



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

ESTUDO DA DOSAGEM DE PASTAS DE CONCRETO AUTO
ADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE MICROSSÍLICA E FILLER CALCÁRIO

LUCAS GOMES MEDEIROS DE SOUZA

João Pessoa - PB
Julho de 2016

LUCAS GOMES MEDEIROS DE SOUZA

**ESTUDO DA DOSAGEM DE PASTAS DE CONCRETO AUTO
ADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE MICROSSÍLICA E FILLER
CALCÁRIO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à
Universidade Federal da Paraíba, como requisito
parcial para a obtenção do título Bacharel em
Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de
Azeredo

**JOÃO PESSOA
2016**

S719e Souza, Lucas Gomes Medeiros de
Estudo da dosagem de pastas de concreto auto adensável com
adição de microssílica e filler calcário (PB) / Lucas Gomes Medeiros de
Souza. – João Pessoa, 2016.

52f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) – CGEC -
Campus I - Universidade Federal da Paraíba - UFPB.

FOLHA DE APROVAÇÃO

LUCAS GOMES MEDEIROS DE SOUZA

ESTUDO DA DOSAGEM DE PASTAS DE CONCRETO AUTO ADENSÁVEL COM ADIÇÃO DE MICROSSÍLICA E FILLER CALCÁRIO

Trabalho de Conclusão de Curso em 17/06/2016 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Givanildo Alves de Azeredo
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UFPB

Prof. Dr. Enildo Tales Ferreira
Departamento de Engenharia Civil e Ambiental do
CT/UFPB

Profa. Dra. Aline Figueiredo Nóbrega de Azeredo
Edificações - IFPB

Profa. Dra. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

Ao eterno amigo Diego Moura, pois sem sua parceria, no curso e na vida, eu não teria chagado até aqui. Saudades eternas.

AGRADECIMENTOS

Ao Criador pelo dom da vida e por me fazer forte e corajoso a cada dia

À minha família pelo suporte, afeto e confiança – imprescindíveis não só na confecção desse trabalho – mas em toda minha trajetória. Em especial agradeço aos meus pais Wilton e Luthgard pelas provas diárias de amor e pelos valores éticos e morais, tão evidentes em suas vidas. Aos meus irmãos Filipe e André agradeço pela cumplicidade e certeza de apoio incondicional.

À Luisa por todo o cuidado, compreensão e apreço dedicados.

Ao professor e orientador Givanildo Azeredo agradeço pela presteza e desdobrado apoio.

Ao amigo e professor Guilherme Leite que tanto ensinou e orientou acerca dos assuntos aqui tratados.

Aos amigos e colegas, atuais e pretéritos, sobretudo àqueles que se fazem presentes em momentos adversos.

Por fim, com peculiar orgulho é que agradeço à minha avó Eny, por toda fibra, garra, coragem e amor que me norteiam hoje e sempre.

RESUMO

O concreto auto adensável (CAA) revolucionou a indústria da construção civil desde seu surgimento no final da década de 1980 no Japão, porém estudos ainda são desenvolvidos acerca do assunto buscando a melhoria desta tecnologia. Um tópico bastante abordado no estudo do CAA é a composição do mesmo e os diferentes tipos de materiais que podem ser acrescentados à sua composição, como metacaulim, cinza volante, *filler* calcário e microssílica. No presente trabalho foi estudado o uso de *filler* calcário e microssílica na produção de pastas de CAA através de método de dosagem experimental, com o uso de um planejamento de experimentos com misturas.

Observou-se que a adição de microssílica exerce grande influência nas dosagens de aditivo superplastificante e de água na mistura, que foram aumentadas para que as propriedades desejadas fossem alcançadas. Percebeu-se também um comportamento tixotrópico em algumas pastas, o que dificultou um pouco a análise estatística, porém foi obtida uma pasta com propriedades adequadas para a produção do CAA.

Palavras-chave: Concreto auto adensável. CAA. Pasta. Método de dosagem. *Filler* calcário. Microssílica.

ABSTRACT

The self-compacting concrete (SCC) has revolutionized the industry of civil construction since its conception in the end of decade of 1980 in Japan, although studies are still developed about the subject seeking the improvement of this technology. A topic significantly debated in the study of the SCC is its composition and the different materials that can be added to it, such as metakaolin, fly ash, limestone filler and silica fume. This research will address the usage of limestone filler and silica fume in the production of SCC cement pastes using a mixture method.

Could be observed that the addition of silica fume causes great influence in the dosage of superplasticizer and water in the mixture, which were increased so that the proprieties were reached. Was noticed also a thixotropic behavior in some pastes, what difficult the statistical analyses, although a paste with suited proprieties for the production of the SCC was obtained.

Keywords: Self-compacting concrete. SCC. Cement paste. Mixture method. Limestone filler. Silica fume.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esquema do procedimento de dosagem de Okamura	20
Figura 2: Fluxograma do método de dosagem proposto por Gomes (2002)	21
Figura 3: Fluxograma do método de dosagem proposto por Leite	23
Figura 4: Esquema de simplex para misturas de três componentes (A, B e C) com restrições inferiores e superiores	24
Figura 5: Esquema de um pseudo-simplex duplo para misturas entre os pseudocomponetes C_1, C_2, C_3 e C_4 formados pelos materiais A, B e C	26
Figura 6: Teste <i>Mini-Slump</i>	28
Figura 7: Filler calcário	30
Figura 8: Microssílica	31
Figura 9: Fluxograma do método de Leite para dosagem de pastas de CAA	32
Figura 10: Superfície de resposta do T_{115} para as misturas de $C_1 + C_2 + C_3 + C_4$	46
Figura 11: Superfície de resposta do Flow para as misturas de $C_1 + C_2 + C_3 + C_4$	47
Figura 12: Região de auto adensabilidade	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores do teste preliminar com alto teor de microssilica.....	33
Tabela 2: Pontos experimentais para os simplex 1 e 2.....	36
Tabela 3: Pontos experimentais para a dosagem das pastas de CAA.....	36
Tabela 4: Relações Água/Cimento e porcentagens de microssilica	37
Tabela 5: Valores em massa dos materiais da pasta de CAA.....	38
Tabela 6: Resultados T_{115} e Flow	40
Tabela 7: Resultados T_{115} e Flow para cada simplex	41
Tabela 8: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (T_{115}).....	42
Tabela 9: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (Flow).....	42
Tabela 10: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (T_{115}) com parâmetros ignorados	43
Tabela 11: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (Flow) com parâmetros ignorados	43
Tabela 12: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (T_{115}).....	44
Tabela 13: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (Flow).....	44
Tabela 14: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (T_{115}) com parâmetros ignorados	45
Tabela 15: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (Flow) com parâmetros ignorados	45
Tabela 16: Resultados da pasta obtida.....	49

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	vi
RESUMO.....	vii
ABSTRACT	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE TABELAS.....	x
1. INTRODUÇÃO	13
1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA.....	13
1.2. OBJETIVOS	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. CONCRETO AUTO ADENSÁVEL.....	15
2.1.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS.....	15
2.1.2. APLICAÇÕES E INDICAÇÕES DE USO	16
2.2. MATERIAIS.....	17
2.2.1. <i>FILLER</i> CALCÁRIO	17
2.2.2. MICROSSÍLICA	18
2.3. MÉTODOS DE DOSAGEM.....	19
2.3.1. MÉTODO DE OKAMURA.....	19
2.3.2. MÉTODO DE GOMES	20
2.3.3. MÉTODO DE LEITE	22
3. METODOLOGIA	30
3.1. MATERIAIS.....	30
3.1.1. CIMENTO	30
3.1.2. ADIÇÕES MINERAIS	30
3.1.3. ADITIVO QUÍMICO	31
3.1.4. ÁGUA	31

3.2. MÉTODOS	31
3.2.1. TESTES PRELIMINARES	32
3.2.2. PROPORÇÃO CONSIDERADA	34
3.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS	38
4. RESULTADOS	40
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS	50
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52

1. INTRODUÇÃO

O adensamento do concreto em peças estruturais é uma das etapas mais importantes da construção civil. Falhas na técnica de execução de tal prática podem comprometer a qualidade das estruturas de concreto armado. O processo geralmente faz uso de agulha de imersão, o que é particularmente delicado em elementos onde há uma alta densidade de armadura, ou em locais de difícil acesso. Assim, para garantir uma boa compactação do concreto, e com isso assegurar suas propriedades no estado endurecido, faz-se necessário técnicas eficientes e uma mão de obra qualificada (MELO, 2005; NUNES, 2001; CAVALCANTI, 2006).

Em 1986, devido à escassez de mão de obra qualificada para a execução de serviços de compactação do concreto, o Professor Okamura da universidade de Tóquio, propôs um novo tipo de concreto, o concreto auto adensável (CAA), que eliminaria a necessidade de compactação e de mão de obra qualificada. O primeiro protótipo do CAA foi completado pela primeira vez em 1988, usando materiais disponíveis no mercado japonês (OKAMURA; OUCHI, 2003).

1.1. RELEVÂNCIA DO TEMA

A EFNARC (2002), classificou o CAA como sendo o maior desenvolvimento da construção em estruturas de concreto das últimas décadas. Esta tecnologia já vem sendo bastante utilizada no Japão e na Europa. Porém, o Brasil ainda não adotou o uso do CAA, e existem poucos registros de utilização. Segundo Cavalcanti (2006), dos principais motivos para a ocorrência disto, podem ser destacados: a falta de confiabilidade nos métodos de dosagem, a grande variedade de materiais no mercado e o pouco conhecimento do comportamento do CAA e de suas propriedades.

A dosagem do CAA, que é uma das etapas mais importantes para a obtenção deste concreto, vem sendo pouco estudada, e muitos pesquisadores utilizam métodos de dosagem muito antigos, que foram propostos apenas com o objetivo de iniciar os estudos desta tecnologia (TUTIKIAN, 2007). Novos estudos, com diferentes materiais e métodos de dosagem, são de grande importância para o desenvolvimento e evolução do CAA.

Outro tópico de grande importância no estudo do CAA, é sua composição. Melo (2005) afirma que a escolha dos materiais a serem utilizados para a produção deste concreto precisa

ser criteriosa, e suas características físicas não devem ser muito variáveis, principalmente em relação a sua granulometria.

1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem por objetivo principal o estudo do método de dosagem de pastas de concreto auto adensável, com adição de microssílica e *filler* calcário, proposto por Leite (2016, no prelo).

Dentre os objetivos específicos, podem ser destacados:

- a) Analisar influência da adição de *filler* calcário e microssílica nas propriedades da pasta;
- b) Analisar o efeito da variação na proporção de superplastificante na mistura;
- c) Determinar uma pasta apropriada para a obtenção do concreto auto adensável.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para a elaboração deste trabalho, foi realizada uma pesquisa na literatura sobre o concreto auto adensável. Inicialmente, serão apresentadas suas principais características, e em seguida, apresentam-se suas vantagens e desvantagens, como também suas aplicações e indicações de uso, os materiais utilizados em sua obtenção e por fim, seus principais métodos de dosagem.

2.1. CONCRETO AUTO ADENSÁVEL

Tutikian (2007) define o concreto auto adensável como sendo um material cimentício que tem a capacidade de preencher cada espaço da forma onde será moldado, apenas através do seu peso próprio, ou seja, sem necessidade de compactação ou vibração externa. A alta fluidez do CAA proporciona a este a capacidade de envolver as barras de aço e eliminar os vazios exclusivamente através da ação da gravidade (OKAMURA, 1997; GOMES; GETTU; AGULLÓ, 2003; TUTIKIAN, 2007).

Para ser considerado auto adensável, o concreto deve apresentar três propriedades: fluidez, coesão e resistência à segregação. Ou seja, o CAA deve ser capaz de fluir naturalmente dentro da forma, mantendo a homogeneidade, preenchendo os espaços vazios e passando por obstáculos sem obstrução do fluxo, preservando-se sempre coeso (OKAMURA; OUCHI, 1997, TUTIKIAN, 2007).

Segundo Melo (2005), para que sejam alcançadas essas propriedades específicas, o CAA necessita de maior quantidade de material fino (preferencialmente adições) e um volume menor de agregados.

2.1.1. VANTAGENS E DESVANTAGENS

O CAA revolucionou a construção civil devido a suas muitas vantagens, as quais podemos citar (CAMARGOS, 2002 apud CAVALCANTI, 2006; EFNARC, 2002; TUTIKIAN, 2004):

- Redução no custo de aplicação por m³, se comparado ao concreto convencional;
- Diminuição no tempo de aplicação;

- Otimização e redução da mão-de-obra no canteiro;
- Permite utilização em peças de seções reduzidas;
- Maior liberdade de formas e dimensões;
- Permite bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais;
- Eliminação do ruído provocado pela agulha de vibração;
- Permite um ganho ecológico por poder utilizar resíduos em sua composição.

Porém, mesmo com a grande quantidade de pesquisas que vem sendo produzidas sobre o CAA, ainda existem algumas desvantagens que podem ser contornadas. Lisbôa (2004) destaca os seguintes pontos:

- Difícil obtenção;
- Necessidade de mão-de-obra especializada para sua confecção e controle tecnológico;
- Necessidade de cuidados especiais no transporte para evitar segregação;
- Menor tempo disponível para aplicação.

2.1.2. APLICAÇÕES E INDICAÇÕES DE USO

As principais indicações de uso do CAA são (CAMARGOS, 2002 apud LISBÔA, 2004):

- Fundações executadas por hélice contínua;
- Em elementos pré-fabricados, principalmente naqueles com grande concentração de armaduras, onde o concreto convencional tem certa dificuldade de preencher seus vazios;
- Reservatórios de água e piscinas;
- Pisos, contra pisos, lajes e pilares;
- 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.

O CAA vem sendo objeto de estudo constante no Brasil e no mundo dos últimos anos. Estas pesquisas são realizadas em universidades em sua maioria, e fazem com que este material seja mais aceito no mercado, devido à variedade de testes em suas propriedades e materiais (TUTIKIAN, 2007).

2.2. MATERIAIS

O CAA é composto por cimento, água, agregados miúdos e agregados graúdos, assim como o concreto convencional (CCV). Porém, o CAA possui ainda a adição de aditivos (superplastificante e modificadores de viscosidade) e materiais finos na forma de adições minerais, o que faz com que o CAA passe a apresentar propriedades distintas, sobretudo em seu estado fresco, havendo, assim, a necessidade de métodos de dosagem próprios (DINIZ, 2010).

Devido a seus requerimentos reológicos especiais, adições minerais, tanto inertes como reativas, são comumente usadas para melhorar sua trabalhabilidade, bem como regular a quantidade de cimento e água em sua dosagem e reduzir o calor de hidratação (EFNARC, 2002).

A CAA necessita de uma quantidade maior de partículas finas em sua composição, e para suprir esta necessidade, são adicionados materiais finos visando a redução do atrito entre os agregados, aumentando a viscosidade, e conseqüentemente, causando uma maior resistência à segregação. Ainda, as partículas menores preenchem os espaços entre as partículas maiores, elevando a fluidez do material (MELO, 2005; ESPING, 2003).

As características das adições são determinantes quanto ao desempenho destas no CAA. Fatores como a granulometria, textura superficial, forma da partícula e reatividade exercem grande influência no concreto no estado fresco, alterando suas propriedades (MOOSBERG-BUSTNES, 2003).

Assim, os materiais utilizados como adição mineral para elaboração deste trabalho são descritos a seguir, de acordo com a literatura.

2.2.1. FILLER CALCÁRIO

O *filler* calcário é classificado como semi-inerte, ou seja, atua tanto por meio de um efeito físico como químico. Sua granulometria, forma e finura podem afetar o consumo de água, e assim, afetam também seu uso na produção do CAA.

O efeito físico causado pelo *filler* ocorre devido à finura de suas partículas, causando um aumento na distribuição do tamanho das partículas no concreto, resultando numa melhor trabalhabilidade, diminuindo a permeabilidade, reduzindo a formação de microfissuras e promovendo um controle no consumo de água (EFNARC, 2005; KURDOWSKI, 2014).

Esping (2003), indica que a finura do *filler* também influencia no consumo do aditivo superplastificante, ou seja, quanto mais fino tal material, há necessidade de um maior teor de aditivo para que sejam mantidas as características de deformabilidade.

Segundo Bosiljkov (2003 *apud* MELO, 2005), a ação química do *filler* se dá durante a hidratação do cimento, nas primeiras idades, acelerando a hidratação dos minerais do clínquer, contribuindo para o aumento da resistência à compressão.

2.2.2. MICROSSÍLICA

Segundo Metha e Monteiro (2008), a microssílica, ou sílica ativa, é um subproduto das indústrias de silício metálico e ligas de ferro-silício, e suas partículas mostram distribuições de tamanho até cem vezes mais finas que o cimento Portland comum. A microssílica é altamente pozolânica, porém, em dosagens elevadas (mais de 5%), aumenta-se consideravelmente a necessidade de água na mistura, o que a torna um material de difícil manuseio (KURDOWSKI, 2014; METHA; MONTEIRO, 2008; THOMAZ, 1985).

Melo (2005) destaca os seguintes efeitos da microssílica no concreto em estado fresco:

- Maior coesão, garantindo misturas mais estáveis;
- Drástica redução da exsudação, devido ao tamanho reduzido das partículas;
- Aumento na demanda de água;
- Redução da retração plástica;
- Aumento da fluidez do concreto;
- Redução do calor de hidratação, acompanhado de um aumento nos níveis de resistência à compressão, tendo em vista a maior densificação da matriz de cimento;
- Redução da permeabilidade, garantindo maior durabilidade às estruturas.

A forma arredondada das partículas de microssílica e sua elevada finura causam um consumo maior de aditivo superplastificante, e um aumento na tensão de escoamento do CAA

portanto, os teores usuais de substituição ao cimento para tal concreto são de 5 a 8% (TAKADA et al, 1999 apud MELO, 2005).

2.3. MÉTODOS DE DOSAGEM

Os métodos de dosagem de CAA recorrem ao uso de aditivos químicos e adições minerais e à modificação do esqueleto granular em relação ao concreto convencional. Porém, para a otimização do CAA deve-se considerar as diferentes características dos materiais componentes, e as peculiaridades das propriedades de tal concreto, muito diferentes do concreto convencional (GOMES; GETTU; AGULLÓ, 2003).

Os métodos de Okamura (1995) e de Gomes (2002) serão descritos resumidamente, por serem de grande importância para o desenvolvimento das técnicas de dosagem do CAA, e o método de Leite (2016, no prelo) será descrito posteriormente de forma mais detalhada por ser o método utilizado para os fins deste trabalho.

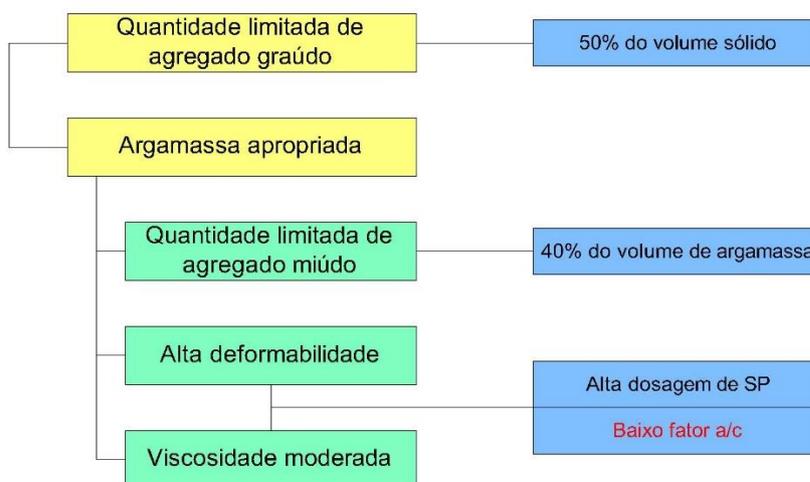
2.3.1. MÉTODO DE OKAMURA

O método de dosagem de Okamura para concreto auto adensável, foi desenvolvido em 1995 (OKAMURA; OUCHI, 2003), como continuação do trabalho iniciado em 1986. Para que um concreto a ser dosado cumpra os requisitos de auto adensabilidade, este deve possuir (OKAMURA; OUCHI, 2003):

- Quantidade limitada de agregados;
- Relação água/cimento baixa;
- Altas dosagens de aditivo superplastificante.

Em seu método, Okamura limita a quantidade de agregado graúdo em 50% do volume total de concreto, enquanto o agregado miúdo é limitado em 40% do volume total da argamassa. Não são especificadas a dosagem de superplastificante nem a relação água/cimento, porém Okamura (1997) limita o fator água/cimento entre 0,90 e 1,00, em volume, dependendo das propriedades das adições. Já o aditivo é determinado de forma experimental, na forma de testes, até que o material apresente características aceitáveis. A Figura 1 apresenta um esquema do procedimento de dosagem considerado pelo método.

Figura 1: Esquema do procedimento de dosagem de Okamura



Fonte: Leite, 2016 no prelo traduzido de Okamura; Ouchi, 2003

Okamura e Ouchi (2003) indicam ensaios para a verificação da viscosidade e deformabilidade do CAA, estes ensaios são: caixa-U, funil-V e *slump flow*.

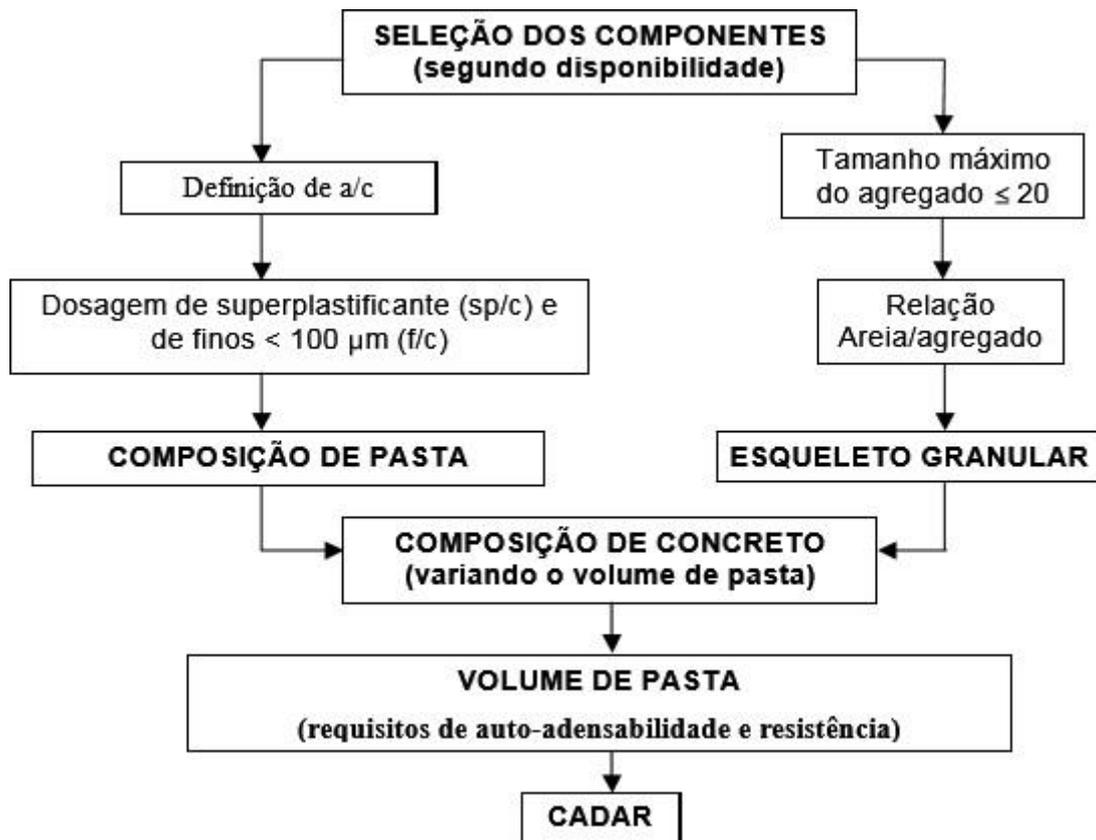
2.3.2. MÉTODO DE GOMES

O método de dosagem de CAA proposto por Gomes (2002) é voltado para concreto auto adensável de alta resistência (CADAR). Este procedimento considera que o concreto é composto por duas fases, sendo uma a pasta e a outra o esqueleto granular, podendo assim ser otimizadas separadamente para que sejam adquiridas as propriedades ideais para o material. Para a obtenção de tal concreto, Gomes (2002) define as seguintes condições:

- Relação água/finos menor que 0,40;
- Relações otimizadas de superplastificante/cimento e finos/cimento para garantir alta fluidez e boa coesão;
- Determinar uma pasta de concreto com características de auto adensabilidade.

A Figura 2 mostra um esquema do método de Gomes para a obtenção do CADAR:

Figura 2: Fluxograma do método de dosagem proposto por Gomes (2002)



Fonte: Gomes; Gettu; Agulló, 2003

O método sugere que seus componentes sejam obtidos entre os disponíveis no local da sua utilização, garantindo a viabilidade econômica do concreto. Materiais não disponíveis podem ser utilizados, caso os obtidos localmente não satisfaçam as características esperadas.

Para a dosagem da pasta, Gomes (2002) afirma que esta deve ser fluida porém coesa. Para obter estas características, o aditivo superplastificante deve ser otimizado, através de testes no cone de Marsh. A proporção de finos na mistura é determinada através de resultados obtidos no teste *mini-slump*, e a relação água/cimento deve ser fixada de acordo com a resistência requerida, sendo normalmente mantida entre 0,35 e 0,40.

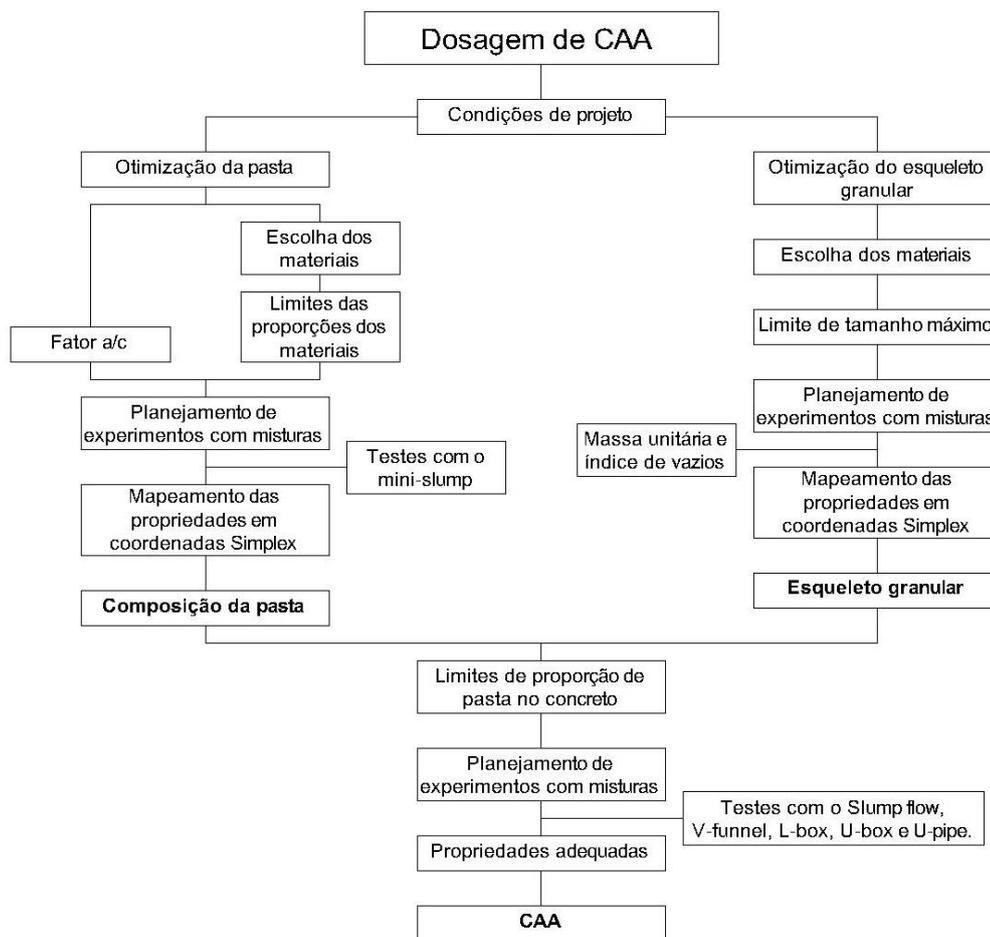
Para o esqueleto granular, normalmente limita-se a dimensão máxima do agregado em 20 mm. Também deve ser minimizado o volume de vazios entre os agregados, para redução no atrito e diminuição da porosidade do concreto. O método define a proporção areia/agregado experimentalmente, através da massa unitária da mistura entre diferentes proporções dos agregados. A proporção ideal é aquela que apresenta a maior massa unitária, e conseqüentemente, menor número de vazios.

Os testes realizados no concreto são: *slump flow*, caixa-L, funil-V e caixa-U. Estes experimentos determinam a trabalhabilidade do concreto, e seus resultados devem atender às características necessárias para auto adensabilidade.

2.3.3. MÉTODO DE LEITE

O método de Leite (2016, no prelo) foi desenvolvido com base no método de Gomes *et al.* (2003), e de forma similar, propõe a otimização da pasta e do esqueleto granular separadamente, considerando que as propriedades de fluidez e viscosidade da pasta são responsáveis pelo fluxo do concreto. Leite, porém, se utiliza do planejamento de experimentos com misturas (PEM) para a obtenção destas composições. As variáveis que definem as características do CAA são a massa unitária e o índice de vazios para o esqueleto granular, e o T_{115} e o espalhamento final no *mini-slump* para a pasta. O PEM é novamente utilizado para determinar as proporções otimizadas do esqueleto granular e da pasta para que as propriedades de auto adensabilidade do concreto sejam atendidas. O método sugere os passos apresentados de forma resumida na Figura 3.

Figura 3: Fluxograma do método de dosagem proposto por Leite



Fonte: Leite (2016, no prelo)

2.3.3.1. PEM NA PASTA

Para o planejamento experimental na pasta, o método opta por fixar o fator água/cimento para que a água não entre no planejamento como uma variável, pois isto traria muitas dificuldades devido à grande influência da água no concreto, e o fator a/c variável afetaria muito as características da pasta. Assim, o planejamento experimental considerado é formado pela mistura de três componentes: cimento, adição mineral e superplastificante.

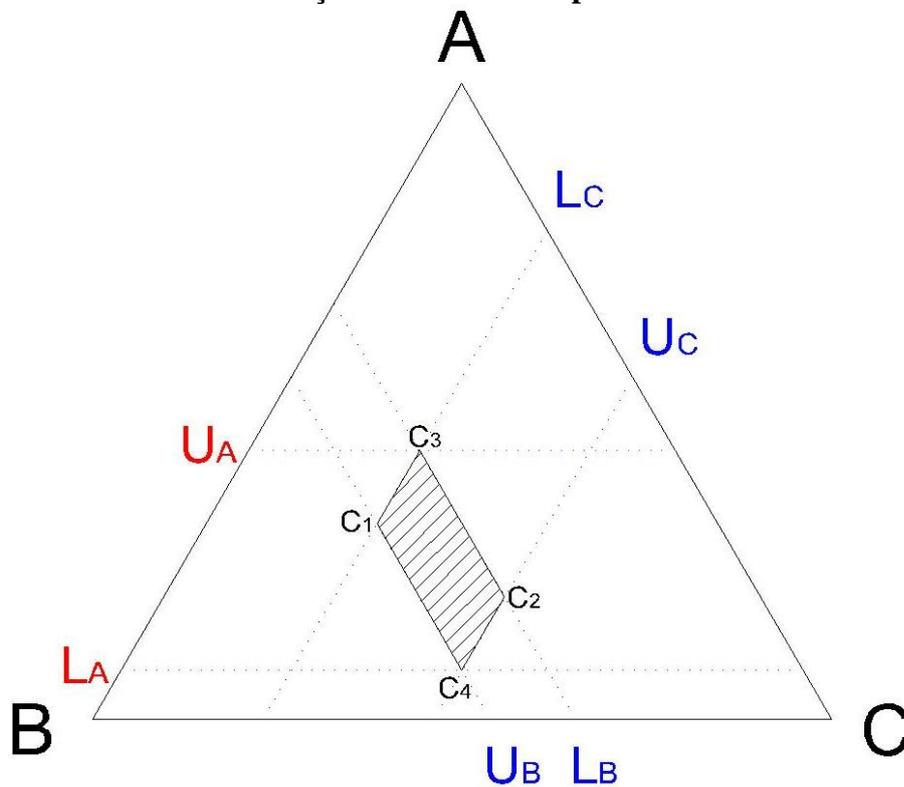
2.3.3.1.1. MÉTODO DO PSEUDO-SIMPLEX DUPLO (MÉTODO DE LEITE)

Em sua metodologia para dosagem de CAA, Leite (2016, no prelo) propõe o método do pseudo-simplex duplo para a realização do planejamento experimental na pasta. Tal método, usado em misturas com três componentes, define que devem ser definidas restrições a dois

destes componentes, de modo que o terceiro componente também seja restringido para o que o valor total seja de 100%. O método também determina que haja, no máximo, um único ponto onde ocorra mistura binária entre os componentes que sofreram as restrições, isto é, a proporção do componente que não sofreu restrições só é zero em, no máximo, um ponto (LEITE, 2016, no prelo).

O método sugere a criação de pseudocomponentes, representando as proporções dos materiais nos vértices da sub-região formada pelas restrições dos materiais B e C (Figura 4).

Figura 4: Esquema de simplex para misturas de três componentes (A, B e C) com restrições inferiores e superiores



Fonte: Leite (2016, no prelo)

Assim, são obtidas as seguintes proporções:

$$C_1 = U_B \text{ de } B + L_C \text{ de } C + (1 - U_B - L_C) \text{ de } A$$

$$C_2 = L_B \text{ de } B + U_C \text{ de } C + (1 - L_B - U_C) \text{ de } A$$

$$C_3 = L_B \text{ de } B + L_C \text{ de } C + U_A \text{ de } A$$

$$C_4 = U_B \text{ de } B + U_C \text{ de } C + L_A \text{ de } A$$

Onde:

C_j : Compósitos compostos pelos componentes A, B e C, com $j = 1, 2, 3, 4$;

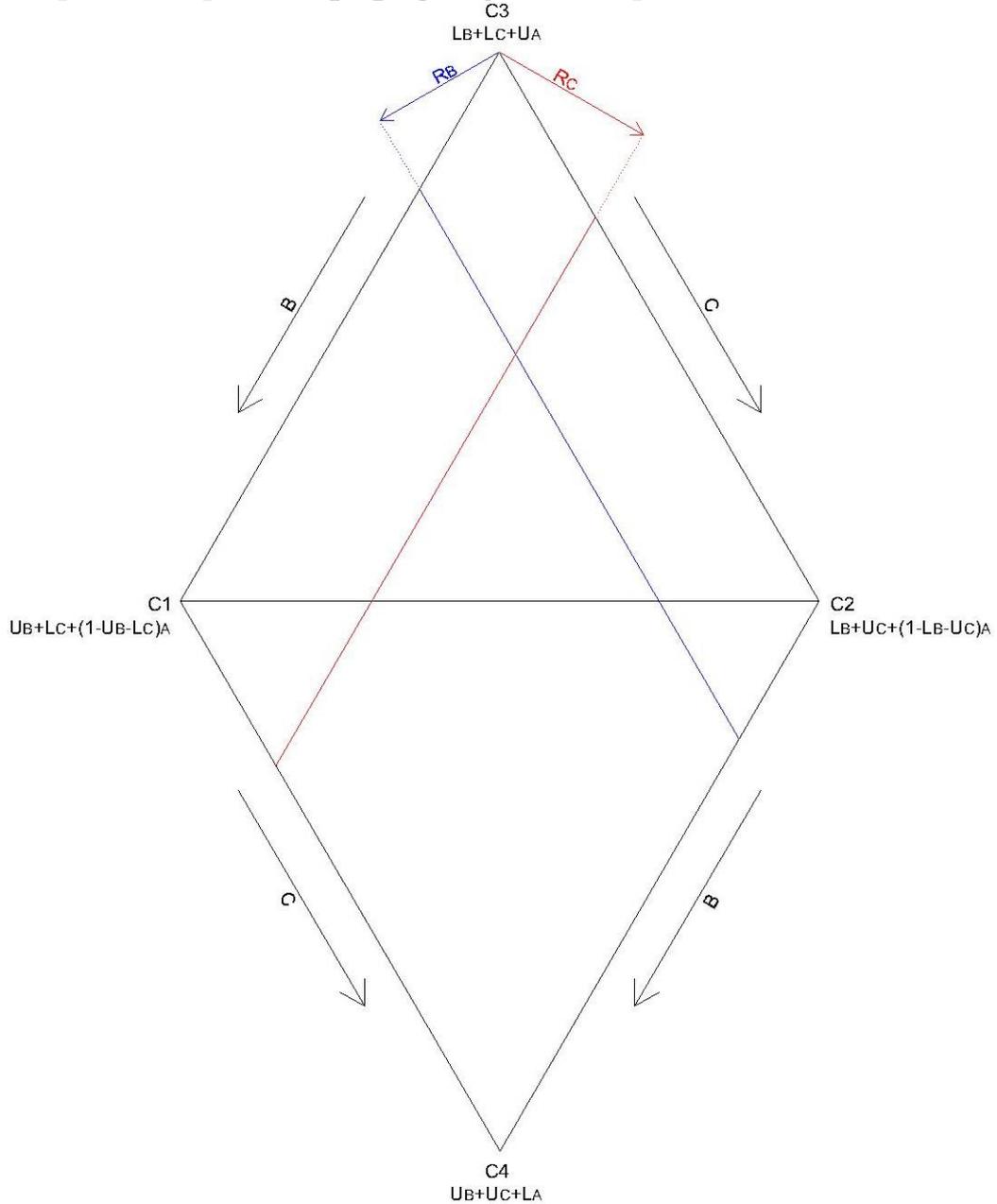
U_i : Limite superior da proporção do componente i na mistura, com $i = A, B, C$;

L_i : Limite inferior da proporção do componente i na mistura, com $i = A, B, C$;

A partir desses compósitos monta-se uma região em formato de losango através da união de duas regiões simplex formadas pelas misturas de $C_1 + C_2 + C_3$ e $C_1 + C_2 + C_4$, onde os compósitos C_3 e C_4 ficam em vértices opostos do losango e as retas que definem a mistura binária entre C_1 e C_2 nos dois simplex são coincidentes.

Esse método implica que a variável de resposta apresentará duas equações, uma para cada mistura de três componentes. Portanto, é fundamental que haja uma rotina que defina quando cada equação deve ser utilizada, em termos dos componentes iniciais da mistura. A Figura 5 representa o esquema do pseudo-simplex duplo, onde podem serão feitas algumas observações a seguir.

Figura 5: Esquema de um pseudo-simplex duplo para misturas entre os pseudocomponentes C_1, C_2, C_3 e C_4 formados pelos materiais A, B e C



Fonte: Leite (2016, no prelo)

Qualquer mistura binária que ocorre entre os pseudocomponentes C_1 e C_3 resulta em um composto que apresenta a porcentagem igual ao limite inferior do material C (L_C), enquanto que a porcentagem do material B cresce conforme se aumenta a proporção de C_1 . Isso acontece de forma análoga ao analisarmos outras misturas binárias no gráfico. Pode-se perceber que a porcentagem do material B cresce do lado C_2C_3 do losango até o lado C_1C_4 e a do material C cresce do lado C_1C_3 até o lado C_2C_4 .

Assim, Leite (2016, no prelo) define R_B como sendo um valor de referência que mede a distância do lado C_2C_3 a uma reta paralela a este e R_C a distância do lado C_1C_3 a uma reta paralela a este. Tais valores podem ser calculados através da seguinte formula (Eq. X):

$$R_i = \frac{x_i - L_i}{U_i - L_i} \quad [\text{Eq. X}]$$

Onde:

x_i : Porcentagem do material i na mistura, com $i = A, B$.

O valor de R_i está compreendido entre zero e um. Quando $x_i = L_i \rightarrow R_i = 0$, e quando $x_i = U_i \rightarrow R_i = 1$.

Define-se então um critério para a escolha da equação que descreve a resposta do simplex referente à mistura $C_1 + C_2 + C_3$ ou à mistura $C_1 + C_2 + C_4$. Assim, as retas perpendiculares a R_B e R_C se cruzam no interior da região simplex correspondente à equação a ser utilizada. Se a interseção se der no eixo entre C_1 e C_2 , qualquer das duas equações são aceitáveis. Observa-se também que esta análise pode ser realizada através da soma de R_B e R_C , como demonstrado a seguir:

- a) Se $R_B + R_C < 1$, escolhe-se a equação de $C_1 + C_2 + C_3$;
- b) Se $R_B + R_C > 1$, escolhe-se a equação de $C_1 + C_2 + C_4$;
- c) Se $R_B + R_C = 1$, pode-se escolher qualquer uma das equações.

2.3.3.2. PEM NO ESQUELETO GRANULAR

O esqueleto granular é a fase sólida do concreto e é formado pela mistura dos agregados. Sua otimização se dá através da dosagem que proporcione a maior massa unitária, e o menor índice de vazios (BUI; MONTGOMERY, 1999; GOMES; GETTU; AGULLÓ, 2003; LEITE, 2016, no prelo)

O método utiliza um modelo cúbico especial em centroide-simplex para a realização do planejamento experimental de misturas dos agregados, sem restrições aplicadas a estes.

2.3.3.3. PRODUÇÃO DO CONCRETO

Após a otimização da pasta e do esqueleto granular, estes são unidos para a produção do CAA. Gomes (2002) define que o esqueleto granular com maior massa unitária necessita de uma menor quantidade de pasta para a lubrificação, sendo esta responsável pela fluidez do concreto.

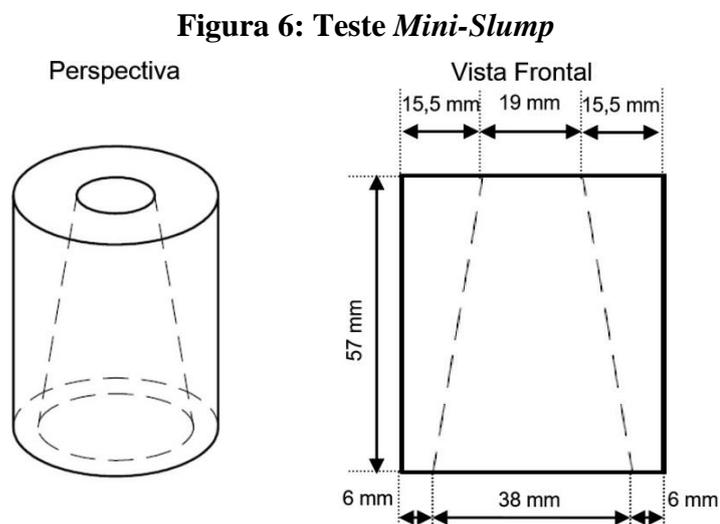
O método de Leite sugere a definição de três traços: um forte, com menor quantidade de agregados, um intermediário e um fraco, com maior quantidade de agregados, variando a proporção do esqueleto granular na mistura.

2.3.3.4. MÉTODOS DE ENSAIO

Para a obtenção dos parâmetros necessários para a aplicação do método, após a determinação das proporções para a pasta, para o esqueleto granular e para o CAA, são realizados os experimentos descritos a seguir.

2.3.3.4.1. *MINI-SLUMP*

Primeiramente, foi realizado o ensaio *mini-slump*, ou *mini-flow*, na pasta de CAA, que consiste em encher o aparato (Figura 6) com a pasta, e em seguida levantar o mini-cone para que o material possa escoar livremente.



Fonte: Diniz (2010)

Neste experimento dados obtidos serão o tempo que o material leva para alcançar o diâmetro de 115 milímetros (T_{115}), e o espalhamento final da pasta (*Flow*). Com estes resultados, avalia-se a fluidez e coesão das pastas.

3. METODOLOGIA

Bui e Montgomery (1999) consideram duas fases na produção do CAA, a fase líquida, ou pasta, e a fase sólida, ou esqueleto granular. Compõem o esqueleto granular os agregados graúdo e miúdo, e a pasta é formada pelo cimento, água, aditivo químico e adições minerais. Para esta pesquisa, foi considerada apenas a fase líquida do concreto.

3.1. MATERIAIS

3.1.1. CIMENTO

Foi utilizado o cimento Portland CP II-Z-32 da marca Cimpor (Figura 10), pois este é facilmente encontrado no mercado e apresenta especificações compatíveis com a pesquisa. Este tipo de cimento contém entre 6 e 14% de pozolana e até 10% de material carbonático (NBR 11578:1991).

3.1.2. ADIÇÕES MINERAIS

Neste trabalho foi utilizado como adição mineral a mistura entre *filler* calcário e microssílica, em proporção pré-estabelecida.

3.1.2.1. FILLER CALCÁRIO

Foi utilizado o *filler* calcário (Figura 11) fornecido pela Dolomil Industrial, com partículas inferiores a 80 μ m de diâmetro.

Figura 7: *Filler* calcário



Fonte: Autor

3.1.2.2. MICROSSÍLICA

A microssílica (Figura 12) utilizada foi cedida pela empresa Polimix Concreto LTDA.

Figura 8: Microssílica



Fonte: Autor

3.1.3. ADITIVO QUÍMICO

Foi utilizado o aditivo superplastificante ADVA™ CAST 525 fornecido pela empresa Grace Brasil LTDA. Este produto, baseado em polycarboxilato, é indicado para uso na dosagem de CAA, sendo assim, apropriado para esta pesquisa.

3.1.4. ÁGUA

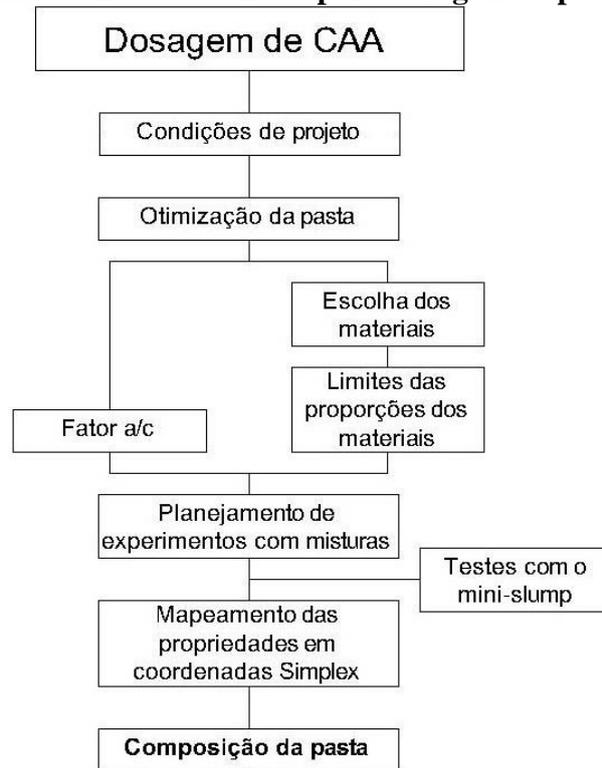
A água utilizada na produção das pastas foi fornecida pela rede de abastecimento do município de João Pessoa, através da CAGEPA (Companhia de Água e Esgotos da Paraíba).

3.2. MÉTODOS

A metodologia adotada foi proposta por Leite (2016, no prelo), que supõe a otimização da pasta e do esqueleto granular de forma separada. Neste trabalho abordaremos apenas a dosagem da pasta de CAA, deixando para trabalhos futuros o estudo e determinação do esqueleto granular e a produção e ensaios do CAA propriamente dito.

O método utiliza o planejamento de experimentos com misturas (PEM) para determinação das proporções da pasta otimizada, através dos resultados obtidos no ensaio *mini-slump*, para que sejam atendidas as propriedades de auto adensabilidade do concreto (LEITE, 2016, no prelo). A Figura 13 apresenta um resumo do método para a dosagem da pasta de CAA.

Figura 9: Fluxograma do método de Leite para dosagem de pastas de CAA



Fonte: Adaptado de Leite (2016, no prelo)

O planejamento experimental para a pasta de CAA seria representado por uma mistura de quatro componentes: cimento, água, superplastificante e adição mineral, porém, como sugere o método, foi fixada a relação água/finos, ou seja, a relação entre a água e a quantidade de finos presente na mistura, que para este trabalho é composta por cimento e adição mineral. Isso faz com que o PEM seja composto por três componentes: cimento, superplastificante e adição mineral.

3.2.1. TESTES PRELIMINARES

Para iniciar-se o estudo da metodologia adotada, foram realizados testes preliminares para a determinação de limites para a dosagem de cada material. Observou-se então, que para método de Leite, os pontos experimentais 1 e 2 representam os pontos críticos do planejamento, sendo estes o mais fluido e o mais coeso, respectivamente. Como pode-se perceber, o ponto 1 consiste no componente C_1 puro, ou seja, o valor máximo de superplastificante e o mínimo de *filler* e microssilica. O ponto 2 é composto apenas pelo C_2 , correspondendo assim ao mínimo de superplastificante e o máximo da adição mineral.

Para a obtenção das restrições necessárias para o método de dosagem em questão, foi realizada uma consulta na literatura, e testes com possíveis misturas nos pontos experimentais 1 e 2. No ponto 1 os resultados dos experimentos teriam que ser compatíveis com uma pasta muito fluida, e no ponto 2 a pasta seria muito coesa, para que fosse garantido um alcance maior nos resultados, facilitando a análise e obtenção dos valores adequados.

Esperava-se que as pastas testadas apresentassem o valor do T_{115} inferior a 2s, para o ponto experimental 1, e superior a 4s para o ponto 2, e do espalhamento final no *mini-flow* maior que 19cm, para a pasta 1, e menor que 17cm para a pasta 2. Estes valores são os limites mínimos e máximos considerados para a obtenção da pasta ideal, garantindo fluidez, resistência e coesão (GOMES *et al.* 2003).

A execução dos testes foi importante também para observar o comportamento e característica dos materiais. A seguir, serão apresentados os testes realizados antes da execução deste trabalho, que tinham como propósito a determinação dos limites a serem considerados de cada material, incluindo a relação água/finos.

Inicialmente foram realizados testes com altos valores na dosagem de microssilica, com proporções que superavam 15% na substituição do cimento. Os resultados obtidos podem ser observados na Tabela 16, que apresenta a dosagem utilizada e os valores de T_{115} e espalhamento final (*Flow*). O fator água/finos considerado para este teste foi de 0,4, e a adição mineral teve uma proporção de 70% de *filler* calcário e 30% de microssilica.

Tabela 1: Valores do teste preliminar com alto teor de microssilica

Pontos Experimentais	Porcentagem SP	Porcentagem Filler + MS	Porcentagem Cimento	T_{115} Médio	Espalhamento Médio
1	1,600%	25,000%	73,400%	0,71s	20,63cm
2	0,800%	40,000%	59,200%	1,65s	16,23cm

Fonte: Autor

Os valores de T_{115} não estão dentro do intervalo determinado por Gomes *et al.* (2003), e como a pasta 2, que é considerada um ponto extremo, não atingiu o limite mínimo de 2 segundos, essa dosagem foi descartada.

A influência da microssilica é muito grande nas pastas de CAA, aumentando drasticamente o consumo de água e superplastificante, e influenciando no T_{115} e no espalhamento final. Ahari1 e Erdem (2016) afirmam que a adição de microssilica reduz o tempo de espalhamento e o espalhamento final da mistura, e essa redução cresce com o aumento da dosagem de microssilica. Tais parâmetros puderam ser observados nos testes preliminares deste estudo.

Com isso, a dosagem utilizada para a execução do método foi com baixa dosagem de microssílica, e menor teor de água/finos, fixado em 0,3.

3.2.2. PROPORÇÃO CONSIDERADA

A adição mineral utilizada no planejamento é composta por *filler* calcário e microssílica. Foi definido a proporção destes materiais e fixada em 85% de *filler* e 15% de microssílica (em massa), pois assim seria garantida a trabalhabilidade da pasta sem o aumento exagerado no consumo de superplastificante.

Como já abordado na seção 2.3.3 deste trabalho, o método do pseudo-simplex duplo determina que sejam definidas restrições para dois dos componentes, com o terceiro também restrito para que o valor final seja de 100%. Foram definidos, então, limites para o superplastificante e para a adição mineral, de forma que a pasta otimizada apresente as características exigidas quanto a fluidez, coesão e resistência. Para isso, foi feita uma revisão bibliográfica acerca dos materiais e do CAA, e foram realizados testes com as possíveis proporções, até que fossem encontrados os limites adequados (Eq. 2 e 3), como podem ser observados no formato da Equação 1.

$$L_i \leq x_i \leq U_i \quad [\text{Eq. 1}]$$

$$0,006 \leq x_{SP} \leq 0,016 \quad [\text{Eq. 2}]$$

$$0,25 \leq x_{AM} \leq 0,35 \quad [\text{Eq. 3}]$$

Onde:

x_i : Proporção do material i na mistura;

L_i : Limite inferior da proporção do material i na mistura;

U_i : Limite superior da proporção do material i na mistura;

x_{SP} : Proporção, em massa, de superplastificante na mistura de cimento, adição mineral (*filler* e microssílica) e superplastificante.

x_{AM} : Proporção, em massa, da adição mineral (*filler* e microssílica) na mistura de cimento, adição mineral (*filler* e microssílica) e superplastificante.

Aplicando a pasta em questão ao método do pseudo-simplex duplo com a criação de quatro pseudocomponentes de acordo com as proporções encontradas, temos:

$$C_1 = 1,6\% \text{ de SP} + 25\% \text{ de Adição mineral} + 73,4\% \text{ de Cimento}$$

$C_2 = 0,6\% \text{ de } SP + 35\% \text{ de Adição mineral} + 64,4\% \text{ de Cimento}$

$C_3 = 0,6\% \text{ de } SP + 25\% \text{ de Adição mineral} + 74,4\% \text{ de Cimento}$

$C_4 = 1,6\% \text{ de } SP + 35\% \text{ de Adição mineral} + 63,4\% \text{ de Cimento}$

O método determina que seja utilizado um modelo cúbico especial, ou seja, foram produzidas dez pastas distintas para cada simplex. Foram também realizadas duas réplicas para cada ensaio.

Foi considerado o centroide-simplex como planejamento experimental, como determina a metodologia proposta por Leite (2016, no prelo). Os sete pontos experimentais distintos que são sugeridos para a determinação dos coeficientes do modelo são:

- Três nos componentes puros;
- Três no centro das misturas binárias entre os componentes;
- Um no centroide da região simplex.

Além destes, foram adicionados mais três pontos para a análise do modelo:

- Para o simplex 1:

$66,7\% \text{ de } C_1 + 16,7\% \text{ de } C_2 + 16,7\% \text{ de } C_3;$

$16,7\% \text{ de } C_1 + 66,7\% \text{ de } C_2 + 16,7\% \text{ de } C_3;$

$16,7\% \text{ de } C_1 + 16,7\% \text{ de } C_2 + 66,7\% \text{ de } C_3.$

- Para o simplex 2:

$66,7\% \text{ de } C_1 + 16,7\% \text{ de } C_2 + 16,7\% \text{ de } C_4;$

$16,7\% \text{ de } C_1 + 66,7\% \text{ de } C_2 + 16,7\% \text{ de } C_4;$

$16,7\% \text{ de } C_1 + 16,7\% \text{ de } C_2 + 66,7\% \text{ de } C_4.$

Assim, a Tabela 1 apresenta os pontos experimentais com as proporções dos pseudocomponentes e dos componentes reais.

Tabela 2: Pontos experimentais para os simplex 1 e 2

Pontos Experimentais	Pseudocomponentes				Componentes Reais		
	Porcentagem C1	Porcentagem C2	Porcentagem C3	Porcentagem C4	Porcentagem SP	Porcentagem Filler + MS	Porcentagem Cimento
1	100%	0%	0%	0%	1,600%	25,000%	73,400%
2	0%	100%	0%	0%	0,600%	35,000%	64,400%
3	0%	0%	100%	0%	0,600%	25,000%	74,400%
4	50%	50%	0%	0%	1,100%	30,000%	68,900%
5	50%	0%	50%	0%	1,100%	25,000%	73,900%
6	0%	50%	50%	0%	0,600%	30,000%	69,400%
7	33,3%	33,3%	33,3%	0%	0,933%	28,333%	70,733%
8	66,7%	16,7%	16,7%	0%	1,267%	26,667%	72,067%
9	16,7%	66,7%	16,7%	0%	0,767%	31,667%	67,567%
10	16,7%	16,7%	66,7%	0%	0,767%	26,667%	72,567%
11	100%	0%	0%	0%	1,600%	25,000%	73,400%
12	0%	100%	0%	0%	0,600%	35,000%	64,400%
14	0%	0%	0%	100%	1,600%	35,000%	63,400%
13	50%	50%	0%	0%	1,100%	30,000%	68,900%
15	50%	0%	0%	50%	1,600%	30,000%	68,400%
16	0%	50%	0%	50%	1,100%	35,000%	63,900%
17	33,3%	33,3%	0%	33,3%	1,267%	31,667%	67,067%
18	66,7%	16,7%	0%	16,7%	1,433%	28,333%	70,233%
18	16,7%	66,7%	0%	16,7%	0,933%	33,333%	65,733%
20	16,7%	16,7%	0%	66,7%	1,433%	33,333%	65,233%

Fonte: Autor

Percebe-se que os pontos 1, 2 e 4 são iguais aos pontos 11, 12 e 14, pois representam apenas o componente C_1 , apenas o C_2 e $0,5C_1 + 0,5C_2$, respectivamente. Portanto, foram então desconsiderados os pontos repetidos, e com a reorganização da tabela, temos um total de dezessete pontos experimentais para a dosagem das pastas de CAA (Tabela 2).

Tabela 3: Pontos experimentais para a dosagem das pastas de CAA

Pontos Experimentais	Pseudocomponentes				Componentes Reais		
	Porcentagem C1	Porcentagem C2	Porcentagem C3	Porcentagem C4	Porcentagem SP	Porcentagem Filler + MS	Porcentagem Cimento
1	100%	0%	0%	0%	1,600%	25,000%	73,400%
2	0%	100%	0%	0%	0,600%	35,000%	64,400%
3	0%	0%	100%	0%	0,600%	25,000%	74,400%
4	50%	50%	0%	0%	1,100%	30,000%	68,900%
5	50%	0%	50%	0%	1,100%	25,000%	73,900%
6	0%	50%	50%	0%	0,600%	30,000%	69,400%
7	33,3%	33,3%	33,3%	0%	0,933%	28,333%	70,733%
8	0%	0%	0%	100%	1,600%	35,000%	63,400%
9	50%	0%	0%	50%	1,600%	30,000%	68,400%
10	0%	50%	0%	50%	1,100%	35,000%	63,900%
11	33,3%	33,3%	0%	33,3%	1,267%	31,667%	67,067%
12	66,7%	16,7%	16,7%	0%	1,267%	26,667%	72,067%
13	16,7%	66,7%	16,7%	0%	0,767%	31,667%	67,567%
14	16,7%	16,7%	66,7%	0%	0,767%	26,667%	72,567%
15	66,7%	16,7%	0%	16,7%	1,433%	28,333%	70,233%
16	16,7%	66,7%	0%	16,7%	0,933%	33,333%	65,733%
17	16,7%	16,7%	0%	66,7%	1,433%	33,333%	65,233%

Fonte: Autor

Com os valores definidos e a relação água/finos fixada em 0,3, podemos analisar a relação água/cimento e a porcentagem de cimento substituída por microssílica, como demonstrado na Tabela 3.

Tabela 4: Relações Água/Cimento e porcentagens de microssílica

Pontos experimentais	Água / Cimento	Porcentagem de Microssílica
1	0,40	5%
2	0,46	8%
3	0,40	5%
4	0,43	7%
5	0,40	5%
6	0,43	6%
7	0,42	6%
8	0,47	8%
9	0,43	7%
10	0,46	8%
11	0,44	7%
12	0,41	6%
13	0,44	7%
14	0,41	6%
15	0,42	6%
16	0,45	8%
17	0,45	8%

Fonte: Autor

Pode-se observar a variação dos valores da relação a/c entre 0,4 e 0,47 correspondendo a valores aceitáveis na dosagem de CAA, e a porcentagem de cimento substituído por microssílica variando de 5 a 8%, proporção ideal segundo Takada *et al.* (1999, *apud* MELO, 2005).

Com as 17 proporções definidas, foram realizados 51 ensaios *mini-slump*, sendo um ensaio para cada pasta e mais duas réplicas. As respostas obtidas nestes ensaios foram o T_{115} e o espalhamento final (*Flow*). Gomes *et al.* (2003) recomendam que a pasta otimizada apresente os seguintes resultados:

- $T_{115} = 3 \pm 1s$;
- $Flow = 180 \pm 10mm$.

Os resultados são analisados com o auxílio do software estatístico Statistica versão 8.0 da empresa StatSoft Inc.®. Os gráficos foram apresentados pelo software separadamente para

cada simplex, e foram unidas pelo autor deste trabalho, de forma que sejam formados gráficos na forma de simplex duplo.

3.3. PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Após a determinação dos materiais a serem utilizados, foram definidas suas proporções, através das particularidades do modelo estatístico, e levando em consideração o comportamento de cada material. Para a realização dos ensaios necessários para o estudo, foi determinado que a massa final da pasta seria de 500g mais a massa da água, que não entrou como variável no planejamento, tendo sua massa determinada através da relação fixa água/finos, que para este trabalho é de 0,3.

As proporções da mistura foram obtidas estatisticamente, como demonstrado na seção 3.2 deste trabalho. Então é possível determinar os valores em massa de cada material, de acordo com a Tabela 4.

Tabela 5: Valores em massa dos materiais da pasta de CAA

Pontos experimentais	P _{SP}	P _{FILLER}	P _{MICROSÍLICA}	P _{CIMENTO}	P _{ÁGUA}
1	8,0g	106,3g	18,8g	367,0g	147,6g
2	3,0g	148,8g	26,3g	322,0g	149,1g
3	3,0g	106,3g	18,8g	372,0g	149,1g
4	5,5g	127,5g	22,5g	344,5g	148,4g
5	5,5g	106,3g	18,8g	369,5g	148,4g
6	3,0g	127,5g	22,5g	347,0g	149,1g
7	4,7g	120,4g	21,3g	353,7g	148,6g
8	8,0g	148,8g	26,3g	317,0g	147,6g
9	8,0g	127,5g	22,5g	342,0g	147,6g
10	5,5g	148,8g	26,3g	319,5g	148,4g
11	6,3g	134,6g	23,8g	335,3g	148,1g
12	6,3g	113,3g	20,0g	360,3g	148,1g
13	3,8g	134,6g	23,8g	337,8g	148,9g
14	3,8g	113,3g	20,0g	362,8g	148,9g
15	7,2g	120,4g	21,3g	351,2g	147,9g
16	4,7g	141,7g	25,0g	328,7g	148,6g
17	7,2g	141,7g	25,0g	326,2g	147,9g

Fonte: Autor

Os materiais foram pesados em balança de precisão 0,1g, incluindo a água, e em seguida misturados manualmente com uma espátula em uma bacia até que fosse obtida uma mistura homogênea. A mistura foi feita seguindo os seguintes passos:

- i. Mistura-se o cimento, o *filler* e a microssílica;
- ii. Adiciona-se $\frac{1}{4}$ da água à mistura;
- iii. Adiciona-se $\frac{1}{4}$ da água ao superplastificante e incorpora aos poucos à mistura, mexendo com uma espátula para garantir a homogeneidade da pasta, este passo é repetido até que toda água tenha sido usada, e que não haja mais resquícios do superplastificante;
- iv. Mistura-se bem até que a pasta esteja homogênea.

Em seguida é executado o ensaio *mini-slump*, como proposto por Gomes *et al.* (2003). O experimento foi filmado para garantir a precisão na medição dos tempos de ensaio (T_{115}), pois o intervalo de tempo é muito curto, o que dificultaria a marcação manual utilizando cronômetro. A medição do espalhamento final foi feita utilizando uma trena. O ensaio foi repetido três vezes para cada pasta, seguindo os seguintes passos:

- i. Nivelada-se a plataforma e a placa de vidro onde será realizado o ensaio com um nível de bolha;
- ii. Centraliza-se o mini cone na placa de vidro;
- iii. Despeja-se a pasta no mini cone até que este esteja completamente preenchido e nivelado por cima;
- iv. Levanta-se o instrumento para que a pasta possa escorrer e espalhar sobre a placa de vidro;
- v. Aguarda-se o fim do espalhamento da pasta e toma-se quatro medidas de seu diâmetro final, de forma radialmente homogênea. A média dessas medidas é tida como o espalhamento final da pasta;
- vi. Analisa-se o vídeo para a medição do T_{115} .

4. RESULTADOS

Os resultados foram obtidos através de ensaios de *mini-flow* realizados para cada ponto experimental. Tais ensaios mostram as propriedades de fluidez e coesão de cada pasta, medindo o tempo para que seja atingido um diâmetro de 115 mm (T_{115}), e o espalhamento final (*Flow*).

Primeiramente, serão apresentados os resultados dos experimentos realizados para o método de dosagem em estudo, e posteriormente, os resultados dos testes preliminares para a determinação dos limites de dosagem de cada material.

A Tabela 5 apresenta os resultados de T_{115} e espalhamento final (*Flow*) para cada pasta analisada.

Tabela 6: Resultados T_{115} e *Flow*

Pontos experimentais	T_{115}			Espalhamento Final		
	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3
1	1,57s	1,27s	1,36s	20,75cm	20,58cm	20,53cm
2	3,70s	4,90s	7,30s	14,38cm	12,63cm	11,90cm
3	2,50s	2,70s	2,90s	17,20cm	16,00cm	14,98cm
4	2,04s	1,80s	1,70s	20,50cm	20,48cm	20,43cm
5	1,70s	1,50s	1,50s	19,63cm	19,75cm	19,55cm
6	2,70s	2,60s	3,00s	16,00cm	15,40cm	14,20cm
7	1,95s	1,90s	1,76s	19,00cm	19,20cm	19,45cm
8	1,63s	1,52s	1,77s	19,65cm	19,75cm	19,90cm
9	1,34s	1,33s	1,20s	19,98cm	20,03cm	20,23cm
10	1,67s	1,50s	1,44s	19,75cm	19,68cm	19,60cm
11	2,20s	1,63s	1,80s	19,63cm	19,40cm	19,40cm
12	1,87s	1,67s	1,60s	19,85cm	19,43cm	19,53cm
13	2,30s	2,24s	2,07s	18,45cm	18,20cm	18,38cm
14	2,03s	2,10s	1,90s	18,85cm	18,45cm	18,53cm
15	1,77s	1,73s	1,60s	19,88cm	20,18cm	19,85cm
16	1,90s	1,85s	1,60s	19,40cm	18,83cm	19,80cm
17	1,96s	1,87s	1,77s	19,73cm	19,60cm	19,85cm

Fonte: Autor

Para ser realizada a análise correta dos dados obtidos, devem ser estudadas as duas regiões simplex de forma separada. Assim, voltando à forma da Tabela 1, como proposta inicialmente, temos (Tabela 6):

Tabela 7: Resultados T_{115} e *Flow* para cada simplex

Pontos experimentais	T_{115}			Espalhamento Final			
	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	Experimento 1	Experimento 2	Experimento 3	
Simplex 1 (C1+C2+C3)	1	1,57s	1,27s	1,36s	20,75cm	20,58cm	20,53cm
	2	3,70s	4,90s	7,30s	14,38cm	12,63cm	11,90cm
	3	2,50s	2,70s	2,90s	17,20cm	16,00cm	14,98cm
	4	2,04s	1,80s	1,70s	20,50cm	20,48cm	20,43cm
	5	1,70s	1,50s	1,50s	19,63cm	19,75cm	19,55cm
	6	2,70s	2,60s	3,00s	16,00cm	15,40cm	14,20cm
	7	1,95s	1,90s	1,76s	19,00cm	19,20cm	19,45cm
	8	1,87s	1,67s	1,60s	19,85cm	19,43cm	19,53cm
	9	2,30s	2,24s	2,07s	18,45cm	18,20cm	18,38cm
	10	2,03s	2,10s	1,90s	18,85cm	18,45cm	18,53cm
Simplex 2 (C1+C2+C4)	1	1,57s	1,27s	1,36s	20,75cm	20,58cm	20,53cm
	2	3,70s	4,90s	7,30s	14,38cm	12,63cm	11,90cm
	3	1,63s	1,52s	1,77s	19,65cm	19,75cm	19,90cm
	4	2,04s	1,80s	1,70s	20,50cm	20,48cm	20,43cm
	5	1,34s	1,33s	1,20s	19,98cm	20,03cm	20,23cm
	6	1,67s	1,50s	1,44s	19,75cm	19,68cm	19,60cm
	7	2,20s	1,63s	1,80s	19,63cm	19,40cm	19,40cm
	8	1,77s	1,73s	1,60s	19,88cm	20,18cm	19,85cm
	9	1,90s	1,85s	1,60s	19,40cm	18,83cm	19,80cm
	10	1,96s	1,87s	1,77s	19,73cm	19,60cm	19,85cm

Fonte: Autor

Para cada parâmetro analisado, foram gerados dois gráficos, um para cada simplex, combinando para um total de quatro superfícies de resposta. Estes gráficos foram unidos, dois a dois, para formar uma região simplex dupla, como determina a metodologia adotada.

Os resultados obtidos foram submetidos a uma análise estatística, sendo observada inicialmente a mistura 1, formada pelos pseudocomponentes C_1 , C_2 e C_3 . Pode-se observar que o coeficiente de correlação (R^2) está baixo para o T_{115} (Tabela 7), sendo 0,78, já para o *Flow* (Tabela 8) o valor é 0,89, e pode ser considerado aceitável.

Tabela 8: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (T₁₁₅)

Factor	Coeffs (recoded comps); Var.:T115; R-sqr=,7819; Adj:,725 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: T115; MS Residual=,3958333					
	Coeff.	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	1,53545	0,35114	4,37273	0,000222	0,8091	2,26184
(B)C2	5,10545	0,35114	14,53954	0,000000	4,3791	5,83184
(C)C3	2,71454	0,35114	7,73060	0,000000	1,9881	3,44093
AB	-6,13153	1,76758	-3,46889	0,002080	-9,7880	-2,47502
AC	-1,63335	1,76758	-0,92406	0,365048	-5,2899	2,02316
BC	-5,29335	1,76758	-2,99469	0,006470	-8,9499	-1,63684
ABC	1,85647	11,65307	0,15931	0,874814	-22,2497	25,96269

Fonte: Autor

Tabela 9: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (Flow)

Factor	Coeffs (recoded comps); Var.:FLOW; R-sqr=,8934; Adj:,8656 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: FLOW; MS Residual=,8290516					
	Coeff.	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	20,18693	0,50818	39,72395	0,000000	19,1357	21,23818
(B)C2	13,29299	0,50818	26,15802	0,000000	12,2417	14,34424
(C)C3	16,25133	0,50818	31,97944	0,000000	15,2001	17,30258
AB	14,49318	2,55807	5,66566	0,000009	9,2014	19,78496
AC	4,74318	2,55807	1,85420	0,076578	-0,5486	10,03496
BC	3,78864	2,55807	1,48105	0,152164	-1,5031	9,08042
ABC	9,45000	16,86456	0,56035	0,580661	-25,4370	44,33701

Fonte: Autor

Pode-se observar que os parâmetros AC e ABC, para a Tabela 7, e AC, BC e ABC para a Tabela 8 não são estatisticamente significativos, e podem assim ser ignorados sem grandes perdas na correlação de seus respectivos modelos. Assim, são geradas novas tabelas de coeficientes no modelo cúbico especial, como apresentados na Tabela 9, para o T₁₁₅, e na Tabela 10 para o *Flow*.

Tabela 10: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (T₁₁₅) com parâmetros ignorados

Coeffs (recoded comps); Var.:T115; R-sqr=,7733; Adj:,737 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: T115; MS Residual=,3785779						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(25)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	1,38177	0,305126	4,52853	0,000126	0,75335	2,01019
(B)C2	5,11949	0,342099	14,96495	0,000000	4,41492	5,82405
(C)C3	2,56086	0,305126	8,39281	0,000000	1,93245	3,18928
AB	-6,00762	1,578977	-3,80475	0,000817	-9,25958	-2,75566
BC	-5,16944	1,578977	-3,27392	0,003098	-8,42140	-1,91747

Fonte: Autor

Tabela 11: Coeficientes da mistura 1 no modelo cúbico especial (Flow) com parâmetros ignorados

Coeffs (recoded comps); Var.:FLOW; R-sqr=,8519; Adj:,8348 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: FLOW; MS Residual=1,019064						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(26)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	20,63941	0,499588	41,31288	0,000000	19,61249	21,66632
(B)C2	13,63941	0,499588	27,30133	0,000000	12,61249	14,66632
(C)C3	17,18300	0,431357	39,83475	0,000000	16,29634	18,06967
AB	15,01738	2,590542	5,79700	0,000004	9,69244	20,34231

Fonte: Autor

Pode-se observar que não ocorreram grandes variações no coeficiente de correlação dos modelos.

De forma análoga, pode-se analisar a mistura 2, que é composta por C₁, C₂ e C₄. Observa-se que novamente o coeficiente de correlação (R²) para o modelo cúbico especial no T₁₁₅ tem um valor baixo (0,76), porém, para o *Flow*, o coeficiente R² é 0,93, sendo considerado aceitável para o modelo. A Tabela 10 apresenta os valores dos coeficientes do modelo cúbico especial para o T₁₁₅, e a Tabela 11 apresenta os coeficientes para o *Flow*.

Tabela 12: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (T₁₁₅)

Coeffs (recoded comps); Var.:T115; R-sqr=,7621; Adj:,7 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: T115; MS Residual=,4552685						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	1,48867	0,37658	3,95309	0,000632	0,7096	2,26769
(B)C2	5,03443	0,37658	13,36869	0,000000	4,2554	5,81345
(C)C4	1,78049	0,37658	4,72800	0,000092	1,0015	2,55951
AB	-6,36715	1,89564	-3,35884	0,002716	-10,2886	-2,44571
AC	-0,46169	1,89564	-0,24356	0,809735	-4,3831	3,45974
BC	-7,98351	1,89564	-4,21151	0,000332	-11,9049	-4,06208
ABC	17,42471	12,49735	1,39427	0,176560	-8,4280	43,27745

Fonte: Autor

Tabela 13: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (Flow)

Coeffs (recoded comps); Var.:FLOW; R-sqr=,9247; Adj:,9051 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: FLOW; MS Residual=,4522925						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(23)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	20,4270	0,37535	54,42108	0,000000	19,6505	21,20344
(B)C2	13,3383	0,37535	35,53569	0,000000	12,5619	14,11481
(C)C4	19,6603	0,37535	52,37854	0,000000	18,8838	20,43678
AB	15,0639	1,88944	7,97272	0,000000	11,1554	18,97254
AC	-1,0588	1,88944	-0,56037	0,580646	-4,9674	2,84982
BC	13,7639	1,88944	7,28469	0,000000	9,8554	17,67254
ABC	-32,1882	12,45644	-2,58406	0,016591	-57,9563	-6,42012

Fonte: Autor

Os coeficientes AC e ABC para o T₁₁₅, e AC para o *Flow* não são estatisticamente significativos, assim, pode-se ignorá-los sem grandes alterações no coeficiente de correlação. Pode-se então gerar novas tabelas, retirando os coeficientes ignorados. A Tabela 13 indica os coeficientes do modelo cúbico especial da variável T₁₁₅, e a Tabela 14 apresenta os coeficientes para o *Flow*.

Tabela 14: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (T₁₁₅) com parâmetros ignorados

Coeffs (recoded comps); Var.:T115; R-sqr=,7407; Adj:,6992 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: T115; MS Residual=,4565376						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(25)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	1,51339	0,335073	4,51659	0,000130	0,8233	2,20349
(B)C2	4,99135	0,375675	13,28637	0,000000	4,2176	5,76507
(C)C4	1,80521	0,335073	5,38750	0,000014	1,1151	2,49530
AB	-5,29532	1,733949	-3,05390	0,005303	-8,8664	-1,72418
BC	-6,91168	1,733949	-3,98609	0,000513	-10,4828	-3,34054

Fonte: Autor

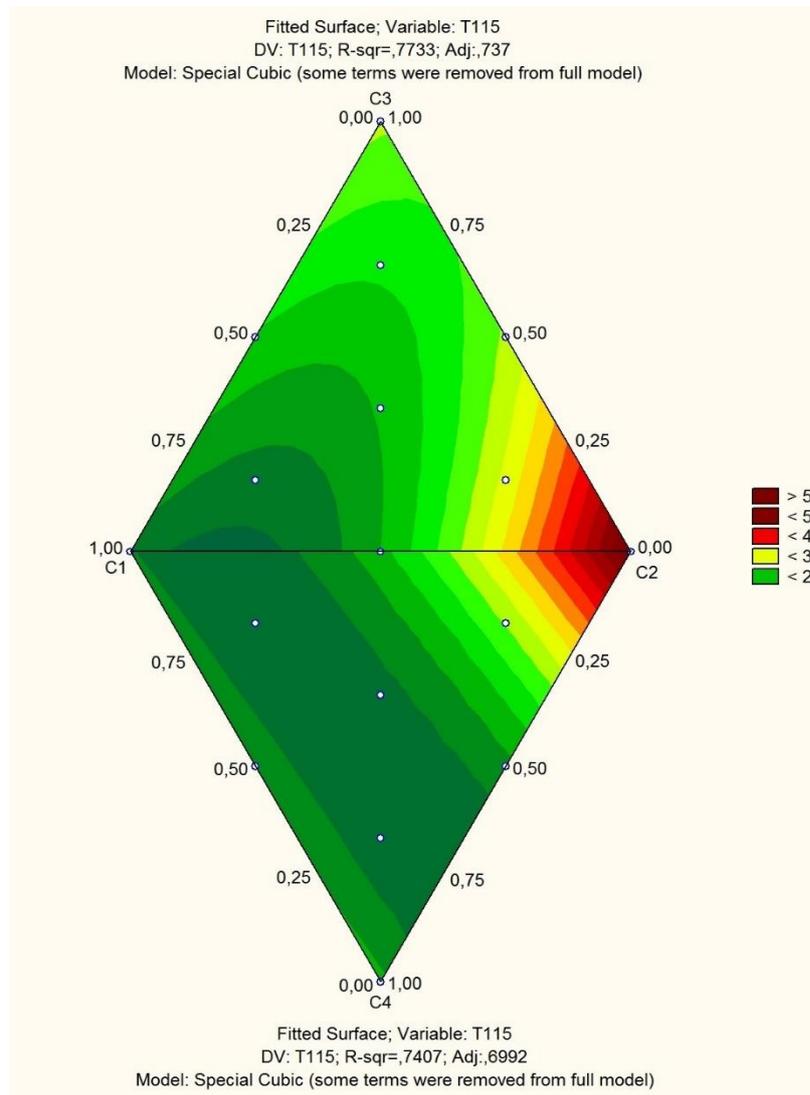
Tabela 15: Coeficientes da mistura 2 no modelo cúbico especial (Flow) com parâmetros ignorados

Coeffs (recoded comps); Var.:FLOW; R-sqr=,9237; Adj:,9078 3 Factor mixture design; Mixture total=1,, 30 Runs DV: FLOW; MS Residual=,4393647						
Factor	Coeff.	Std.Err.	t(24)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
(A)C1	20,3340	0,33181	61,28225	0,000000	19,6491	21,0188
(B)C2	13,3429	0,36986	36,07540	0,000000	12,5795	14,1062
(C)C4	19,5673	0,33181	58,97167	0,000000	18,8825	20,2521
AB	15,2447	1,83489	8,30822	0,000000	11,4577	19,0318
BC	13,9447	1,83489	7,59974	0,000000	10,1577	17,7318
ABC	-35,0289	11,21452	-3,12353	0,004619	-58,1745	-11,8832

Fonte: Autor

Com as considerações feitas, são geradas as superfícies de resposta para cada variável. A superfície de resposta para o modelo cúbico especial da variável T₁₁₅ (Figura 14) mostra claramente que há uma relação entre as quantidades de supeplastificante e adição na mistura e o tempo de espalhamento. Pode-se observar que ao se aproximar de C₂, o T₁₁₅ aumenta. Isto se dá pelo fato da mistura C₂ apresentar a quantidade mínima de SP e máxima de adições minerais, tornando-a assim a pasta mais coesa.

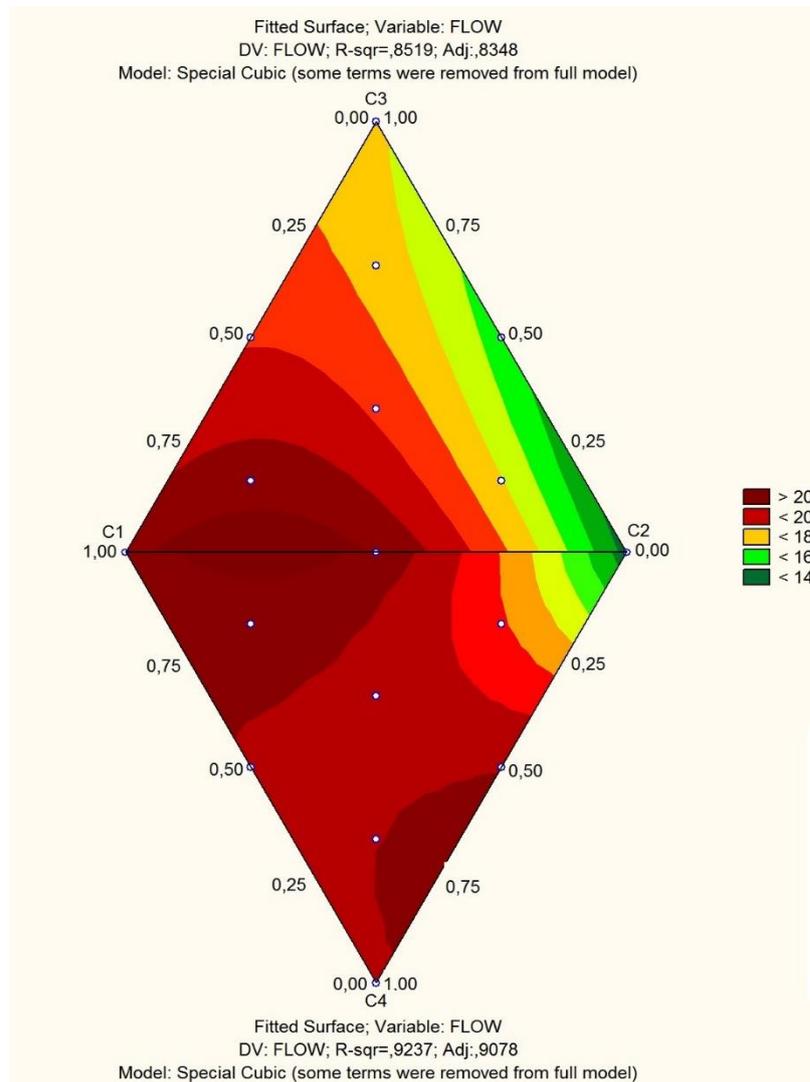
Figura 10: Superfície de resposta do T₁₁₅ para as misturas de C₁ + C₂ + C₃ + C₄



Fonte: Autor

Observa-se de forma análoga, que também há uma relação entre a variável *Flow* (Figura 15) e a dosagem de SP e adição mineral, porém, esta relação ocorre de forma diferente. O espalhamento tem uma relação direta com a dosagem de SP, e indireta com a quantidade de adições minerais.

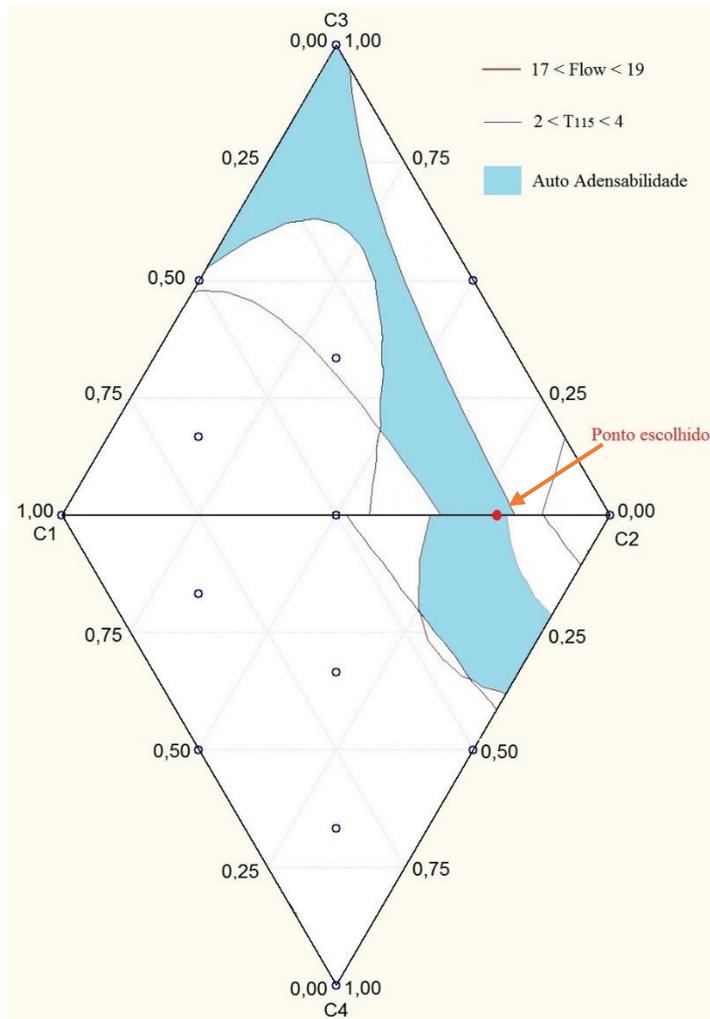
Figura 11: Superfície de resposta do *Flow* para as misturas de $C_1 + C_2 + C_3 + C_4$



Fonte: Autor

A partir das superfícies apresentadas, pode-se aplicar os limites para as variáveis T_{115} e *Flow*. A metodologia adotada determina que para haver auto adensabilidade, os valores de T_{115} devem estar entre $2s$ e $4s$, e os valores do *Flow* entre 17 e 19cm. Portanto, estes limites são impostos às superfícies de resposta, e, sobrepondo-as, tem-se uma região onde há maior probabilidade de ocorrer auto adensabilidade (Figura 16).

Figura 12: Região de auto adensabilidade



Fonte: Autor

Para comprovação do método, foi então escolhida uma pasta contida na região de auto adensabilidade. Esta pasta foi escolhida de forma que se aproximasse ao máximo do ponto C_2 , pois este representa o menor uso de aditivo superplastificante, e maior uso das adições, representando menor custo de produção. A pasta foi escolhida com a seguinte proporção: 20,0% de C_1 + 80% de C_2 (Figura 16), o que corresponde à:

0,8% de SP + 33,0% de Filler e Microssílica + 66,2% de Cimento

Com a água fixada em 0,3 x massa do total de finos.

Foram obtidos então os seguintes resultados (Tabela 15):

Tabela 16: Resultados da pasta obtida

Experimento	T _{11s}	Espalhamento Final
1	2,10s	18,73cm
2	2,10s	18,83cm
3	2,23s	18,97cm
Média	2,14s	18,84cm

Fonte: Autor

Pode-se observar que a pasta escolhida está dentro dos limites requeridos pelo método, apresentando assim as propriedades requeridas de coesão e fluidez para a obtenção do CAA.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo principal a obtenção de dosagens de pastas de concreto, com adição de *filler* calcário e microssílica, que atendessem às propriedades de auto adensabilidade. Para tal, foi utilizada a metodologia de dosagem de pastas de CAA proposta por Leite (2016, no prelo).

As pastas estudadas neste trabalho são compostas por cimento, *filler* calcário, microssílica, superplastificante e água, sendo esta última atrelada à relação fixa de água/finos em 0,3. Os parâmetros considerados para a verificação da auto adensabilidade foram o tempo necessário para que seja atingido um diâmetro de 115 mm (T_{115}) e o espalhamento final (*Flow*), ambos medidos através do ensaio *mini-slump*.

Para analisar os resultados obtidos nos ensaios, foram geradas regiões simplex, limitadas pelos pseudocomponentes C_1 , C_2 , C_3 e C_4 , que formaram duas superfícies de resposta para cada parâmetro analisado. Tais pseudocomponentes representam proporções pré-definidas de cimento, superplastificante e da adição composta por *filler* e microssílica. As superfícies de resposta obtidas estão de acordo com os resultados encontrados por outros autores. O T_{115} se mostrou inversamente proporcional ao superplastificante, e diretamente proporcional à adição mineral. O *Flow* apresentou resultados opostos, sendo diretamente proporcional ao teor de superplastificante, e inversamente à adição.

Com a sobreposição dos gráficos obtidos, foi possível obter-se uma região de alta probabilidade de obtenção de auto adensabilidade da pasta, ou seja, a região é delimitada pelos limites de T_{115} (entre 2 e 4s) e *Flow* (entre 17 e 19cm). Foi escolhido um ponto pertencente a esta região, e foram realizados ensaios para comprovar, com sucesso, sua auto adensabilidade.

Foi observado, porém, que em pastas com elevada dosagem de adição mineral, os parâmetros variavam com o tempo. Os pontos experimentais 2, 3 e 6, como vistos na Tabela 5, apresentaram um aumento no T_{115} , bem como diminuição no *Flow* entre seus experimentos. O intervalo entre os experimentos foi, em média, 5 minutos. Tais experimentos foram repetidos, e foram observados resultados semelhantes.

Feitas as devidas observações, podem ser realizadas as seguintes conclusões:

Os valores de R^2 obtidos na análise estatística, embora abaixo do aceitável, podem ser considerados válidos por se tratar de um procedimento experimental, sendo vulnerável a pequenas diferenças no comportamento do material. Foi observado que a grande diferença entre

os resultados dos experimentos de uma mesma pasta (válido para as pastas 2, 3 e 6) causou uma significativa redução no valor do coeficiente de correlação.

O método adotado é válido para dosagem de pastas de CAA com adição de *filler* calcário e microssílica, apesar dos resultados obtidos na análise estatística. A pasta obtida apresentou resultados satisfatórios, e pode ser utilizada para produção do CAA.

Como indicado pela literatura, foi observado um comportamento tixotrópico nas pastas 2, 3 e 6 (Tabela 5), o que causou uma rápida perda de fluidez, elevando o T_{115} , e diminuindo o diâmetro de espalhamento final. Tal comportamento pode ser observado em outros estudos com os materiais utilizados. Percebe-se porém, com os resultados obtidos nos testes preliminares, que a microssílica exerce uma influência muito mais significativa em relação à perda de fluidez do que o *filler* calcário, apesar deste também contribuir para tal efeito.

Pode-se concluir também, através dos dados dos testes preliminares, que dosagens elevadas de microssílica, ou seja, mais de 10% de substituição no cimento, causam redução no tempo de espalhamento (T_{115}) e também no espalhamento final da mistura (*Flow*). Pode-se afirmar também, visando os resultados obtidos nos testes iniciais, que elevadas dosagens de microssílica causam um significativo aumento no consumo de água e de aditivo superplastificante.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHARIL, R. S.; ERDEM, T. K. **Effects of Silica Fume and Metakaolin on Rheology and Structural Breakdown Properties of Self-Consolidating Concrete**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 8th, 2016, Washington. p.175-185.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – **NBR 6023** – Informação e documentação – Referências – Elaboração. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 10520** – Informação e documentação – Citações em documentos - Apresentação. Rio de Janeiro, 2002.

_____. **NBR 11578** – Cimento Portland composto. Especificação. Rio de Janeiro, 1991.

BUI, V. K.; MONTGOMERY, D. **Mixture proportioning method for self-compacting high performance concrete with minimum paste volume**. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1, 1999, Stockholm. **Anais...** Stockholm: RILEM Publications SARL, 1999. p. 373-384.

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

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

DINIZ, Marcelo Andrade. **Concreto auto-adensável utilizando resíduos de caulim**. João Pessoa, 2010. 122 p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Urbana e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba.

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. In: EFNARC. Fevereiro, 2002

EFNARC - European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems. **Specification and guidelines for self-compacting concrete**. In: EFNARC. Maio, 2005

ESPING, O. **Methods for characterization of fillers and fines for self-compacting concrete**. O. Wallevik and I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003, p.208-219.

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

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

GOMES, P. C. C.; BARROS, A. R. de. **Métodos de dosagem de concreto autoadensável**. São Paulo: Pini, 2009. 165p.5

KURDOWSKI, Wieslaw. **Cement and concrete chemistry**. [s. l.]: Springer Science & Business, 2014.

LEITE, Guilherme Urquiza. Alexandre Rodrigues de. **Método de Dosagem de Concreto Auto-Adensável Utilizando Planejamento de Experimentos com Misturas**. João Pessoa, 2016. 124 p. Dissertação de mestrado – Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Ambiental, Universidade Federal da Paraíba.

LISBOA, E.M. **Obtenção do concreto auto-adensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas**. 2004. p1115. Dissertação – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Alagoas, Alagoas, 2004.

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

METHA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto — Estrutura, propriedades e Materiais**. Ed.PINI. São Paulo, 2008.

MOOSBERG-BUSTNES, H. **Characterization of filler**. Edição: O. Wallevik; I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3rd, 2003, Reykjavik. **Proceedings...** France: RILEM Publications, 2003. p. 540-550.

OKAMURA, Hajime. Self-compacting high-performance concrete. **Concrete international**, v. 19, n. 7, p. 50-54, 1997.

OKAMURA, Hajime; OUCHI, Masahiro. Self-compacting concrete. **Journal of advanced concrete technology**, v. 1, n. 1, p. 5-15, 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 da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

StatSoft, Inc. (2007). **STATISTICA (data analysis software system)**, version 8.0.
www.statsoft.com.