

**UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA E AMBIENTAL
PPGEUA**

MARCELO ANDRADE DINIZ

**CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL
UTILIZANDO RESÍDUOS DE CAULIM**

**JOÃO PESSOA
2010**

MARCELO ANDRADE DINIZ

**CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL
UTILIZANDO RESÍDUOS DE CAULIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental da Universidade Federal da Paraíba, como exigência para a obtenção do título de mestre na área de Engenharia Urbana e Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

João Pessoa
2010

D585c

Diniz, Marcelo Andrade

Concreto auto-adensável utilizando resíduos de caulim /
Marcelo Andrade Diniz. João Pessoa, [s.n.]: UFPB,
2010. 122f.

Trabalho de Conclusão do Programa de Pós-graduação em
Engenharia Urbana e Ambiental do Centro de tecnologia da
UFPB.

Orientador: Givanildo Alves de Azeredo.
Dissertação (Mestrado) – UFPb - CT

1 Concreto auto-adensável. 2 Resíduos de caulim.
3 Fíler calcário. 4 Aditivo superplastificante.

UFPb/BC

CDU: 62:711(043)

MARCELO ANDRADE DINIZ

**CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL
UTILIZANDO RESÍDUOS DE CAULIM**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental do Centro de tecnologia da UFPB, como exigência legal para a obtenção do título de Mestre na área de Engenharia Urbana e Ambiental.

Dissertação aprovada em: 30 de setembro de 2010

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo (Orientador – UFPB)

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa (Examinador Interno)

Prof. Dr. Ulisses Targino Bezerra (Examinador Externo)

Prof. Dr. Karoline Akves de Melo Moraes (Examinador Externo)

Dedico este trabalho a **Deus**
a quem devo tudo.

A minha esposa
Luciana,
pelo seu amor, amizade, compreensão, carinho
e por potencializar em mim o que tenho de melhor.
Você é um Presente de Deus na minha vida.
A você todo o meu amor, toda a minha gratidão, toda a minha vida.

Ao meu pai Zenilton e minha mãe Maria das Graças,
se contornei obstáculos, se consegui vitórias e se aqui estou,
com certeza, foi porque tenho pais maravilhosos,
que me dão todo apoio e demonstram o melhor exemplo de honestidade,
trabalho, esforço e um amor imensurável por mim.
Minha eterna gratidão.
Amo vocês.

As minhas irmãs
Millena e Tayza,
pelo carinho, amor...
Sou muito feliz por vocês serem minhas irmãzinhas.

As meus cunhados
Felipe, Raoni e Tiago,
pela amizade, companheirismo...
Sou muito feliz por vocês serem meus irmãos.

AGRADECIMENTOS

Em especial a minha esposa **Luciana**.

A toda a minha família pela oração.

Aos meus sogros Judenir e Vera Lúcia
por ter me acolhido como filho e
pela nova família que recebi quando vocês entraram na minha vida.

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo,
por ter se disponibilizado em ser meu orientador,
pelos ensinamentos transmitidos e oportunidades dadas.
A atenção e sobretudo a confiança que sempre demonstrou,
deram-me segurança para vencer as dificuldades.

A Universidade Federal da Paraíba,
e a todos que a fazem, mestres e funcionários,
por terem feito parte do meu processo de amadurecimento.

A **Maria Mãe de Deus** e minha mãe.

“Não basta a leitura sem a unção, não basta a especulação sem a devoção, não basta a pesquisa sem maravilhar-se; não basta a circunspeção sem o júbilo, o trabalho sem a piedade, a ciência sem a caridade, a inteligência sem a humanidade, o estudo sem a graça”.

São Boaventura

RESUMO

O concreto auto-adensável (CAA), considerado como um dos maiores avanços na tecnologia do concreto, é caracterizado por suas capacidades especiais de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação pela ação do seu próprio peso sem que existam outras forças externas. Diante do panorama em que as cidades e suas indústrias têm provocado um considerável aumento na produção dos resíduos sólidos, incluir resíduos industriais ao CAA traz benefícios ambientais significativos. Assim, este trabalho teve por objetivo desenvolver um CAA com inserção de resíduos provenientes da fabricação de caulim, mais especificamente a birra e a borra. No CAA de referência foi utilizado o fíler calcário. Na confecção do CAA foram utilizados como base os métodos de dosagem Tutikian (2007) e Gomes (2002), sendo realizados os testes do Funil de Marsh e mini-cone para composição da pasta e os testes de compactação dos materiais para confecção dos esqueletos granulométricos. Para avaliar as propriedades do CAA no estado fresco foram executados os testes do espalhamento, espalhamento T50cm, funil-V, funil V 5min, caixa-L, caixa-U e anel-J. Foi constatada a possibilidade de utilizar resíduos provenientes do beneficiamento de caulim em um CAA, a borra como material fino e a birra em substituição de parte dos agregados. No estado endurecido, foram executados testes de resistência à compressão aos 7 e 28 dias, obtendo resistências na faixa aproximada de 20 MPa a 40 MPa.

Palavras-chave: Concreto auto-adensável. Resíduos de caulim. Fíler calcário. Aditivo superplastificante.

ABSTRACT

Self-compacting concrete (SCC), considered one of the greatest advances in concrete technology, is characterized by its special capacity of filling ability, passing ability and resistance to segregation by the action of its own weight without the presence of other external forces. Taking into consideration the numerous cities and their industries that have caused a considerable increase in the production of solid waste, including industrial waste in SCC has brought about significant environmental benefits. This study aimed to develop a SCC with inclusion of waste from the manufacturing of kaolin, specifically from what is called "birra" and "borra". The most common producers of SCC used limestone filler. In the production of SCC the mix-design method Tutikian (2007) and Gomes (2002) were used as a base, the Marsh funnel and miniature slump tests for paste composition and the compactability test of materials for the fabrication of granulometric skeletons. In order to evaluate the properties of SCC in fresh state tests, the slump flow test, slump flow test T50cm, V-funnel, V-funnel 5min, L-box, U-box and J-ring were used. The possibility of using waste from the kaolin beneficiation in a SCC was proven, where the "borra" was used as fine material and "birra" as a replacement for aggregates. In the hardened state, testing of compressive strength were carried out on the 7th and 28th days, resulting in resistance rate of approximately 20 to 40MPa.

Key words: Self-compacting concrete. kaolin Waste. Limestone Filler. Superplasticizer.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Teste do espalhamento _____	29
Figura 2: teste do espalhamento T50cm. _____	31
Figura 3: teste do anel J _____	33
Figura 4: teste do funil V e funil V 5min _____	35
Figura 5: teste da caixa L _____	38
Figura 6: teste da caixa U _____	40
Figura 7: Comparação da proporção dos materiais entre o CAA e o CCV. (OKAMURA e OUCHI, 2003). _____	43
Figura 8: Resumo do método de Okamura. (OKAMURA e OUCHI, 2003) _____	43
Figuras 9 e 10: Teste do Espalhamento e Funil V para argamassa, respectivamente (OKAMURA e OUCHI, 2003) _____	44
Figura 11: Resumo do método de Tutikian (2007) _____	46
Figura 12: exemplo de diagrama de dosagem com o α variando (TUTIKIAN, 2007) _____	51
Figura 13: exemplo de diagrama de desempenho relacionando resistência à compressão, com módulo de elasticidade, com velocidade de onda ultra-sônica e penetração de íons de cloreto (TUTIKIAN, 2007). _____	52
Figura 14: resumo do método de Gomes (2002). _____	53
Figura 15: Funil de Marsh _____	55
Figura 16: mini-cone do ensaio mini-cone para otimização dos finos na pasta. _____	56
Figura 17: Saco de cimento CP II F 32 _____	61
Figura 18: brita 19 mm _____	62
Figura 19: brita 9,5 mm _____	62
Figura 20: areia _____	63
Figura 21: filer calcário _____	64
Figura 22: curva granulométrica do filer calcário. _____	65
Figura 23: birra _____	65

Figura 24: borra _____	65
Figura 25: curva granulométrica da borra _____	66
Figura 26: galão 3,6 litros _____	67
Figura 27: curva granulométrica dos materiais utilizados _____	68
Figura 28: equipamentos para o teste do espalhamento e espalhamento T50cm _	69
Figura 29: equipamento para o teste do funil V _____	70
Figura 30: equipamentos para o teste do Anel J _____	70
Figura 31: equipamento para o teste da caixa L _____	70
Figura 32: equipamentos para o teste da caixa U _____	71
Figura 33: equipamento utilizado no teste do Funil de Marsh. _____	76
Figura 34: desenho e dimensões do mini-cone utilizado nesta dissertação. _____	77
Figura 35: ensaio do mini-cone para otimização dos finos na pasta. _____	78
Figura 36: testes do concreto no estado fresco _____	80
Figura 37: ensaio de resistência à compressão do concreto no estado endurecido	80
Figura 38: gráfico dos resultados finais dos quatro grupos de esqueletos granulométricos. _____	85
Figura 39: obtenção do ponto de saturação da pasta com relação a/c 0,40, através do Funil de Marsh _____	89
Figura 40: Porcentagem dos materiais dos esqueletos granulométricos _____	94
Figura 41: gráfico do consumo de cimento dos concretos desenvolvidos _____	106
Figura 42: gráfico de resistência à compressão no estado endurecido (7 dias) __	108
Figura 43: gráfico de resistência à compressão no estado endurecido (28 dias) _	108

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do espalhamento.	30
Tabela 2: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do espalhamento T50cm.	32
Tabela 3: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do anel J.	34
Tabela 4: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do funil V.	36
Tabela 5: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do funil V 5min	36
Tabela 6: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste da caixa L.	39
Tabela 7: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste da caixa U.	41
Tabela 8: massas específicas e unitárias dos materiais utilizados	68
Tabela 9: granulometria dos materiais utilizados	68
Tabela 10: grupos de esqueleto granulométrico e seus respectivos materiais.	72
Tabela 11: grupos de esqueleto granulométrico e seus respectivos materiais.	73
Tabela 12: grupos de esqueleto granulométrico e seus respectivos materiais.	79
Tabela 13: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 1)	83
Tabela 14: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 1)	83
Tabela 15: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 1)	83
Tabela 16: Resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)	83
Tabela 17: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)	83
Tabela 18: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)	83

Tabela 19: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 2)	83
Tabela 20: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)	84
Tabela 21: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)	84
Tabela 22: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)	84
Tabela 23: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 3)	84
Tabela 24: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)	84
Tabela 25: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)	84
Tabela 26: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)	84
Tabela 27: resultado do quarto teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)	84
Tabela 28: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 4)	85
Tabela 29: resultados dos testes de trabalhabilidade do concreto composto pelo grupo 1	86
Tabela 30: resultados dos testes de trabalhabilidade do concreto composto pelo grupo 2	86
Tabela 31: resultados dos testes de compatibilidade ad/c e determinação do ponto de saturação.	88
Tabela 32: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/finos ideal	90
Tabela 33: teste do mini-cone para verificação da relação aditivo/cimento+fíler	90
Tabela 34: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/finos ideal	90
Tabela 35: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/finos ideal	91
Tabela 36: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/resíduo ideal	92
Tabela 37: resultado do primeiro teste e composição final do esqueleto granulométrico (grupo 1)	92
Tabela 38: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)	92

Tabela 39: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)	93
Tabela 40: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 2)	93
Tabela 41: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)	93
Tabela 42: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)	93
Tabela 43: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 3)	93
Tabela 44: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)	93
Tabela 45: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)	93
Tabela 46: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)	93
Tabela 47: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 4)	94
Tabela 48: denominações dos tipos de CAA desenvolvidos com respectivas abreviaturas	95
Tabela 49: CAA desenvolvidos com respectivos materiais utilizados	95
Tabela 50: valores aceitos pela maioria dos pesquisadores para os ensaios de trabalhabilidade.	97
Tabela 51: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco	97
Tabela 52: consumo de cimento e teor de argamassa	97
Tabela 53: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco	98
Tabela 54: consumo de cimento e teor de argamassa	98
Tabela 55: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco	99
Tabela 56: consumo de cimento e teor de argamassa	99
Tabela 57: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco	100
Tabela 58: consumo de cimento e teor de argamassa	100
Tabela 59: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco	101
Tabela 60: consumo de cimento e teor de argamassa	101
Tabela 61: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco	102

Tabela 62: consumo de cimento e teor de argamassa_____	102
Tabela 63: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco____	Erro!
Indicador não definido.	
Tabela 64: consumo de cimento e teor de argamassa_____	103
Tabela 65: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco____	104
Tabela 66: consumo de cimento e teor de argamassa_____	104
Tabela 67: resumo dos resultados dos concretos testados quanto à capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação_____	105
Tabela 68: resultados dos testes de resistência à compressão no estado endurecido (MPa)_____	107
Tabela 69: comparativo entre traços obtidos pela metodologia de Tutikian (2007) e Gomes (2002) _____	109
Tabela 70: comparativo entre traços obtidos pela metodologia de Tutikian (2007) e Gomes (2002) _____	109
Tabela 71: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco____	111
Tabela 72: consumo de cimento e teor de argamassa_____	111

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 Considerações iniciais	16
1.2 Justificativa	18
1.3 Objetivos:	20
1.4 Breve referência às fontes consultadas	21
1.5 Menção aos aspectos metodológicos	21
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1 Histórico	22
2.2 Definição e características	24
2.3 Avaliação do CAA	28
2.3.1 Teste do Espalhamento (<i>Slump Flow Test</i>)	28
2.3.2 Teste do Espalhamento T50cm (<i>Slump Flow Test T50cm</i>)	31
2.3.3 Teste do Anel J (<i>J Ring test</i>)	32
2.3.4 Teste do Funil V e teste do Funil V 5min (<i>V Funnel Test</i>)	34
2.3.5 Teste da Caixa em L (<i>L Box Test</i>)	37
2.3.6 Teste da Caixa em U (<i>U Box Test</i>)	39
2.3.7 Outros ensaios existentes	41
2.4 Métodos de dosagem	42
2.4.1 Método de dosagem proposto por Okamura (1997)	43
2.4.2 Método de dosagem proposto por Tutikian (2007)	45
2.4.3 Método de dosagem proposto por Gomes (2002)	52
2.5 Resíduos de caulim	58
3 MATERIAIS E MÉTODOS	61
3.1 Apresentação e caracterização dos materiais	61
3.2 Métodos	69
3.2.1 Metodologia segundo Tutikian (2007)	72
3.2.2 Metodologia segundo Gomes (2002)	75
3.2.3 Comparativo dos traços obtidos pelos métodos de Tutikian (2007) e Gomes (2002)	81

4 RESULTADOS	82
4.1 Método de Tutikian (2007)	82
4.1.1 Escolha dos materiais	82
4.1.2 Determinação do esqueleto granular	82
4.1.3 Determinação da relação água/ cimento ou percentual de aditivo superplastificante	86
4.2 Método de Gomes (2002)	88
4.2.1 Composição da pasta	88
4.2.2 Composição do esqueleto granulométrico	92
4.2.3 Composição do concreto	95
4.3 Comparativo dos traços obtidos pelos métodos de Tutikian (2007) e Gomes (2002)	109
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	112
6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	114
REFERÊNCIAS	115

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações iniciais

A cada dia o nível de exigência tecnológica acerca do concreto cresce. Segundo Mehta e Monteiro (2008), a evolução na tecnologia do concreto é resultante da tentativa de superar certas deficiências das misturas de concretos convencionais de cimento Portland. A capacidade de se obter valores cada vez maiores de resistência à compressão foi um dos primeiros fatores que impulsionou o desenvolvimento do concreto. Posteriormente, outras necessidades foram surgindo e a exigência por concretos com características especiais foram sendo desenvolvidas. Atualmente existem inúmeros tipos de concretos como: o estrutural leve; de alta resistência; de alto desempenho; com retração compensada; reforçado com fibras; contendo polímeros; pesado para blindagem de radiação; concreto massa; compactado com rolo; com altos teores de adições e pozolanas; aparente; colorido; branco; translúcido; sustentável; e ainda entre outros, o auto-adensável.

Este último citado, que é o objeto de estudo deste trabalho, começou a ser desenvolvido na universidade de Tóquio, no Japão, pouco mais de vinte anos atrás (OKAMURA; OUCHI, 1999), e surgiu devido principalmente à necessidade de se vencer os problemas existentes quanto ao adensamento nas estruturas de maior complexidade e de grande quantidade de armadura empregada (LISBOA, 2004).

O concreto auto-adensável (CAA) é definido como o concreto capaz de fluir sob seu próprio peso e preencher completamente as fôrmas, até mesmo na presença de uma alta densidade de armadura, sem a necessidade de qualquer vibração, ainda mantendo homogeneidade (SKARENDAHL, 2000; EFNARC, 2002).

Durante as últimas duas décadas inúmeros estudos acerca do CAA foram realizados e muitas composições de misturas foram desenvolvidas. Entretanto, muito precisa ser avaliado, pois segundo Domone (2006), o CAA possui uma família larga de misturas não havendo uma mistura única para todas as aplicações ou todos os

tipos de exigências, permanecendo assim um espaço considerável para o melhoramento das misturas em busca de maior eficiência e maior economia. Além de não se obter uma composição universal para o CAA, também não há, até agora, um método de avaliação ou uma combinação de métodos que tenha aprovação unânime para caracterizar as propriedades e os aspectos relevantes do CAA. Assim, cada composição de mistura deve ser testada por mais de um método a fim de se obterem os diferentes parâmetros de trabalhabilidade (EFNARC, 2002).

O desenvolvimento do CAA tem sido recentemente um dos avanços mais importantes na indústria da construção (BROUWERS e RADIX, 2005). Segundo Assié *et. al.* (2007), em breve se espera que o concreto convencional (CCV) seja substituído pelo CAA em muitas aplicações por causa de suas várias vantagens, como redução dos efeitos prejudiciais do ruído provenientes dos vibradores em ambientes urbanos, possibilidade de lançamento em locais fortemente armados ou com geometria complexa e redução nos custos do processo industrial.

Diante dos novos estudos para a melhoria do concreto se apresenta ainda a possibilidade de inserção de resíduos industriais em sua composição, alguns com propriedades pozolânicas, com o objetivo de reduzir custos e minimizar os impactos ambientais. Trazendo em particular o caso do CAA, que permite a utilização de resíduos sólidos industriais para a melhoria de suas propriedades, há um subsídio positivo à tecnologia sustentável do concreto. Através da preservação dos recursos não-renováveis e da redução à agressão ao meio ambiente, tal utilização representa um caminho alternativo para minimização do consumo de cimento e agregados (DINIZ, 2005).

Com o crescimento da indústria da construção civil local, tanto em quantidade, quanto no porte das construções e na tecnologia empregada, se faz presente a necessidade de produtos que acompanhem esta ascensão. Neste contexto, o presente trabalho desenvolveu um concreto auto-adensável utilizando-se de resíduos industriais locais provenientes do processo de beneficiamento do caulim: a birra e a borra.

Para efeito de esclarecimento, neste trabalho foi utilizado o termo concreto convencional (CCV) para o concreto sem características especiais, também

denominado em outros trabalhos por concreto vibrado, concreto tradicional, concreto comum, etc.

1.2 Justificativa

A atividade desenvolvida pela indústria da construção civil gera grande impacto ao meio ambiente, principalmente no âmbito da utilização de recursos naturais. Na concepção de Pinto (1999), a construção empresarial no cenário atual tem cada vez menos espaço para convivência com o elevado percentual de perdas detectado e com o desperdício de recursos naturais não renováveis, seja por injunções econômicas, seja por questões ambientais.

Diante do panorama em que as cidades e suas indústrias têm provocado um considerável aumento na produção dos resíduos sólidos, o seu tratamento e a sua destinação final precisam ser cada vez mais objeto de pesquisas.

Além disso, a indústria da construção civil no mundo inteiro tem exigido concretos de maior trabalhabilidade, de custos mais baixos e de mais rápida e fácil execução. O concreto auto-adensável representa uma evolução na tecnologia do concreto apresentando benefícios econômicos, tecnológicos e ambientais, concedendo mais sustentabilidade ao concreto (CAVALCANTE, 2006). O mercado e a indústria locais não podem ficar distantes desta realidade, por isso pesquisas que desenvolvam concretos que atendam a essas necessidades são de extrema relevância. Sendo o CAA um desses tipos de concreto, adequá-lo ao contexto local quanto à sua composição, método de produção e avaliação torna-se imprescindível para o crescimento da indústria da construção civil local.

Outro ponto relevante é o fato de que, com o crescimento das cidades e suas indústrias, há também um aumento na geração dos resíduos industriais que traz sérios problemas para o meio ambiente. Esse contexto gera um impulso na busca de soluções para o tratamento e destinação final destes resíduos industriais.

Uma forma de amenizar a agressão ao meio ambiente e de baixar os custos de produção é utilizar materiais rejeitados pelas indústrias. Neste sentido, a construção civil possui um grande campo para utilização de resíduos em sua produção e incluir resíduos provenientes do beneficiamento de caulim ao CAA com grande potencial de utilização pela indústria da construção civil traz benefícios ambientais significativos.

Com a utilização de resíduos industriais, além da contribuição à preservação do meio ambiente, há a possibilidade de minimizar os custos de produção e assim reduzir o preço das construções. Isto se faz verdade com a economia de matéria prima e a não deposição dos rejeitos na natureza através da substituição de parte dos agregados naturais (areia e cascalho) por agregados artificiais (resíduos industriais).

Segundo Nóbrega (2007), do processo de beneficiamento do caulim são gerados dois resíduos diferentes, chamados popularmente na região de birra e borra, ambos não possuindo valor econômico algum e nem destino de reutilização. Isto justifica produzir um CAA que empregue em sua composição este resíduo industrial, reduzindo assim o impacto ambiental provocado pelo simples descarte deste rejeito.

Outro benefício gerado pela produção de um CAA que se insira no mercado local é a sua possível utilização em obras de infra-estruturas públicas. Obras que possam ser executadas com maior rapidez, menos ruído, maior segurança do trabalho (pela não utilização do vibrador e redução do número de trabalhadores no canteiro de obras), geram menos transtornos em nível urbano, além de todas as outras vantagens do CAA.

Por fim, Alencar (2008) afirma que o estágio atual do desenvolvimento tecnológico do CAA no Brasil é atrasado devido a uma carência de documentos técnicos e de base científica que permitam a sua evolução, o que torna o uso deste tipo de concreto limitado apenas a casos especiais. Com isto, confirma-se a importância desta pesquisa a fim de tentar impulsionar a realidade local a se enquadrar no contexto internacional.

1.3 Objetivos:

Objetivo Geral:

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um concreto auto-adensável utilizando materiais locais com inserção de resíduos provenientes da fabricação de caulim, mais especificamente a birra e a borra.

Objetivos Específicos:

- Testar a compatibilidade do aditivo hiperplastificante adotado com os materiais constituintes de concreto;
- Identificar a dosagem ideal dos resíduos de caulim na pasta (com a borra) e na composição do esqueleto granular (com a birra) do CAA;
- Constatar a capacidade de preenchimento, de escoamento e a resistência à segregação do concreto em estudo no estado fresco para poder classificá-lo como CAA;
- Verificar a resistência à compressão do CAA no estado endurecido.

1.4 Breve referência às fontes consultadas

Para a realização desta dissertação foram consultadas fontes nacionais e fontes internacionais, que vão desde 1993 a 2010, a fim de enquadrar o trabalho dentro de um contexto real e atual. Além disto, normas técnicas nacionais e internacionais foram consultadas para a realização dos testes.

1.5 Menção aos aspectos metodológicos

Este trabalho foi constituído das etapas de revisão bibliográfica, definições e principais características do CAA, além de estudo e definição dos ensaios de avaliação do CAA no estado fresco. Em seguida foi definida a composição do CAA, com a caracterização dos materiais constituintes, e definição do universo da amostra. Em paralelo, foi realizada a confecção dos equipamentos e aquisição dos materiais para os ensaios. Posteriormente, foi realizada a confecção do CAA propriamente dito, através dos métodos de Tutikian (2007) e de Gomes (2002), com a devida avaliação das propriedades do CAA no estado fresco, sendo executados os testes do espalhamento, espalhamento T50cm, funil-V, funil V 5min, caixa-L, caixa-U e anel-J. Dos CAA`s, foram moldados corpos de prova para avaliação das propriedades no estado endurecido (execução do teste de resistência à compressão simples). Por fim, foram tabulados e discutidos os dados resultantes dos testes e feita a redação final da dissertação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Histórico

O Concreto auto-adensável (CAA) começou a ser desenvolvido no Japão na década de oitenta do século passado devido a problemas no processo de adensamento decorrentes principalmente da complexidade das estruturas utilizadas (MELO, 2005) e para resolver o problema da baixa durabilidade de construções em concreto armado (TUTIKIAN, 2004).

Mais precisamente, em 1983 foram iniciados os primeiros estudos; em 1986 surgiu o CAA propriamente dito; em 1988 foi aplicado o primeiro protótipo pelo professor Hajime Okamura da Universidade de Tóquio (OKAMURA, 1997); em 1989 foi publicado o primeiro trabalho sobre o CAA pelo professor Ozawa, também da Universidade de Tóquio; e em 1993, Okamura, Ozawa e Macawa lançaram o livro *High Performance Concrete*, que apesar do título se referir ao concreto de alto desempenho, foi o primeiro acerca do CAA (OKAMURA, OUCHI, 1999). Ainda por volta de 1993, a difusão de tecnologia do Japão chegou à Europa através da Ásia.

Apesar do início do CAA ser atribuído à cidade de Tóquio, no Japão, Collepardi (2001) acredita que este concreto também era estudado e aplicado em outras cidades como em Hong Kong, Nova York e Trieste.

Nos seus primeiros anos de desenvolvimento, o CAA pouco foi divulgado e/ou publicado. Esta pouca divulgação do CAA se deve ao fato de que as empresas que estavam desenvolvendo esse novo concreto esperavam ganhar comercialmente com ele, inclusive utilizando-se de nomes diferenciados como *Superquality concrete* (SQC), *Non-vibrated concrete* (NVC) e *Biocrete* (BARTOS e SÖDERLIND, 2000).

Após essa fase inicial, o CAA tomou um impulso bastante significativo através dos seminários da União Internacional dos Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas Construtivos e Estruturas - RILEM (*Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux, systèmes de construction et ouvrages*) e

seus respectivos Comitês Técnicos. O primeiro RILEM Comitê Técnico de SCC (CT 174-SCC), presidido pelo Dr. Skarendahl, foi criado em 1997, e em 2000 concluiu os seus trabalhos com o relatório nº 23 sobre o estado-da-arte.

Em 1998, foi realizado em Kochi, no Japão, um seminário internacional sobre CAA, e em 1999, em Estocolmo, na Suécia, foi seguido pelo Primeiro Simpósio Internacional RILEM sobre CAA. No ano de 2000, RILEM estabeleceu a segunda comissão técnica, CT 188-CSC, com mais ênfase nos aspectos de produção. Em 2001, foi realizado em Tóquio, Japão, o Segundo Simpósio Internacional acerca do CAA.

Um grande passo no processo de desenvolvimento do CAA foi provavelmente a sua utilização na América do Norte, onde uma quantidade significativa foi produzida no ano de 2000, e, presumivelmente, ultrapassou um milhão de metros cúbicos no total, até o final de 2002. A primeira conferência Norte-Americana sobre CAA foi realizada com grande sucesso em 2002, presidida pelo Prof Shah.

Em 2003, foi realizado o terceiro Simpósio Internacional RILEM sobre CAA, em associação com o CT 188 CSC. Em 2005 o quarto Simpósio Internacional RILEM sobre CAA foi realizado em paralelo com a segunda conferência Norte-Americana sobre CAA na cidade de Chicago – Estados Unidos. Em 2006, foi publicado o relatório final nº 35 do RILEM CT 188 CSC: Moldagem do CAA (SKARENDAHL; BILLBERG, 2006)

Em 2007, no quinto Simpósio Internacional RILEM sobre CAA, dando seguimento aos trabalhos da CT 188-CSC, duas novas comissões de trabalho em CAA foram estabelecidas. Uma comissão, RILEM CT 209-RFC, centra-se sobre “Reologia de materiais de cimento fresco”, presidido por Ólafur Wallevik. A segunda comissão, presidida por Geert De Schutter, foi RILEM CT 205-DSC, que finalizou seus trabalhos com o relatório nº 38 - “Durabilidade do concreto auto-adensável” – estado da arte (SCHUTTER; AUDENAERT, 2007).

A cada dia, os estudos acerca do CAA e o interesse do setor da construção civil nesse tema crescem, visto o número de publicações e devido às diversas vantagens encontradas no CAA em relação ao CCV.

2.2 Definição e características

Segundo Skarendahl (2000), pode ser descrito como CAA o concreto que durante a moldagem não está sujeito à entrada de qualquer energia externa de vibradores, compactadores ou ações similares, sendo esta capacidade obtida através da concepção de adequadas propriedades reológicas inerentes ao concreto.

O concreto auto-adensável (CAA) utiliza os materiais base do concreto convencional (CCV). Todavia, enquanto o CCV é constituído por cimento, água, agregados miúdos e agregados graúdos, o CAA, além dos componentes do CCV citados anteriormente, possui a adição de aditivos (superplastificantes e modificadores de viscosidade) e materiais finos. Devido a estas adições, o CAA passa a possuir proporções de dosagens distintas como também diferir em algumas propriedades, sobretudo no estado fresco.

Segundo Sedran e Larrard (1999), o critério de escolha dos materiais empregados na produção do CAA deve ser cuidadoso, pois se trata de um material bastante sensível à variação de seus componentes e dos procedimentos de produção.

O que define um concreto como sendo um CAA são as suas propriedades ainda no estado fresco. São elas: capacidade de escoamento ou de passagem, capacidade de preenchimento (fluidez) e resistência à segregação (homogeneidade). Quanto a estas propriedades a EFNARC (2002) definiu:

- Capacidade de escoamento: capacidade que o CAA tem de passar por pequenas aberturas como os espaços entre as armaduras sem segregação ou bloqueio;
- Capacidade de preenchimento: capacidade que o CAA tem de fluir e preencher completamente todos os espaços dentro de uma forma, sob o seu próprio peso;
- Resistência à segregação: capacidade que o CAA tem de permanecer homogêneo durante o transporte e o lançamento.

É importante lembrar que a capacidade de auto-adensamento não é necessariamente equivalente a capacidade de auto-nivelamento. Também o CAA, em relação com concretos submersos, possui muitas similaridades, contudo são diferentes em muitos aspectos (SKARENDAHL, 2000).

Devido às propriedades apresentadas, segundo Coppola (2000) e Camargos (2002) o CAA possui algumas vantagens em relação ao CCV. São elas:

- redução do número de trabalhadores;
- redução do tempo de execução da obra;
- otimização nas condições de segurança do trabalho;
- certeza de bom acabamento em concreto aparente;
- eliminação da necessidade de espalhamento e de vibração;
- eliminação do ruído provocado pelo vibrador;
- realização da concretagem sem adensamento em locais com grande densidade de armadura;
- crescimento das possibilidades de concretagem em formas de dimensões reduzidas;
- possível minimização do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional;
- redução do tempo de lançamento do concreto na estrutura, permitindo concretagens mais rápidas;
- facilita o bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais;
- eliminação de defeitos macro, bolhas de ar e falhas de concretagem;
- aumento da durabilidade devido à redução de defeitos de concretagem.

Com todas estas vantagens, a EFNARC (2002) afirma que, dentro das últimas duas décadas, o CAA é o desenvolvimento tecnológico mais revolucionário sucedido na construção de estruturas de concreto. Todavia, Lisboa (2004) afirma que apesar de existir inúmeras pesquisas já desenvolvidas com novos materiais no intuito de se obter um CAA ainda mais viável, o mesmo ainda apresenta algumas desvantagens em relação ao CCV que precisam ser contornadas. São elas:

- não é fácil de ser obtido, precisando de mão de obra especializada para sua confecção, controle tecnológico e aplicação;

- tem maior necessidade de controle durante sua aplicação;
- necessita de cuidados especiais com o transporte para evitar a segregação;
- apresenta menor tempo disponível para aplicação.

Com relação ao custo para obtenção do CAA, não tem havido um consenso. Segundo Ho *et. al.* (2001), dependendo da composição e do controle de qualidade na produção, o aumento do custo pode ser bem significativo se comparado com o CCV. Também Melo (2005) afirma que o CAA apresenta altos custos iniciais quando se pensa apenas na avaliação econômica da produção do mesmo. Entretanto, Ambroise *et. al.* (1999) conseguiram CAA com o custo dos materiais 20% acima do CCV, o que implicaria um valor equivalente considerando a redução do custo de lançamento e adensamento. Corroborando com estes, Bennenk (2007) afirma que o custo elevado é substituído pela necessidade de menos mão de obra.

Quanto à utilização, o CAA pode ser utilizado na maioria das aplicações onde o CCV é aplicado, sendo indicado em concretagens que necessitem de altas resistências, em locais de difícil acesso e em estruturas densamente armadas (SKARENDAHL, 2000).

Segundo Camargos (2002), as indicações de uso do CAA são:

- fundações executadas por hélice contínua;
- paredes, vigas e colunas;
- paredes diafragma;
- estações;
- reservatórios de água e piscinas;
- pisos, contrapisos, lajes, pilares, muros, painéis;
- obras com acabamento em concreto aparente;
- obras de concreto em locais de difícil acesso;
- em peças pequenas, com muitos detalhes ou com formatos não convencionais, onde seja difícil a utilização de vibradores e em formas de peças com grande concentração de ferragens.

Diante das tantas vantagens apresentadas e das muitas possibilidades de utilização do CAA, há também a confiabilidade nas suas propriedades no estado endurecido. Uma quantidade substancial de análises de dados dos programas de teste realizados nos últimos anos tem conduzido à confiança na durabilidade do CAA (DOMONE, 2007).

Como exemplo, testes realizados por Assié et al. (2007) para verificar as diferenças existentes entre o CAA e o CCV nas propriedades físicas no que diz respeito à durabilidade, mostraram que:

- para três classes de tensão estudadas (20 MPa; 40 MPa; 60 MPa), apesar de uma relação mais elevada de água/cimento, o CAA tem uma força de compressão equivalente (ou mesmo melhor) do que CCV;
- as propriedades dos concretos durante o transporte eram equivalentes;
- o CAA era mais resistente ao ingresso do oxigênio do que CCV;
- o CAA e CCV tiveram uma resistência similar à deterioração por agentes agressivos.

Assim, eles concluíram que ao mesmo nível de força de compressão, o CAA pode ser considerado tão útil e durável quanto o CCV nos termos de suas propriedades físico-químicas.

Devido à história relativamente curta do CAA em aplicações práticas, existe uma lacuna significativa de informações sobre seu desempenho em estruturas reais. Quanto à modelagem da vida útil do CAA, ainda é difícil prever o tempo de deterioração. Portanto, as modelagens aplicadas ao CCV podem ser utilizadas para o CAA, provavelmente com certas modificações no que diz respeito às diferentes características de microestrutura e mecanismos de transporte, devendo qualquer serviço de modelagem verificar desempenhos em longos prazos suficientes, seja no campo ou no laboratório (SCHUTTER, 2007b).

2.3 Avaliação do CAA

Segundo Gomes e Barros (2009), a alta deformabilidade e a moderada viscosidade são parâmetros que refletem o comportamento reológico do CAA e garantem as principais propriedades que devem ser atendidas. Para avaliação destas propriedades muitos testes já foram desenvolvidos. Exemplo: teste do espalhamento (com o tronco-cônico de Abrams); espalhamento T50cm; funil-V; funil V 5min; caixa-L; caixa-U; anel-J. De acordo com Gomes et al. (2008), mesmo todos podendo serem aplicados no local da obra, o teste do espalhamento com o tronco-cônico de Abrams, muitas vezes, é o único usado. Ainda segundo eles, apenas este ensaio não pode descrever se o CAA foi alcançado ou não (pois só avalia a capacidade de preenchimento) e isto pode estar caracterizando um erro na análise da capacidade de passar entre obstáculos.

A seguir, estão descritos mais detalhadamente os ensaios utilizados neste trabalho.

2.3.1 Teste do Espalhamento (*Slump Flow Test*)

O teste do espalhamento se utiliza do mesmo equipamento indicado pela NBR NM 67 (Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998b): concreto – Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio, e pela NBR NM 68 (ABNT, 1998c): concreto – Determinação da consistência do concreto pelo espalhamento de graff, que é o tronco-cônico de Abrams. Foi normalizado pela *American Society for Testing and Materials (ASTM) – Standard test method for slump flow of self-consolidating concrete. C 1611, 2006*; pela *European Standard (EN) - Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test. EN 12350-8, 2007*; e recentemente pela NBR 15823-2 (ABNT, 2010).

Considerado como o mais simples dos ensaios, o teste do espalhamento é uma adaptação do ensaio de abatimento para concretos muito fluidos. A diferença é que no ensaio de abatimento para CCV ao se lançar a amostra no molde, esta é golpeada com o soquete e é medida a altura do abatimento quando o cone é removido, enquanto no teste do espalhamento a amostra não sofre qualquer tipo de compactação, sendo seu adensamento realizado pela força da gravidade, e é medido o diâmetro do espalhamento quando removido o Cone de Abrams (Figura 1).

Os equipamentos utilizados no teste do espalhamento são basicamente uma placa quadrada de dimensões 100 cm x 100 cm com uma devida marcação de um círculo de 20 cm centralizada na base; um tronco de cone com 20 cm de diâmetro interno na parte inferior, 10cm também de diâmetro interno na parte superior e 30 cm de altura; uma concha côncava e uma espátula ou colher de pedreiro para preenchimento e remoção do concreto no cone; por fim, uma trena para medir o espalhamento do concreto.

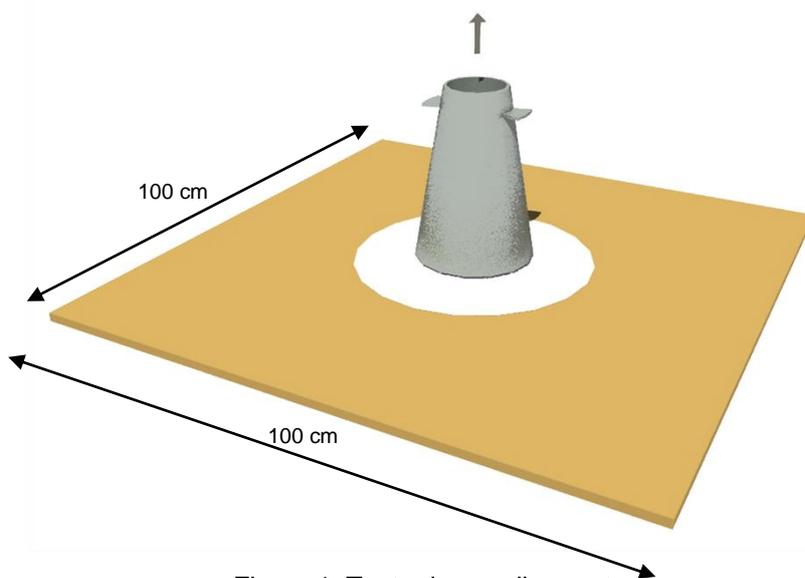


Figura 1: Teste do espalhamento

O procedimento para execução do teste do espalhamento segue as seguintes etapas:

- Umedecer a placa e o cone de Abrams para não absorver a água do concreto;
- Apoiar a placa sobre chão firme e nivelado;
- Colocar o cone sobre o círculo central de 20 cm marcado na base;

- Preencher o cone com a concha por completo (sem nenhum tipo de compactação), retirando o excesso de concreto no topo e na base, se houver;
- Erguer verticalmente o cone para permitir que o concreto escoe livremente;
- Medir o diâmetro do espalhamento em duas direções perpendiculares e calcular a média dos resultados, obtendo assim o valor do espalhamento;
- Observar a existência ou não de segregação ou exsudação.

Usado para determinar a capacidade de preenchimento, ou deformabilidade, do CAA, o teste do espalhamento deve ser realizado juntamente com outros testes para caracterização correta do concreto e ser testado.

Embora o teste do espalhamento avalie principalmente a capacidade de preenchimento, também, como descrito na última etapa do procedimento, deve ser observado se há segregação (como a distribuição irregular dos agregados graúdos e/ou separação entre a pasta e os agregados) e/ou exsudação (averiguando a existência de uma fina camada de pasta ou água de exsudação nas bordas e na parte superior do concreto). Na Tabela 1 são apresentados os valores mínimos e máximos adotados por diversos pesquisadores para o teste do espalhamento.

Tabela 1: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do espalhamento.

Teste do Espalhamento			
Referência	Valor mínimo (cm)	Valor máximo (cm)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	65	80	Capacidade de preenchimento (fluidez). Resistência à segregação (coesão). Presença de exsudação
Gomes (2002)	60	70	
Araujo (2003)	65	80	
Gomes et al. (2003)	60	75	
Lisboa (2004)	60	75	
Tutikian (2007)	60	75	
Gomes e Barros (2009)	60	80	

2.3.2 Teste do Espalhamento T50cm (*Slump Flow Test T50cm*)

O teste do espalhamento T50cm se utiliza dos mesmos equipamentos indicados anteriormente para teste do espalhamento (item 2.3.1). A variação entre os testes é caracterizada por dois fatores: a medição do tempo de escoamento e o acréscimo de uma marcação de círculo de 50 cm de diâmetro centralizado na placa quadrada de 100 cm x 100 cm (Figura 2).

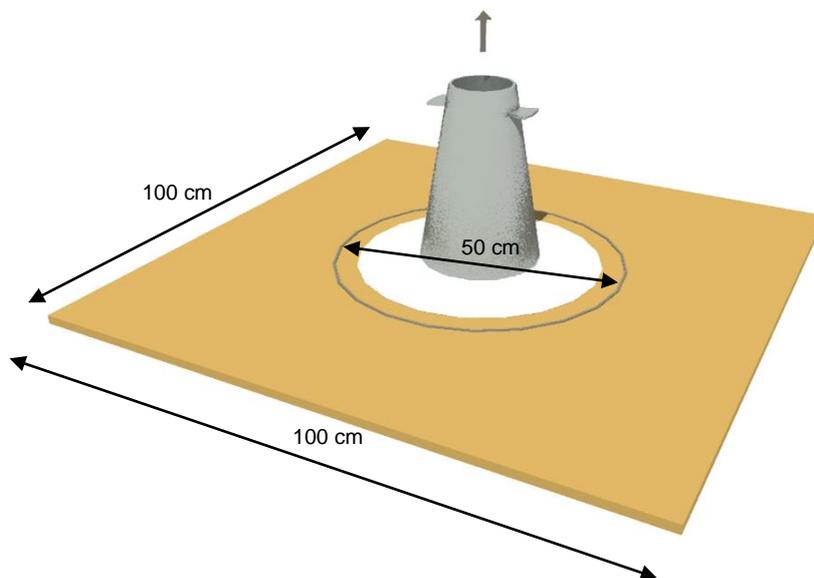


Figura 2: teste do espalhamento T50cm.

Enquanto o teste do espalhamento mede o diâmetro final do círculo formado pelo CAA, o T50cm verifica o tempo gasto pelo CAA do momento que o cone é erguido verticalmente até alcançar a marca dos 50 cm. Assim, o teste do espalhamento e o teste do espalhamento T50cm podem ser realizados simultaneamente.

O procedimento para execução do teste do espalhamento T50cm segue as seguintes etapas:

- Umedecer a placa e o cone de Abrams para não absorver a água do concreto;
- Apoiar a placa sobre chão firme e nivelado;
- Colocar o cone sobre o círculo central de 20 cm marcado na base;

- Com a concha preencher o cone por completo (sem nenhum tipo de compactação), retirando o excesso de concreto no topo e na base se houver;
- Erguer verticalmente o cone para permitir que o concreto escoe livremente;
- Iniciar a marcação do tempo no momento em que o cone for erguido e parar a marcação no momento em que o concreto atingir a marca de 50 cm;

Neste teste verifica-se a viscosidade do CAA, pois, segundo Alencar (2008), um concreto com maior viscosidade, ou seja, mais coeso, demandará maior tempo para atingir o mesmo espalhamento. Na Tabela 2 são apresentados os valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do espalhamento T50cm.

Tabela 2: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do espalhamento T50cm.

Teste do Espalhamento T50cm			
Referência	Valor mínimo (segundo)	Valor máximo (segundo)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	2	5	Capacidade de preenchimento (fluidez). Resistência à segregação (coesão). Viscosidade.
Gomes (2002)	4	10	
Araujo (2003)	2	5	
Gomes et al. (2003)	3	7	
Lisboa (2004)	3	7	
Tutikian (2007)	3	7	
Gomes e Barros (2009)	2	7	

2.3.3 Teste do Anel J (*J Ring test*)

O teste do anel J também conhecido como anel japonês, foi normalizado pelas EUROPEAN STANDARD, EN 1235-12 (2007), ASTM C 1621/C 1621M (2006) e NBR 15823-3 (ABNT, 2010).

Usado para verificar a capacidade de escoamento do CAA, este teste é uma complementação do teste do espalhamento, podendo ser realizado com o cone de Abrams, Orimet e até mesmo com o funil V.

O equipamento é composto por um anel de barras metálicas espaçadas de forma a simular uma armadura real, contudo normalmente é adotado um anel de 30 cm de diâmetro com 16 barras circulares espaçadas eqüidistantes. A espessura destas barras varia de acordo com a dimensão do agregado graúdo ou situação que se deseja simular, pois a distância entre as barras não deve ser inferior a três vezes o diâmetro máximo do agregado graúdo (Figura 3).

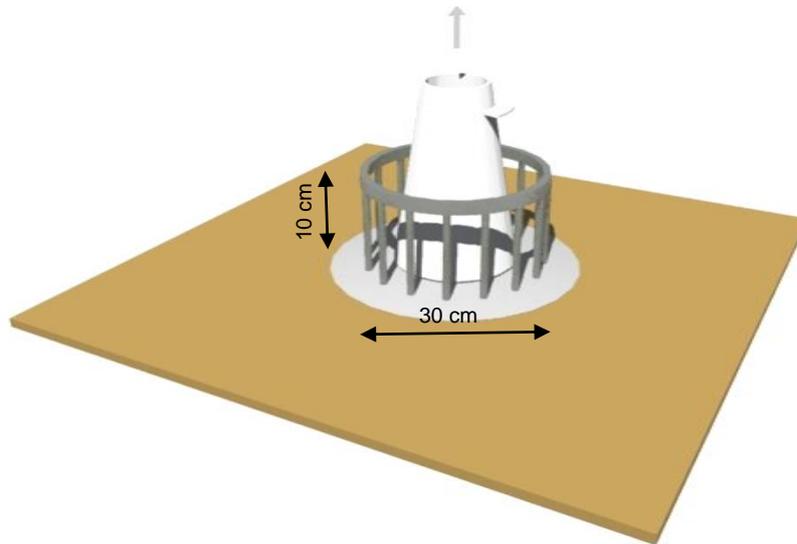


Figura 3: teste do anel J

Os equipamentos utilizados no teste do anel J, para o caso do teste em conjunto com o teste do espalhamento, são os mesmos utilizados no teste do espalhamento: uma placa quadrada de dimensões 100 cm x 100 cm; um cone de Abrams; uma concha côncava e uma espátula ou colher de pedreiro; uma trena para medir a altura do CAA, porém com o acréscimo do anel de barras metálicas.

O procedimento para execução do teste do anel-J segue as seguintes etapas:

- Umedecer a placa e o cone de Abrams para não absorver a água do concreto;
- Apoiar a placa sobre chão firme e nivelado;
- Colocar o anel J centralizado na base e o cone sobre o círculo central de 20 cm marcado na base;
- Com a concha preencher o cone por completo (sem nenhum tipo de compactação), retirando o excesso de concreto no topo e na base, se houver;

- Erguer verticalmente o cone para permitir que o concreto escoe livremente;
- Medir a altura em quatro pontos distintos imediatamente internos ao anel e outros quatro pontos também distintos imediatamente externos ao anel;
- Calcular a média aritmética dos resultados internos e externos;
- Observar a existência ou não de segregação ou exsudação.

A diferença entre as duas medidas é o valor do teste do anel J. O valor da diferença entre as medidas internas e externas ao anel J não deve exceder 10 mm e a constatação visual da existência de separação do agregado graúdo da argamassa quando o concreto flui às extremidades ou passar pelo anel J significa que a mistura não está coesa o bastante, necessitando de ajustes (MENEZES, 2006). Na Tabela 3 são apresentados os valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do anel J

Tabela 3: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do anel J.

Teste do anel J			
Referência	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0	10	Capacidade de escoamento (habilidade de passagem). Resistência à segregação (coesão).
Gomes (2002)	0	10	
Araújo (2003)	0	10	
Gomes et al. (2003)	0	10	
Tutikian (2007)	0	10	
Gomes e Barros (2009)	0	10	

2.3.4 Teste do Funil V e teste do Funil V 5min (*V Funnel Test*)

Desenvolvido na Universidade de Tóquio no Japão por Okamura & Ozawa (1995), o teste do Funil V foi normalizado pela EUROPEAN STANDARD, EN 1235-9 (2007) e NBR 15823-5 (ABNT, 2010).

Este teste tem por objetivos avaliar a capacidade do CAA de passar por seções estreitas e verificar a viscosidade aparente do CAA através da medição do

tempo de escoamento pelo equipamento. Também verifica a resistência à segregação repetindo o teste com um intervalo de cinco minutos entre o preenchimento do funil V e a liberação do CAA. Se a diferença de tempo entre o primeiro teste e o segundo for superior a três segundos pode significar que houve certa segregação (EFNARC, 2002).

O funil V, como descrito por Lisboa (2004), possui duas seções de tamanhos e formas diferentes: o trecho superior de seção transversal interna com altura de 45cm possui uma seção superior de 51,1 cm x 7,5 cm e inferior de 6,5 cm x 7,5 cm; e o trecho inferior de seção transversal interna retangular constante, com altura de 15 cm e dimensões do seu início até o fim de 6,5 cm x 7,5 cm. Para assegurar a eficiência do equipamento é necessário que em seu orifício de saída inferior haja um sistema de abertura rápida (à prova de passagem d'água quando fechada), seja em forma de porta deslizante ou com dobradiça (Figura 4).

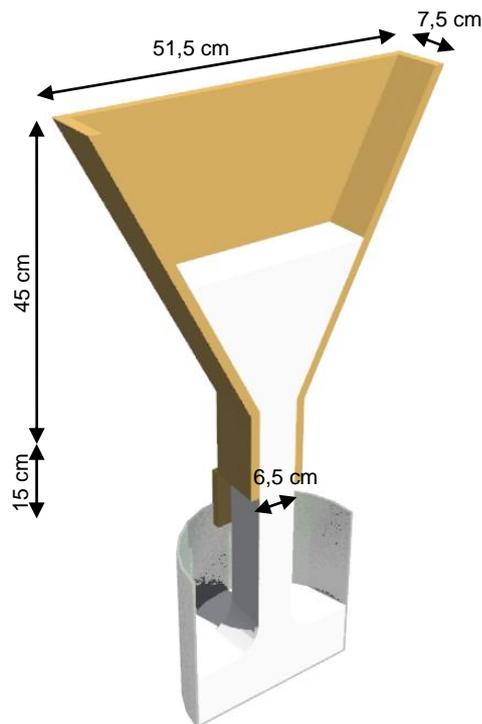


Figura 4: teste do funil V e funil V 5min

Os equipamentos utilizados no teste do funil V são uma concha côncava e uma espátula ou colher de pedreiro para preenchimento e remoção do concreto do Funil V; por fim, um cronômetro para medir o tempo de escoamento do concreto.

O procedimento para execução do teste do funil V segue os seguintes procedimentos:

- Umedecer equipamento para não absorver a água do concreto.
- Nivelar e preencher o funil V com o CAA (sem nenhum tipo de compactação), retirando o excesso de concreto no topo, se houver;
- Abrir rapidamente a passagem inferior do equipamento para permitir que o concreto escoe livremente;
- Cronometrar o tempo que o CAA leva para escoar;
- Para o funil V 5min, repetir o procedimento deixando um intervalo de cinco minutos entre o preenchimento e a abertura da porta de saída para que o CAA escoe;
- Comparar o tempo entre os ensaios para verificar a possibilidade de segregação.

Na Tabela 4, para o teste do funil V e na Tabela 5, para o teste do funil V 5 min, são apresentados os valores mínimos e máximos aceitos por diversos pesquisadores.

Tabela 4: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do funil V.

Teste do Funil V			
Referência	Valor mínimo (segundo)	Valor máximo (segundo)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	6	12	Capacidade de preenchimento (fluidez). Capacidade de escoamento (habilidade de passagem). Viscosidade.
Gomes (2002)	10	15	
Araujo (2003)	6	12	
Gomes et al. (2003)	7	13	
Lisboa (2004)	7	13	
Tutikian (2007)	6	12	
Gomes e Barros (2009)	6	15	

Tabela 5: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste do funil V 5min

Teste do Funil V 5min (acrécimo de tempo em relação ao primeiro teste)			
Referência	Valor mínimo (segundo)	Valor máximo (segundo)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0	3	Resistência à segregação.
Gomes (2002)	0	3	
Araujo (2003)	0	3	
Gomes et al. (2003)	0	3	
Lisboa (2004)	0	3	
Tutikian (2007)	0	3	
Gomes e Barros (2009)	0	3	

2.3.5 Teste da Caixa em L (*L Box Test*)

Desenvolvida para verificar a capacidade de passar por obstáculos e medir a fluidez permanecendo coeso, o teste da Caixa em L foi normalizado pela EUROPEAN STANDARD, EN 12350-10 (2007) e NBR 15823-4 (ABNT, 2010). Assim como em Alencar (2008), o equipamento utilizado neste trabalho segue o dimensionamento estabelecido pela EFNARC (2002), cuja diferença se encontra no comprimento da seção horizontal. Enquanto que a caixa em L da EFNARC (2002) possui um comprimento de 80 cm, a caixa em L da EN 12350-10 (2007) possui comprimento horizontal de 70 cm, reduzindo o nível de exigência do teste, já que o CAA precisará percorrer uma distância menor (ALENCAR, 2008).

Este equipamento, como o próprio nome se refere, possui a forma da letra L. Constituída por uma parte vertical de seção transversal de 20 cm x 10 cm, com 60 cm de altura e outra parte horizontal com seção transversal de 20 cm x 15 cm, com comprimento de 80 cm, são ligadas entre si através de uma abertura de 20 cm x 15 cm e uma porta deslizante verticalmente que impede a passagem do CAA (da parte vertical para a parte horizontal) quando fechada. À frente da porta são colocadas duas ou três barras de aço de espessura também variável, dependendo da simulação que se deseja realizar para alcançar condições semelhantes às armaduras de estruturas reais (Figura 5). Mais comumente se adotam três barras de aço. Com relação às espessuras das barras a mais comum é a de 12,5 mm.

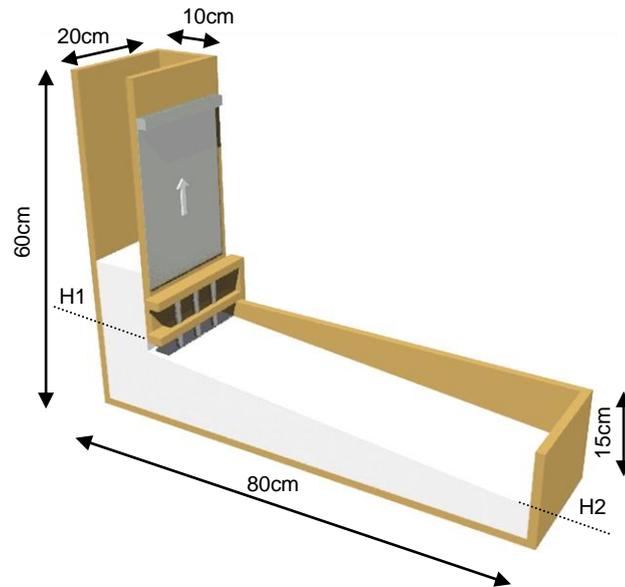


Figura 5: teste da caixa L

Os equipamentos utilizados no teste da Caixa em L são uma concha côncava e uma espátula ou colher de pedreiro para preenchimento e remoção do concreto da Caixa em L; por fim, uma trena para medir as alturas do concreto.

O teste da Caixa em L segue os seguintes procedimentos:

- Umedecer a equipamento para não absorver a água do concreto;
- Apoiar o equipamento em base firme e nivelada;
- Preencher a parte vertical da Caixa em L com o CAA (sem nenhum tipo de compactação), retirando o excesso de concreto no topo, se houver;
- Aguardar 01 minuto e em seguida abrir rapidamente a porta do equipamento para permitir que o concreto escoe livremente;
- Cronometrar o tempo que o CAA leva para escoar até a marca dos 20 cm e dos 40 cm;
- Medir a altura inicial (H1) e a final (H2) calculando a relação $H2/H1$;
- Verificar visualmente se há segregação.

Pela dificuldade de se cronometrar o tempo gasto pelo CAA para atingir as referidas marcas, devido ao espaço de tempo curto entre elas, esta medição se mostrou pouco operacional, sendo muitas vezes omitida (ALENCAR, 2008). Contudo, o teste da Caixa em L, ainda segundo Alencar (2008), permite a verificação visual da capacidade de preenchimento dos espaços e auto-nivelamento

do CAA e afirma que se o CAA for aprovado neste teste, provavelmente irá obter bons resultados nos demais testes para verificação da habilidade de passar por obstáculo, a exemplo do Anel-J e da Caixa em U. Corroborando com esta afirmação, Alencar e Helene (2006), através de estudo experimental realizado, consideraram o teste da Caixa em L como sendo o mais exigente para qualificação do CAA.

Como pode ser observada na Tabela 6, a razão H2/H1 deve estar entre 0,8 e 1,0 para ser considerada satisfatória.

Tabela 6: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste da caixa L.

Teste da caixa L			
Referência	Valor mínimo (H2/H1)	Valor máximo (H2/H1)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0,80	1	Capacidade de escoamento (habilidade de passagem).
Gomes (2002)	0,80	1	
Araujo (2003)	0,80	1	
Gomes et al. (2003)	0,80	1	
Lisboa (2004)	0,80	1	
Tutikian (2007)	0,80	1	
Gomes e Barros (2009)	0,80	1	

2.3.6 Teste da Caixa em U (*U Box Test*)

Desenvolvido para avaliar a capacidade do concreto em passar por obstáculos sem bloqueio ou segregação, o teste da caixa em U é indicado por Okamura & Ouchi (2003). Segundo Melo (2005), este teste mede também o auto-nivelamento do concreto através da altura alcançada após ultrapassar o obstáculo.

Este equipamento, caracterizado pela forma da letra U, possui dois compartimentos de seção transversal de 20 cm x 14 cm cada e 59 cm de altura, interligados entre si através de uma divisória mediana e uma abertura na parte inferior de 14 cm x 20 cm. Para fechamento desta abertura, uma porta deslizante de abertura vertical superior para impedir a passagem do CAA quando fechada. Geralmente, no mesmo alinhamento da divisória mediana são colocadas três barras de aço de 12,5 mm de espessura equidistantes, que podem ter suas configurações

alteradas (quantidade e espessura) dependendo da simulação que se deseja realizar para alcançar condições semelhantes às armaduras de estruturas reais.

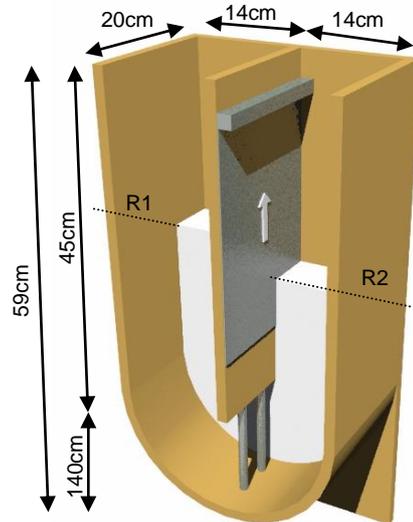


Figura 6: teste da caixa U

Os equipamentos utilizados no teste da Caixa em U são uma concha côncava e uma espátula ou colher de pedreiro para preenchimento e remoção do concreto da caixa em U; por fim, uma trena para medir as alturas do concreto.

O teste da Caixa em U segue os seguintes procedimentos:

- umedecer a equipamento para não absorver a água do concreto;
- apoiar o equipamento em base firme e nivelada;
- preencher um dos lados da Caixa em U com o concreto (sem nenhum tipo de compactação), retirando o excesso de concreto no topo se houver;
- aguardar um minuto e em seguida abrir rapidamente a porta do equipamento para permitir que o concreto escoe livremente;
- aguardar a estabilização do concreto;
- medir a altura R1 e a R2 e determinar o valor $R1 - R2$.

Os resultados obtidos da medição da Caixa em U ($R1 - R2$) admitem valores, segundo EFNARC (2002), de até 30 mm. Concretos mais fluidos tendem a

resultados mais próximos de zero (MENEZES, 2006). Ainda segundo Menezes (2006), a observação visual do escoamento do concreto é importante para identificação de segregação, pois um CAA deve fluir de forma coesa e uniforme. Na Tabela 7, são apresentados os valores limites aceitos por diversos pesquisadores para o teste da caixa U.

Tabela 7: valores limites adotados por diversos pesquisadores para o teste da caixa U.

Teste da caixa U (R1 – R2)			
Referência	Valor mínimo (mm)	Valor máximo (mm)	Propriedades avaliadas
EFNARC (2002)	0	30	Capacidade de escoamento (habilidade de passagem).
Gomes (2002)	0	80	
Araujo (2003)	0	30	
Tutikian (2007)	0	30	
Gomes e Barros (2009)	0	30	

2.3.7 Outros ensaios existentes

Nenhum teste desenvolvido até agora conseguiu aprovação universal para verificação de todas as propriedades do CAA. Sendo assim, ainda existem outros ensaios desenvolvidos para caracterizar um concreto como auto-adensável. A seguir temos outros exemplos de ensaios que não foram utilizados nesta pesquisa.

Para verificação da viscosidade existe o Ensaio Orimet (*Orimet Test*). Para caracterização da capacidade de preenchimento, tem o Ensaio da Caixa de Preenchimento (*Fill-box Test*), também conhecido com Kajima-box (EFNARC, 2002). Para avaliação da resistência à segregação existe o U-Shaped pipe, o *Column technique* e o Ensaio da Estabilidade GTM (*GTM screen stability test method*).

2.4 Métodos de dosagem

A dosagem para obtenção do CAA não é fácil. A determinação da quantidade de cada material constituinte, de forma econômica e que possa alcançar todas as propriedades exigidas de um CAA é um desafio que muitos pesquisadores vêm tentando vencer desde o seu surgimento.

Mundialmente, existe uma ampla gama de métodos de dosagem que podem produzir com sucesso um CAA, entretanto, a maioria destes métodos possui uma série de restrições abrangendo valores limite quanto às proporções dos materiais (SCHUTTER, 2007).

A literatura aponta o método proposto por Okamura e Ozawa (1995) como sendo a primeira metodologia desenvolvida para dosagem do CAA e sendo a base para outros métodos de dosagem. Dentre tantos métodos já desenvolvidos podemos citar como exemplo os propostos por Petersson et al. (1996); Sedran et al. (1996); Billberg (1999); Su et al. (2001); EFNARC (2002); Gomes (2002); Araújo (2003); Tutikian (2004); Repette e Melo (2005); Tutikian (2007). Ainda encontramos na literatura outros métodos de dosagem, entretanto que não estão plenamente consagrados.

Muitas destas metodologias foram desenvolvidas na tentativa de simplificar a dosagem ou tornar a dosagem universal, passível de ser realizada mais facilmente e com qualquer material tecnicamente viável de produzir um concreto.

Nesta dissertação foram adotados duas destas metodologias desenvolvidas. O método de dosagem proposto por Tutikian (2007) e o método proposto por Gomes (2002). Estes métodos foram escolhidos pelo fato dos procedimentos serem relativamente simples, permitindo que sejam reproduzidos com facilidade.

A seguir temos uma breve explicação acerca do método proposto por Okamura, em virtude de ter sido o primeiro, e das duas metodologias desenvolvidas nesta dissertação.

2.4.1 Método de dosagem proposto por Okamura (1997)

Este método sugere que para serem atendidos os requisitos da auto-adensabilidade o concreto deve ser dosado com limitada quantidade de agregados, baixa relação água/cimento e alta dosagem de aditivo superplastificante.

Na Figura 7, segundo Okamura e Ouchi (2003), é apresentada a comparação entre as proporções do concreto convencional e o auto-adensável.

Concreto auto-adensável				
AR	ÁGUA	FINOS	AREIA	BRITA
AR	ÁGUA	CIMENTO	AREIA	BRITA
Concreto convencional				

Figura 7: Comparação da proporção dos materiais entre o CAA e o CCV. (OKAMURA e OUCHI, 2003).

O método fixa a quantidade de agregado graúdo em 50% do volume sólido e o agregado miúdo em 40% do volume da argamassa, restando assim para se atingir as características de auto-adensabilidade o ajuste da relação água/finos (a/f) e a dosagem do aditivo superplastificante.

Na Figura 8 é apresentado o esquema do procedimento em questão.

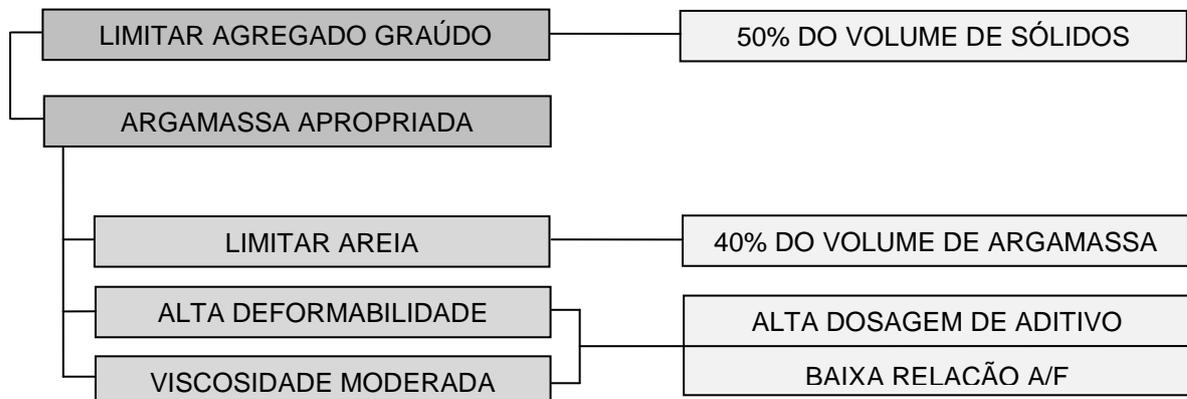


Figura 8: Resumo do método de Okamura. (OKAMURA e OUCHI, 2003)

Para verificação da obtenção ou não do concreto auto-adensável, Okamura e Ouchi (2003) indicam a utilização dos ensaios do Espalhamento, Caixa U e Funil V. Estes testes verificam a deformabilidade, através da equação 1, e a viscosidade, através da equação 2.

$$\Gamma_c = \frac{(sf_1 \times sf_2 - sf_0^2)}{sf_0^2} \quad (1)$$

$$Rc = \frac{10}{tc} \quad (2)$$

Em que:

Γ_c é a deformabilidade do concreto

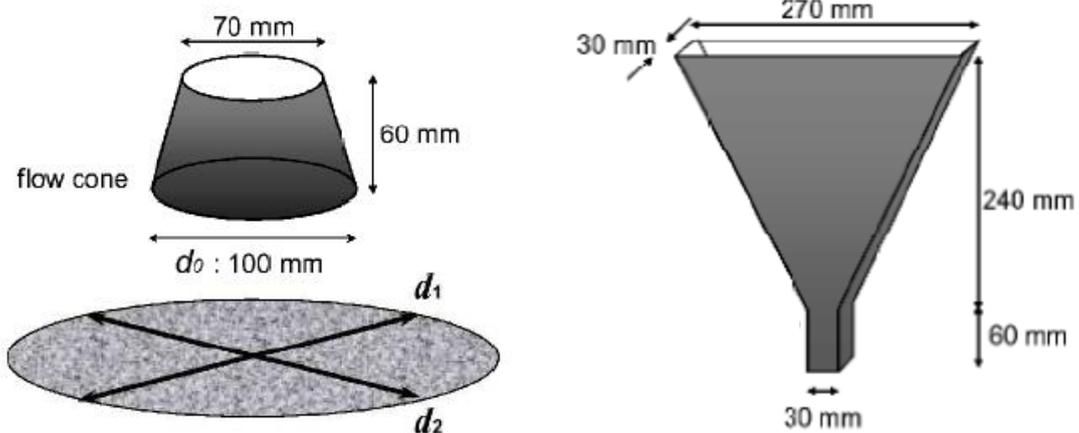
sf_1 e sf_2 são as medidas dos diâmetros perpendiculares do espalhamento

sf_0 é o diâmetro da parte inferior do tronco de cone

Rc é a viscosidade do concreto

tc é o tempo de escoamento do concreto pelo Funil V

Caso exista a necessidade de correções, é sugerido realizar os ensaios do Espalhamento e do Funil V em escala reduzida para verificar a deformabilidade e a viscosidade da argamassa. Os equipamentos são mostrados nas Figuras 9 e 10.



Figuras 9 e 10: Teste do Espalhamento e Funil V para argamassa, respectivamente (OKAMURA e OUCHI, 2003)

Para saber se a argamassa atende às características de deformabilidade e viscosidade são utilizadas, respectivamente, as equações 3 e 4.

$$\Gamma a = \frac{(sf_1 \times sf_2 - sf_0^2)}{sf_0^2} \quad (3)$$

$$Ra = \frac{10}{ta} \quad (4)$$

Em que:

Γa é a deformabilidade da argamassa;

sf_1 e sf_2 são as medidas dos diâmetros perpendiculares do espalhamento;

sf_0 é o diâmetro da parte inferior do tronco de cone;

Ra é a viscosidade da argamassa;

ta é o tempo de escoamento da argamassa pelo Funil V.

Sobre este método, pode-se dizer que teve ele um papel fundamental no desenvolvimento do CAA. Contudo, deixa muitos pontos em aberto, como também não apresenta parâmetros a serem alcançados, fazendo com que talvez o responsável pela dosagem tenha que executar inúmeras tentativas a fim de alcançar os requisitos esperados. Tutikian (2004) diz que este método não deve ser mais utilizado, pois não há como dosar um concreto considerando apenas os limites superiores de quantidade e valores muito abrangentes, como alta dosagem de aditivo superplastificante e baixa relação água/cimento. E ainda segundo Tutikian (2004), apesar do método propor a execução dos ensaios de trabalhabilidade em escala reduzida, não há conhecimento dos valores ideais.

2.4.2 Método de dosagem proposto por Tutikian (2007)

O método de Tutikian (2007) se utiliza de outros conceitos como os de De Larrard (1999) para definição dos materiais, os conceitos de O`Reilly (1992) para determinar o empacotamento granular máximo, os conceitos de Helene e Terzian

(1992) com o diagrama de dosagem do IPT/EPUSP, além dos conceitos de Tutikian (2004) para dosagem de CAA. Este procedimento pode ser apresentado, de forma resumida, nas seguintes etapas: escolha dos materiais; determinação do esqueleto granular, determinação da relação água/cimento ou percentual de aditivo superplastificante; mistura dos traços rico, intermediário e pobre; e determinação das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades requeridas.

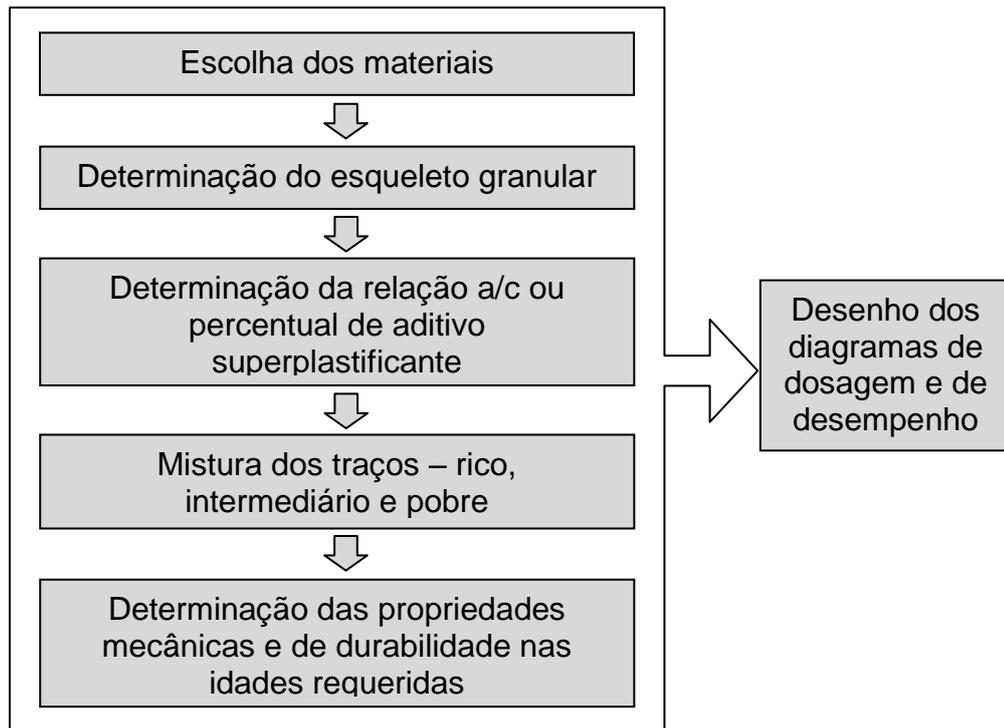


Figura 11: Resumo do método de Tutikian (2007).

A seguir temos a descrição um pouco mais detalhada das etapas anteriormente citadas.

2.4.2.1 Escolha dos materiais

Basicamente, os materiais utilizados na confecção do CAA são os mesmos do CCV (agregado graúdo, agregado miúdo, cimento, água) com o acréscimo de um material com granulometria inferior ao agregado miúdo (finos), aditivo

superplastificante e, opcionalmente, aditivo modificador de viscosidade (VMA), podendo ainda haver a inserção de outras classes de agregado.

Para a escolha do agregado graúdo, Torales-Carbonare *et al.* (2003) recomendam agregados graúdos com forma angular e superfície áspera para proporcionar maior aderência com a pasta, contudo Tutikian (2007) indica que deve ser priorizado a escolha por agregados arredondados para melhorar o empacotamento e reduzir o risco de segregação da composição.

Em relação à granulometria dos agregados, ainda não há uma definição quanto à utilização de todas as faixas granulométricas seguindo a tradicional tecnologia dos concretos ou as orientações de De Larrard (1999) ao se utilizar agregados com diâmetros espaçados (TUTIKIAN, 2007). No que diz respeito à dimensão dos agregados, quase todos os estudos indicam como sendo 19 mm o tamanho máximo.

Tendo em vista as questões abordadas, o método sugere, porém não afirma com certeza, a possibilidade de se utilizar para a dosagem do CAA qualquer material que seja tecnicamente viável para obtenção do mesmo. Esta característica permite que se utilizem materiais disponíveis na região e no mercado local.

Por fim, perante tantos materiais disponíveis no mercado a escolha correta destes para a confecção do concreto é de fundamental importância, devendo obedecer às características predeterminadas.

2.4.2.2 Determinação do esqueleto granular

O objetivo desta etapa é determinar a proporção entre os materiais constituintes do concreto de forma a se obter a menor quantidade de vazios. Para esta determinação da relação ótima dos agregados graúdos e agregados miúdos foi utilizado um método de dosagem proposto por O'Reilly (1992), que apesar de ter sido proposto para concretos convencionais serve também para CAA. Nesta dissertação este método será chamado de método do empacotamento.

Este método se utiliza de uma sequência gradativa de testes de compactação, cujos materiais, primeiramente os de maior granulometria, são misturados, alterando-se a proporção entre eles. Por exemplo, 10% de um material A e 90% de um material B, depois 20% do material A e 80% do material B, em seguida 30% de A e 70% de B e assim sucessivamente. Dependendo do nível de precisão as proporções podem ser mais ou menos espaçadas.

Então se verifica qual a proporção obteve maior massa unitária e menor índice de vazios dos dois materiais de maior granulometria. Posteriormente, repete-se o teste adotando a proporção de menor índice de vazios e com o material de maior granulometria seguinte aos já testados, até se obter a melhor proporção entre todos os materiais, excetuando-se o cimento. É importante lembrar também que para cada mistura é necessário repetir o teste três vezes e calcular a média dos resultados, a fim de se obter um valor mais correto. Tutikian (2007) orienta o empacotamento dos materiais finos pozolânicos após a areia regular, considerando-os como agregados.

Neste processo pode haver uma mistura com maior massa unitária e não ser a mistura com o menor índice de vazios. Por isto, é importante enfatizar que deve ser utilizado a mistura com o menor índice de vazios e não com a maior massa unitária.

O cálculo da massa unitária é obtido através da equação 5:

$$M_{unit} = \frac{P_t}{V_t} \quad (5)$$

Onde se considera, M_{unit} a massa unitária da mistura, V_t o volume total do recipiente preenchido e P_t a massa total da mistura.

Primeiramente, para o cálculo do índice de vazios é preciso ter o valor da massa específica de cada mistura que é obtida pela equação 6:

$$M_{esp AB} = \frac{(M_{esp A} \times \%A) + (M_{esp B} \times \%B)}{100} \quad (6)$$

Com os resultados das massas específicas de cada mistura, determina-se o volume de vazios para cada proporção através da equação 7:

$$V = \frac{M_{esp AB} - M_{unit AB}}{M_{esp AB}} \times 100 \quad (7)$$

Com a determinação do esqueleto granular finalizado existe boa probabilidade do CAA não segregar e não ter excesso de material fino. A não confirmação da obtenção de um CAA é um forte indicativo de que os materiais utilizados não são adequados para a sua produção, devendo-se então substituir componentes ou acrescentar outros para devida correção (TUTIKIAN, 2007).

2.4.2.3 Determinação da relação água/cimento ou percentual de aditivo superplastificante

Este ponto é fundamental para a confecção do CAA e pode-se seguir por dois caminhos. Antes da mistura de materiais, através da escolha de um traço intermediário, ou se determina a relação a/c ou o percentual de aditivo superplastificante, sempre fixando um deles para encontrar o outro. A determinação da relação a/c é feita tomando-se como referência as tabelas da NBR 6118 (ABNT, 2003), observando a classe de agressividade ambiental e o tipo de concreto. Já o percentual de aditivo superplastificante é feito contando com a experiência do responsável e com base em outros concretos similares (TUTIKIAN, 2007).

Tanto a determinação da relação a/c quanto o percentual de aditivo superplastificante devem ser confirmados experimentalmente. Como o ideal é aproveitar o máximo das propriedades concedidas pelo aditivo, já que a diferença do custo entre o CCV e o CAA é quase na totalidade do aditivo, sugere-se fixar primeiramente a relação a/c e um abatimento inicial similar a de um CCV sem a introdução do aditivo. Na fixação da relação a/c deve ser considerada a resistência e durabilidade que se deseja alcançar.

Então se experimenta gradativamente o teor de aditivo superplastificante até encontrar o percentual ideal. Na dosagem, o aditivo pode ser adicionado na ordem de 0,1 em peso do cimento, sendo realizado pelo menos um ensaio para cada porcentagem de aditivo superplastificante.

2.4.2.4 Mistura dos traços rico, intermediário e pobre

Nesta etapa da dosagem são confeccionados no mínimo três traços (um rico, um intermediário e um pobre) para a determinação das equações de comportamento e coeficientes de correlação para devida manufatura do gráfico de dosagem e de desempenho. Segundo Tutikian (2007), é bom que sejam executados quatro pontos para que as curvas tenham uma maior precisão.

Para que todos os traços sejam inseridos em um mesmo gráfico e sejam considerados de uma mesma família, o que se mantém fixo é o valor de aditivo superplastificante e as proporções entre os agregados, já que o teor de argamassa seca não será constante para todos os pontos.

Por fim, a única variável restante é a relação a/c , sendo esta dosada para que se tenha um concreto mais ou menos fluido. Devido a isto, é fundamental algum ensaio que avalie a fluidez, pois uma mistura pode ser considerada um CAA com pouca fluidez ou não ser considerada um CAA mesmo estando bastante fluido (TUTIKIAN, 2007).

Após esta etapa devem ser moldados os corpos de prova para os devidos ensaios. A moldagem deve ser realizada de forma a não haver nenhum tipo de compactação ou vibração mecânica, sendo o acabamento superior e a cura semelhante à moldagem de um corpo de prova de um concreto convencional.

2.4.2.5 Ensaios das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades requeridas

Nesta fase são realizados os ensaios para verificação das propriedades mecânicas e/ou das propriedades de durabilidade a fim de se determinar as propriedades requeridas, como por exemplo: resistência à compressão, tração,

velocidade ultra-sônica, módulo de elasticidade, penetração de íons cloretos, absorção de água, etc.

2.4.2.6 Desenho dos diagramas de dosagem e desempenho

Esta etapa é o ponto final do método, sendo necessário o cálculo das equações de comportamento para cada uma das propriedades estudadas.

O diagrama de dosagem relaciona no primeiro quadrante: a resistência à compressão nas diversas idades ensaiadas, com a relação a/c; no segundo quadrante: a relação a/c com a proporção 1:m; no terceiro quadrante a proporção 1:m com o custo e consumo de cimento por metro cúbico de concreto; e no quarto quadrante (que divide a resistência à compressão com o eixo y positivo) foi relacionado o teor de argamassa seca com o consumo de cimento, já que o teor de argamassa seca deixou de ser constante para toda a família.

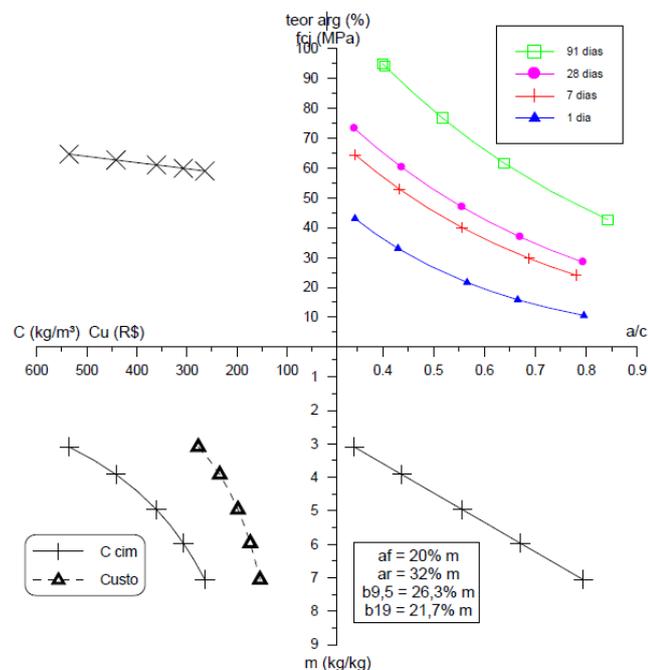


Figura 12: exemplo de diagrama de dosagem com o α variando (TUTIKIAN, 2007).

O diagrama de desempenho não é obrigatório para dosagem dos concretos, ficando a ser utilizado somente quando for solicitado. Semelhante ao de dosagem, o diagrama de desempenho relaciona outras propriedades do concreto. A exemplo disto, as propriedades mecânicas e as de durabilidade como absorção total de água ou por capilaridade, carbonatação, penetração de íons cloretos, módulo de elasticidade, resistência à tração, velocidade da onda ultra-sônica, etc. A resistência à compressão é a mais utilizada, porém haverá casos em que outros ensaios se relacionam entre si sendo fundamental determinar as equações de comportamento para cada caso.

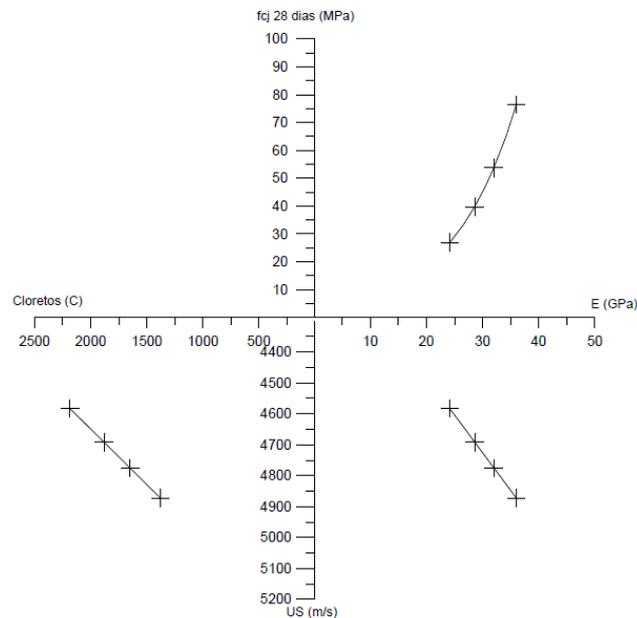


Figura 13: exemplo de diagrama de desempenho relacionando resistência à compressão, com módulo de elasticidade, com velocidade de onda ultra-sônica e penetração de íons de cloreto (TUTIKIAN, 2007).

2.4.3 Método de dosagem proposto por Gomes (2002)

Baseado no método proposto por Torralles-Carbonari *et. al.* (1996), o método proposto por Gomes (2002) foi desenvolvido para dosagem de concretos com alta resistência. Contudo, considera como objetivo a obtenção de um concreto com propriedades similares a de um CAA. Estas propriedades são alta fluidez,

preenchimento dos vazios dos agregados e não apresentação de bloqueio. Esta metodologia divide o procedimento em duas etapas individuais: a obtenção da pasta com fluidez e coesão e a obtenção de um esqueleto granular com menor índice de vazios. Então determina a melhor quantidade de pasta que preenche os vazios ainda existentes no esqueleto granulométrico dos agregados e que garante as características de um CAA. Na Figura 14 tem-se um esquema da metodologia de Gomes e em seguida o detalhamento do método.

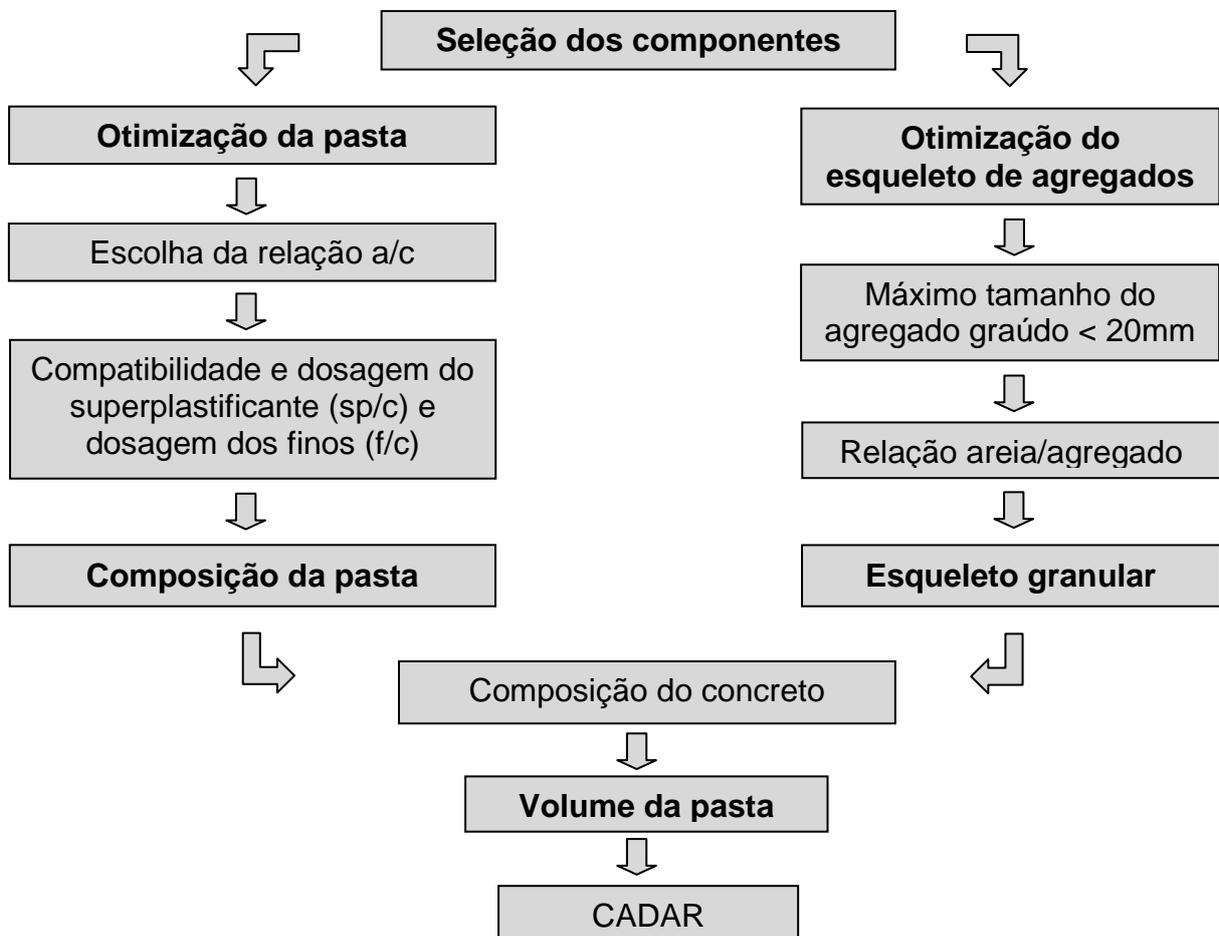


Figura 14: resumo do método de Gomes (2002).

2.4.3.1 Seleção dos componentes

Assim como tantos outros métodos, este procedimento começa com a seleção dos componentes. Nesta primeira etapa da seleção dos componentes Gomes (2002) coloca como sendo 20 mm o máximo tamanho do agregado graúdo.

Escolhidos os materiais, o método divide a confecção do concreto em duas etapas: uma etapa para a confecção da pasta e outra etapa, paralela a esta, para confecção do esqueleto granulométrico dos agregados. Por fim, a junção das duas etapas: a união da pasta com os agregados.

Gomes (2008) afirma que as determinações independentes dos diferentes parâmetros de mistura ou variáveis, através da obtenção separada das fases, é uma das principais vantagens deste método.

2.4.3.2 Composição da pasta

Para a obtenção da pasta são utilizados dois ensaios diferentes. O primeiro a ser realizado é o ensaio do Funil de Marsh e posteriormente o ensaio do Mini-slump.

2.4.3.2.1 Funil de Marsh

O ensaio do Funil de Marsh é utilizado para determinar a compatibilidade do superplastificante com o cimento, como também determinar o ponto de saturação da relação superplastificante/cimento (sp/c). O Funil de Marsh (Figura 15) é composto por um cone invertido de abertura inferior de 5 mm a 12,5 mm. O utilizado nesta pesquisa foi de 8 mm.

Este procedimento consiste em adicionar um litro de pasta (cimento + água) no Funil de Marsh e cronometrar o tempo gasto por 500ml de pasta para passar pelo orifício inferior do funil. São realizados dois testes para cada pasta: um após cinco minutos da confecção da pasta e outro aos sessenta minutos. Neste teste são confeccionados diversas pastas em que é fixada a relação a/c (de acordo com a resistência que se pretende obter) e varia-se a relação sp/c. Usualmente, se varia a quantidade sólida na ordem de 0,1 de aditivo superplastificante em relação ao peso do cimento até se obter o ponto de saturação.

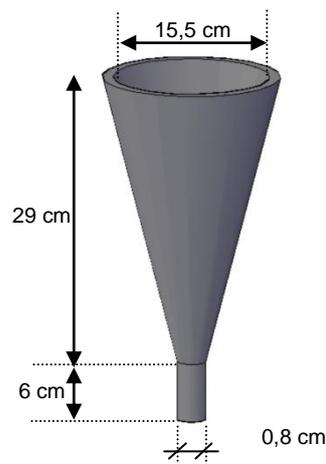


Figura 15: Funil de Marsh

Segundo Aitcin (2000), a dosagem de saturação do superplastificante é determinada pela interseção das curvas de 5 min e 60 min em um gráfico da variação do tempo de escoamento versus a dosagem sp/c. Entretanto, de acordo com Gomes (2008), o ponto de saturação é determinado quando o acréscimo na dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhoria significativa na fluidez da pasta.

2.4.3.2.2 Mini-cone

Uma vez encontrado o ponto de saturação da relação sp/c, deve-se testar o teor ótimo de finos na pasta. Para isto utiliza-se o teste do mini-cone. Desenvolvido

por Kantro (1980), o cone possui as seguintes dimensões internas: 19 mm de diâmetro superior; 38 mm de diâmetro inferior; e altura de 57 mm (Figura 16). Segundo o próprio Kantro (1980), o flange lateral serve para coletar excesso de pasta que porventura possa ultrapassar o topo, e a parte inferior do flange é recuada para que a face inferior deste não impeça que a pasta possa fluir quando o cone for erguido.

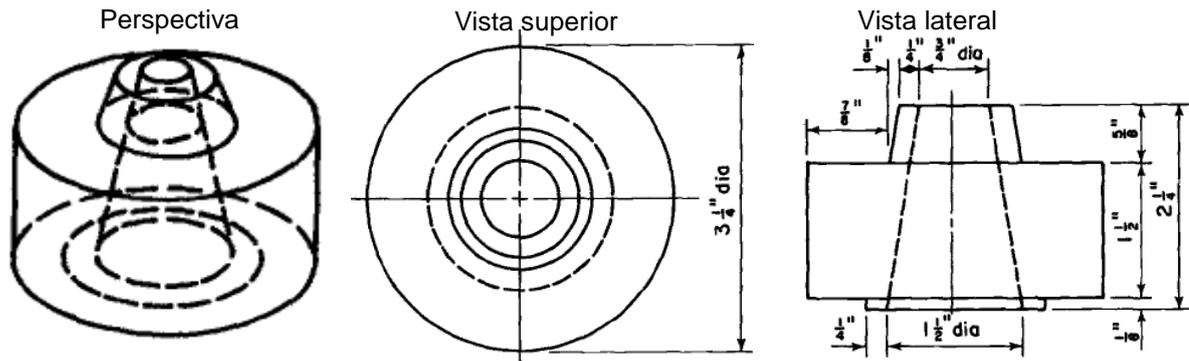


Figura 16: mini-cone do ensaio mini-cone para otimização dos finos na pasta. (Fonte: Kantro, 1980).

Este experimento consiste em testar várias porcentagens gradativas de finos em relação ao cimento. Para este teste se aconselha manter a relação a/c constante para todas as pastas em um valor entre 0,35 a 0,40, dependendo da resistência que se queira encontrar. A quantidade de superplastificante deve ser obtida através da relação superplastificante/cimento + finos. Para tanto, sugere-se adotar um valor de aditivo superior ao encontrado no ensaio do Funil de Marsh, pois se sabe que os finos também influenciam na relação sp/c.

Na realização do teste do mini-cone é medido o diâmetro final do espalhamento e o tempo gasto para a pasta atingir um diâmetro de 115 mm. Os resultados considerados ideais são: espalhamento de 180 mm \pm 10 mm; e o tempo gasto para atingir um diâmetro de 115 mm em 3s \pm 1s.

Após encontrar a porcentagem ideal de finos sugere-se voltar ao teste do Funil de Marsh para confirmar a dosagem ideal do superplastificante, agora já com a relação cimento + finos ideal.

2.4.3.3 Determinação do esqueleto granulométrico

Nesta etapa, o processo para determinação do esqueleto granular é semelhante ao método utilizado por Tutikian (2007), verificando a melhor compactação entre os materiais a serem utilizados, sempre empacotando os de maior granulometria para os de menor valor granulométrico, considerando sempre como o melhor resultado a proporção com o menor índice de vazios existente.

Contudo, a grande diferença entre os dois procedimentos é o fato de que, na metodologia de Gomes (2002), apenas os agregados graúdos e miúdos são empacotados. Ou seja, o material fino não entra na relação dos materiais que fazem parte do esqueleto granulométrico. Como já exposto na etapa anterior, a quantidade de material fino é determinada em relação à quantidade de cimento e não em relação à quantidade dos agregados.

2.4.3.4 Composição do concreto

Nesta etapa é realizada a junção entre as duas etapas anteriormente descritas. São confeccionados vários traços de concreto com diferentes quantidades de pasta em relação aos agregados. Isto se faz para encontrar a quantidade mínima de pasta necessária para se obter um CAA. Para cada traço devem ser realizados todos os testes de trabalhabilidade para confirmação ou não da obtenção de um CAA. Menezes (2006) diz que este procedimento sugere como sendo a fluidez e a viscosidade da pasta que dirigem as propriedades de escoamento e auto-compactabilidade do concreto.

2.5 Resíduos de caulim

Antes de falar dos resíduos de caulim se faz necessário abordar o caulim propriamente dito. O termo caulim deriva da palavra chinesa Kauling (colina alta), fazendo referência a uma colina onde o material é retirado há muitos séculos atrás, a colina de Jauchau Fu (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO/DNPM, 2001).

Sendo utilizado primeiramente na produção de artigos cerâmicos e de porcelana, o caulim atualmente tem uma grande variedade de aplicações industriais. Inserido nos mais diversos tipos de materiais como papel, borracha, plásticos, produtos farmacêuticos e alimentícios, rações, fertilizantes, entre outros, constantemente se desenvolve novas formas de utilização do caulim (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO/DNPM, 2001).

O caulim é um material argiloso formado por silicatos hidratados de alumínio, tendo como principais minerais a caulinita e a haloisita. A composição química do grupo da caulinita é $Al_2O_3 \cdot mSiO_2 \cdot nH_2O$, onde m varia de 1 a 3 e n de 2 a 4, podendo usualmente encontrar-se outros elementos químicos. Também estão contidas no caulim, na forma de impurezas, outras substâncias como a areia, quartzo, palhetas de mica, grãos de feldspato, óxidos de ferro e titânio, etc. (BALANÇO MINERAL BRASILEIRO/DNPM, 2001).

O processo de industrialização do caulim é realizado pelas etapas de extração ou lavra, e de beneficiamento. A extração pode ser realizada de forma descoberta ou subterrânea, sendo esta última o procedimento utilizado no estado da Paraíba. Já o beneficiamento pode ser realizado através de via úmida ou via seca, dependendo do uso a que vai se destinar o caulim.

Do processo de beneficiamento por via úmida, método utilizado na Paraíba, são gerados dois tipos de resíduos. Um resíduo mais grosso com característica mais arenosa denominado popularmente de “birra”, e outro com aparência mais argilosa, denominado “borra”. Estes resíduos de caulim são constituídos por caulinita, quartzo e mica (MENEZES, 2009). Uma outra forma de caracterizar os resíduos de caulim é através do teor de caulinita: a birra, com cerca de 30% de caulinita, 60% de quartzo e 10% de mica; a borra, com cerca de 55% caulinita, 25% de quartzo e 20% de mica,

podendo esta composição variar de acordo com a eficiência do processo de beneficiamento utilizado (NÓBREGA, 2007).

Ainda segundo Nóbrega (2007), esses resíduos caulíníticos não têm valor econômico algum e nem destino de reutilização. Em função disto, a usina de beneficiamento realiza o descarte em locais mais próximos na tentativa de reduzir os custos de manejo com seu transporte e acaba ficando cercada de grandes volumes de material não aproveitado.

A fim de amenizar o impacto ambiental na região do entorno das indústrias de beneficiamento de caulim, cada vez mais seus resíduos tem sido objeto de pesquisas. Exemplo disto foi a pesquisa realizada por Menezes (2009), que estudou a atividade pozolânica e a viabilidade dos resíduos do beneficiamento do caulim para a produção de argamassas para alvenaria e comprovou que há um grande potencial para utilização dos resíduos em substituição parcial ao cimento. Menezes (2009) observou ainda que os índices de atividade pozolânica com a cal e com o cimento demonstraram que os resíduos na condição natural apresentam baixa atividade pozolânica, contudo os resíduos após calcinação indicam índices de atividade acima do exigido pelas respectivas normas, obtendo resistências a compressão simples das argamassas contendo resíduos calcinados superiores às das argamassas sem resíduo.

Outra pesquisa realizada por Rocha *et. al.* (2008) verificou que o resíduo do beneficiamento de caulim pode ser utilizado para a produção de argamassas para chapisco, assentamento, emboço e revestimento, pois possuindo características físicas e químicas similares às dos agregados miúdos utilizados para a produção de argamassas, o resíduo não degrada as propriedades mecânicas das argamassas produzidas, podendo ser utilizado em substituição parcial à cal hidratada em proporções que atingem valores superiores a 15%.

Costa (2006) constatou em seus estudos que a composição mineralógica do resíduo grosso oriundo do beneficiamento de caulim é semelhante aos minerais presentes na composição de agregados convencionais utilizados na pavimentação e que possui grãos dos mais variados diâmetros, podendo assim substituir parte de todos os agregados convencionais e do fíler em uma mistura asfáltica.

Corroborando com estas pesquisas, Nóbrega (2007) concluiu em seus estudos que há evidências de que os resíduos da indústria de caulim possuem potencial para serem usados como pozolanas, plastificantes e agregados em argamassas destinadas ao assentamento de alvenarias, revestimentos de paredes e tetos em sua forma in natura.

Também existem estudos do uso do resíduo caulínico em concretos, como é o caso de Barata e Dal Molim (2002), que verificaram que, apesar de serem preliminares os resultados obtidos, dão indicativos de que o rejeito do beneficiamento do caulim, ao ser calcinado e moído em condições controladas, provavelmente possa vir a ser empregado, assim como a sílica ativa, na produção de concretos de alto desempenho como um insumo de alto valor agregado. Ainda segundo Barata e Dal Molim (2002), as propriedades avaliadas dos concretos com a incorporação de metacaulinita foram significativamente superiores as dos concretos de referência e, em comparação com os concretos com sílica ativa, as resistências à compressão e as taxas de absorção capilar foram semelhantes.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo é dividido em duas etapas. Na primeira são apresentados e caracterizados os materiais utilizados nesta pesquisa. A segunda etapa é composta pela descrição da metodologia utilizada.

3.1 Apresentação e caracterização dos materiais

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram:

3.1.1 Cimento

Devido a sua disponibilidade no mercado local e sua grande utilização na construção civil empregou-se o cimento Portland CP II F 32.



Figura 17: Saco de cimento CP II F 32

3.1.2 Agregados graúdos

Nesta pesquisa foi utilizada a pedra britada de origem granítica com duas granulometrias diferentes, 19 mm e 9,5 mm, ambas comercializadas no mercado local de João Pessoa.



Figura 18: brita 19 mm



Figura 19: brita 9,5 mm

As características físicas dos agregados graúdos, apresentadas nas tabelas 8 e 9, foram determinadas segundo a NBR NM 45/2006 (Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios), NBR NM 53/2003 (Agregado graúdo - Determinação de massa específica) e NBR NM 248/2003 (Agregados - Determinação da composição granulométrica). As amostras foram obtidas segundo a NBR NM 26/2001 (Agregados – Amostragem) e a NBR 27/2001 (Agregados – Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório).

3.1.3 Agregado miúdo

Utilizou-se a areia natural quartzosa de rio, proveniente da região denominada Caxitú, no município do Conde-PB, também encontrada no comércio de João Pessoa.



Figura 20: areia

As características físicas dos agregados miúdos (ver tabelas 8 e 9) foram determinadas segundo a NM 45/2006 (Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios), NBR NM 52/2003 (Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman) e NBR NM 248/2003 (Agregados - Determinação da composição granulométrica). As amostras foram obtidas segundo a NBR NM 26/2001 (Agregados – Amostragem) e a NBR 27/2001 (Agregados – Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório).

3.1.4 Fíler calcário

O fíler calcário, utilizado nesta pesquisa como fino, é proveniente da indústria Dolomil Industrial da cidade de Campina Grande-PB.



Figura 21: fíler calcário

As características físicas do fíler calcário, como mostradas nas tabelas 8 e 9, foram determinadas segundo a NM 45/2006 (Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios), NBR NM 52/2003 (Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman) e NBR NM 248/2003 (Agregados - Determinação da composição granulométrica). As amostras foram obtidas segundo a NBR NM 26/2001 (Agregados – Amostragem) e a NBR 27/2001 (Agregados – Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório).

Para determinar a área específica foi utilizado o método de Blaine, de acordo com o procedimento da NBR NM 76. O valor encontrado para o fíler calcário foi de 3528,5 cm²/g.

A curva granulométrica do fíler foi determinada através da granulometria a laser, cujo resultado está apresentado na Figura 22.

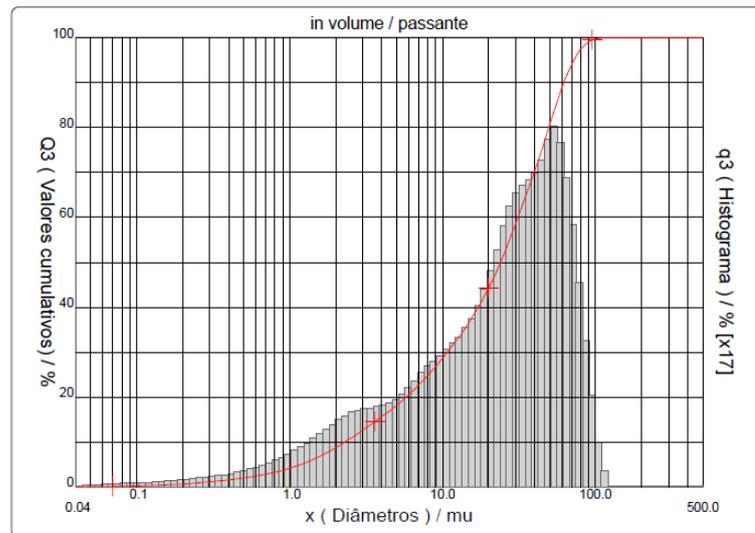


Figura 22: curva granulométrica do fíler calcário.

3.1.5 Resíduos industriais

Os resíduos industriais inseridos nesta pesquisa foram resíduos provenientes do beneficiamento do caulim: a birra e a borra. Os resíduos são provenientes da Caulisa Indústria S/A, localizada na região dos municípios do Junco do Seridó e Juazeirinho-PB.



Figura 23: birra



Figura 24: borra

Para efeito de esclarecimento, neste trabalho a birra, que é um resíduo mais arenoso foi adotada como agregado. Enquanto que a borra, sendo um resíduo com aparência mais argilosa, entrou como fino.

As características físicas dos resíduos, apresentadas nas tabelas 8 e 9, foram determinadas segundo a NM 45/2006 (Agregados – Determinação da massa unitária e do volume de vazios), para borra a NBR NM 52/2003 (Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman), para a birra a NBR NM 52/2003 (Agregados - Determinação da massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman) e NBR NM 248/2003 (Agregados - Determinação da composição granulométrica). As amostras foram obtidas segundo a NBR NM 26/2001 (Agregados – Amostragem) e a NBR 27/2001 (Agregados – Redução de amostras de campo para ensaio de laboratório).

Para determinar a área específica foi utilizado o método de Blaine, de acordo com o procedimento da NBR NM 76. O valor encontrado para a borra foi de 1959,0 cm^2/g .

A curva granulométrica do fíler foi determinada através da granulometria a laser, cujo resultado está apresentado na Figura 25.

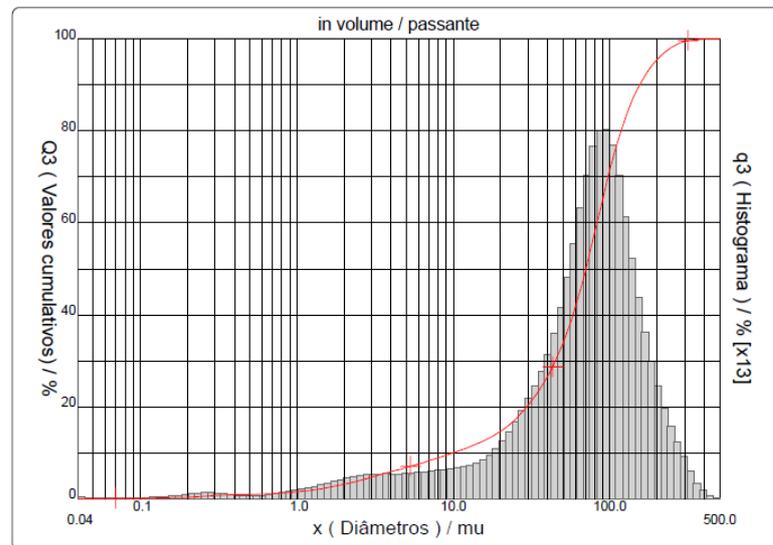


Figura 25: curva granulométrica da borra

3.1.6 Água

A água utilizada nesta pesquisa foi a da rede de abastecimento do município de João Pessoa, pela qual o LABEME (Laboratório de Estruturas e Materiais) da UFPB é servida.

3.1.7 Aditivo plastificante

Para produção de CAA de forma geral normalmente se utilizam aditivos denominados superplastificantes. Nesta pesquisa, para a realização dos experimentos foi utilizado aditivo denominado de hiperplastificante, mas o conceito é do aditivo superplastificante. Assim, nesta pesquisa trataremos o aditivo como aditivo superplastificante.

Este aditivo é conhecido comercialmente como ADIMENT PREMIUM, da Vedacit. Ele é a base de policarboxilatos, possui densidade de $1,09 \text{ g/cm}^3$ e é isento de cloretos.



Figura 26: galão 3,6 litros FONTE: www.vedacit.com.br

A seguir, na Tabela 8, são apresentadas as massas específicas, massas unitárias, na Tabela 9 a granulometria e na Figura 27 a curva granulométrica dos respectivos materiais utilizados nesta dissertação.

Tabela 8: massas específicas e unitárias dos materiais utilizados

Materiais utilizados	Cimento CP II F 32	Fíler calcário	Borra	Birra	Areia	Brita 9,5	Brita 19
Massa específica (Kg/dm ³)	2,92	2,63	2,27	2,61	2,56	2,53	2,53
Massa unitária (Kg/dm ³)	1,20	1,10	0,75	1,30	1,60	1,38	1,34

Tabela 9: granulometria dos materiais utilizados

Abertura das peneiras	Fíler Calcário	Borra	Birra	Areia	Brita 9,5 mm	Brita 19 mm
	Porcentagem Retida Acumulada (%)					
#19 mm	0	0	0	0	0	0,6
#12,5 mm	0	0	0	0	0	0,6
#9,5 mm	0	0	0,1	0	0,2	94,1
#6,3 mm	0	0	0,1	0	0,2	94,1
#4,75 mm	0	0	29,0	0,3	49,7	99,3
#2,36 mm	0	1,5	29,0	4,0	87,0	99,3
#1,18 mm	0	2,9	56,2	15,1	92,4	99,3
#600 µm	4,1	5,7	79,5	33,4	94,6	99,3
#300 µm	11,0	29,3	91,8	64,5	94,6	99,3
#150 µm	18,8	78,0	91,8	84,3	94,6	99,3
#75 µm	92,8	96,3	91,8	84,3	94,6	99,3
Fundo	100	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
Dimensão Máxima	600 µm	1,18 mm	6,3 mm	2,36 mm	6,3 mm	12,5 mm

Como pode ser percebido, os agregados mesmo tendo sido comprados com denominações de 9,5 e 19 mm, possuem dimensão máxima característica inferiores. Isto indica uma ausência de controle de qualidade na sua britagem.

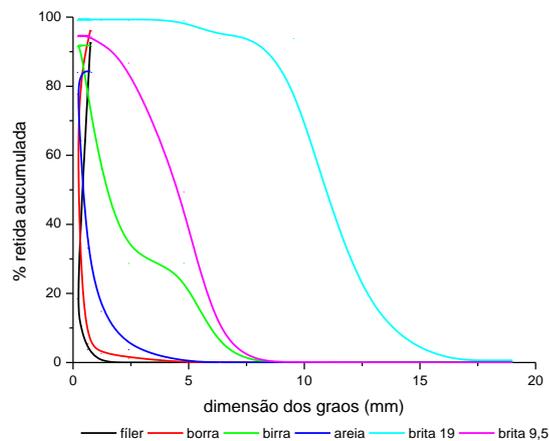


Figura 27: curva granulométrica dos materiais utilizados

3.2 Métodos

Para alcançar os objetivos desta pesquisa, foi primeiramente realizada uma revisão da literatura acerca das características do CAA, dos métodos de dosagem e procedimentos de avaliação do CAA.

Quanto aos procedimentos de avaliação do concreto foram escolhidos os ensaios que pudessem caracterizar as três propriedades essenciais do CAA: capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação. Os procedimentos escolhidos foram: ensaio do espalhamento, espalhamento T50cm, Funil V, Funil V 5min, Anel J, Caixa L, Caixa U. Em seguida partiu-se para confecção dos equipamentos utilizados nestes procedimentos.

Os equipamentos (placa quadrada de dimensões 100 cm x 100 cm, Funil V, Caixa L, Caixa U,) foram fabricados pelo próprio autor deste trabalho com o apoio de um marceneiro profissional, sendo confeccionados em compensado naval a fim de reproduzir mais fielmente as formas de madeira utilizadas na construção civil; e o anel J foi confeccionado por um ferreiro. Os demais equipamentos utilizados já se tinham disponíveis no LABEME (Laboratório de Estruturas e Materiais) da UFPB.



Figura 28: equipamentos para o teste do espalhamento e espalhamento T50cm



Figura 29: equipamento para o teste do funil V



Figura 30: equipamentos para o teste do Anel J



Figura 31: equipamento para o teste da caixa L



Figura 32: equipamentos para o teste da caixa U

O cimento, a areia e os dois tipos de brita (19 mm e 9,5 mm) foram adquiridos em depósitos de material de construção próximos à Universidade Federal da Paraíba.

O cimento foi adquirido de forma gradativa, na medida em que ia sendo necessário, a fim de não ultrapassar o prazo de validade, tendo sido assim, utilizado diferentes lotes.

Os agregados graúdos e miúdos foram adquiridos em quantidade suficiente para o desenvolvimento de toda a pesquisa, sendo colocados para secar e posteriormente acondicionados em tonéis plásticos com tampa para devida proteção.

O filer calcário foi doado pela Dolomil Industrial localizada na cidade de Campina Grande-PB, já vindo acondicionado em sacos plásticos.

Os resíduos de caulim foram doados pela Caulisa Indústria de Caulim S/A. Os dois tipos de resíduos foram retirados, aleatoriamente, de diferentes montes de resíduo de caulim a céu aberto ao redor de uma das fábricas da referida indústria na cidade de Juazeirinho-PB, sendo posteriormente colocados para secar e acondicionados, separadamente, em tonéis com tampa.

O aditivo hiperplastificante foi doado pela Vedacit.

A seguir serão descritos os procedimentos de dosagem seguindo-se os métodos de dosagem propostos por Tutikian (2007) e Gomes (2002).

3.2.1 Metodologia segundo Tutikian (2007)

3.2.1.1 Escolha dos materiais

Foram escolhidos materiais de acordo com a disponibilidade do comércio local. Após a escolha e caracterização, foram definidos os grupos de esqueletos granulométricos a serem utilizados. A composição de cada grupo está apresentada na Tabela 10.

Tabela 10: grupos de esqueleto granulométrico e seus respectivos materiais.

Grupos	Materiais utilizados					
	Brita 19	Brita 9,5	Birra	Areia	Fíler Calcário	Borra
01		X		X	X	
02	X	X		X	X	
03		X	X	X	X	
04	X	X	X	X	X	
05		X		X		X
06	X	X		X		X
07		X	X	X		X
08	X	X	X	X		X

3.2.1.2 Determinação do esqueleto granular

Em seguida, foram determinadas as composições dos esqueletos granulométricos com o menor índice de vazios, através do ensaio de massa unitária. O procedimento foi seguido como descrito no item 2.4.2.2, misturando 10% do material A e 90% do material B, depois 20% do material A com 80% do material B, até se inverterm as proporções em 90% do material B e 10% do material A. Para cada porcentagem de mistura foram realizados três testes a fim de se obter resultados mais precisos.

Ao fim de cada conjunto de resultados eram realizados os cálculos para determinar qual porcentagem possuía o menor índice de vazios e, então, partiu-se para a inserção do próximo material de granulometria logo inferior aos testados.

Foi testada a inserção da borra no esqueleto granulométrico em substituição ao fíler calcário, como apresentado na Tabela 10, formando assim mais quatro grupos distintos. Contudo, ao desenvolver o primeiro teste de compactação que tinha na sua composição a borra, observou-se que este material não poderia ser empacotado como os demais porque o valor da massa unitária nunca aumentava, ao contrário, sempre diminuía. Foi observado então que a borra possuía massa unitária inferior a 1 Kg/dm³, mais precisamente 0,75 Kg/dm³. Isto significa que quanto mais se insere a borra na mistura, menor será a massa unitária do conjunto. Conseqüentemente, também não poderia ser verificado o menor índice de vazios.

Assim, ficaram formados quatro grupos de esqueleto granulométrico conforme Tabela 11.

Tabela 11: grupos de esqueleto granulométrico e seus respectivos materiais.

Grupos	Materiais utilizados				
	Brita 19	Brita 9,5	Borra	Areia	Fíler Calcário
01		X		X	X
02	X	X		X	X
03		X	X	X	X
04	X	X	X	X	X

3.2.1.3 Determinação da relação água/cimento ou percentual de aditivo superplastificante

Com a definição dos esqueletos granulométricos de todos os grupos, partiu-se então para a etapa da determinação da relação água/cimento e percentual de aditivo superplastificante. Para tanto, foi fixado, para a pior situação, um valor para relação água/cimento (*a/c*), baseado nas tabelas 6.1 - Classes de agressividade ambiental e 7.1 - Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto da NBR 6118/03 e testados experimentalmente percentuais (de 1% em

peso do cimento) de aditivo superplastificante em traços intermediários para os grupos de esqueleto granulométrico 01 e 02.

Com os parâmetros de dosagem definidos, os materiais foram pesados e misturados em uma betoneira com motor elétrico. Baseado na sequência dos testes de compactação, a colocação dos agregados ocorreu sempre do material de maior granulometria para o de menor granulometria, em seguida o material fino e depois o cimento. Após aproximadamente 2 minutos de mistura dos materiais secos, a água foi adicionada. Por fim, o aditivo foi adicionado gradativamente.

Para cada traço de concreto com sua respectiva porcentagem de aditivo superplastificante, os testes de trabalhabilidade espalhamento, espalhamento T50cm e o funil V foram realizados para verificação da fluidez e coesão. Para garantir a precisão dos tempos a serem registrados, além da marcação com cronômetro realizado manualmente, os testes foram filmados com uma câmera fotográfica digital Sony Cyber-shot DSC-W210 que possui função de filmagem. Posteriormente, através dos vídeos, foram realizadas as confirmações dos tempos gastos nos testes.

Segundo a metodologia de Tutikian (2007), a não obtenção do CAA no traço experimental é um indicativo de que os materiais adotados não são adequados para a confecção deste concreto, devendo substituir os materiais ou apenas acrescentar outros para suprir as lacunas. Assim, foram testados com o esqueleto granulométrico dos grupos 01 e 02 acréscimos gradativos de fíler: 30%, 45%, 60%, para correção da coesão.

As etapas seguintes: mistura dos traços rico, intermediário e pobre, os ensaios das propriedades mecânicas e de durabilidade nas idades requeridas e o desenho dos diagramas de dosagem e desempenho, da metodologia de Tutikian (2007), não foram realizadas.

3.2.2 Metodologia segundo Gomes (2002)

A metodologia de Gomes (2002) também utiliza no seu processo de dosagem o esqueleto granulométrico para os agregados através de testes de compacidade, similares ao realizado na metodologia de Tutikian (2007), porém verifica a quantidade ideal de finos em relação ao cimento através de testes mais simples e que utiliza uma quantidade menor de material. Esta metodologia assume que o comportamento da fluidez do concreto é amplamente dirigido pela fluidez da matriz da pasta, podendo ser encontrada pela otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular, e o volume da pasta definido no concreto (GOMES *et. al.*, 2003).

3.2.2.1 Seleção dos componentes

Para esta etapa de seleção dos componentes se utilizou os materiais apresentados no item 3.1.

3.2.2.2 Composição da pasta

Para composição da pasta, foram realizados dois ensaios distintos: o teste com o Funil de Marsh e o ensaio com o mini-cone.

3.2.2.2.1 Ensaio com o Funil de Marsh

Os ensaios com o Funil de Marsh (Figura 33) foram realizados para verificação da compatibilidade do aditivo superplastificante com o cimento e determinação do ponto de saturação do aditivo em relação ao cimento.



Figura 33: equipamento utilizado no teste do Funil de Marsh.

Seguindo o procedimento descrito no item 2.4.3.1.1, foram testadas seis pastas com diferentes relações ad/c: 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1,0. As pastas foram confeccionadas adotando-se a relação a/c = 0,4. Os materiais foram misturados e executados ensaios aos 5 min e 60 min.

Foi construído o gráfico do tempo de escoamento com a dosagem nominal do superplastificante. Através do gráfico foi observada a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento, bem como o ponto de saturação do aditivo.

Após a confirmação da compatibilidade entre o aditivo superplastificante/cimento e a obtenção do ponto de saturação do aditivo, foram realizados os testes com o mini-cone para determinação do teor ideal de finos.

3.2.2.2.2 Ensaio com o mini-cone

De acordo com o procedimento descrito no item 2.4.3.1.2, foram realizados os ensaios do mini-cone com o fíler calcário e posteriormente, com a borra.

Neste trabalho, o equipamento utilizado, confeccionado em alumínio, não seguiu o desenho do mini-cone com seu respectivo flange desenvolvido por Kantro (1980). Como podem ser observadas na Figura 34 as dimensões internas do mini-cone foram obedecidas, entretanto o desenho externo foi simplificado.

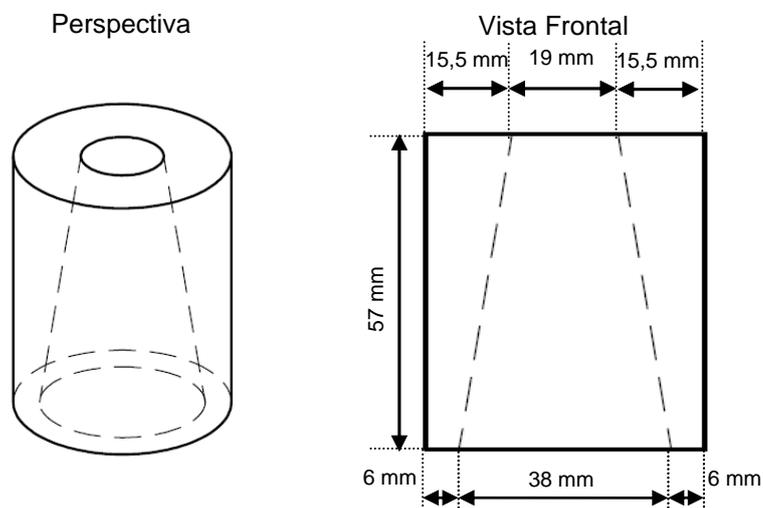


Figura 34: desenho e dimensões do mini-cone utilizado nesta dissertação.

3.2.2.2.2.1 Ensaio com o mini-cone com o fíler calcário

Para determinação do teor ideal de fíler foram testadas diferentes pastas variando a porcentagem de finos de 0% a 30%, em acréscimos gradativos de 5%. Nestes ensaios, foi utilizada a relação ad/c no seu ponto de saturação obtido no teste do Funil de Marsh.

Com a obtenção de uma porcentagem de fíler que atendeu aos limites estabelecidos $T_{115} = 3 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$, testou-se o acréscimo de aditivo para obtenção do parâmetro de espalhamento = $18 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$. Deste ponto em diante, passou-se a adotar a relação aditivo/cimento+finos (ad/c+finos), devido ao fator aditivo/cimento não considerar aumento da área de superfície específica do fino.



Figuras 35: ensaio do mini-cone para otimização dos finos na pasta.

Foram refeitos os ensaios com a nova relação ad/c+finos, sendo testadas diferentes pastas variando a porcentagem de finos de 10% a 40%, em acréscimos gradativos de 5%.

3.2.2.2.2 Ensaio com o mini-cone com a borra

Para determinação do teor ideal de borra foram testadas diferentes pastas variando sua porcentagem em acréscimos gradativos de 5%, dos 10% aos 40%. Nestes ensaios com a borra, foi utilizada como base a relação ad/c+finos obtido no teste com o fíler.

Obtendo-se uma porcentagem de borra que atendeu aos limites estabelecidos $T_{115} = 3 \text{ s} \pm 1 \text{ s}$, testou-se o acréscimo de aditivo para obtenção do parâmetro de espalhamento = $18 \text{ cm} \pm 1 \text{ cm}$.

Para cada pasta foi executado o ensaio do mini-cone duas vezes. Nos poucos testes que apresentou diferença de resultados, um terceiro ensaio foi realizado a fim de se obter dados precisos. Assim foram encontrados os valores do teor ideal de finos e o ponto de saturação do aditivo.

3.2.2.3 Determinação do esqueleto granulométrico

Paralelamente a etapa de composição da pasta, foram executados os testes de compactação entre os agregados para verificação do esqueleto granular. Contudo, como estes testes já tinham sido realizados anteriormente, apenas utilizou-se dos resultados já obtidos, evidentemente, sem a inserção do fíler calcário. Desta forma, os quatro grupos de esqueleto granulométrico formados ficaram com a composição de materiais como apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: grupos de esqueleto granulométrico e seus respectivos materiais.

Grupos	Materiais utilizados			
	Brita 19	Brita 9,5	Borra	Areia
1		X		X
2	X	X		X
3		X	X	X
4	X	X	X	X

3.2.2.4 Composição do concreto

Foi realizada a junção das etapas de composição da pasta e esqueleto granular para obtenção da composição do concreto.

Com o objetivo de verificar a quantidade mínima de pasta necessária para caracterizar o concreto como sendo um CAA, foram confeccionados traços ricos, intermediários e pobres para cada um dos grupos de esqueleto granulométrico com a utilização dos dois tipos de finos: o fíler calcário e a borra.

Para cada traço de concreto foram executados os testes de trabalhabilidade - espalhamento, espalhamentos T50cm, Funil V, Funil V 5min, Anel J, Caixa L, Caixa U.



Figura 36: testes do concreto no estado fresco

Após a verificação do concreto no estado fresco, foram moldados corpos de prova de cada concreto confeccionado para devida realização de testes no estado endurecido. Um dia após a moldagem dos corpos de prova, estes foram desmoldados, devidamente identificados e colocados em câmara úmida. Os testes de resistência foram realizados aos sete e vinte e oito dias (Figura 37), segundo a NBR 5739/94.



Figura 37: ensaio de resistência à compressão do concreto no estado endurecido

3.2.3 Comparativo dos traços obtidos pelos métodos de Tutikian (2007) e Gomes (2002)

Foi realizada uma comparação entre os traços dos concretos obtidos pelos métodos de Tutikian (2007) e Gomes (2002).

Para este comparativo foram confeccionados três traços de concreto: 1:2, 1:3, 1:4, pela metodologia de Tutikian (2007). Foi utilizado o esqueleto granulométrico composto por brita 9,5 mm, areia e fíler calcário, obtidos dos testes de compactação. As relações ad/c e a/c se basearam no concreto similar obtido pela metodologia de Gomes (2002). Para estes traços não foram moldados corpos de prova, pois o objetivo foi verificar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco.

Por fim, foram analisados e discutidos os resultados obtidos e realizada a redação final desta dissertação.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos dos testes executados para esta dissertação. Primeiro os resultados obtidos nos testes desenvolvidos pela metodologia de Tutikian (2007), depois os resultados encontrados pela metodologia de Gomes (2002) e, posteriormente, é apresentado o comparativo entre os métodos.

4.1 Método de Tutikian (2007)

4.1.1 Escolha dos materiais

Os materiais escolhidos para esta pesquisa foram apresentados e caracterizados no item 3.1.

4.1.2 Determinação do esqueleto granular

A intenção inicial desta pesquisa era desenvolver um CAA formado por oito grupos diferentes de esqueletos granulométricos. Entretanto, como descrito no item 3.2.1.2, a borra não entrou nas composições dos esqueletos granulométricos. Assim, ficaram quatro grupos de esqueletos granulométricos, os quais estão apresentados no item 3.2.1.2 – Tabela 11.

A seguir, temos os materiais que constituem cada um dos grupos com os respectivos resultados de cada teste efetuado, bem como a porcentagem final de cada esqueleto granulométrico.

O primeiro grupo testado foi composto por brita 9,5, areia e fíler calcário.

Tabela 13: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 1)

1° empacotamento (grupo 1)	
Brita 9,5	Areia
40%	60%

Tabela 14: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 1)

2° empacotamento (grupo 1)	
40% Brita 9,5 / 60% areia	Fíler calcário
85%	15%

Tabela 15: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 1)

Empacotamento Final (grupo 1)		
Brita 9,5	Areia	Fíler calcário
34%	51%	15%

O segundo grupo tinha em sua composição brita 19, brita 9,5, areia, fíler calcário.

Tabela 16: Resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)

1° empacotamento (grupo 2)	
Brita 19	Brita 9,5
60%	40%

Tabela 17: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)

2° empacotamento (grupo 2)	
60% Brita 19 / 40% Brita 9,5	Areia
50%	50%

Tabela 18: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)

3° empacotamento (grupo 2)	
50%(60% Brita 19 / 40% Brita 9,5) / 50% areia	Fíler calcário
90%	10%

Tabela 19: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 2)

Empacotamento Final (grupo 2)			
Brita 19	Brita 9,5	Areia	Fíler calcário
27%	18%	45%	10%

O terceiro grupo foi composto por brita 9,5, birra, areia, fíler calcário.

Tabela 20: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)

1° empacotamento (grupo 3)	
Brita 9,5	Birra
60%	40%

Tabela 21: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)

2° empacotamento (grupo 3)	
60% Brita 9,5 / 40% Birra	Areia
40%	60%

Tabela 22: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)

3° empacotamento (grupo 3)	
40% (60% Brita 9,5 / 40% Birra) / 60% Areia	Fíler calcário
85%	15%

Tabela 23: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 3)

Empacotamento Final (grupo 3)			
Brita 9,5	Birra	Areia	Fíler calcário
20,4%	13,6%	51%	15%

O quarto grupo composto por brita 19, brita 9,5, birra, areia, fíler calcário.

Tabela 24: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)

1° empacotamento (grupo 4)	
Brita 19	Brita 9,5
60%	40%

Tabela 25: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)

2° empacotamento (grupo 4)	
60% Brita 19 / 40% Brita 9,5	Birra
60%	40%

Tabela 26: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)

3° empacotamento (grupo 4)	
60% (60% Brita 19 / 40% Brita 9,5) / 40% birra	Areia
50%	50%

Tabela 27: resultado do quarto teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)

4° empacotamento (grupo 4)	
50% [60% (60% Brita 19 / 40% Brita 9,5) / 40% birra] / 50% areia	Fíler calcário
85%	15%

Tabela 28: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 4)

Empacotamento Final (grupo 4)				
Brita 19	Brita 9,5	Birra	Areia	Fíler calcário
15,3%	10,2%	17%	42,5%	15%

No gráfico a seguir, Figura 38, são apresentados os resultados finais dos esqueletos granulométricos no método de Tutikian (2007).

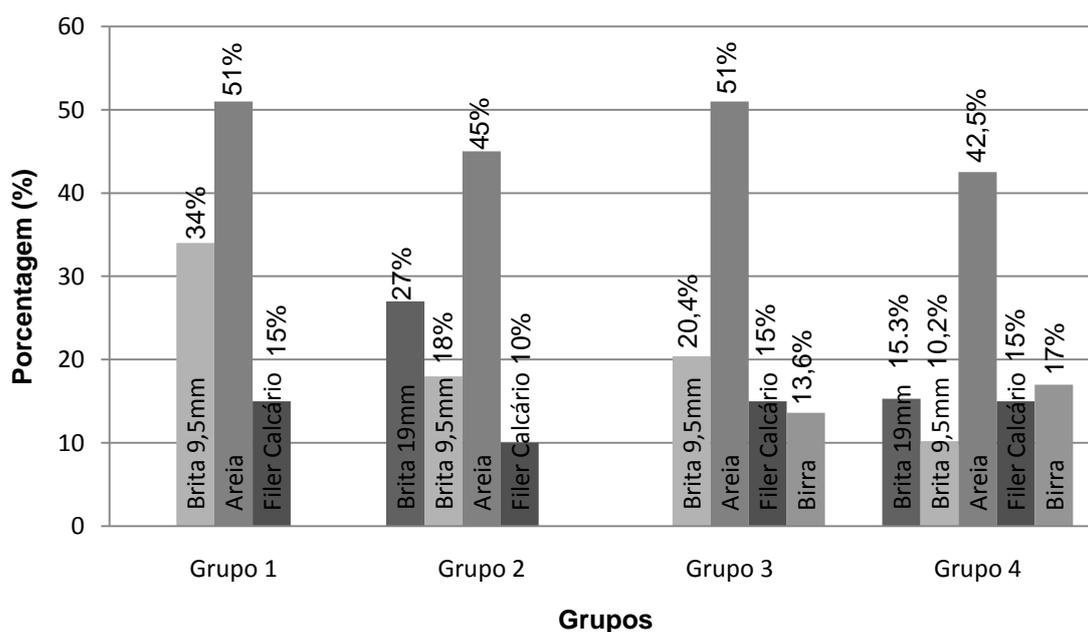


Figura 38: gráfico dos resultados finais dos quatro grupos de esqueletos granulométricos.

Através da observação deste gráfico pode-se perceber que houve uma redução na quantidade de areia, se compararmos o grupo 1 em relação ao grupo 2, em virtude de um menor volume de vazios deixado pelas britas 19 mm e 9,5 mm. No grupo 1 o agregado graúdo ocupa 34% do total enquanto que no grupo 2 preenche 45%, sugerindo que a utilização de materiais com distribuição contínua de granulometria maximiza o empacotamento, reduzindo o índice de vazios.

Estas observações também foram percebidas se comparados os grupos 3 e 4. Todavia, vale evidenciar o espaço ocupado pela birra dentro da composição dos respectivos grupos de esqueletos granulométricos. A birra funciona na composição como agregado miúdo e agregado graúdo. No grupo 3 substitui 13,6% do agregado

graúdo. Já no grupo 4 esta redução foi ainda maior: na ordem de 17%, sendo 14,5% de agregado graúdo e 2,5% da areia.

4.1.3 Determinação da relação água/ cimento ou percentual de aditivo superplastificante

Nesta etapa, foi determinada uma relação água/cimento (a/c) com base nas tabelas 6.1 e 7.1 da NBR 6118/03, adotando-se um valor de a/c igual a 0,45. Posteriormente à fixação da relação a/c, buscou-se determinar o percentual de aditivo superplastificante em função da escolha do traço intermediário.

Neste ponto foram realizados traços intermediários (1:4) de concreto para os dois esqueletos granulométricos que serviriam de base para o concreto de referência variando a quantidade de superplastificante em relação ao cimento. Para cada traço desenvolvido com seu respectivo percentual de aditivo plastificante, foram realizados os testes de trabalhabilidade – espalhamento, espalhamento T50cm e funil V.

A Tabela 29, para o esqueleto granulométrico grupo 1, e a Tabela 30, para o esqueleto granulométrico grupo 2, apresentam os resultados dos testes de trabalhabilidade realizados.

Tabela 29: resultados dos testes de trabalhabilidade do concreto composto pelo grupo 1

Traço Intermediário (1:4) com Esqueleto granulométrico (grupo 01) – a/c = 0,45								
Aditivo (%)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3
Espalhamento (cm)	50	53	60	62	62	63	63	64
Espalhamento T50cm (s)	< 1							
Funil V	-		< 3					

Tabela 30: resultados dos testes de trabalhabilidade do concreto composto pelo grupo 2

Traço Intermediário (1:4) com Esqueleto granulométrico (grupo 02) – a/c = 0,45								
Aditivo (%)	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,2	1,3
Espalhamento (cm)	47	52	57	59	60	62	62	63
Espalhamento T50cm (s)	< 1							
Funil V	-				< 3			

Os resultados obtidos nestes ensaios não foram satisfatórios. Apesar de obter um concreto cada vez mais fluido à medida que se aumentou o teor de aditivo plastificante, não foi atingida a viscosidade característica de um CAA. A conclusão de que os concretos testados ainda não eram CAA, se deu pela verificação dos resultados apresentados nos testes de espalhamento T50 e no teste do Funil V. Os valores obtidos foram inferiores aos estabelecidos pela literatura, que é um mínimo de 3 s para o espalhamento T50cm e de 6 segundos para o teste do funil V.

Após avaliar estes últimos resultados, percebeu-se a necessidade de se acrescentar uma quantidade maior de finos para oferecer ao concreto uma maior coesão.

Para tanto foi testado o acréscimo de finos além do obtido no empacotamento. Foram testados concretos com 30%, 45% e 60% de fíler calcário para os esqueletos granulométricos dos grupos 01 e 02. Contudo, todos continuaram sem obter as características de um CAA. Para todas as porcentagens testadas os resultados para o teste do funil V foram inferiores a três segundos. Para o teste do espalhamento T50cm todos os valores obtidos dos respectivos concretos foram menores que um segundo.

Os outros testes de trabalhabilidade não foram executados em virtude da não obtenção de resultados que atendessem aos parâmetros nestes primeiros testes.

Buscou-se então a realização de novos ensaios, como o *Funil de Marsh* e o mini-cone, que ainda não haviam sido realizados, no intuito de fornecer parâmetros mais precisos a respeito da pasta, se suas propriedades estariam otimizadas para a obtenção de um CAA. Estes ensaios determinam a coesão ideal da pasta utilizando-se de uma menor quantidade de material e de procedimentos mais simples.

A partir da realização desses novos ensaios supracitados percebeu-se que a pesquisa poderia adotar o procedimento proposto por Gomes (2002), pois no início de sua metodologia já são inseridos tais ensaios. Outra razão pela qual se optou em adotar outra metodologia é que, segundo Tutikian (2007), a não obtenção de um CAA no traço experimental é indicativo de que se devem substituir componentes ou acrescentar outros. Como esta substituição na base da tentativa podia ser muito dispendiosa, já que se estava trabalhando diretamente no concreto, e sem a

garantia de se chegar a um resultado satisfatório nas primeiras tentativas, se optou pela mudança de metodologia.

4.2 Método de Gomes (2002)

Como descrito no item 2.4.2, o método de Gomes (2002) é dividido em duas fases paralelas, uma denominada composição da pasta e outra determinação do esqueleto granulométrico, mais a junção das duas etapas denominada de determinação do volume de pasta.

4.2.1 Composição da pasta

Assim, dentro da fase de otimização da pasta, foi realizado o ensaio do Funil de Marsh para verificar a compatibilidade do aditivo superplastificante e o ponto de saturação do aditivo em relação ao cimento.

4.2.1.1 Ensaio do Funil de Marsh

Na Tabela 31, temos os resultados obtidos no teste de compatibilidade e ponto de saturação aditivo/cimento (ad/c) através do ensaio do Funil de Marsh.

Tabela 31: resultados dos testes de compatibilidade ad/c e determinação do ponto de saturação.

Compatibilidade ad/c e determinação do ponto de saturação						
ad/c	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
T5min	10s	10s	9s	9s	9s	9s
T60min	12s	10s	8s	8s	8s	8s

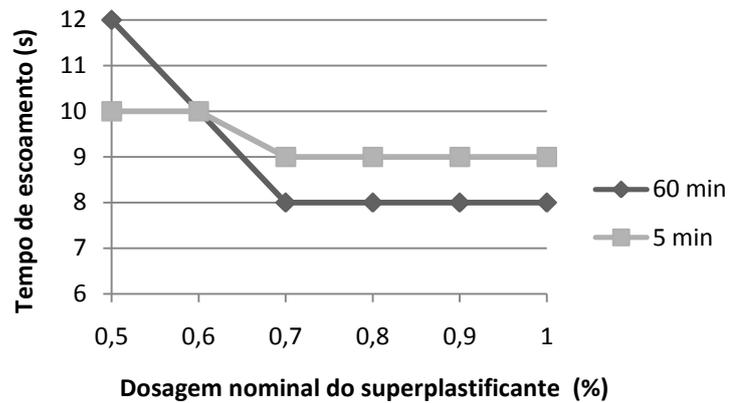


Figura 39: obtenção do ponto de saturação da pasta com relação a/c 0,40, através do Funil de Marsh

Como pode ser observado no gráfico, segundo Aïtcin (2000), há a compatibilidade entre o superplastificante e o cimento devido o cruzamento entre as linhas de 5 min e 60 min. O ponto de saturação da relação ad/c encontrado foi de 0,7, pois a partir deste ponto o acréscimo de aditivo não provocou nenhuma alteração significativa na fluidez da pasta.

4.2.1.2 Ensaio do mini-cone

Para o teste do mine-cone foi considerado o valor base de ad/c = 0,7 e a/c = 0,4. Para estes testes os resultados pretendidos eram espalhamento: 18 cm \pm 1 cm e T115: 3 s \pm 1 s.

4.2.1.2.1 Relação cimento + fíler calcário

A partir de então foram sendo testadas porcentagens gradativas de fíler calcário, em relação ao cimento. Os resultados obtidos nos primeiros testes estão apresentados na Tabela 32.

Tabela 32: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/finos ideal

Teste do mini-cone com $ad/c = 0,7$ e $a/c = 0,4$							
% fíler calcário	0%	5%	10%	15%	20%	25%	30%
Espalhamento Ø(cm)	18	16	15	14	12	12	11
T115 (segundos)	0,5	0,6	0,8	1,4	2,5	2,8	3,0

Tendo encontrado o valor considerado ideal de 3 s para o teste T115cm na pasta que continha 30% de fíler, foi-se adicionando aditivo, gradativamente, a fim de se obter uma maior fluidez até encontrar uma medida de espalhamento que também satisfizesse as recomendações da literatura de 18 cm \pm 1 cm.

Neste ponto, foi percebido que somente o fator aditivo/cimento não fazia a leitura da influência do fíler, devido ao aumento da área de superfície específica, pois quanto mais fino é o material maior é sua superfície específica. Então, optou-se por a adotar a relação aditivo/cimento+finos ($ad/c+finos$).

Considerando agora a relação aditivo/cimento+fíler, o valor encontrado dentro dos limites de espalhamento = 18 cm \pm 1cm e T115 = 3 s \pm 1 s, mostrado na Tabela 33, foi de 1,0%.

Tabela 33: teste do mini-cone para verificação da relação aditivo/cimento+fíler

Teste do mini-cone com $a/c = 0,4$ e 30% de fíler em relação ao cimento							
$ad/c+fíler$	0,53	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
Espalhamento Ø(cm)	11	12	13	15	16	17	18
T115 (segundos)	3,0	2,8	2,5	2,3	2,1	2,0	1,8

Com estes testes experimentais passou-se a adotar sempre a quantidade de aditivo em relação ao cimento + finos. Assim, para confirmar o resultado obtido anteriormente, repetiu-se o teste do mini-cone para confirmação da porcentagem ideal de fíler calcário, adotando o valor de $ad/c+fíler = 1,0$. Os resultados deste ensaio estão apresentados na Tabela 34.

Tabela 34: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/finos ideal

Teste do Mini-cone com $ad/c+fíler = 1,0$							
% fíler calcário	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
Espalhamento Ø(cm)	18	18	18	18	17	16	15
T115 (segundos)	0,7	1,0	1,1	1,5	2,0	2,2	2,5

Como pode ser observada na Tabela 34, a porcentagem que se encaixa dentro dos parâmetros estabelecidos de espalhamento = 18 cm \pm 1 cm e T115 = 3 s

± 1 s, apresentando boa fluidez e boa coesão, continuou sendo a de 30% de fíler calcário.

4.2.1.2.2 Relação cimento + borra

Em virtude da borra entrar como material fino neste trabalho, também foram executados testes utilizando o ensaio do mini-cone para verificar qual a melhor relação cimento + borra que pudesse conceder à mistura do concreto uma coesão característica de um CAA. Para os testes com a borra utilizou-se diretamente a relação ad/c+finos.

Os resultados de testes do mini-cone para verificação da relação cimento/borra ideal estão apresentados na Tabela 35.

Tabela 35: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/finos ideal

Teste do Mini-cone com ad/c+borra = 1,0							
% borra	10%	15%	20%	25%	30%	35%	40%
Espalhamento Ø(cm)	18	18	17	17	16	15	15
T115 (segundos)	0,5	0,6	1,3	1,5	2,2	2,3	2,6

Para estes testes nenhuma das misturas se enquadraram dentro dos resultados de espalhamento: 18 cm \pm 1 cm e T115: 3 s \pm 1 s. A porcentagem de borra que mais se aproximou dos resultados esperados foi de 30%, cujo espalhamento foi de 16 cm e T115 de 2,2 s.

Por isto, foi testado o aumento da quantidade de aditivo em relação à proporção cimento + borra até encontrar os requisitos mínimos de coesão e fluidez. Para esta verificação, foi utilizada a proporção de 30% de borra em relação ao cimento, pois como dito anteriormente, foi a porcentagem de ficou mais próxima dos parâmetros ideais. Como pode ser observado na Tabela 36, constatou-se que o fator que melhor se enquadra dentro dos limites ideais, foi 1,4 de ad/(c+borra).

Tabela 36: teste do mini-cone para verificação da relação cimento/resíduo ideal

Teste do Mini-cone com ad/(c+borra) com 30% borra							
ad/(c+borra) %	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6
Espalhamento Ø(cm)	16	16	16	16	17	17	18
T115 (segundos)	2,2	2,2	2,2	2,1	2,1	2,0	1,9

Assim, a proporção cimento + borra e a relação ad/(c+borra) que apresentaram boa fluidez e boa coesão foram, respectivamente, 30% e 1,4.

4.2.2 Composição do esqueleto granulométrico

Com os resultados da composição das duas pastas, cimento/fíler e cimento/borra, deu-se prosseguimento à produção do CAA. Como os ensaios de compactação entre os materiais escolhidos já tinham sido realizados anteriormente, retirou-se os finos da composição, ficando apenas com os agregados: areia, brita 9,5, brita 19 mm e a birra.

A seguir, temos os materiais que compõem cada um dos grupos com os respectivos resultados de cada teste efetuado, bem como a porcentagem final de cada esqueleto granulométrico.

O primeiro grupo testado foi composto por brita 9,5, areia.

Tabela 37: resultado do primeiro teste e composição final do esqueleto granulométrico (grupo 1)

Empacotamento Final (grupo 1)	
Brita 9,5	Areia
40%	60%

O segundo grupo tinha em sua composição brita 19, brita 9,5, areia.

Tabela 38: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)

1° empacotamento	
Brita 19	Brita 9,5
60%	40%

Tabela 39: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 2)

2° empacotamento (grupo 2)	
60% Brita 19 / 40% Brita 9,5	Areia
50%	50%

Tabela 40: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 2)

Empacotamento Final (grupo 2)		
Brita 19	Brita 9,5	Areia
30%	20%	50%

O terceiro grupo foi composto por brita 9,5, birra, areia.

Tabela 41: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)

1° empacotamento	
Brita 9,5	Birra
60%	40%

Tabela 42: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 3)

2° empacotamento (grupo 3)	
60% Brita 9,5 / 40% Birra	Areia
40%	60%

Tabela 43: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 3)

Empacotamento Final (grupo 3)		
Brita 9,5 /	Birra	Areia
24%	16%	60%

O quarto grupo composto por brita 19, brita 9,5, birra, areia.

Tabela 44: resultado do primeiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)

1° empacotamento (grupo 4)	
Brita 19	Brita 9,5
60%	40%

Tabela 45: resultado do segundo teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)

2° empacotamento (grupo 4)	
60% Brita 19 / 40% Brita 9,5	Birra
60%	40%

Tabela 46: resultado do terceiro teste para composição do esqueleto granulométrico (grupo 4)

3° empacotamento (grupo 4)	
60%(60% Brita 19 / 40% Brita 9,5) / 40% Birra	Areia
50%	50%

Tabela 47: composição final do esqueleto granulométrico (grupo 4)

Empacotamento Final (grupo 4)			
Brita 19	Brita 9,5	Birra	Areia
18%	12%	20%	50%

No gráfico a seguir são apresentados os resultados finais dos esqueletos granulométricos no método de Gomes (2002).

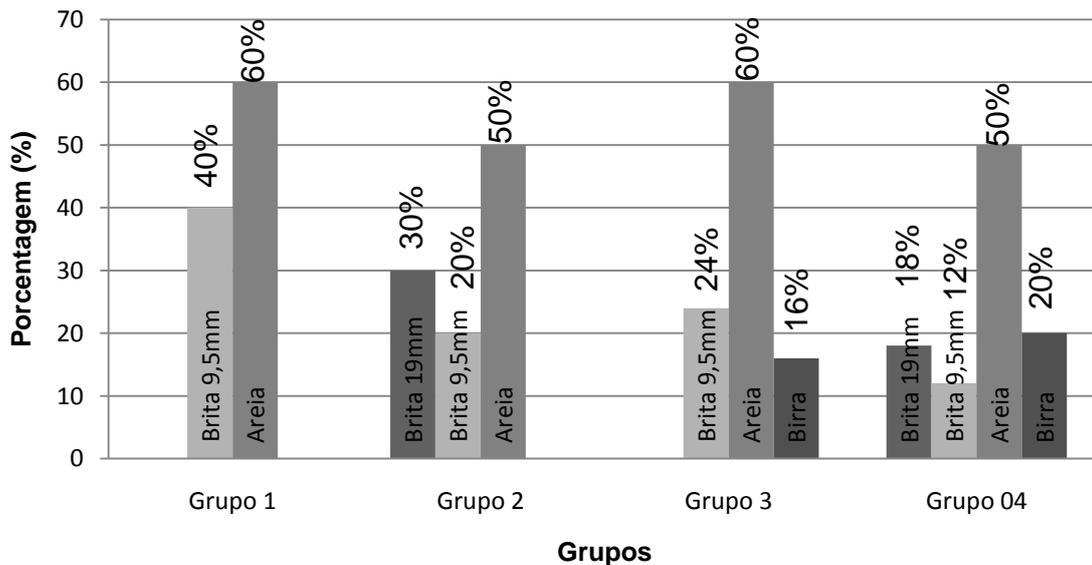


Figura 40: Porcentagem dos materiais dos esqueletos granulométricos

Com a visualização deste gráfico, percebe-se que entre o grupo 1 e o grupo 2 houve uma redução da quantidade de areia em 10% devido a um menor índice de vazios existente. Comparando o grupo 1 com o grupo 3, nota-se que a inclusão da birra no grupo 3 fez reduzir em 16% a quantidade de brita necessária para compor este esqueleto granulométrico. Com relação aos grupos 2 e 4, a inserção da birra substitui em 12% a brita 19 mm e em 8% a brita 9,5 mm, reduzindo 20% no total, se somados os dois tipos de brita.

4.2.3 Composição do concreto

Com a composição da pasta e do esqueleto granulométrico prontos, partiu-se para a verificação da quantidade mínima de pasta em relação aos agregados. Para cada grupo foram utilizadas duas pastas, uma composta de cimento e fíler calcário e a outra pasta formada por cimento e borra.

Em função destes experimentos foram formados oito diferentes tipos de CAA, conforme apresentados na Tabela 48.

Tabela 48: denominações dos tipos de CAA desenvolvidos com respectivas abreviaturas

Denominação do concreto	Siglas
Concreto auto-adensável de referência com fíler e brita unitária (9,5 mm)	CAAFi1
Concreto auto-adensável de referência com fíler e brita binária (9,5 e 19 mm)	CAAFi2
Concreto auto-adensável com fíler, birra e brita unitária (9,5 mm)	CAAFiBi1
Concreto auto-adensável com fíler, birra e brita binária (9,5 e 19 mm)	CAAFiBi2
Concreto auto-adensável com borra e brita unitária (9,5 mm)	CAABo1
Concreto auto-adensável com borra e brita binária (9,5 e 19 mm)	CAABo2
Concreto auto-adensável com borra, birra e brita unitária (9,5 mm)	CAABoBi1
Concreto auto-adensável com borra, birra e brita binária (9,5 e 19 mm)	CAABoBi2

A Tabela 49 resume os materiais constituintes dos tipos de concretos testados, além do cimento, água e aditivo superplastificante.

Tabela 49: CAA desenvolvidos com respectivos materiais utilizados

Tipos de concreto	Materiais utilizados					
	Fíler Calcário	Borra	Areia	Birra	Brita 9,5	Brita 19
CAAFi1	X		X		X	
CAAFi2	X		X		X	X
CAAFiBi1	X		X	X	X	
CAAFiBi2	X		X	X	X	X
CAABo1		X	X		X	
CAABo2		X	X		X	X
CAABoBi1		X	X	X	X	
CAABoBi2		X	X	X	X	X

A diferença básica entre os quatro primeiros grupos dos quatro últimos é o fato de que, a fim de se achar a viscosidade exigida para classificar o concreto como sendo auto-adensável, nos quatro primeiros grupos foi utilizado o fíler e nos outros a borra.

4.2.3.1 Ensaio no estado fresco

Foram testados três traços de concreto para cada grupo de esqueleto granulométrico: 1:2,3, 1:3,3 e 1:4,3. Para cada traço de concreto confeccionado foram realizados os testes de trabalhabilidade que pudessem comprovar a obtenção das propriedades exigidas de um CAA: capacidade de escoamento, capacidade de preenchimento e resistência à segregação.

Ao desenvolver o primeiro traço de concreto utilizando o fíler, percebeu-se a necessidade de corrigir a relação ad/c+fíler, para atingir uma fluidez mínima. Por isto, mesmo tendo encontrado no teste do mini-cone o fator 1,0 para a relação ad/c+fíler, na produção dos concretos com fíler calcário adotou-se o valor de 1,2 para ad/c+fíler.

A partir de então, excetuando a relação a/c, não foram feitos ajustes durante a dosagem do concreto, de modo a reduzir o máximo possível as variáveis e assim avaliar melhor a influência dos materiais componentes do concreto.

Baseado nas pesquisas realizadas acerca dos testes de trabalhabilidade, foi montada a Tabela 50 que apresenta os valores aceitos pela maioria dos pesquisadores para os ensaios de trabalhabilidade. Esta tabela-resumo está apresentada aqui em virtude de indicar os valores de referência adotados neste estudo.

Tabela 50: valores aceitos pela maioria dos pesquisadores para os ensaios de trabalhabilidade.

Ensaio no estado fresco				
Ensaio	Unidade	Valor mínimo	Valor máximo	Principal propriedade avaliada
Espalhamento	cm	60	80	Capacidade de preenchimento
Espalhamento T50cm	segundos	3	7	
Funil V	segundos	6	12	
Funil V 5min	(acréscimo) segundos	0	+ 3	Resistência à segregação
Caixa L	H2/H1	0,80	1,0	Habilidade de passagem
Caixa U	cm	0	3	
Anel J	mm	0	10	

A seguir, na Tabela 51, temos os resultados dos ensaios no estado fresco e na Tabela 52 são apresentados os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAAFi1.

Tabela 51: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAAFi1									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalha- mento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,2	0,40	60	3,0	6.5	+1,2	0,95	2	5
1:3,3	1,2	0,45	58	3.1	5.0	+1,5	0,85	3	10
1:4,3	1,2	0,50	53	3,0	4.0	+1,0	0,75	5	20

Tabela 52: consumo de cimento e teor de argamassa

CAAFi1						
Traço	cim	fc	ar	b9,5	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1,2	0,8	609	75,7
1:3,3	1	0,3	1,8	1,2	480	72,0
1:4,3	1	0,3	2,4	1,6	396	69,8

Legenda: cim= cimento; fc= filer calcário; ar= areia; b9,5= brita 9,5 mm;

Nestes primeiros testes com o CAAFi1 podemos observar que foi alcançado o CAA para o traço 1:2,3, pois para todos os testes no estado fresco os resultados ficaram dentro do estabelecido pela literatura. O traço 1:3,3, apesar de ter obtido resultados de 58 cm no espalhamento e 5 s no funil V, ainda pode ser considerado um CAA, porém no limite mínimo de fluidez e viscosidade necessários para este tipo de composição ser considerado um CAA. Já o traço 1:4,3 não apresentou boa

fluidez (espalhamento = 53 cm), nem boa capacidade de escoamento (caixa L = 0,75; caixa U = 5 cm; anel J = 20 mm), pois os resultados dos testes, em sua maioria, foram inferiores aos limites mínimos estabelecidos pela literatura.

Na Tabela 53, são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e na Tabela 54 os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAABo1.

Tabela 53: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAABo1									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalha- mento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,4	0,45	70	3,0	5,5	+0,5	1,0	1	0
1:3,3	1,4	0,50	65	4,0	6,0	+1,0	0,85	3	10
1:4,3	1,4	0,60	56	5,0	6,0	+2,0	0,7	6	15

Tabela 54: consumo de cimento e teor de argamassa

CAABo1						
Traço	cim	bo	ar	b9,5	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1,2	0,8	585	75,7
1:3,3	1	0,3	1,8	1,2	474	72,0
1:4,3	1	0,3	2,4	1,6	401	69,8

Legenda: cim= cimento; bo= borra; ar= areia; b9,5= brita 9,5 mm;

Os primeiros experimentos utilizando a borra na confecção de um CAA apresentaram bons resultados. Para o concreto denominado de CAABo1, tanto o traço 1:2,3 quanto o 1:3,3 podem ser considerados de fato como um CAA. Pois ambos se mostraram dentro dos requisitos de trabalhabilidade exigidos demonstrando boa fluidez e viscosidade plástica. Quando observados os resultados destes dois concretos, nota-se que os valores obtidos estão dentro dos limites mínimos e máximos estabelecidos pela literatura. Apenas o traço 1:4,3 do CAABo1 começou a perder características de auto-adensabilidade. A pouca fluidez foi observada no teste do espalhamento (56 s) e a baixa deformabilidade foi constatada pelos testes da caixa L (0,7), caixa U (6 cm) e anel J (15 mm).

Comparando os traços do CAABo1 com o CAAFi1, pôde-se perceber que o CAA que tinha em sua composição a borra obteve resultados discretamente

melhores quanto ao espalhamento e a coesão. Com relação ao consumo de cimento, ambos apresentaram valores quase iguais. Assim, através dos resultados obtidos nos testes no estado fresco, fica sugerido que a borra pode ser utilizada como fino em substituição ao filer calcário.

A seguir, na Tabela 55, temos os resultados dos ensaios no estado fresco e na Tabela 56 são apresentados os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAAFi2.

Tabela 55: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAAFi2									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalha mento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,2	0,40	80	2	6	+4,0	0,7	4	12
1:3,3	1,2	0,45	73	1	4,6	+2,0	0,8	4	10
1:4,3	1,2	0,50	67	1	4	+3,2	7,7	5	13

Tabela 56: consumo de cimento e teor de argamassa

CAAFi2							
Traço	cim	fc	ar	b9,5	b19	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1	0,4	0,6	611	69,6
1:3,3	1	0,3	1,5	0,6	0,9	481	65,1
1:4,3	1	0,3	2	0,8	1,2	397	62,2

Legenda: cim= cimento; fc= filer calcário; ar= areia; b9,5= brita 9,5 mm; b19= brita 19 mm

Como pode ser observado nos resultados do teste de traço 1:2,3, foi obtido um concreto com bastante fluidez (espalhamento = 80 cm), pouca coesão (T50cm = 2 s) e sem resistência à segregação, que pode ser comprovado pela comparação dos testes do Funil V e Funil V 5mim, cuja diferença apresentada nos tempos é de 4 s, indicando que os agregados graúdos ficaram alojados no fundo do equipamento impedindo a passagem uniforme do concreto. Também foi possível perceber visualmente a segregação dos materiais e a baixa capacidade de escoamento no teste do anel J.

Os traço 1:3,3 e 1:4,3 do CAAFi2 continuaram com resultados insatisfatórios. Tanto a habilidade de passar entre obstáculos, quanto à resistência à segregação

não foram atendidos, continuando com uma boa fluidez, porém sem a coesão e viscosidade de um CAA.

Na Tabela 57 são apresentados os resultados dos ensaios de trabalhabilidade no estado fresco e na Tabela 58 os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAABo2.

Tabela 57: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAABo2									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalha- mento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,4	0,45	70	2,5	5	+2,5	0,75	3	12
1:3,3	1,4	0,55	75	1,5	5	+2,0	0,8	2	11
1:4,3	1,4	0,60	68	1,6	5,5	+1,5	0,8	3	12

Tabela 58: consumo de cimento e teor de argamassa

CAABo2							
Traço	cim	bo	ar	b9,5	b19	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1	0,4	0,6	585	69,6
1:3,3	1	0,3	1,5	0,6	0,9	454	65,1
1:4,3	1	0,3	2	0,8	1,2	378	62,2

Legenda: cim= cimento; bo= borra; ar= areia; b9,5= brita 9,5 mm; b19= brita 19 mm

O CAABo2 de forma geral apresentou uma boa fluidez (teste do espalhamento = 70 cm, 75 cm, 68 cm), mas a viscosidade não atingiu os parâmetros mínimos (ver resultados dos testes funil V e T50cm). Além disto, demonstrou uma pequena deficiência na capacidade de escoamento e uma tendência a segregar.

A viscosidade foi um pouco superior ao concreto similar com fíler, mas não o suficiente para poder classificá-lo como um CAA. Como os resultados ficaram próximos aos aceitáveis pela literatura, com algum ajuste na relação a/c e ad/c+finos talvez pudesse ser obtido um CAA com esta composição de esqueleto granulométrico.

O consumo de cimento do CAABo2 foi inferior ao CAAFi2. Isto implica que, analisando apenas este aspecto, um concreto com inserção de borra reduz custos, porém em virtude da necessidade de uma maior quantidade de aditivo a redução do custo não se confirme.

Na Tabela 59, são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e na Tabela 60 os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAAFiBi1.

Tabela 59: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAAFiBi1									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalhamento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,2	0,40	70	3,5	6	+0,5	0,95	0,5	2
1:3,3	1,2	0,50	68	2	5	+1,5	0,85	2	3
1:4,3	1,2	0,60	62	1,5	4	+2,0	0,80	3	9

Tabela 60: consumo de cimento e teor de argamassa

CAAFiBi1							
Traço	cim	fc	ar	bi	b9,5	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1,2	0,32	0,48	611	75,7
1:3,3	1	0,3	1,8	0,48	0,72	470	72,0
1:4,3	1	0,3	2,4	0,64	0,96	382	69,8

Legenda: cim= cimento; fc= filer calcário; ar= areia; bi= birra; b9,5= brita 9,5 mm;

Estes primeiros experimentos com a utilização da birra em substituição de parte dos agregados apresentaram resultados significativos. Como podem ser observados nas tabelas referentes aos testes no estado fresco do concreto em questão, todos os resultados para o traço 1:2,3 se enquadraram dentro dos limites estabelecidos pela literatura apresentando as propriedades capacidade de preenchimento, capacidade de escoamento e resistência à segregação de forma bem satisfatória, assim pode-se afirmar que este concreto de fato é um CAA.

Nos traços 1:2,3 e 1:3,3, os resultados dos testes do espalhamento T50cm e funil V ficaram abaixo do limite mínimo estabelecido pela literatura, indicando que o concreto foi perdendo viscosidade. Isto se deve provavelmente em função da quantidade de filer ser fixa em relação ao cimento e não acompanhar a relação a/c, pois pesquisa realizada por Melo (2005) sugere que o teor de filer seja variável em função da água/cimento sendo maior com o aumento do teor de água na mistura a fim de que seja garantida a viscosidade da adequada da mistura e não provoque instabilidade no estado fresco do concreto.

A seguir, na Tabela 61, temos os resultados dos ensaios no estado fresco e na Tabela 62 são apresentados os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAABoBi1.

Tabela 61: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAABoBi1									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalhamento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,4	0,46	55	11	4,5	+0,5	0,80	3	10
1:3,3	1,4	0,50	65	3	4	0,0	0,90	1	5
1:4,3	1,4	0,60	63	3	4	+1,5	0,85	3	10

Tabela 62: consumo de cimento e teor de argamassa

CAABoBi1							
Traço	cim	bo	ar	bi	b9,5	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1,2	0,32	0,48	583	75,7
1:3,3	1	0,3	1,8	0,48	0,72	466	72,0
1:4,3	1	0,3	2,4	0,64	0,96	379	69,8

Legenda: cim= cimento; bo= borra; ar= areia; bi= birra; b9,5= brita 9,5 mm;

No CAABoBi1 traço 1:2,3 os resultados demonstraram uma viscosidade excessiva, como pode ser comprovado pelo teste do espalhamento T50cm que apresentou o valor de onze segundos, ou seja, acima do limite máximo de sete segundos aceitável pela literatura. Este concreto apresentou boa coesão e uma mínima habilidade de passar entre obstáculos (caixa L = 0,80; caixa U = 3 cm; anel J = 10 mm), porém como resultado da alta viscosidade não foi atingido o parâmetro mínimo da fluidez.

Nos demais concretos, cujos dois resíduos foram utilizados em conjunto (CAABoBi1- traços 1:3,3 e 1:4,3), apesar de no teste do funil V não atingirem os resultados mínimos dos seis segundos, os demais testes indicaram boa coesão e uma boa resistência à segregação. Com relação à capacidade de preenchimento, ou seja, a fluidez da mistura pode-se dizer que ficou no limite mínimo esperado de um CAA. Também quanto à capacidade de escoamento obteve resultados dentro da auto-adensabilidade.

Na tabela 63 são apresentados os resultados dos ensaios no estado fresco e na Tabela 64 os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAAFiBi2.

Tabela 63: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAAFiBi2									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalha- mento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,2	0,40	67	2	6	+0,5	1,0	0,5	2
1:3,3	1,2	0,50	68	3	6	+3,0	0,85	3	9
1:4,3	1,2	0,60	66	3	6	+3,0	0,82	3	11

Tabela 64: consumo de cimento e teor de argamassa

CAAFiBi2								
Traço	cim	fc	ar	bi	b9,5	b19	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1	0,4	0,24	0,36	612	69,6
1:3,3	1	0,3	1,5	0,6	0,36	0,54	471	65,1
1:4,3	1	0,3	2	0,8	0,48	0,72	382	62,2

Legenda: cim= cimento; fc= filer calcário; ar= areia; bi= birra; b9,5= brita 9,5 mm; b19= brita 19 mm

O CAAFiBi2 traço 1:2,3, apesar de obter o resultado de dois segundos no teste do espalhamento T50cm, apresentou comprovadamente pelos demais ensaios, uma boa fluidez, boa capacidade de passagem e resistência a segregação. Assim pode-se dizer que atendeu bem aos requisitos exigidos para um CAA.

Os demais traços obtiveram uma boa capacidade de preenchimento e um mínimo de capacidade de escoamento, contudo apresentaram-se no limite mínimo de resistência à segregação. Este limite pode ser comprovado pela observação do teste do funil V 5min que apresenta resultados de +3 s em relação ao teste do funil V, valor máximo aceito pela literatura.

Fazendo um comparação entre o CAAFi2, que apresentou segregação, e o CAAFiBi2, fica sugerido que a birra supriu a falta de coesão existente no CAAFi2. Provavelmente, isto se deve em função do esqueleto granulométrico do CAAFiBi2 possuir uma compacidade maior já que a birra possui uma granulometria bem distribuída. Por fim, na Tabela 65, são apresentados os resultados dos ensaios no

estado fresco e na Tabela 66 os traços unitários secos em massa, consumo de cimento e teor de argamassa referentes ao CAABoBi2.

Tabela 65: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado frescoresco

CAABoBi2									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalha- mento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2,3	1,4	0,45	60	3,5	5,5	+1,0	0,85	3	7
1:3,3	1,4	0,50	65	2,5	5	+1,0	0,75	4	13
1:4,3	1,4	0,60	60	3,0	5	+2,0	0,80	4	11

Tabela 66: consumo de cimento e teor de argamassa

CAABoBi2								
Traço	cim	bo	ar	bi	b9,5	b19	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2,3	1	0,3	1	0,4	0,24	0,36	480	69,6
1:3,3	1	0,3	1,5	0,6	0,36	0,54	466	65,1
1:4,3	1	0,3	2	0,8	0,48	0,72	386	62,2

Legenda: cim= cimento; bo= borra; ar= areia; bi= birra; b9,5= brita 9,5 mm; b19= brita 19 mm

O CAABoBi2, para os três traços desenvolvidos, apresentou uma capacidade de preenchimento mínima. A resistência à segregação também foi obtida de forma satisfatória. Contudo a capacidade de escoamento dos traços 1:3,3 e 1:4,3 não atendeu ao estabelecido pela literatura. Se observados os resultados da caixa U e do anel J, percebe-se que a habilidade de passagem dos concretos não foi suficiente para ficar abaixo valores máximos de 3 cm e 10 mm, respectivamente. Estes resultados indicam que pra ser considerado de fato um CAA, precisar-se-ia ajustar a deformabilidade do concreto.

Comparando com o CAABo2, a inserção da birra no CAABoBi2 melhorou a coesão do concreto, contudo reduziu a capacidade de escoamento e a fluidez.

Na tabela 67 é apresentado o resumo dos resultados dos concretos testados quanto às propriedades no estado fresco exigidos de um CAA.

Tabela 67: resumo dos resultados dos concretos testados quanto à capacidade de preenchimento, habilidade de passagem e resistência à segregação

Tipo do concreto	Traço	Capacidade de preenchimento (fluidez)	Capacidade de escoamento (deformabilidade)	Resistência à segregação (coesão)
CAAFi1	1:2,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	1:3,3	◀▶	◀▶	▲▲▲
	1:4,3	▼▼▼	▼▼▼	▼▼▼
CAABo1	1:2,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	1:3,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	1:4,3	◀▶	▼▼▼	◀▶
CAAFi2	1:2,3	▲▲▲	◀▶	▼▼▼
	1:3,3	▲▲▲	▼▼▼	▼▼▼
	1:4,3	▲▲▲	▼▼▼	▼▼▼
CAABo2	1:2,3	▲▲▲	◀▶	◀▶
	1:3,3	▲▲▲	▼▼▼	◀▶
	1:4,3	▲▲▲	▼▼▼	▼▼▼
CAAFiBi1	1:2,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	1:3,3	▲▲▲	◀▶	▲▲▲
	1:4,3	▲▲▲	◀▶	◀▶
CAABoBi1	1:2,3	◀▶	◀▶	◀▶
	1:3,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	1:4,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
CAAFiBi2	1:2,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	1:3,3	▲▲▲	▲▲▲	◀▶
	1:4,3	▲▲▲	▲▲▲	◀▶
CAABoBi2	1:2,3	▲▲▲	▲▲▲	▲▲▲
	1:3,3	▲▲▲	▼▼▼	◀▶
	1:4,3	▲▲▲	▼▼▼	◀▶

Legenda: ▲▲▲ = Boa ◀▶ = Regular ▼▼▼ = Ruim

A Figura 41 apresenta o consumo de cimento dos concretos desenvolvidos. Neste gráfico, percebe-se um alto consumo de cimento para os traços 1:2,3, contudo para os demais traços o consumo de cimento ficou na faixa indicada pela EFNARC (2002) que é um mínimo de 350 Kg/m³ e um máximo de 500 Kg/m³ a fim de evitar a retração.

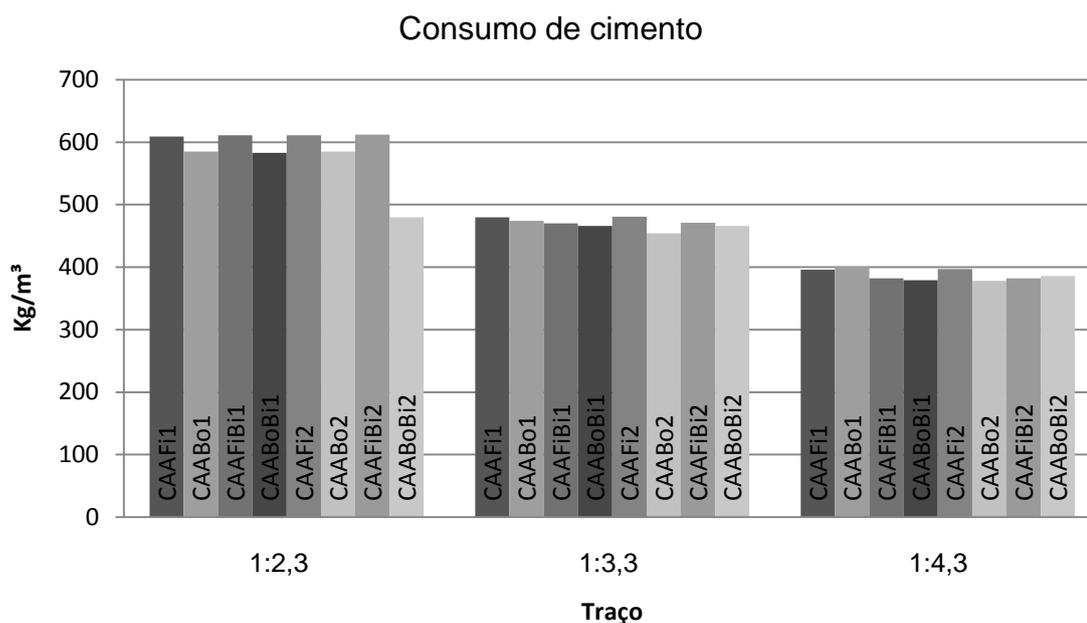


Figura 41: gráfico do consumo de cimento dos concretos desenvolvidos

O consumo de cimento dos concretos que utilizaram a borra como fino foram inferiores aos concretos similares produzidos com o fíler calcário. Também se pode constatar uma redução no consumo de cimento para os concretos com a borra.

Para um mesmo traço, e observando apenas este aspecto, fica sugerido uma redução nos custos do concreto pela utilização de uma menor quantidade de cimento, bem como pela substituição de um material de determinado valor por outro de custo mais baixo. Isto pode não se confirmar, pois os concretos que tem em sua composição a borra necessitam de uma maior quantidade de aditivo se comparados aos concretos com fíler calcário.

4.2.3.2 Ensaio no estado endurecido

Apesar desta pesquisa ter foco nas propriedades do CAA no estado fresco, foram moldados corpos de prova para verificação da resistência no estado

endurecido. Na Tabela 68 são apresentados os resultados dos testes de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias.

Tabela 68: resultados dos testes de resistência à compressão no estado endurecido (MPa)

Tipo do concreto	Traço	7 dias (MPa)	28 dias (MPa)
CAAFi1	1:2,3	37,8	42,2
	1:3,3	25,1	28,7
	1:4,3	21,4	24,9
CAABo1	1:2,3	25,3	32,7
	1:3,3	22,1	25,9
	1:4,3	19,7	22,7
CAAFi2	1:2,3	32,0	45,0
	1:3,3	27,5	36,1
	1:4,3	23,1	29,2
CAABo2	1:2,3	27,2	32,2
	1:3,3	25,2	29,7
	1:4,3	19,7	24,7
CAAFiBi1	1:2,3	27,7	32,8
	1:3,3	33,8	38,7
	1:4,3	23,1	25,2
CAABoBi1	1:2,3	17,6	21,1
	1:3,3	19,4	23,0
	1:4,3	18,6	21,3
CAAFiBi2	1:2,3	29,7	33,9
	1:3,3	32,1	35,3
	1:4,3	30,7	33,0
CAABoBi2	1:2,3	27,1	30,1
	1:3,3	21,5	25,3
	1:4,3	16,5	19,0

No que diz respeito à resistência do concreto em estudo, como podem ser observados na Tabela 68, todos os concretos desenvolvidos ficaram com valores aos 28 dias na faixa aproximada entre 20 a 40 MPa. O que indica ser um concreto, dentro deste aspecto, bem satisfatório, pois esta é uma faixa de resistência amplamente utilizada no mercado local.

Estes resultados corroboram com os estudos realizados por Melo (2005) cuja pesquisa indica que a utilização de adições inertes ou que provoquem pouca influência na resistência à compressão, como é o caso do fíler calcário e a borra, leva à produção de resistências normais.

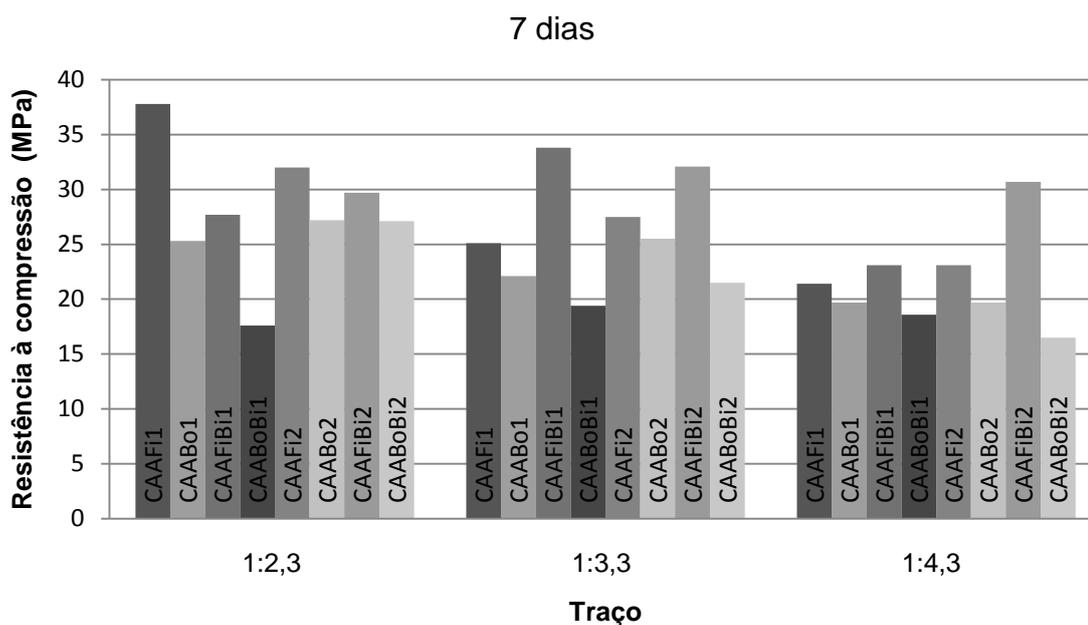


Figura 42: gráfico de resistência à compressão no estado endurecido (7 dias)

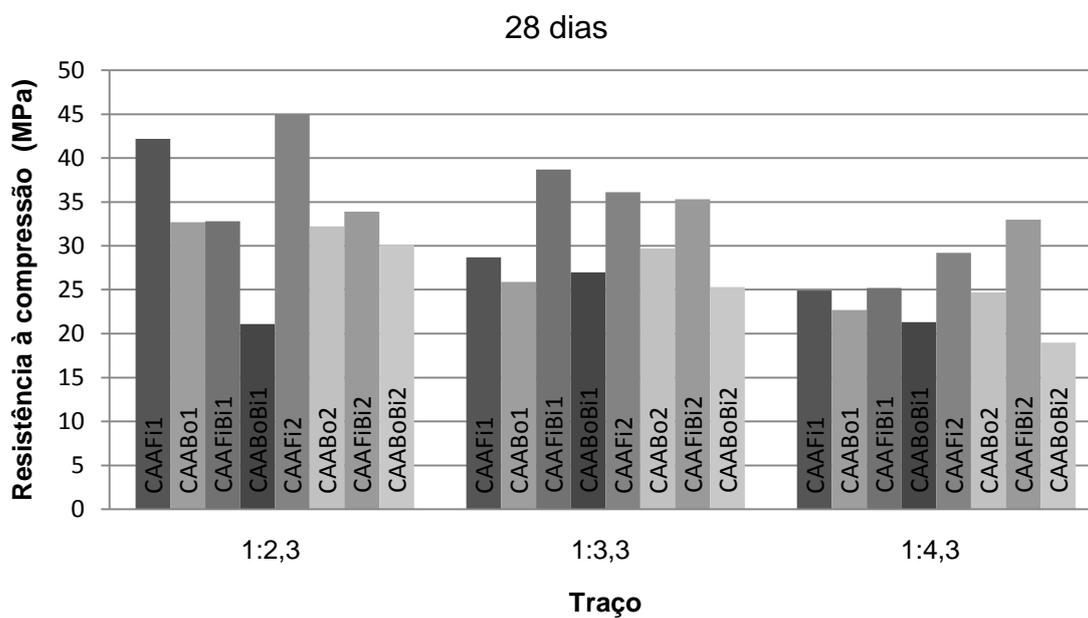


Figura 43: gráfico de resistência à compressão no estado endurecido (28 dias)

Observando os gráficos de resistência à compressão aos 7 dias e 28 dias (Figuras 42 e 43), percebe-se que todos os CAA's confeccionados com a borra obtiveram resistências menores se comparado com o CAA correspondente

confeccionado com o fíler calcário. Esta queda na resistência se justifica devido aos concretos com borra utilizarem, para o mesmo traço, uma relação maior de a/c.

Também pode ser percebido que a utilização da borra e da borra juntos no concreto fez diminuir sua resistência à compressão se comparados aos concretos que utilizaram apenas um dos dois resíduos.

4.3 Comparativo dos traços obtidos pelos métodos de Tutikian (2007) e Gomes (2002)

Para complementar esta pesquisa foi realizado um comparativo dos traços obtidos pela metodologia de Tutikian (2007) e Gomes (2002).

Tabela 69: comparativo entre traços obtidos pela metodologia de Tutikian (2007) e Gomes (2002)

CAAFi1					
Traço		cimento	fíler calcário	areia	brita 9,5
1:2	Tutikian	1	0,30	1,02	0,68
	Gomes	1	0,30	1,02	0,68
1:3	Tutikian	1	0,45	1,53	1,02
	Gomes	1	0,30	1,62	1,08
1:4	Tutikian	1	0,60	2,04	1,36
	Gomes	1	0,30	2,22	1,48

Tabela 70: comparativo entre traços obtidos pela metodologia de Tutikian (2007) e Gomes (2002)

CAAFi2						
Traço		cimento	fíler calcário	areia	brita 9,5	brita 19
1:2	Tutikian	1	0,20	0,90	0,36	0,54
	Gomes	1	0,30	0,85	0,34	0,51
1:3	Tutikian	1	0,30	1,35	0,54	0,81
	Gomes	1	0,30	1,35	0,54	0,81
1:4	Tutikian	1	0,40	1,80	0,72	1,08
	Gomes	1	0,30	1,85	0,74	1,11

Comparando os traços obtidos através das metodologias de Tutikian (2007) e Gomes (2002) (Tabelas 69 e 70) percebe-se que para o CAAFi1 – traço 1:2 e para o CAAFi2 – traço 1:3 as proporções entre os materiais são as mesmas. Isto significa

que apesar de nesta pesquisa, inicialmente, não ter sido obtido um CAA pelo método de Tutikian (2007), com algumas tentativas a mais, modificando a dosagem, por exemplo, da quantidade de aditivo superplastificante e a própria quantidade de finos, se chegaria à confecção de fato de um CAA.

Ainda percebemos com este comparativo que os concretos desenvolvidos inicialmente dentro da metodologia de Tutikian (2007) foram de traço 1:4 e estes também não obtiveram bons resultados quando executados pela metodologia de Gomes (2002). Isto indica que a não obtenção inicial de um CAA pelo método de Tutikian (2007) não significa a invalidez do método. Muito pelo contrário, percebe-se que com um pouco mais de conhecimento acerca do concreto pode-se, realmente, produzir um CAA utilizando-se do método proposto por Tutikian (2007).

Neste comparativo pode-se notar que a dosagem dos finos pelo método de Tutikian (2007) é fixa em relação aos agregados, pois como o próprio Tutikian sugere em sua metodologia, os finos devem ser empacotados após o agregado miúdo, considerando-o também como agregado até o final do processo, ficando apenas o cimento fora do esqueleto granulométrico. Assim a quantidade de finos em relação ao cimento varia de acordo com o traço. Na metodologia de Gomes (2002), acontece o inverso, a quantidade de finos é fixada em relação ao cimento, variando em relação aos agregados.

Segundo Menezes (2006) a fluidez e a viscosidade da pasta governam as propriedades de escoamento e movimentação do concreto sob ação do seu próprio peso. Assim pode-se dizer que o estudo da reologia do concreto na fase de pasta pode dar resultados mais precisos e de forma mais simples. Isto também pode ser comprovado através do teste do mini-cone, pois a reologia da pasta é influenciada quando há alteração nas proporções entre cimento e finos.

Para verificar a possibilidade de se obter um CAA com diferentes proporções entre cimento e finos, foram testados três traços de concreto com esqueletos granulométricos de origem da metodologia de Tutikian (2007). Isto significa que foram testadas diferentes relações finos/cimento.

A seguir temos os resultados dos traços referentes ao CAAFi1 com o esqueleto granulométrico encontrado pelo método de Tutikian (2007).

Tabela 71: resultados dos ensaios de auto-adensabilidade no estado fresco

CAAFi1									
Traço	Aditivo/ C+Finos	Água/ Cimento	Ensaio						
			Espalha- mento (cm)	T _{50cm} (s)	Funil V (s)	Funil V _{5min} (s)	Caixa L H2/H1 (cm)	Caixa U R2-R1 (cm)	Anel J Hi-He (mm)
1:2	1,2	0,40	82	1,5	6	0,0	0,95	1	1
1:3	1,2	0,45	85	2,0	6	0,0	1,0	0	0
1:4	1,2	0,55	80	1,5	5	+1,0	0,95	1	2

Tabela 72: consumo de cimento e teor de argamassa

CAAFi1						
Traço	cim	fc	ar	b9,5	C = Consumo cimento(kg/m ³)	α = Teor de argamassa (%)
1:2	1	0,3	1,02	0,68	658	77,3
1:3	1	0,45	1,53	1,02	526	74,5
1:4	1	0,6	2,04	1,36	428	72,8

Legenda: cim= cimento; fc= fíler calcário; ar= areia; b9,5= brita 9,5 mm;

Para a confecção destes traços de concreto, como sugerido por Tutikian (2007), foi fixado o aditivo com base no histórico de outros concretos similares. Neste caso foram tomadas por base as relações aditivos/cimento+finos e água/cimento utilizadas nesta dissertação dentro da metodologia de Gomes (2002).

Como pode ser observado nos resultados apresentados, foi possível a confecção de CAA com diferentes relações finos/cimento. Apesar dos concretos desenvolvidos não terem obtidos resultados dentro do estabelecido pela literatura para o teste do espalhamento T50cm, apresentou alta capacidade de preenchimento e de escoamento, bem como boa resistência a segregação.

Corroborando com Sedran e De Larrard (1999), estes resultados indicam a sensibilidade do CAA à variação dos seus componentes e dos processos de produção, pois as diferenças entre este CAA e o concreto desenvolvido no início deste estudo puderam ser reduzidas com um pouco mais de experiência e trabalho.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho tinha como objetivo desenvolver um CAA testando a inserção de resíduos provenientes da fabricação de caulim (birra e borra). Assim, podem-se apresentar algumas considerações.

Foi possível desenvolver um concreto auto-adensável com materiais locais. Também se constatou a possibilidade de utilizar resíduos provenientes do beneficiamento de caulim em um CAA, a borra como material fino e a birra em substituição de parte dos agregados. Isto pode ajudar na disseminação de uma maior utilização do CAA.

Através dos experimentos efetuados foi possível identificar as dosagens dos resíduos de caulim no CAA. No caso da borra esta quantidade foi verificada nos testes do mini-cone, sendo de 30% em relação ao cimento, para relação a/c 0,4. No caso da birra a proporção foi encontrada pelo método do empacotamento, sendo de 16% em relação ao grupo que continha areia e brita 9,5 mm e de 20% em relação ao grupo com areia, brita 9,5 mm e brita 19 mm.

Com a utilização dos testes adotados - Espalhamento, Espalhamento T50cm, Caixa L, Caixa U, Anel J, Funil V, Funil V 5min - foram possíveis as constatações das capacidades de preenchimento, de escoamento e a resistência à segregação dos concretos no estado fresco, assim puderam ser identificados os concretos que de fato eram um CAA.

As resistências dos concretos, utilizando resíduos de caulim encontrados nesta pesquisa se enquadraram na faixa de resistência usualmente utilizada por uma grande parcela das construções locais: 20 MPa a 40 MPa.

O aditivo superplastificante utilizado se mostrou compatível com os materiais constituintes do concreto, inclusive com os resíduos industriais adotados.

Não há como utilizar materiais que possuam massa unitária inferior a 1 Kg/dm³ na confecção de um esqueleto granulométrico em virtude da impossibilidade de verificar o menor índice de vazios. Assim, materiais com esta característica não

podem, através dos testes de compacidade, fazer parte do esqueleto granulométrico.

Esta pesquisa não tinha por objetivo comparar metodologias distintas de dosagem para CAA. Todavia, foi possível constatar a possibilidade da produção de um CAA utilizando-se da metodologia de Tutikian (2007), bem como pelo método proposto por Gomes (2002).

É evidente que qualquer aproveitamento de resíduo industrial vem a contribuir na minimização do impacto ambiental. Não sendo diferente, esta pesquisa traz uma contribuição ambiental de extrema relevância. A confirmação da viabilidade de utilização da birra e da borra em um CAA é um grande passo, porém inicial, na tentativa de reduzir o grande volume de resíduo industrial proveniente do beneficiamento de caulim já depositado no meio ambiente.

Por fim, em virtude dos inúmeros ganhos já apresentados, percebe-se a extrema importância do conhecimento de utilização, aplicação e dosagem do CAA. Conhecer um pouco mais do que acredita-se ser, não o futuro, mas o presente da tecnologia da construção, impulsiona novas descobertas a fim de tornar cotidiano o uso do CAA.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como já eram esperadas, dentro de um estudo deste porte, algumas lacunas são deixadas e muitas são as questões que podem ser estudadas por trabalhos futuros.

A seguir são sugeridos alguns pontos para serem aprofundados posteriormente.

É de fundamental importância o estudo da durabilidade do CAA através dos ensaios de absorção, penetração de íons cloretos, teor de ar incorporado, carbonatação, etc. Sendo assim, estudar as propriedades no estado endurecido do CAA produzido com resíduos de caulim se faz pertinente.

Verificar a atividade pozolânica da borra calcinada e sua possível utilização na produção de um CAA.

Pesquisar os teores ótimos de finos/cimento para outras relações água/cimento.

Estudar também a possibilidade de inserir em um mesmo CAA, fíler calcário e borra juntos para correção da viscosidade e coesão.

Fazer um estudo de custo com valores financeiros reais para confirmação da viabilidade ou não da utilização dos resíduos de caulim em um CAA.

Nesta dissertação foram pesquisados traços de CAA utilizando a brita 9,5, bem como a brita 9,5 mm em conjunto com a brita 19 mm. Assim, também seria interessante estudar a influência da utilização apenas da brita 19 mm em associação com os resíduos de caulim na composição do CAA.

REFERÊNCIAS

AITICIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo, Editora PINI, 2000.

ALENCAR, R. S. A. **Dosagem do concreto auto-adensável: produção de pré-fabricados**. São Paulo-SP, 2008. 176 p. Dissertação Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

ALENCAR, R.; HELENE, P. Concreto auto-adensável de elevada resistência – inovação tecnológica na indústria de pré-fabricados. **In: Concreto e Construções. Revista de Materiais do Ibracon**, São Paulo, 2006.

AMBROISE, J; ROLS, A. M. M.; PÉRA, J. Production and testing of self-leveling concrete. In: High performace concrete. Gramado, p. 555-556, 1999.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS (ASTM). **Standard test method for passing ability of self-consolidating concrete by j-ring**. C1621. Philadelphia, 2006.

_____. **Standard test method for slump-flow of self-consolidating concrete**. C1611. Philadelphia, 2006.

ARAÚJO, J. L. **Concreto auto-adensável com materiais locais no nordeste brasileiro**. Recife-PE, 2003. Dissertação Mestrado. Universidade Federal de Pernambuco.

ASSIÉ, S.; ESCADEILLAS, G.; WALLER, V. Estimates of self-compacting concrete 'potential' durability. **Construction and Building Materials**. v. 21, fascículo 10, pág. 1909-1917, outubro, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5739**: concreto – Ensaio de compressão de corpos-de-prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 1994.

_____. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto - procedimento. Rio de Janeiro, 2003.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15823**: Concreto auto-adensável. Rio de Janeiro, 2010.

_____. **NBR NM 26**: Agregados – Amostragem. Rio de Janeiro, 2001a.

_____. **NBR NM 27**: Agregados – Redução da amostragem de campo para ensaios em laboratório. Rio de Janeiro, 2001b.

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

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo – Determinação de massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2003a.

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

_____. **NBR NM 67**: concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone – método de ensaio. Rio de Janeiro, 1998.

_____. **NBR NM 68**: concreto - Determinação da consistência pelo espalhamento na mesa de Graff. Rio de Janeiro, 1998.

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

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

BALANÇO MINERAL BRASILEIRO. DNPM – Departamento Nacional de Produção Mineral. 2001. Disponível em: <<http://www.dnpm.gov.br> > acesso em 25 de junho de 2010.

BARATA, M. S.; DAL MOLIN, D. C. C. Avaliação preliminar do resíduo caulínico das indústrias de beneficiamento de caulim como matéria-prima na produção de uma metacaulinita altamente reativa. **Ambiente Construído**, v. 2. n. 1, ANTAC, Porto Alegre, 2002.

BARTOS, P. J. M.; SÖDERLIND, L. *Environment and ergonomics*. In: **Brite EuRam Program: Rational production and improved working environment through using self compacting concrete**. Task 8.5, p.1-31, 2000.

BENNENK, W. SSC applied in the precast concrete industry. In: **Cape town international concrete conference & Exhibition**, [S.l.;s.n.] p. 24-27, 2007.

BILLBERG, P. Fine mortar rheology in mix design of SCC. In: 1st INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1999, Suécia: RILEM publications, 1999, p. 47-58.

BROUWERS, H. J. H.; RADIX, H. J. Self-Compacting Concrete: Theoretical and experimental study. **Cement and Concrete Research**. v. 35, fascículo 11, pág. 2116-2136, Novembro, 2005.

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

CAVALCANTE, D. J. H. **Contribuição ao estudo do concreto auto-adensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Maceió, 2006. 141 p. Dissertação de mestrado – Centro de Tecnologia, Universidade Federal de Alagoas.

COLLEPARDI, M. *A very close precursor of self-compacting concrete (SCC)*. In: **Supplementary volume of the Proceedings of Three-day CANMET/ACI International Symposium on Sustainable Development and Concrete Technology**, Setembro 16-19, 2001.

COPPOLA, L. *Self-compacting concrete*. In: **Concrete Technology**, p. 42-47, 2000.

COSTA, Cibele Gouveia. **Incorporação do resíduo oriundo do beneficiamento do caulim em concreto asfáltico**. Natal-RN, 2006. 106 p. Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação em engenharia sanitária, Universidade Federal do Rio Grande do Norte.

DE LARRARD, F. **Concrete mixture proportioning: a scientific approach**. E & FN Spon, London, 1999.

DOMONE, P. L. Self-compacting concrete: An analysis of 11 years of case studies. **Cement and Concrete Composites**. v. 28, f. 2, p. 197-208, fevereiro, 2006.

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

DINIZ, F. E. G. **Utilização de resíduo cerâmico moído e adições industriais em compósitos cimentícios auto-adensáveis**. João Pessoa-PB, 2005. Tese de doutorado – Curso de pós-graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal da Paraíba.

EFNARC, - EUROPEAN FEDERATION FOR SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. Specification and guidelines for self-compacting concrete. In: EFNARC. Londres, Fevereiro, 32 p., 2002.

EUROPEAN STANDARD (EN). **Testing fresh concrete – Part 8: Self-compacting concrete – Slump-flow test. EN 12350-8**. Brussels, 2007.

_____. **Testing fresh concrete – Part 9: Self-compacting concrete – V-funnel test. EN 12350-9**. Brussels, 2007.

_____. **Testing fresh concrete – Part 10: Self-compacting concrete – L-box test. EN 12350-10**. Brussels, 2007.

_____. **Testing fresh concrete – Part 12: Self-compacting concrete – J-ring test. EN 12350-12**. Brussels, 2007.

GOMES, P.C.C. **Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete**. Barcelona, Espanha, 2002. 139 p. Tese Doutorado, Universitat Politècnica da Catalunya.

GOMES, P.C.C; BARROS, A. R. Métodos de dosagem de concreto autoadensável. 1ª edição. São Paulo: Editora Pine Ltda, 2009.

GOMES, P.C.C; GETTU, R.; AGULLÓ, L. Uma nova metodologia para obtenção de concretos auto-adensáveis de alta resistência com aditivos minerais. In: **V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto**, p.1-14, 2003

GOMES, P. C.C.; LISBOA, E. M.; CAVALCANTE, D. J. H.; BARROS, A. R.; BARROS, P. G. S.; LIMA, F. B. de; BARBOZA, A. S. R. **Concreto Auto-Adensável: Obtenção, Propriedades e Aplicações.** In: Simpósio Internacional sobre Concretos Especiais, 4º, 2008, Fortaleza-CE. [S.l.;s.n.] Disponível em: <<http://sinco2008.sobral.org>>. Acesso em: 03 de dezembro de 2008.

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

HO, D.W.S.; SHEINN, A.M.M.; TAM, C.T. *The sandwich concept of construction with SCC.* In: **Cement and Concrete Research**, n. 31, p. 1377-1381, 2001.

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

LISBOA, E. M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando resíduo do beneficiamento do mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** Maceió, 2004. 121 p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto auto-adensável com adição de fíler calcário.** Florianópolis-SC, 2005. 184 p. Dissertação de mestrado - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina.

MENEZES, C. M. T. **Concreto auto-adensável utilizando metacaulim e pó de pedra como adições minerais.** Recife, 2006. 121 f. Dissertação de mestrado – Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto.** Microestrutura, propriedades e materiais. São Paulo: IBRACON. 2008. 674 p.

NÓBREGA, A. F. **Potencial de aproveitamento de resíduos de caulim paraibano para o desenvolvimento de argamassas de múltiplo uso.** João Pessoa, 2007. 118 p. Dissertação de mestrado – Programa de pós-graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba.

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

OKAMURA, H.; OUCHI, M. **Self-compacting concrete. Development, present use and future**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELFCOMPACTING CONCRETE, 1º, Stockholm. Proceedings...France: RILEM publications, 1999. p. 3-14.

OKAMURA, H.; OUCHI, M. Self-compacting concrete. In: **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, 2003.

OKAMURA, H; OZAWA, K. Mix-design for self-compacting concrete. Concrete library of JSCE, v. 25, p. 107-120, 1995.

O'REILLY, V. D. **Método de dosagem de concreto de elevado desempenho**. Pini, São Paulo, 1992.

PETERSSON, Ö.; BILLBERG, P.; VAN, B.K. A model for a self-compacting concrete. In: RILEM INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF FRESH CONCRETE, Paisley. **Proceedings...** London: RILEM publications, 1996. p. 484-492.

PINTO, T.P. **Metodologia para a gestão diferenciada de resíduos sólidos da construção urbana**. São Paulo, 1999. 189f. Tese de doutorado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

REPPETE, W. L.; MELO, K. A. Influência de finos nas propriedades do concreto auto-adensável com adição de fíler calcário. In: 47º CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO. CD-ROM, Recife-PE, 2005.

ROCHA, A. K. A.; MENEZES, R. R.; NEVES, G. A.; FERREIRA, H. C.; MELO, W. A. Argamassas mistas para alvenaria utilizando resíduo de caulim - Parte I: comportamento mecânico **REM: Revista Escola de Minas**. Ouro Preto, outubro/dezembro, 2008.

SCHUTTER, G de. Introduction. Durability of Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art, Report of RILEM Technical Committee 205-DSC, p.: 208, RILEM Publications S.A.R.L., 2007a.

SCHUTTER, G de. Summary and Conclusions. Durability of Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art, Report of RILEM Technical Committee 205-DSC, p.: 208, RILEM Publications S.A.R.L., 2007b.

SCHUTTER, G de.; AUDENAERT, k. Durability of Self-Compacting Concrete - State-of-the-Art, Report of RILEM Technical Committee 205-DSC, p.: 208, RILEM Publications S.A.R.L., 2007

SEDRAN, T.; LARRARD, F. de. **Optimization of self-compacting concrete thanks to packing model.** In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELFCOMPACTING CONCRETE, 1º, Stockholm. Proceedings...France: RILEM publications, 1999. p. 321-332.

SEDRAN, T.; LARRARD, F. de.; HOURST, F.; CONTAMINES, C. **Mix Design of self-compacting concrete.** In: PROC. INTERNATIONAL RILEM CONFERENCE ON PRODUCTION METHODS AND WORKABILITY OF CONCRETE, P.J.M. Bartos; D.L. Marrs; D.J. Cleamnd (ed), E & FN Spon, 1996. p. 439-450.

SKARENDAHL, Å. Definitions. **Self-Compacting Concrete - State-of-the-art report of RILEM TC 174-SCC.** RILEM publications SARL, p. 3-5, 2000.

SKARENDAHL, Å.; BILLBERG, P. Casting of Self Compacting Concrete. **RILEM Report 35. Final report of RILEM TC 188-CSC.** ". RILEM Publications S.A.R.L. 2006

SU, N.; HSU, K.C.; CHAI, H.W. A simple mix design method for self-compacting concrete. **Cement and Concrete Research**, n. 31, p. 1799-1807, 2001.

TORALLES-CARBONARI, M.B.; GETTU, R.; AGULLÓ, L.; AGUADO, A.; ACENÃ, V. A synthetic approach for experimental optimization of high strength concrete, In: 4th INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON UTILIZATION OF HIGH STRENGTH/HIGH PERFORMANCE CONCRETE, Paris, 1996. p.161-167.

TORALLES-CARBONARI, M.B.; ELIAN, M.M.S.; CARBONARI, G. **Influência da compacidade do esqueleto granular no consumo de pasta e nas propriedades do CAD.** In: V Simpósio EPUSP sobre Estruturas de Concreto, p.1-12, 2003.

TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos auto adensáveis.** Porto Alegre, 2004, 149 p. Dissertação de mestrado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TUTIKIAN, B. F. **Proposição de um método de dosagem experimental para concretos auto-adensáveis.** Porto Alegre, 2007, 162 p. Tese de doutorado, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul