, 2013.

SUASSUNA, P. M.; BRASILEIRO, M. I.; PRADO, A. C. de A. **Reaproveitamento do rejeito da extração e beneficiamento da pedra Cariri em massas cerâmicas**. In: Encontro Universitário da UFC no Cariri, 4, Juazeiro do Norte, Ceará, 2012.

TAKADA, K. Influence of Admixtures and Mixing efficiency on the properties of Self compacting concrete. The Birth of Self Compacting Concrete in the Netherlands. **DUP Science**, 2004.

TATTERSALL, G. H.; BANFILL, P. F.G. **The rheology of fresh concrete**. London: Pitman, p. 347, 1983.

TENNICH, M.; OUEZDOU, M. B.; KALLEL, A. Behavior of self-compacting concrete made with marble and tile wastes exposed to external sulfate attack. **Construction and Building Materials**. 135, p. 335-342, 2017.

TENNICH, M.; KALLEL, A.; OUEZDOU, M. B. Incorporation of fillers from marble and tile wastes in the composition of self-compacting concretes. **Construction and Building Materials**. 91, p. 65-70, 2015.

TÜRKEL, S.; YIGIT, A. **The effect of limestone powder, fly ash and silica fume on the properties of self-compacting repair mortars.** Sadhana, v. 34, part. 2, p.331–343, Abril 2009.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto-adensáveis.** 2004.149 p Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2004.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos autoadensáveis.** 2007. 167p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

TUTIKIAN, B. F.; DAL MOLIN, D. C. **Concreto Auto-adensável.** São Paulo: PINI, 2008. 140 p.

ULYGUNOGLU, T.; TOPÇU, I. B.; CELIK, A. G. Use of waste marble and recycled aggregates in self-compacting concrete for environmental sustainability. **Journal of Cleaner Production.** 84, p. 691-700, 2014.

VIANA, T.; TOPÇU, I. B.; CELIK, A. G. Membro Crato da Formação Santana, Chapada do Araripe, CE: **Riquíssimo registro de fauna e flora do Cretáceo.**In: SIGEP 5, 2006.

VIDAL, F. W. H.; CASTRO, N. F.; FERNANDES, T. W. **Aplicações Industriais dos Rejeitos do Calcário Laminado do Cariri Cearense.** In: Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais, 3, Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 6. Natal, 2007.

VIDAL, F. W. H.; FERNANDES, T. W. G.; PEQUENO, D. A. C. **Inovação Tecnológica para Valorização da Pedra Cariri - CE.** In: Congresso Brasileiro de Rochas Ornamentais, 3, Simpósio de Rochas Ornamentais do Nordeste, 6. Natal, 2007.

VIDAL, F. W. H.; PADILHA, M. W. M.; OLIVEIRA, R. R. **Aspectos do Aproveitamento dos Rejeitos da Pedra Cariri.** In: Congresso Internacional de Rochas Ornamentais, 1. Guarapari, ES, 2005.

VITA, M. O.; GIROTTO, L. S.; BARBOSA, M. P.; REPETTE, W. L.; MACIEL, G. de F. **Concreto auto adensável: estudo da influência de diferentes tipos de adições minerais na fluidez e no comportamento reológico.**In: Congresso Brasileiro do Concreto, 52, Fortaleza, CE, 2010.

YAHIA, A.; KHAYAT, K. H. Applicability of rheological models to high-performance grouts containing supplementary cementitious materials and viscosity enhancing admixture. **Materials and Structures**, n. 36, p. 402-412, 2003.

YAHIA, A.; TANIMURA, M.; SHIMOYAMA, Y. Rheological properties of highly flowable mortar containing limestone filler-effect of powder content and w/c ration. **Cement and Concrete Research**, n. 35, p. 532-539, 2005.

YE, G. *et al.* Influence of limestone powder used as filler in SCC on hydration and microstructure of cement pastes. **Cement & Concrete Composites**. 29, p. 94-102, 2007.

WALLEVIK, O. H. Rheology – A **Scientific approach to develop Self-Compacting Concrete**. In: Symposium on SCC, 3rd, Rilem, pp. 23-31, Reykjavik, 2003.

ZENDE, A. A.; KHADIRNAIKAR, R. B. An Overview of the Properties of Self Compacting Concrete. **Journal of Mechanical and Civil Engineering (IOSR-JMCE)**. p. 35-43. 2014.

APÊNDICES

APÊNDICE 1 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO E NO FUNIL V NAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA)

Tabela 45 Resultados individuais de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do teor de agregado miúdo e % de SP das AA

a/c	AM (%)	SP (%)	D (mm)	F- V t (s)		
0,70	40	0,10	346,5	nr		
			346,9	nr		
			347,3	nr		
	45	0,10	290,8	nr		
			290,4	nr		
			290,7	nr		
	0,57	50*	0,10	200,3	2,03	
				196,3	2,11	
				200,8	1,90	
40			0,2	218,7	2,89	
				222,9	3,21	
				219,6	4,44	
				0,10	246,9	3,78
					247,7	3,61
					254,4	3,70
40	0,20	277,5	2,83			
		283,6	3,43			
		285,2	3,16			
		0,25	283,5	3,42		
			299,3	3,30		
			299,3	2,78		
0,46	45*	0,30	316,1	2,87		
			313,6	3,77		
			317,3	2,63		
		50	0,10	199,7	nr	
				196,5	nr	
				198,0	nr	
				227,2	3,24	
				0,20	223,4	3,59
					228,0	3,30
240,6	3,13					
40*	0,25*			241,7	4,13	
				242,7	3,50	
		256,7	2,83			
		0,30	250,3	2,71		
			257,5	3,16		
			125,0	nr		
0,46	50	0,20	nr			
		0,30	nr			
		0,10	nr			
		0,20	148,6	nr		
			187,9	nr		
			206,5	4,15		
40*	0,25*	211,9	3,67			
		208,5	2,81			

Nota: AM- teor de agregado miúdo, em volume; SP- aditivo superplastificante; D- diâmetro médio no ensaio de espalhamento; F-V- ensaio no funil V modificado; nr- ensaio não foi realizado.

APÊNDICE 2 – RESULTADOS DOS ENSAIOS DE ESPALHAMENTO E NO FUNIL V DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS COM RSPC

Tabela 46 Resultados individuais de espalhamento e tempo de escoamento no funil V para determinação do ajuste do teor de RSPC e % de SP das AA

a/c	AM (%)	RSPC (%)	SP (%)	D (mm)	F- V t (s)		
0,70	50	5	0,10	198	nr		
				208	3,59		
			0,15*	212	3,76		
				225	3,37		
				227	3,22		
			0,20	224	1,90		
				219	2,96		
				207	2,72		
		10	0,15	211	1,97		
				202	2,32		
				231	2,62		
			0,25	228	2,32		
				225	2,42		
				226	4,53		
			0,30*	231	3,44		
				228	3,50		
		15	0,30	206	2,72		
				210	2,22		
				216	2,50		
				223	2,65		
			0,35	221	3,01		
				222	2,82		
			0,40*	223	3,91		
				227	3,89		
			226	3,90			
		0,57	45	20		203	nr
					0,40	204	nr
						202	nr
0,45	211				2,62		
	230			4,60			
0,50*	220			4,02			
	225			4,30			
5	0,25*			235	3,75		
				233	3,33		
				237	4,19		
				209	2,03		
10	0,25			210	3,50		
		210	2,75				
		226	3,20				
	0,30	219	3,50				
		224	2,56				
	0,35*	237	3,55				
		228	3,73				
		232	3,75				
15	0,35	199	nr				
		211	3,53				
	0,40	215	3,43				

			212	3,34
			214	3,84
		0,45*	224	3,97
			234	3,90
		0,45	186	nr
			209	nr
		0,50	197	nr
	20		193	nr
		0,55*	217	4,23
			218	4,07
			218	4,75
		0,25	175	nr
	5		205	3,73
		0,35*	198	4,09
			202	3,72
		0,45	188	nr
	10		207	3,94
		0,50*	207	3,42
0,46	40		207	4,97
		0,55	168	nr
	15		213	4,31
		0,65*	213	3,52
			213	5,32
		0,70	176	nr
	20	0,75*	205	3,83
			204	4,39
			206	4,05

Nota: AM- teor de agregado miúdo, em volume; RSPC- teor de resíduo; SP- aditivo superplastificante; D- diâmetro médio no ensaio de espalhamento; F-V- ensaio no funil V modificado.

APÊNDICE 3 – RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIAS À COMPRESSÃO AXIAL NAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA)

Tabela 47 Resultados individuais de resistência à compressão das argamassas autoadensáveis, aos 7 e 28 dias

a/c	Mistura	fc ₇ (MPa)						fc ₂₈ (MPa)					
0,70	5RSPC	15,4	15,4	15,3*	16,0	14,7*	**	22,8*	17,7*	17,7*	20,8	20,6	20,6
	10RSPC	15,2	15,0	14,3*	14,0*	14,8*	15,5	20,2*	19,2*	21,9	22,8	16,7*	22,9
	15RSPC	14,6	14,4*	15,2	14,2*	14,9	14,0	20,6*	18,9*	21,9	21,0	22,3	20,8*
	20RSPC	15,4	15,2	13,4*	14,8*	14,9*	15,7	16,1*	20,5*	20,5*	21,2	21,2	21,6
0,57	5RSPC	21,7	22,4	19,3*	22,7	19,0*	**	26,5*	28,7	31,0*	27,0*	27,8	28,0
	10RSPC	23,1	22,3*	21,0*	22,6*	22,6	22,8	33,3	31,8	34,0	31,7	30,2	33,2
	15RSPC	18,1*	18,3*	22,3	22,1	22,0*	22,6	29,5	22,7*	22,5*	28,9	26,3*	30,1
	20RSPC	22,9	20,4	23,1	22,5	22,1	21,2	34,0	29,6	28,1	32,0	32,3	27,5

Nota: fc₇- Resistência média à compressão, aos 7 dias; fc₂₈- Resistência média à compressão aos 28 dias; * Valores excluídos nos cálculos das médias para reduzir dispersão; **corpo de prova quebrou na execução do ensaio.

APÊNDICE 4 – RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA)

Tabela 48 Resultados individuais da absorção de água por imersão, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, das argamassas autoadensáveis estudadas

a/c	Mistura	A (%)	IV (%)	Massa específica – (g/cm ³)		
				MEs	MEsat	MEreal
0,70	5RSPC	14,3	27,0	1,89	2,16	2,60
		13,8	26,4	1,90	2,17	2,59
		13,4	25,7	1,92	2,18	2,58
	10RSPC	14,4	27,2	1,89	2,16	2,60
		14,1	26,7	1,90	2,17	2,59
		14,2	26,9	1,90	2,17	2,60
	15RSPC	14,8	27,8	1,88	2,16	2,61
		14,7	27,7	1,88	2,16	2,60
		14,8	27,8	1,88	2,16	2,61
	20RSPC	14,7	27,6	1,88	2,16	2,60
		14,6	27,6	1,89	2,17	2,61
		14,8	27,9	1,88	2,16	2,61
0,57	5RSPC	14,0	26,6	1,90	2,16	2,58
		14,1	26,8	1,90	2,17	2,60
		14,1	26,8	1,90	2,17	2,59
	10RSPC	14,4	27,1	1,89	2,16	2,59
		14,2	27,0	1,89	2,16	2,59
		14,4	27,3	1,89	2,16	2,60
	15RSPC	14,6	27,4	1,88	2,16	2,59
		14,5	27,3	1,88	2,16	2,59
		14,5	27,3	1,89	2,16	2,59
	20RSPC	14,6	27,4	1,88	2,15	2,59
		14,6	27,4	1,88	2,15	2,59
		14,6	27,3	1,88	2,15	2,58

Nota: A- Absorção de água por imersão; Sd- desvio padrão; CV – coeficiente de variação; IV – índice de vazios; MEs – massa específica seca; MEsat – massa específica saturada; MEreal – massa específica real.

APÊNDICE 5 – RESULTADO DA COMPARAÇÃO MÚLTIPLA DE MÉDIAS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR IMERSÃO DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA)

Duncan test; variable A (Absorção argamassa)				
Approximate Probabilities for Post Hoc Tests				
Error: Between MS = ,02891, df = 16,000				
RSPC	{1}	{2}	{3}	{4}
	13,952	14,283	14,632	14,640
5		0,003976	0,000086	0,000065
10	0,003976		0,002816	0,003054
15	0,000086	0,002816		0,933512
20	0,000065	0,003054	0,933512	

Figura 71 Comparação múltipla de médias entre os valores de absorção de água das AA

APÊNDICE 6 - RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA POR CAPILARIDADE DAS ARGAMASSAS AUTOADENSÁVEIS (AA)

Tabela 49 Resultados individuais das argamassas autoadensáveis obtidos no ensaio de absorção de água por capilaridade, aos 28 dias

a/c	Mistura	A ₁₀ (g/cm ²)	A ₉₀ (g/cm ²)	Cc (g/dm ² .min ^{1/2})	
0,70	5RSPC	0,3	0,7	6,5	
		0,3	0,7	6,6	
		0,3	0,7	6,5	
	10RSPC	0,3	0,6	5,8	
		0,3	0,6	5,7	
		0,3	0,7	5,9	
	15RSPC	0,3	0,7	5,8	
		0,3	0,6	5,6	
		0,3	0,7	5,7	
	20RSPC	0,3	0,6	5,4	
		0,3	0,6	5,4	
		0,3	0,6	5,4	
	0,57	5RSPC	0,2	0,5	4,6
			0,3	0,6	5,0
			0,2	0,5	4,8
10RSPC		0,3	0,6	4,8	
		0,2	0,5	4,3	
		0,2	0,5	4,0	
15RSPC		0,2	0,5	4,2	
		0,2	0,5	4,0	
		0,2	0,5	4,0	
20RSPC		0,3	0,5	4,0	
		0,2	0,5	3,7	
		0,3	0,5	3,7	

Nota: A₁₀- Taxa de absorção de água por capilaridade aos 10 minutos do início do ensaio; A₉₀- Taxa de absorção de água por capilaridade aos 90 minutos do início do ensaio; Cc- Coeficiente de capilaridade.

APÊNDICE 7 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO AXIAL DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS (CAA)

Tabela 50 Resultados individuais de resistência à compressão axial, aos 7 e 28 dias dos CAA estudados

a/c	Mistura	fc ₇ (MPa)					fc ₂₈ (MPa)		
0,70	C-R	15,0*	16,9	17,5	16,8	22,2	21,9	22,7	20,4*
	C-RSPC	12,8*	13,2	13,1	14,3	19,2	17,2*	19,1	18,9
0,57	C-R	24,0	24,4	23,9	22,2*	30,2	32,1	27,6*	31,5
	C-RSPC	21,3	20,9	18,9*	21,6	27,3	28,4	24,5*	27,2

Nota: fc₇ - Resistência à compressão axial, aos 7 dias; fc₂₈ - Resistência à compressão axial, aos 28 dias; *Valores excluídos dos cálculos das médias para reduzir dispersão.

**APÊNDICE 8 - RESULTADOS DO ENSAIO DE RESISTÊNCIA À
TRAÇÃO POR COMPRESSÃO DIAMETRAL DOS CONCRETOS
AUTOADENSÁVEIS (CAA)**

Tabela 51 Resultados individuais de resistência à tração por compressão diametral, aos 7 e 28 dias dos CAA estudados

a/c	Mistura	ft D₇ (MPa)	ft D₂₈ (MPa)
0,70	C-R	2,10	2,18*
		1,57*	2,47
		1,69*	1,44*
		2,10	2,39
	C-RSPC	1,56*	1,42*
		1,33	2,05*
		1,28*	2,24
		1,38	2,40
0,57	C-R	1,84	2,48
		2,86	2,96
		2,69	2,61
		2,54	3,40
	C-RSPC	2,22*	1,66*
		1,57	1,71*
		1,63	2,74
		1,44*	3,00

Nota: ft D₇ - Resistência média à tração por compressão diametral, aos 7 dias; ft D₂₈ - Resistência média à tração por compressão diametral, aos 28 dias; *- Valores excluídos no cálculos das médias para reduzir dispersão.

APÊNDICE 9 - RESULTADOS DO ENSAIO DE ABSORÇÃO DE ÁGUA, ÍNDICE DE VAZIOS E MASSA ESPECÍFICA DOS CONCRETOS AUTOADENSÁVEIS (CAA)

Tabela 52 Resultados individuais da absorção de água, índice de vazios e massa específica, aos 28 dias, dos CAA estudados

a/c	Mistura	A (%)	IV (%)	Massa específica (g/cm ³)		
				MEs	MEsat	MEreal
0,70	C-R	8,4	16,5	1,97	2,14	2,36
		8,2	16,0	1,94	2,10	2,31
		8,2	16,0	1,96	2,12	2,33
	C-RSPC	8,4	16,5	1,97	2,14	2,36
		8,2	16,0	1,94	2,10	2,31
		8,2	16,0	1,96	2,12	2,33
0,57	C-R	7,6	14,5	1,90	2,04	2,22
		7,8	15,1	1,93	2,08	2,27
		7,8	15,2	1,94	2,09	2,29
	C-RSPC	8,6	18,2	2,13	2,31	2,60
		8,5	18,1	2,13	2,31	2,60
		9,0	18,9	2,11	2,29	2,59

Nota: A – Taxa de Absorção de água por imersão; IV – índice de vazios; MEs – massa específica seca; MEsat – massa específica saturada; MEreal – massa específica real.