

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL
MODALIDADE ESTRUTURAS**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL
E UMA APLICAÇÃO COM MATERIAIS LOCAIS**

por

JUSSARA LIMEIRA DE ARAÚJO

Orientador: Prof. Dr. Paulo de Araújo Régis

Prof. Dr. Normando Perazzo Barbosa

CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Jussara Limeira de Araújo

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL DA UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE “MESTRE EM CIÊNCIAS EM ENGENHARIA CIVIL”.

APROVADA POR:

**Orientador: Prof. Paulo de Araújo Régis, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco**

**Orientador: Prof. Normando Perazzo Barbosa D.Sc.
Universidade Federal da Paraíba**

**Examinador Externo: Prof. Paulo César Correia Gomes, D.Sc.
Universidade Federal de Alagoas**

**Examinador Interno: Prof. Arnaldo Manoel Pereira Carneiro, D.Sc.
Universidade Federal de Pernambuco**

**Recife/PE – Brasil
Março de 2003**

DEDICATÓRIA

*A Deus, por sua presença constante em minha vida,
permitindo-me alcançar mais esta vitória.*

AGRADECIMENTOS

Aos meus queridos avós Gonzaga e Raimunda (*in memorian*) por todo incentivo a mim dispensado desde as primeiras letras.

Às minhas queridas mãe e irmã, Fátima e Juliana, pelo apoio incessante em todos os momentos da minha vida.

À minha querida tia Emília, pelo exemplo e dedicação à pesquisa.

Aos meus grandes amigos e familiares por todo apoio.

À UFPE, Universidade Federal de Pernambuco.

À CAPES.

Ao Professor Normando Perazzo, pelo incentivo diário e estímulo constante na orientação e realização deste trabalho.

Aos funcionários do LABEME, especialmente Ricardo, pela fundamental ajuda na parte experimental deste trabalho.

Ao LABEME, Laboratório de Ensaio de Materiais e Estruturas da UFPB – Universidade Federal da Paraíba.

Aos Professores Paulo Régis e Ézio pelo incentivo na escolha do tema dessa dissertação.

À CIMEPAR, fabricante do cimento ZEBU, do grupo CIMPOR, pela doação do Pó Calcário e apoio quando solicitado.

À MBT, Master Builders Technology, pela doação de superplastificante.

À Fosroc, pela doação de superplastificante.

Resumo da Dissertação apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências em Engenharia Civil (M.Sc.)

CONSIDERAÇÕES SOBRE CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL E UMA APLICAÇÃO COM MATERIAIS LOCAIS

Jussara Limeira de Araújo

Março/2003

Orientador: Paulo de Araújo Régis

Normando Perazzo Barbosa

Programa: Engenharia Civil

É inegável a evolução da tecnologia do concreto nas últimas décadas. Passou-se de um material que era constituído por quatro componentes: cimento, areia, brita e água, para um outro envolvendo seis componentes, ou seja, os já utilizados mais os aditivos químicos e as adições minerais. Concreto auto-adensável (CAA), chamado em inglês de *Self-Compacting Concrete (SCC)* faz uso desses seis elementos constituintes (e às vezes até de mais um agente de viscosidade) e pode ser definido como um concreto capaz de fluir pelo interior das fôrmas passando através das armaduras e preenchendo-as completamente unicamente sob a ação do seu próprio peso. Em virtude de algumas de suas vantagens como, por exemplo: facilidade de execução de concretagem mais rápida e com redução de mão de obra e ausência de vibração com conseqüente redução de barulho, tem sido crescente o interesse sobre seu emprego em todo o mundo. No entanto, não é tão simples a obtenção do CAA, visto que é necessária uma combinação adequada dos materiais para permitir ao concreto apresentar três propriedades básicas: capacidade de preenchimento das fôrmas, capacidade de escoar e passar através das armaduras e resistência à segregação.

Neste trabalho apresenta-se uma série de informações sobre o CAA. Indicam-se os materiais que o compõem, mostrando-se também métodos de ensaios que podem ser usados para se detectar a incompatibilidade do cimento com o superplastificante e descrevem-se resumidamente os ensaios propostos na literatura para medição das capacidades de preenchimento e de escoamento e de resistência à segregação. Os valores alvo dos ensaios são também indicados. Duas metodologias usadas na obtenção do CAA são apresentadas. Com base em uma delas, foi feita uma experimentação para se obter o CAA usando-se como adição pó calcário e resíduos de tijolos cerâmicos moídos. Como agregados foi usado o material oriundo de mesma jazida, separados apenas por peneiramento: o gráudo foi aquele formado por seixos rolados de dimensões entre 4,8 e 9,5mm e o agregado miúdo o que passou na peneira de malha 4,8mm. O teor de cimento foi fixado em 350 kg/m³.

O controle das propriedades do concreto fresco foi feito pelos ensaios de espalhamento pelo Cone de Abrahms, Caixa em L e GTM. Os ensaios mostraram que o CAA é muito sensível a pequenas variações das propriedades dos materiais e do seu proporcionamento. Os resultados conseguidos indicam que é possível obter-se o CAA usando-se os materiais locais. Os resíduos de blocos cerâmicos moídos tiveram excelente desempenho como adição, melhorando significativamente a resistência do CAA (43 MPa) em relação ao pó calcário (28MPa).

Abstract of thesis presented to UFPE as a partial fulfillment of the requirements for the Master of Science's degree (M. Sc.)

**SELF-COMPACTING CONCRETE CONSIDERATIONS
AND AN APPLICATION WITH LOCAL MATERIALS**

Jussara Limeira de Araújo

Mars/2003

Advisor: Paulo de Araújo Régis

Normando Perazzo Barbosa

Department: Civil Engineering

It is undeniable the evolution of the technology of the concrete in the last decades. It's a material that was constituted by four components initially: cement, sand, stone and water, and became another one involving six components, in other words, the already presented and mineral addition and chemical admixtures. Self-Compacting Concrete (SCC), uses those six constituent elements (and sometimes also a viscosity agent) and it can be defined as a concrete capable to flow in the interior of the molds passing through the reinforcements and filling them out completely under the action of its own weight. Because of some of your advantages as, for instance, easiness of execution, faster placement, reduction of work hand and vibration absence with consequent noise reduction, it has been growing the interest on its employment all over the world. However, it is not so simple to obtain SCC because it is necessary an appropriate combination of the materials to allow the concrete to present three basic properties: filling ability, passing ability and segregation resistance.

In this work some information of SCC is given. Materials that are used on it are indicated, as well as the tests that can be used to detect the incompatibility of the cement with the

superplasticizers. The procedures proposed in the literature for measurement of the filling ability, passing ability and segregation resistance are described. The target values of the tests are also indicated. Two methodologies used to obtaining SCC are presented. Based in one of them, an experimentation to obtain SCC using as addition limestone filler and ground ceramic bricks residues was made. A material from the same place, just separated by sieving, was used as aggregate: the coarse aggregate with dimensions between 4,8 mm and 9,5 mm and the fine aggregate the fraction passed on 4,8mm mesh. The cement content was fixed in 350 kg/m³. The control of the properties of the fresh concrete was made by the slump-flow test by Abrams cone, L-Box and GTM. The tests showed that SCC is very sensitive to small variations of the properties of the materials and to its proportion. Results indicate that it is possible to obtain SCC using local materials. Ground ceramic bricks residues had a very good performance, acting as active addition, improving the resistance of SCC significantly (43 MPa) in relation to the limestone filler (28MPa).

ÍNDICE

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO	10
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
2.1. CONCRETO NO ESTADO FRESCO	12
2.2. ADITIVOS PARA CONCRETO	13
2.2.1. Generalidades	13
2.2.2. Compatibilidade do Cimento com o Superplastificante e Ponto de Saturação.....	15
2.3. ADIÇÕES	20
2.4. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)	22
2.4.1. Considerações Gerais.....	22
2.4.2. Ensaios Existentes para Misturas de CAA no Estado Fresco.....	24
2.4.3. Sumário dos Ensaios e Valores Desejáveis.....	32
2.4.4. Materiais Usados no CAA	33
2.5. METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO CAA	33
2.5.1. Metodologia do EFNARC.....	34
2.6. MÉTODO DE GOMES (2002)	38
2.7. ALGUNS TRABALHOS FEITOS SOBRE CAA.....	41
CAPÍTULO III - MATERIAIS	42
3.1. MATERIAIS.....	42
3.1.1. Cimento.....	42
3.1.2. Adições	42
3.1.3. Agregados	43
3.1.4. Aditivos.....	44
CAPÍTULO IV - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	45
4.1. INTRODUÇÃO	45
4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	45
4.3. VERIFICAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO CIMENTO COM O SUPERPLASTIFICANTE E OBTENÇÃO DO PONTO DE SATURAÇÃO	46
4.4. OBTENÇÃO DE UMA DOSAGEM INICIAL.....	46
4.4.1. Considerações Iniciais.....	46
4.4.2. Mecanismo de Obtenção dos Componentes do Traço	48
4.4.3. Traço Unitário em Massa.....	51
4.4.4. Verificações Preliminares	51
4.4.5. Massa Específica do Concreto Fresco.....	52
4.5. AJUSTE DA RELAÇÃO ÁGUA-FINOS	52
4.6. DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE SUPERPLASTIFICANTE NA ARGAMASSA	52
4.7. OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO ATRAVÉS DE ENSAIOS	52
4.8. VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ENDURECIDO.....	53
CAPÍTULO V - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	54
5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	54
5.2. COMPATIBILIDADE DOS ADITIVOS COM OS CIMENTOS.....	56
5.3. OBTENÇÃO DE UMA DOSAGEM INICIAL.....	60
CAPÍTULO VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	75
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	78

CAPÍTULO I – INTRODUÇÃO

Inegável é a evolução da tecnologia do concreto nas últimas décadas. Passou-se de um material que era constituído por quatro componentes, cimento, areia, pedra e água, para um outro envolvendo seis constituintes: os já citados mais os aditivos químicos e as adições minerais.

Os aditivos, frutos dos notáveis progressos da indústria química, são materiais que incorporados ao concreto em pequenas quantidades (0,3% a 3% da massa de cimento) podem promover significativas melhorias nas propriedades do concreto fresco, com conseqüentes benefícios para esse material no estado endurecido.

Já as adições são produtos, em geral na forma de pó, com finura superior à do cimento, que usados em quantidades não inferiores a 5% da massa deste último, podem melhorar significativamente as propriedades de resistência e durabilidade do concreto endurecido promovendo uma maior coesão do material no estado fresco.

O concreto auto-adensável, (CAA), chamado em inglês de *self-compacting concrete* (SCC), faz uso desses seis elementos constituintes (e às vezes até de mais um: agente de viscosidade) e pode ser definido como um concreto capaz de fluir pelo interior das fôrmas, passando coeso através das armaduras e preenchendo-as completamente unicamente sob ação de seu próprio peso.

Tem sido crescente o interesse sobre seu emprego em todo mundo em virtude de algumas de suas vantagens como:

- facilidade de lançamento;
- concretagem mais rápida e com conseqüente redução de mão de obra;
- ausência de vibração com conseqüente redução de barulho;
- propiciar ambiente de trabalho mais seguro;
- conduzir a melhor acabamento das superfícies;
- dar maior liberdade de projeto das peças estruturais permitindo seções mais finas.

Inicialmente desenvolvido no Japão, onde foi feita a primeira aplicação prática em 1988, a tecnologia do CAA tem tomado significativo impulso na Europa, tanto na indústria de

pré-moldados de concreto como nas construções convencionais. A obtenção do CAA não é muito simples. É preciso uma combinação adequada dos materiais constituintes, havendo muita sensibilidade a pequenas variações do teor de qualquer um deles. Sendo indispensável o uso de superplastificantes, tem que ser avaliada sua compatibilidade com o cimento a ser utilizado. Alguns dos ensaios adotados para se avaliar as propriedades do CAA não são ainda normalizados, e na literatura encontra-se diferentes tipos de ensaio para se tentar obter uma mesma propriedade. Assim, a EFNARC, uma organização europeia dedicada a produtos químicos e sistemas construtivos com concreto, publicou em finais de 2001 um conjunto de diretrizes e especificações para guiar os interessados na obtenção do CAA.

O Brasil, rico em materiais locais que podem ser empregados como adição, e em diferentes tipos de agregado, tem poucos trabalhos publicados sobre o CAA. Em alguns deles nota-se inclusive que se o confunde o CAA com concreto de elevado abatimento. Este trabalho visa difundir o CAA fornecendo mais informações, considerando os seus potenciais benefícios para a indústria da construção.

Esta dissertação é composta de seis capítulos. O primeiro deles é esta introdução. No Capítulo II encontra-se a revisão bibliográfica. Nele são feitas algumas considerações sobre concreto fresco, recordando-se alguns conceitos. Fala-se rapidamente dos aditivos, das adições, componentes do CAA. Apresenta-se a metodologia proposta pelo EFNARC (2002) para obtenção do CAA e também se descrevem os ensaios usados para avaliar suas propriedades no estado fresco, e para se verificar compatibilidade do cimento com o superplastificante. Mostra-se também a metodologia utilizada por GOMES (2002) para obtenção de CAA de alta resistência. Citam-se alguns trabalhos feitos sobre o CAA.

No capítulo III apresentam-se os materiais utilizados na parte experimental deste trabalho.

O capítulo IV trata da metodologia que foi empregada na parte experimental, descrevendo-se uma maneira de se obter o proporcionamento dos materiais.

O capítulo V é referente à apresentação e análise dos resultados experimentais. Mostram-se as propriedades dos materiais, a verificação da compatibilidade cimento-superplastificante e os demais resultados dos testes feitos no CAA.

Finalmente, no Capítulo VI são apresentadas as considerações finais e as propostas para pesquisas futuras na área.

CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. CONCRETO NO ESTADO FRESCO

O concreto encontra-se no estado fresco tão logo é terminado o processo de mistura e até o início de seu endurecimento. Este ocorre quando a quantidade de cristais aciculares de etringita (oriundos da reação química dos aluminatos do cimento com água) é tal que começa a dificultar a mobilidade do concreto.

O intervalo de tempo em que o concreto permanece neste estado depende de numerosos fatores entre os quais pode-se citar:

- finura do cimento;
- tipo de cimento;
- presença de aditivo;
- tipo de aditivo;
- presença de adição;
- tipo e finura de adição;
- temperaturas de mistura e do ambiente.

Em se tratando de complexas reações químicas que promovem o endurecimento do concreto, nos itens acima tudo o que as favorece apressam o processo. Na prática interessa que esse intervalo seja de tal ordem que permita o transporte, lançamento e adensamento do concreto nas fôrmas. Em locais de temperatura elevada, como o Nordeste brasileiro, esse tempo é normalmente assegurado pela utilização de aditivos retardadores de pega no concreto. No caso do CAA, é eliminada a etapa de adensamento, tendo-se, pois, um acréscimo no tempo necessário entre a mistura e a concretagem definitiva dos elementos estruturais.

Com referência ao concreto no estado fresco convém definir:

- coesão
- segregação
- exsudação
- trabalhabilidade
- consistência

Coesão: é a capacidade de os constituintes do concreto fresco se manterem unidos durante seu manuseio.

Segregação: é a separação dos constituintes do concreto quando manuseado (praticamente o contrário de coesão)

Exsudação: é o aparecimento de água na superfície do concreto recém adensado (não deixa de ser uma espécie de segregação).

Trabalhabilidade: é propriedade que determina o esforço necessário para manipular uma quantidade de concreto recém-misturado com uma perda mínima de homogeneidade (MEHTA, 1994).

Consistência: é um índice que mede a mobilidade do concreto fresco (através do ensaio do tronco de cone em concretos convencionais, ou aparelho Vebe em concretos secos).

Diversos fatores influem nos fenômenos acima definidos, entre os quais o consumo de água (favorece a mobilidade, mas facilita a segregação), o consumo de cimento (maior consumo conduz, em geral, a mais coesão), a forma e dimensão máxima dos agregados (a demanda de água varia com a granulometria com conseqüências na segregação), a presença ou não de aditivos (em geral melhoram a coesão e aumentam a consistência), proporcionamento dos materiais (dosagem equilibrada leva a coesão e consistência desejadas, com redução de exsudação e conseqüentes propriedades desejadas de resistência e durabilidade).

2.2. ADITIVOS PARA CONCRETO

2.2.1. Generalidades

Como já antecipado, os aditivos são parte integrante obrigatória nos concretos modernos como concreto de alto-desempenho e CAA.

No Brasil, os aditivos são classificados pela NBR 11768 – Aditivos para concreto de cimento Portland (ABNT, 1992) em:

Tipo P - plastificante
Tipo R – retardador de pega
Tipo A – acelerador de pega
Tipo PR – plastificante e retardador
Tipo PA – plastificante e acelerador
Tipo SP - superplastificante
Tipo SPR – superplastificante e retardador
Tipo SPA – superplastificante e acelerador
Tipo IAR – incorporador de ar

O aditivo do Tipo A, acelerador de pega, tem como função acelerar a evolução da resistência inicial do concreto durante o endurecimento, podendo inclusive acelerar a pega do concreto (NEVILLE, 1997).

O aditivo do Tipo R, retardador de pega, permite um atraso na pega da pasta de cimento tornando mais lento seu endurecimento (NEVILLE, 1997).

O aditivo do Tipo SP, superplastificante, também chamado aditivo redutor de água, permite a redução do teor de água de três a quatro vezes, em um dado traço de concreto, quando comparado a aditivos redutores de água normais (MEHTA, 1994).

O aditivo tipo IAR é usado para incorporar minúsculas bolhas de ar no concreto, sendo usado em concretos sujeitos a gelo e degelo e também em concretos com poucos finos, como é o caso do concreto compactado com rolo. O ar incorporado facilita a mobilidade dos componentes do concreto fresco.

Entre os efeitos gerais dos aditivos, pode-se citar:

- aumento de trabalhabilidade sem aumento de consumo de água;
- redução do consumo de água mantida a trabalhabilidade;
- redução da água e do cimento, na mesma proporção, mantendo trabalhabilidade e resistência;
- aumento da resistência inicial;
- retardamento ou aceleração de pega;
- redução da exsudação;
- aumento de durabilidade;
- redução da permeabilidade;

- controle da expansão causada pela reação álcalis-agregado;
- anulação da retração ou leve expansão;
- redução da segregação;
- fluidificação do concreto para bombeamento;
- aumento de aderência às armaduras;
- melhor acabamento.

No CAA faz-se uso dos aditivos superplastificantes e algumas vezes dos incorporadores de ar. Os aditivos SP normalmente são vendidos na forma de emulsões aquosas, ou seja, partículas sólidas dispersas em água. O que importa é na realidade o teor de sólidos presentes na emulsão, que pode estar entre 25% e 40% da massa total.

Até há pouco tempo, o constituinte básico da parte sólida era melamina sulfonada ou naftaleno sulfonado. Recentemente apareceram os chamados “superplastificantes de última geração” à base de acrílico.

O que os aditivos SP fazem é dispersar as partículas de cimento (segundo diversos mecanismos de ação que aqui não cabe discutir), permitindo desta forma seja uma notável redução de água, seja uma extraordinária fluidez do concreto no estado fresco.

2.2.2. Compatibilidade do Cimento com o Superplastificante e Ponto de Saturação

Como os SP contêm sulfato em sua constituição, dependendo das proporções de aluminatos e gipsita presentes no cimento, podem ocorrer reações químicas indesejáveis que eliminam completamente a eficiência do produto. É o que se chama “incompatibilidade do SP com o cimento”.

Esse problema é realmente freqüente, a ponto de NEVILLE (1997) sugerir que seja vendido conjuntamente o par cimento-superplastificante. É impossível saber a partir das especificações de um determinado cimento e de um determinado superplastificante, que tipo de comportamento reológico se poderia esperar em traços com baixa relação a/c (WHITING, 1979; JOLICOEUR AND MACGREGOR, 1994), citados por AÏTCIN (2000). É necessário experimentá-los e ver como funcionam, face à complexidade dos fenômenos químicos envolvidos.

Portanto, antes do uso dos SP, é sempre conveniente verificar sua compatibilidade com o cimento a ser empregado. Um método usando o minicone mostrado na Figura 2.1 é descrito em AITCIN (2000). Resumidamente este consiste em se preencher o minicone com uma pasta de cimento à qual foi adicionado o superplastificante e verificar o tempo de espalhamento em segundos, após 10 min, 30 min, 40 min, 60 min da mistura. Quando se tem um aumento significativo do tempo de espalhamento nos primeiros intervalos pode-se dizer que há incompatibilidade entre os dois materiais.

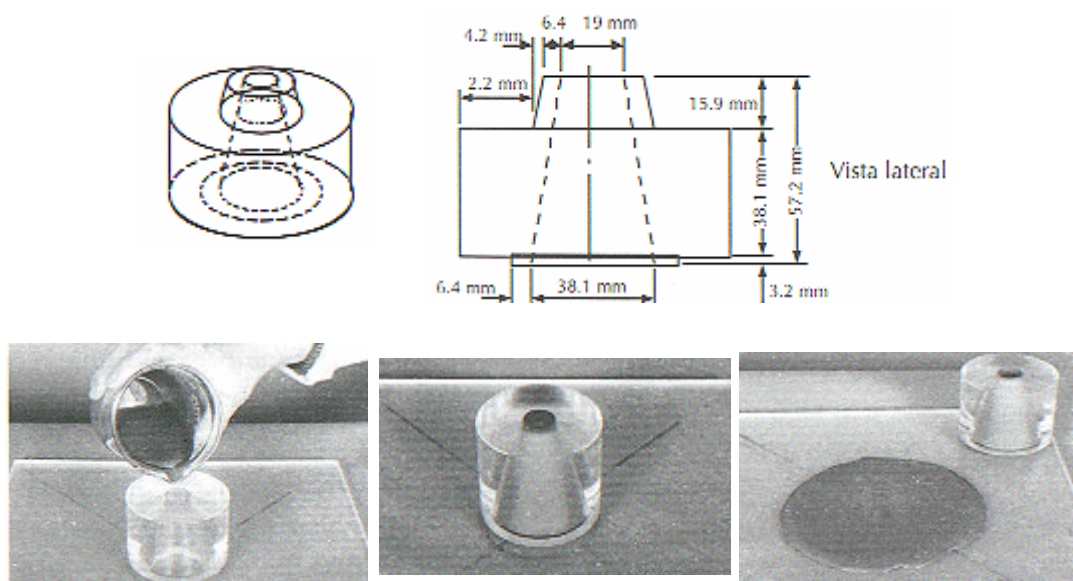


Figura 2.1 - Minicone usado para verificação da compatibilidade do superplastificante com o cimento (AITCIN, 2000).

Um outro método também descrito em AITCIN (2000) e que foi utilizado neste trabalho, sendo, pois, aqui explicitado, faz uso do Funil de Marsh, que é mostrado na Figura 2.2. Este ensaio permite também se obter o “ponto de saturação” do superplastificante. O ponto de saturação pode ser definido como sendo a porcentagem de superplastificante, relativa à massa de cimento, que chega a envolver todos os seus grãos. A partir daí, qualquer aumento na dosagem do superplastificante não produz nenhum efeito na reologia da pasta.



Figura 2.2 - Funil de Marsh.

O ensaio consiste em preparar uma pasta de cimento com o superplastificante e medir o tempo para que uma certa quantidade dela (1litro, por exemplo) escoe através do cone. As etapas do ensaio consistem em:

- medir a água e o superplastificante;
- ligar o misturador enquanto se introduz progressivamente a quantidade de cimento em 01 (um) minuto e 30 (trinta) segundos;
- parar a mistura por 15 (quinze) segundos para limpar com a espátula o cimento aderente à vasilha;
- misturar durante 60 (sessenta) segundos;
- medir a temperatura;
- medir, em intervalos de tempo de 05 (cinco) e 60 (sessenta) minutos, o tempo de escoamento. A cada vez, mede-se a temperatura da pasta, que deve estar entre 20°C e 23 °C.



Figura 2.3 - Execução do ensaio com o Funil de Marsh.

Faz-se variar as dosagens de superplastificante e para cada uma delas são feitas duas medidas de tempo obtendo-se duas curvas como as apresentadas na Figura 2.4. A interseção delas corresponde ao ponto de saturação.

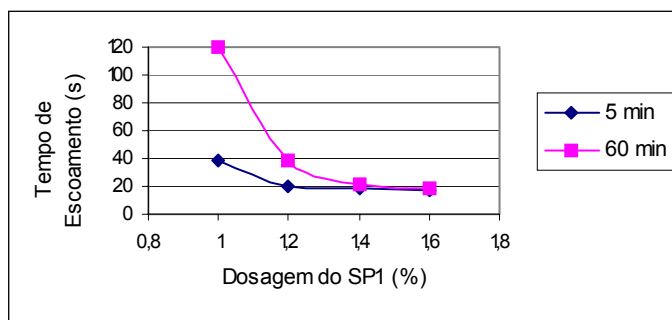


Figura 2.4 –Curvas que permitem encontrar o ponto de saturação.

Para detectar a incompatibilidade do cimento com o superplastificante, AITCIN (2000) sugere ajustar a relação água/aglomerante de tal forma que a pasta depois de 5 minutos de repouso apresente um tempo de escoamento do funil de Marsh de 1,2 litros (Figura 2.5) entre 60 e 90 segundos. A incompatibilidade ocorre quando não se consegue fazer a curva de 60 min encontrar aquela de 5 min.

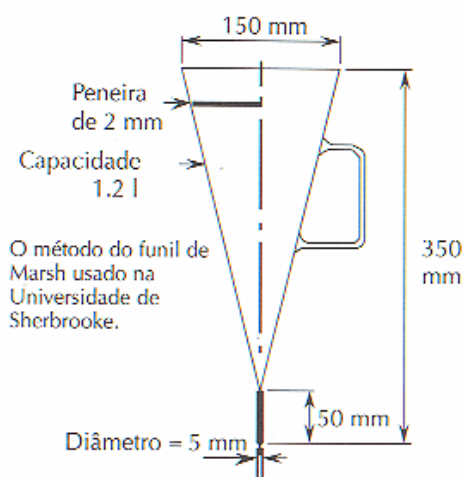


Figura 2.5 - Cone de Marsh usado em AITCIN (2000).

GOMES (2001) e GOMES (2002) usaram o cone de Marsh da EURO-NORMA EN445 (1996) para obtenção do ponto de saturação das pastas. Trata-se do funil utilizado para medir a fluidez da pasta de injeção das bainhas no concreto protendido pós-tracionado com

armaduras aderentes. Como se pode ver na Figura 2.6, as dimensões do funil já não correspondem às do mostrado na Figura 2.5.

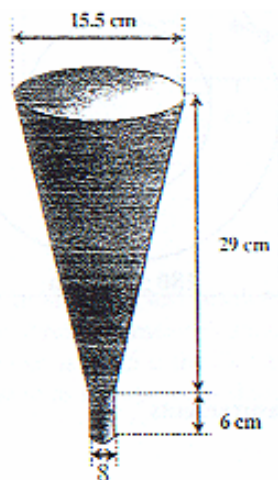


Figura 2.6 – Cone de Marsh usado em GOMES (2001) e GOMES (2002).

Introduzindo-se um litro de pasta no funil, o ponto de saturação é obtido a partir de um gráfico onde estão representadas em ordenada o logaritmo do tempo de escoamento de meio litro de pasta e em abscissa o teor de superplastificante (Figura 2.7). O ponto de saturação é tomado como aquele em que a curva faz um ângulo $\alpha = 140 \pm 10^\circ$.

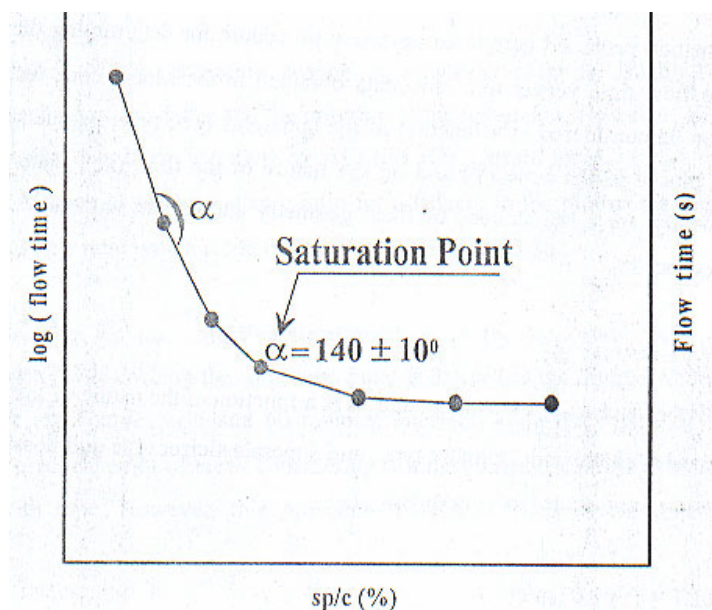


Figura 2.7 - Curva para obtenção do ponto de saturação (GOMES, 2002).

O ponto de saturação pode ser considerado o teor ótimo de superplastificante que aplicado à pasta de cimento conduz à sua máxima mobilidade sem causar segregação ou exsudação. Ele varia bastante com a relação água/cimento, com o tipo de SP, com a constituição da pasta e mesmo com a temperatura.

2.3. ADIÇÕES

Adições são materiais inorgânicos finamente divididos que são usados no concreto para melhorar certas propriedades ou para se obter propriedades especiais (EFNARC, 2002). Em princípio, as adições dão mais coesão ao concreto, reduzindo exsudação. No caso do CAA elas desempenham um importante papel, como será adiante apresentado.

As adições podem ser divididas em dois tipos principais:

- adições praticamente inertes (Tipo I)
- adições quimicamente ativas (Tipo II)

Adições inertes são aquelas de baixa reatividade química com o cimento e/ou seus produtos de hidratação. Pó de granito oriundo da britagem para obtenção de agregados, pó de calcário usado em concreto asfáltico, com dimensões inferiores a 0,125mm, são exemplos típicos de adições do Tipo I.

Adições quimicamente ativas são aquelas que apresentam propriedades pozolânicas ou mesmo propriedades cimentícias. As primeiras estão presentes nas pozolanas, as últimas, na escória de alto forno moída, por exemplo. A escória não é disponível no Nordeste Brasileiro, daí ser dado destaque às pozolanas.

Pozolanas

Pozolana é um material rico em sílica ou em sílica e alumina amorfas que quando na forma de partículas muito finas, em presença de água, é capaz de reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio para formar silicatos estáveis com propriedades cimentícias.

Para que o material seja pozolânico vale salientar que grande parte da sílica presente deve estar no estado amorfo ou vítreo, pois quando na forma cristalina sua reatividade é muito

pequena. Através da espectroscopia por Difração de Raios X ou por dissolução em ácido clorídrico e hidróxido de potássio, é possível determinar o teor de sílica vítrea (ALVES, 2002).

A Figura 2.8 mostra um exemplo de um material que tem sílica amorfa e também na forma cristalina. Trata-se de uma difratometria de raios X realizada em resíduos de tijolos cerâmicos moídos. O trecho sem picos indica presença de material amorfo, os picos indicam materiais cristalinos. Apesar da cristalinidade detectada no ensaio, o material apresentou comportamento pozolânico mais que satisfatório (ALVES, 2002).

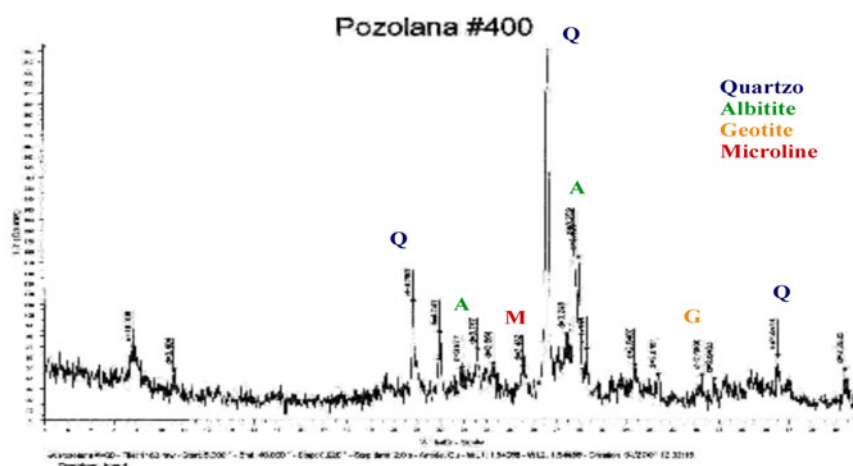


Figura 2.8 – Difractometria de raios X de amostra de blocos cerâmicos moídos (ALVES, 2002).

Os materiais pozolânicos podem ser de origem natural ou artificial. Os materiais mais comumente encontrados são as cinzas vulcânicas – a pozolana original – pumicita, opalina, micas e calcedônias, terras diatomáceas calcinadas e argila calcinada (MEHTA, 1994).

É possível que algumas pozolanas naturais, como as terras diatomáceas, necessitem de um alto teor de água devido à sua porosidade, o que constitui um problema para o concreto. Todavia, é possível melhorar a atividade de algumas pozolanas naturais através de calcinação a temperaturas entre 550 °C e 1100 °C, dependendo do material.

Há ainda a metacaulinita, obtida pela calcinação de argila caulínica pura ou refinada a temperaturas entre 650 °C e 850 °C, e moída até a finura de 700 m²/kg a 900 m²/kg. O material resultante apresenta grande pozolanicidade. Embora a pozolanicidade não seja ainda perfeitamente entendida, sabe-se que a área específica e a composição química têm um papel

importante, mas como estão inter-relacionadas, torna-se um problema complexo (NEVILLE, 1997).

Um dos grandes benefícios das pozolanas é que elas podem substituir parcialmente o cimento, contribuindo para a redução da emissão de CO₂ na atmosfera. Assim é que numerosos produtos, subprodutos e resíduos têm sido estudados para tal. Cinzas volantes originadas da queima de carvão mineral (LYNSDALE AND KHAN, 2000; SWAMY, BARBOSA, 1998), resíduos de tijolos cerâmicos moídos (ALVES, 2002) e mesmo cinzas de materiais vegetais como as da casca de arroz. Estas últimas são um resíduo natural com alto teor de sílica e que com tratamento a uma temperatura entre 500°C e 700 °C resulta em um material amorfo com estrutura porosa. Com elas, numerosas pesquisas têm sido feitas, como SAMPAIO et all (2000), AGUILA (2000) e GASTALDINI (2000).

Outro efeito benéfico das pozolanas, e aqui se destaca a sílica ativa, é a modificação da estrutura de poros da pasta de cimento hidratada, o que reduz sua permeabilidade, com conseqüente melhoria da durabilidade.

2.4. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL (CAA)

2.4.1. Considerações Gerais

O concreto auto-adensável, CAA, é um concreto fluido que se adensa sob a ação única do seu peso próprio, dispensando o uso de qualquer processo de vibração. É constituído pelos mesmos componentes dos concretos modernos convencionalmente vibrados, entretanto, apresenta grande quantidade de superplastificante e de materiais pulverulentos (finos).

O CAA foi desenvolvido para garantir compactação adequada e facilidade no lançamento de concreto em estruturas com armações congestionadas e áreas restritas.

O procedimento para a produção do CAA é predominantemente empírico, devendo o projeto da mistura ser ensaiado para então serem atingidas as propriedades pré-definidas do concreto fresco e endurecido. Recomenda-se grande controle dos componentes para evitar a segregação, o escorregamento e a sedimentação (EFNARC, 2002).

Segundo o EFNARC (2002) uma mistura de concreto só poderá ser classificada como auto adensável se apresentar as seguintes propriedades básicas:

- Capacidade de Preenchimento (*Filling Ability*);
- Capacidade de Escoamento (*Passing Ability*);
- Resistência à Segregação (*Segregation Resistance*).

a) Capacidade de Preenchimento (*Filling Ability*)

É a capacidade do CAA de preencher todos os espaços no interior da fôrma sob ação única do seu peso próprio.

b) Capacidade de Escoamento (*Passing Ability*)

É a capacidade do CAA passar através de pequenas aberturas como espaçamentos entre barras de aço, também sob ação única do seu peso próprio.

c) Resistência à Segregação (*Segregation Resistance*)

É a capacidade do CAA permanecer uniforme e coeso durante o processo de transporte e lançamento.

Experiências práticas no Japão e recentemente na Europa têm mostrado que concretos auto-adensáveis comercialmente viáveis podem ser produzidos e todos os importantes benefícios podem ser alcançados. Contudo, o projeto europeu de CAA também confirmou que os métodos mais comumente usados para verificação das propriedades básicas do CAA no estado fresco não são apropriados.

O comportamento de misturas de CAA no estado fresco difere bastante do concreto normal de alta-trabalhabilidade (superplastificado). Atualmente, não existem testes de trabalhabilidade padrão (europeu ou de outras nacionalidades) adequados para promover uma rápida verificação das propriedades básicas desses concretos no estado fresco, in situ, confirmando se a mistura de concreto é auto-adensável. As aplicações de CAA são no momento limitadas a casos especiais onde seria possível usar concretos normais (EFNARC, 2002).

A tecnologia do CAA está sendo atualmente adotada em vários países europeus. Na ausência de métodos de ensaios padronizados adequados, é necessário examinar criticamente os métodos de ensaios existentes e identificar ou, quando necessário, desenvolver métodos de ensaios adequados para aceitação das Normas Européias. Tais métodos de ensaios devem ser

capazes de verificar com rapidez e confiabilidade as propriedades chave do CAA no estado fresco no local da construção. O equipamento do ensaio deve ser resistente, confiável, facilmente portátil e de baixo custo. O procedimento de ensaio deve ser realizado, se possível, por um único operador e devem ser obtidos resultados significativos que possam ser interpretados com um mínimo de treinamento do pessoal e que possam ser usados para definir e especificar diferentes misturas de CAA.

2.4.2. Ensaio Existentes para Misturas de CAA no Estado Fresco

A Tabela 2.1 indica alguns ensaios utilizados para se medir as três propriedades acima citadas: capacidade de preenchimento, capacidade de escoamento, resistência à segregação (EFNARC, 2002). Uma rápida descrição de cada um deles é a seguir apresentada.

Tabela 2.1– Ensaio para avaliação das propriedades do CAA

PROPRIEDADE	ENSAIO
Capacidade de Preenchimento	Espalhamento pelo Cone de Abrams (slumpflow) Espalhamento pelo T _{50cm} Funil em V (V-Funnel) Orimet Caixa de Preenchimento (Fill-box)
Capacidade de Escoamento	Ensaio do Anel de Barras de Aço (J-ring) Caixa em L (L-box) Caixa em U (U-box)
Resistência à Segregação	T _{5min} no Funil em V (V-Funnel at T _{5min}) GTM

Ensaio de Espalhamento pelo cone de Abrams (Slump Flow Test):

O equipamento básico é o mesmo usado para o abatimento convencional, indicado na NBR 7223 (ABNT, 1983). No entanto, o método do ensaio difere: a amostra de concreto lançada no molde não é golpeada com o soquete e quando o cone é removido a amostra espalha na placa onde estava o cone. O que se mede é o diâmetro do espalhamento do concreto (Figura 2.9). Toma-se a média entre dois diâmetros perpendiculares e exprime-se o resultado em mm.

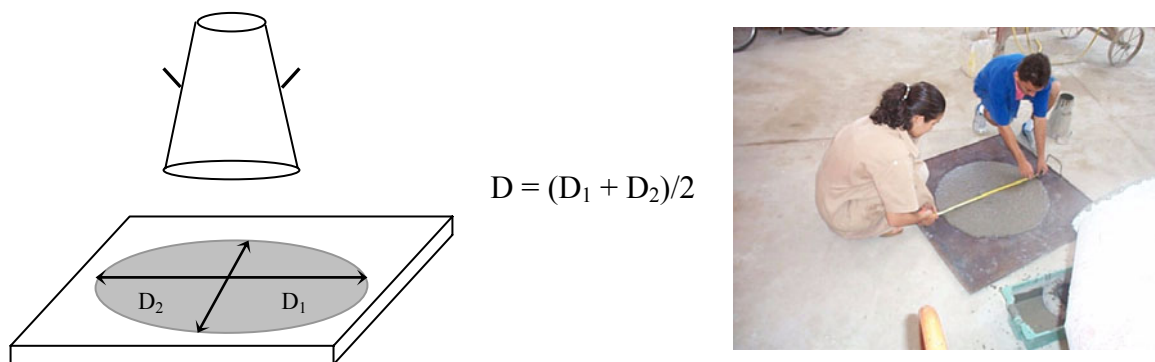


Figura 2.9 – Ensaio de espalhamento pelo cone de Abrams.

Segundo EFNARC (2002) o valor desejável para o espalhamento do CAA é um diâmetro médio, D , entre 650 e 800 mm.

O ensaio de espalhamento pode dar uma indicação da Capacidade de Preenchimento do CAA e um operador experiente também pode detectar a susceptibilidade da mistura à segregação (EFNARC, 2002). Contudo, esta informação não pode ser obtida de resultados numéricos isolados. É necessária uma experiência prévia substancial para usar o ensaio como controle durante a execução de uma construção com CAA.

O ensaio não parece ser sensível o bastante para distinguir entre misturas de CAA e concretos superplastificados, ou seja, concretos fluidos, mas não auto-adensáveis, ou aqueles propensos à segregação, os quais podem atingir valores de espalhamento entre 550mm e 750mm. Embora o ensaio seja o mais largamente usado em aplicações práticas de misturas de CAA, existe um problema adicional relativo ao tamanho do cone usado e o procedimento exato do ensaio. O mais comum é o cone com dimensões internas de 200mm de diâmetro na base, 100mm de diâmetro no topo e 300mm de altura. Cerca de 6 litros de concreto são necessários para o ensaio.

Ensaio de espalhamento pelo T_{50cm} (T_{50cm} slumpflow test)

Este ensaio é realizado conjuntamente com o anterior. Na placa onde é posto o cone de Abrams, marca-se um círculo com 50 cm de diâmetro. Retirado o cone com o concreto no seu interior, mede-se o tempo que a mistura leva para se espalhar 50cm.

EFNARC (2002) recomenda um valor alvo situado entre 2 e 5 segundos.

Ensaio do Funil em V (V-Funnel test)

Este ensaio foi desenvolvido no Japão e usado por OZAWA et al, citado por EFNARC (2002). O equipamento consiste em um funil em forma de “V” detalhado na Figura 2.10.

Com este ensaio é possível determinar a capacidade de preenchimento de concretos com diâmetro máximo do agregado igual a 20mm. São necessários cerca de 12 litros de concreto para preencher o funil, sendo medido o tempo que este material leva para ser escoado. Em seguida, pode-se preencher novamente o funil e permitir seu escoamento após quinze minutos. Caso o concreto apresente tendência à segregação, o tempo de escoamento deverá aumentar significativamente.

O valor alvo sugerido para o tempo de escoamento é de dez segundos.

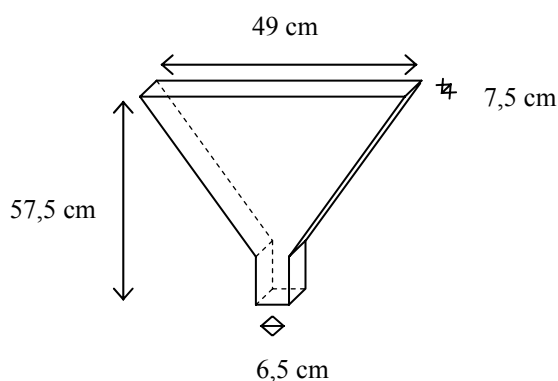


Figura 2.10 - Funil V para determinação do tempo de escoamento do concreto.

Para funis com medida da abertura igual a 6,5cm recomenda-se um tempo de escoamento de seis a dez segundos (OZAWA et all, 1994). Para funis com medida da abertura igual a 7,5cm recomenda-se um tempo de escoamento de dez a quinze segundos (SAKATA et all, 1996).

Ensaio Orimet (Orimet test)

Este ensaio, cujo equipamento é apresentado na Figura 2.11, foi desenvolvido por BARTOS em 1978 (GOMES, 2002). O ensaio consiste em determinar o tempo necessário para que dez litros de concreto escoem no interior de um cilindro vertical com 8 cm de

diâmetro. O material passa pelo funil centrado da parte inferior do cilindro. O tempo de escoamento é associado à capacidade de preenchimento do concreto. BARTOS e GRAUERS (1999), SONEBI e BARTOS (2000), citados por Gomes (2002), recomendam um valor inferior a três segundos. Já EFNARC (2002) recomenda um valor igual ou inferior a cinco segundos.

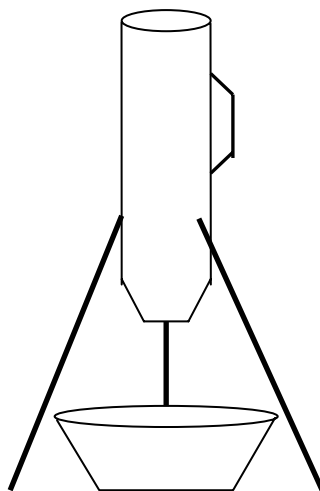


Figura 2.11 – Equipamento para ensaio Orimet.

Ensaio da Caixa de Preenchimento (Fill Box)

Este ensaio é também conhecido como *Ensaio Kajima*, e é usado para medir a capacidade de preenchimento do CAA com diâmetro máximo do agregado limitado a 20mm.

O aparelho é constituído de um container transparente com uma superfície lisa e impermeável. No container são colocados 35 (trinta e cinco) obstáculos feitos de PVC com diâmetro de 20mm e distantes 50mm de eixo a eixo. No topo é colocada uma bomba de 100mm de diâmetro e 500mm de altura, com um funil de 100mm de altura. O container é preenchido com o concreto bombeado e a diferença de altura entre os dois lados do container é medida para indicar a capacidade de preenchimento.

De acordo com EFNARC (2002) são necessários cerca de 45 litros de concreto que devem ser colocados no funil da seguinte maneira: a cada 5 (cinco) segundos adiciona-se cerca de 1,5 a 2 litros de concreto fresco no funil até que o mesmo tenha coberto o primeiro obstáculo. Quando o concreto parar de escoar, medem-se duas alturas opostas h_1 e h_2 para o cálculo da porcentagem de preenchimento:

$$P = \{(h_1 + h_2) / 2 \cdot h_1\} \cdot 100\%$$

O teste deve ser feito em 8 (oito) minutos e quanto mais próxima de 100% a porcentagem de preenchimento, melhores serão as características do CAA.

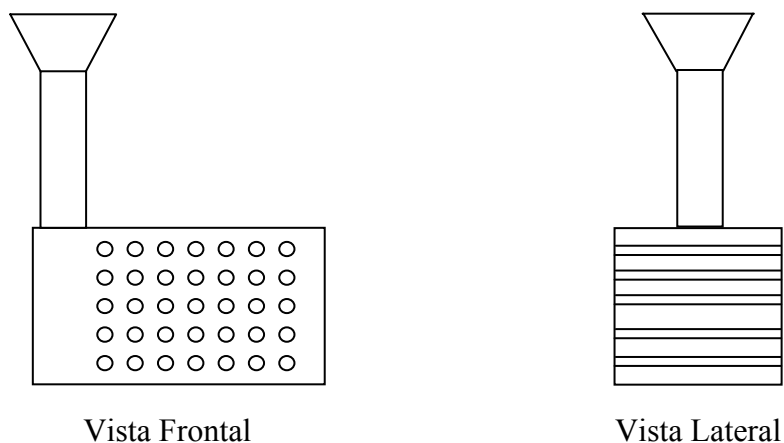


Figura 2.12 – Caixa de Preenchimento (Fill Box)

Ensaio do anel de barras de aço (J ring test)

Este ensaio é usado para determinar a capacidade de escoamento do concreto. Um anel de barras de aço com o diâmetro de 300 mm é utilizado conjuntamente com o Orimet ou com o Cone de Abrams, como mostrado na Figura 2.13. As armaduras podem apresentar diferentes diâmetros e diferentes intervalos de espaçamento, recomendando-se, segundo EFNARC (2002) três vezes a dimensão máxima do agregado.

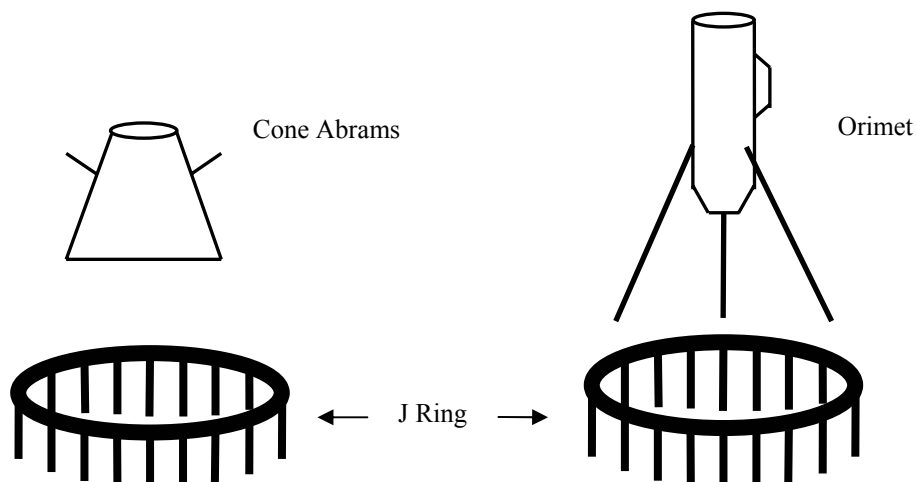


Figura 2.13 – Teste do anel de barras de aço (J Ring test) associado ao Slump e ao Orimet.

O ensaio *J ring* pode ser usado em conjunto com o *Slump Flow* ou com o *Orimet test*. Estas combinações de ensaios avaliam a capacidade de preenchimento e escoamento do concreto. O tempo encontrado no ensaio *Orimet* e/ou o espalhamento encontrado no ensaio *Slump* são medidos para fornecer as características de espalhamento. As armaduras do *J ring* podem ser fixadas de maneira a permitir maior ou menor dificuldade na passagem do concreto.

De acordo com as recomendações de EFNARC (2002) são necessários seis litros de concreto para realizar o ensaio que consiste em preencher o cone de Abrams que se encontra inserido no anel e em seguida retirá-lo permitindo o escoamento do concreto através das armaduras. São feitas duas medidas perpendiculares do diâmetro de espalhamento do concreto. Também se mede a diferença entre as alturas interna e externa do concreto no anel. Esta é uma indicação da capacidade de escoamento, ou do grau de restrição da passagem do concreto através das armaduras.

Ensaio da Caixa em L (L-Box Test):

Este método usa um aparato composto por uma seção vertical e uma calha horizontal (Figura 2.14) dentro da qual o concreto pode escoar livremente depois de passar por barras de aço colocadas na interseção das duas áreas do aparato. O tempo que o concreto leva para percorrer uma distância de 200mm (T_{20}) e 400mm (T_{40}) no interior da seção horizontal é medido, assim como a altura do concreto em ambas as extremidades, após o escoamento (H_1 e H_2) (Figura 2.15). *L-Box* de diferentes dimensões têm sido testados.

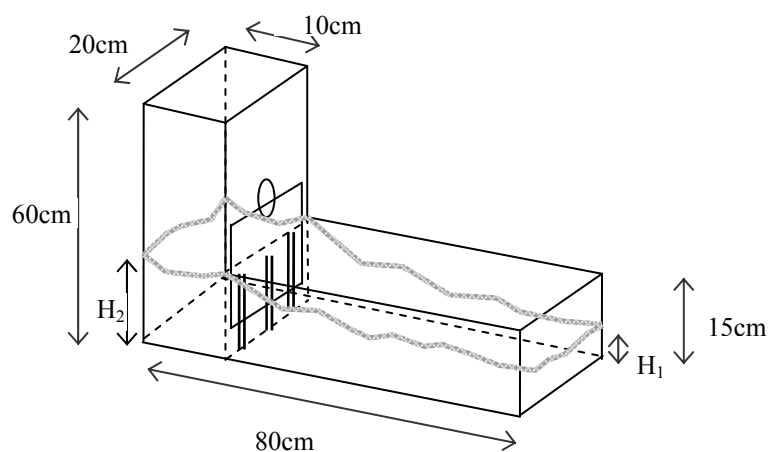


Figura 2.14 - Caixa em L.

O valor alvo segundo EFNARC (2002) é $H_1/H_2 \geq 0,8$.



Figura 2.15 – Ensaio da Caixa em L.

Ensaio da Caixa em U (U-Box)

Este ensaio foi proposto por HAYAKAWA et all (1993) citado por GOMES (2002), e é usado para avaliar a capacidade de preenchimento do CAA. O equipamento é mostrado na Figura 2.16.

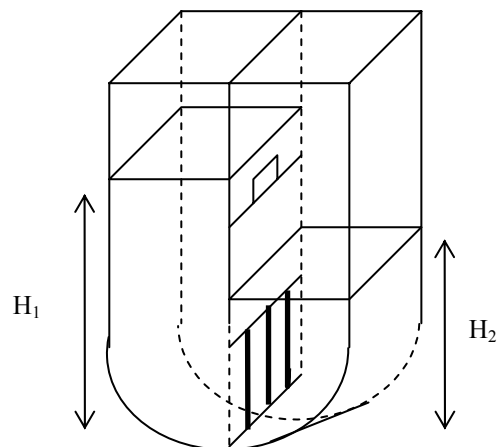


Figura 2.16 – Caixa em U (U-Box).

São necessários vinte litros de concreto para realizar este ensaio que consiste em preencher o equipamento deixando o concreto descansar por um minuto. Abrindo a portinhola em seguida, é permitido o livre escoamento do concreto. Quando o mesmo pára de escoar, faz-se a medida das alturas H_1 e H_2 . Quanto mais fluido o concreto, mais próxima de zero se tornará a relação $H_1 - H_2$.

Ensaio do T_{5min} no Funil em V (V-Funnel at T_{5min})

Este teste é feito aproveitando-se aquele descrito na página 26, usando o Funil em V. Depois da medida do primeiro escoamento, não se deve limpar o Funil ou recolher o material aderido à sua superfície interna. Após 5 minutos, preenche-se novamente o Funil, deixa-se escoar o concreto fazendo-se a medida do tempo de escoamento T_{5min} .

Para o concreto auto-adensável um tempo de escoamento próximo a 10 segundos é considerado satisfatório.

Ensaio GTM

Trata-se de um recente ensaio de medida da separação de agregados numa mistura de CAA após um período de tempo de repouso e passagem através de uma peneira. O ensaio consiste em colocar cerca de dez litros de concreto em um recipiente coberto durante quinze minutos e em seguida retirar aproximadamente dois litros da superfície. Este material é pesado (M_1), e despejado a uma altura de 50cm numa peneira de abertura # 4.8mm por onde escoar durante dois minutos. O material que passa na peneira é pesado achando-se M_2 . A razão de segregação é dada por: $(M_2/M_1) \times 100$, sendo recomendados por EFNARC (2002) valores entre 5% e 15%. Já MOURET (2001) recomenda valores entre 0% e 15%. A Figura 2.17 mostra fases do ensaio.



Figura 2.17 Ensaio GTM para avaliação da segregação.

2.4.3. Sumário dos Ensaios e Valores Desejáveis

A Tabela 2.2 apresenta um resumo com o nome dos testes e as faixas de valores de resultados desejáveis para o concreto ser um CAA.

Tabela 2.2 – Valores desejáveis para os resultados dos testes no CAA (EFNARC, 2002).

PROPRIEDADE	ENSAIO	VALORES DESEJÁVEIS
Capacidade de Preenchimento	Espalhamento pelo Cone de Abrams	650 a 800mm
	Espalhamento pelo T _{50cm}	2 a 5 s
	Funil em V (V-Funnel)	8 a 12 s
	Orimet	0 a 5 s
	Caixa de Preenchimento (Fill Box)	90 a 100%
Capacidade de Escoamento	Anel de Barras de Aço (J-ring)	0 a 10mm
	Caixa em L (L-box)	H ₁ /H ₂ = 0,8 a 1,0
	Caixa em U (U-box)	H ₁ - H ₂ = 30mm máx
	Caixa de Preenchimento (Fill Box)	90 a 100%
Resistência à Segregação	T _{5min} no Funil em V (V-Funnel at T _{5min})	> 3 s
	GTM	5 a 15%*

* MOURET (2001) sugere de zero a quinze por cento.

2.4.4. Materiais Usados no CAA

Como já anteriormente citado, os materiais que podem ser usados no CAA são os mesmos que se utilizam nos concretos convencionais modernos:

Cimento: qualquer cimento portland que obedeça às condições normativas a ele referentes. Cimento com teor de aluminato de cálcio (C_3A) maior que 10% pode diminuir o tempo em aberto, ou seja, aquele em que a trabalhabilidade se matém sem alterações significativas. Consumos típicos de cimento são da ordem de 350 a 450 kg/m^3 . Consumos mais baixos que 350 kg/m^3 requerem adições quimicamente ativas. Consumos maiores que 500 kg/m^3 podem conduzir a retrações significativas (EFNARC, 2002).

Adições: pozolanas diversas, escória de alto forno moída, pó calcário, todas com finura superior à do cimento podem ser usadas. O papel principal das adições é a retenção de água dando coesão ao CAA.

Agregado miúdo: qualquer areia que pode ser usada para fabricação do concreto convencional pode ser empregada na fabricação do CAA.

Agregado graúdo: qualquer agregado graúdo que serve para o concreto convencional é conveniente para o CAA. No entanto, sua dimensão máxima deve ser limitada, usualmente a 16-20 mm, devendo ser menor segundo a aplicação desejada. Por exemplo, na concretagem de peças finas ou com elevada densidade de armadura é conveniente se reduzir este valor para 10 mm.

Aditivos: são indicados os superplastificantes de última geração, capazes de dar muita mobilidade à mistura fresca do CAA. Também podem ser usados aditivos retardadores para permitir maior tempo em aberto, ou seja, o concreto permanecer fluido por mais tempo. Onde há problemas de gelo e degelo, incorporadores de ar podem ser adicionados. Também se pode fazer uso de Agentes Modificadores de Viscosidade, o que permitiria uma redução da quantidade de adições.

2.5. METODOLOGIAS PARA OBTENÇÃO DO CAA

Não é tão simples a obtenção de concretos auto-adensáveis. Embora já se tenham estabelecido alguns ensaios para controle das propriedades do CAA, encontram-se ainda na

literatura variações e discrepâncias sobre o assunto. Até sobre a definição do próprio material de base há conflitos. Por exemplo, o EFNARC (2002) considera como agregado miúdo apenas a fração entre 0,125 mm e 4 mm. Já MARQUARDT et all (2001) e KONIQ et all (2001) consideram que este seja constituído pela fração entre 0 e 2 mm. GOMES (2002) toma para agregado miúdo as partículas entre 0 e 5 mm. Como um dos parâmetros importantes no CAA é justamente a relação agregado miúdo/agregado graúdo (ou então a relação inversa pedra/areia) fica difícil obter consenso entre dados da literatura.

No Brasil, comumente o agregado miúdo é considerado aquele de partículas entre 0,075 mm e 4,8 mm, muitas vezes não se considerando o limite inferior. Vê-se, pois, a dificuldade de homogeneização da linguagem.

A seguir apresentam-se, resumidamente, duas metodologias usadas para a preparação do CAA. A primeira do EFNARC (2002); a segunda, a utilizada por GOMES (2002) com intuito de obter concretos auto-adensáveis de alta resistência.

2.5.1. Metodologia do EFNARC

2.5.1.1. Considerações Iniciais

O procedimento do EFNARC (2002) para dosagem de CAA tem como base o método proposto por OKAMURA (1997) e obedece à seqüência:

- a) fixação de um teor de ar incorporado;
- b) determinação do volume de agregado graúdo;
- c) determinação do consumo de areia;
- d) projeto de composição da pasta;
- e) determinação da relação ótima água/finos e teor de superplastificante na argamassa;
- f) obtenção das propriedades do concreto através de ensaios.

Para se obter um CAA, alguns parâmetros de base devem ser considerados. Recomenda-se que:

- o consumo de cimento esteja entre 350 e 450 kg/m³;
- o volume de agregado graúdo esteja entre 280 e 350 dm³/m³;

- a relação volumétrica água/finos seja de 0,80 a 1, 10;
- o volume total de finos seja de 160 a 240 dm³/m³;
- o volume total de água não exceda 200 l/m³;
- o volume de pasta seja de no mínimo 400 dm³/m³;
- a relação volumétrica areia/pasta seja de no máximo 0,5;
- a relação volumétrica areia/argamassa esteja entre 0,40 e 0,50.

Segundo EFNARC:

- *Finos* são todas as partículas inferiores a 0,125 mm: cimento, adições e finos da areia.
- *Agregado miúdo*, ou *areia*, é a fração de agregados entre 0,125 mm e 4 mm
- *Agregado graúdo*, ou *pedra*, é a parcela de agregado de dimensão superior a 4 mm
- *Pasta* é o componente do traço constituído por finos, água, ar mais o superplastificante
- *Argamassa* é a pasta mais a areia

Interessante comentar que o próprio EFNARC (2002) indica que podem resultar alguns parâmetros que podem não obedecer aos limites citados no início deste item.

Resumidamente pode-se dizer que:

- a) o teor de ar incorporado pode ser estabelecido em 2%; ou seja, o volume de ar pode ser tomado igual a 20 dm³/m³;
- b) o consumo de agregado graúdo deve ser em torno de 50-60% do agregado total;

Quando o volume de agregado graúdo no concreto excede um certo limite, cresce a probabilidade de colisão e contato entre suas partículas, o que aumenta o risco de bloqueio quando o concreto passa através dos espaços entre as barras de armadura. Daí a limitação acima.

O volume ótimo de agregado graúdo depende de:

- diâmetro máximo do agregado: menor dimensão máxima, maior volume tolerado;
 - forma do agregado: seixos rolados permitem maior volume em relação à pedra britada;
- c) o volume de areia na argamassa deve estar entre 40% e 50%;

A determinação do volume de areia pode ser feita a partir da relação pedra/areia, uma vez fixado o volume da pedra e a partir daí o seu consumo.

d) a composição da pasta é estabelecida através de ensaios

Para se escolher a pasta conveniente, faz-se uso do ensaio de espalhamento relativo, $\Gamma_{p/m}$. É empregado o cone com as dimensões indicadas na Figura 2.18 (cujo volume é cerca de 0,34 litros), no qual coloca-se pasta até enchê-lo. Retirado o cone, a pasta esco. Medem-se dois diâmetros perpendiculares e acha-se o valor médio:

$$d = \frac{1}{2} \cdot (d_1 + d_2) \text{ em mm.}$$

A partir dele define-se então o espalhamento relativo por:

$$\Gamma_{p/m} = \left(\frac{d}{d_0} \right)^2 - 1 \quad \text{onde } d_0 = 100\text{mm.}$$

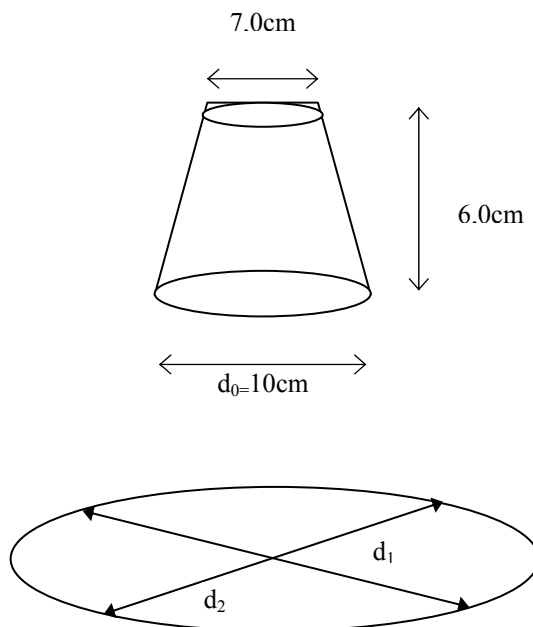


Figura 2.18 – Dimensões do cone e do espalhamento relativo da pasta.

Fixada uma proporção adição-cimento, procede-se ao ensaio variando-se a relação volumétrica água/finos em 1,1; 1,2; 1,3 e 1,4, obtendo-se os espalhamentos relativos, $\Gamma_{p/m}$.

Com os resultados obtidos, plota-se um gráfico como o ilustrado da Figura 2.19, cujo ponto de intersecção com o eixo y é chamado β_p . Portanto β_p é o valor da relação água/finos que daria um abatimento relativo nulo para a pasta.

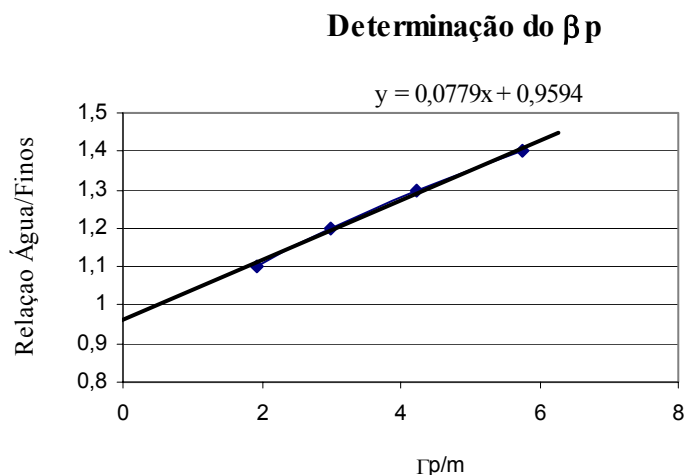


Figura 2.19 – Gráfico para determinação do valor de β_p .

O valor de β_p encontrado é geralmente usado para controle da demanda de água em novos grupos de cimento e fillers. Uma vez obtida a relação água/finos teoricamente ideal para a pasta adotada, β_p , parte-se para ajustar a argamassa.

- e) determinação da relação ótima água/finos e da dosagem de superplastificante na argamassa
- f) A argamassa é constituída pela pasta e areia. É, pois, necessário novo ajuste da água. Usa-se agora o Funil-V ilustrado na Figura 2.20 além do cone já apresentado na Figura 2.18. Faz-se variar a relação água/finos na proporção de $[0,8-1,0] \beta_p$ e a dosagem de superplastificante. O volume de areia na argamassa permanece constante.

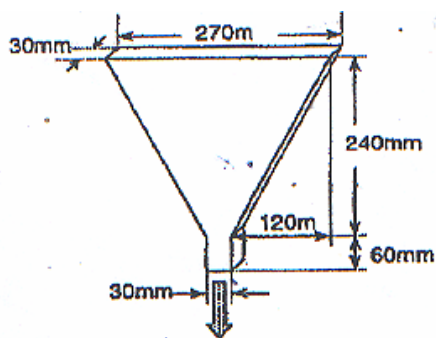


Figura 2.20 – Funil em V para ajuste da argamassa.

O ensaio consiste em se preencher o funil com argamassa e medir o tempo de escoamento, que deve estar entre 07 e 11 segundos. Faz-se também o teste de espalhamento com o cone da Figura 2.18 e o diâmetro médio deve estar entre 24 e 26cm.

Se o espalhamento no ensaio com o cone é satisfatório e o valor de escoamento é inferior a 7 segundos, no Funil V, aconselha-se diminuir a relação água/finos. Se o valor de escoamento for superior a 11 segundos, aconselha-se aumentar a relação água/finos.

Caso não seja possível conciliar os dois resultados, então a combinação dos materiais em questão é inadequada. Sugere-se então uma tentativa com um superplastificante diferente. Uma segunda alternativa seria uma nova adição, e como último recurso, um cimento diferente.

a) obtenção das propriedades do concreto através de ensaios

Seguidos os passos anteriores, procede-se aos ensaios apresentados para se verificar se o concreto obtido apresenta as propriedades de preenchimento, de escoamento e adequada resistência à segregação.

2.6. MÉTODO DE GOMES (2002)

Esse método de projeto assume que o concreto é um material bi-fásico, formado por pasta e agregado, e esta hipótese foi utilizada por SU et al (2001) e SAAK et al (2001) para obter CAA de resistência normal. GOMES (2002) procurou desenvolver um concreto auto-adensável de alta resistência CAAR, admitindo que ele pode ser obtido pela otimização em separado da composição da pasta e do esqueleto granular formado pelos agregados, o que sugere que a viscosidade e fluidez da pasta governam as propriedades de movimentação e escoamento do concreto sob seu próprio peso.

Otimização da composição da pasta

A otimização da pasta consiste em se achar a melhor relação adição/cimento (ad/c) e o ponto de saturação de superplastificante em relação à massa de cimento (sp/c(%)) para uma determinada relação água/cimento (a/c).

A relação a/c é fixada em função da resistência desejada. A reologia da pasta é controlada pelo teor de superplastificante, para cada ad/c empregada.

O Funil de Marsh e o teste do minicone (descritos em 2.2.2) são usados para controle da pasta. É considerado o teor de sólidos do aditivo.

Os passos adotados podem ser:

- fixar a/c;
- adotar diversas relações adição/cimento: (ad/c)1, (ad/c)2, (ad/c)3, etc;
- preparar as pastas com cada uma delas separadamente, fazendo-se variar o teor de SP, para se obter o ponto de saturação, chegando-se a um gráfico como o da Figura 2.21:

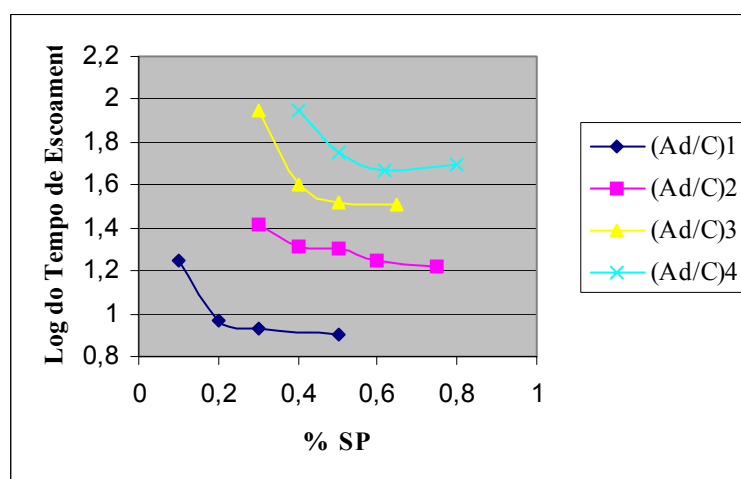


Figura 2.21 – Ponto de saturação para pastas com diferentes relações Ad/C.

- para cada pasta com porcentagem de aditivo correspondente ao ponto de saturação procede-se ao ensaio do mini-cone. Considera-se a melhor relação ad/c como sendo aquela que conduz a um espalhamento de diâmetro $d = 180 \pm 10$ mm e o tempo para atingir o espalhamento com diâmetro correspondente a 115mm (T_{115}) entre 2 e 5s.

O mini-cone em questão é o indicado na Figura 2.1 do item 2.2.2.

Otimização da composição do agregado

A obtenção da relação pedra/areia pode ser achada através do ensaio de massa unitária no estado solto (MU).

São feitas diversas misturas de agregados graúdos e miúdos, obtendo-se um gráfico semelhante ao mostrado na Figura 2.22.

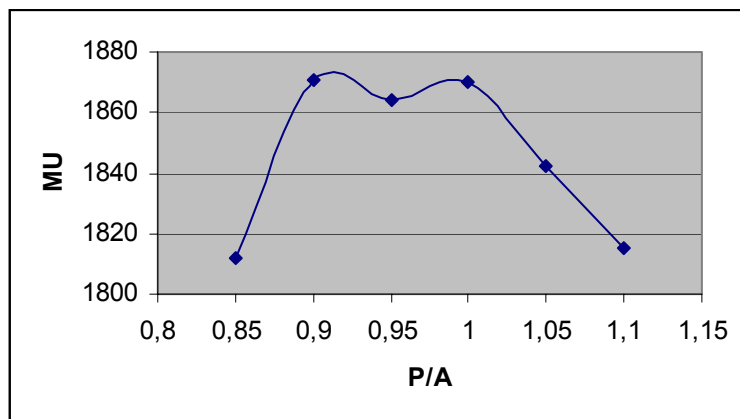


Figura 2.22 – Massa unitária dos agregados (MU) em kg/m^3 em função da relação pedra/areia (P/A).

No ponto onde MU é máxima tem-se a maior compactidade e o menor teor de vazios.

Recomenda-se que o ensaio seja feito mais de uma vez para se ter um valor médio.

Definição da composição do concreto:

Conhecida a composição da pasta e a relação entre os agregados graúdo e miúdo, resta a definir o volume de pasta necessária.

Faz-se então variar o volume de pasta, verificando-se as propriedades no estado fresco através dos ensaios:

- espalhamento pelo cone de Abrams;
- funil em V;
- caixa em L;
- tubo em U, sendo este último ensaio usado para avaliação da resistência à segregação, conforme descrito em GOMES (2002).

A composição ideal seria aquela que atendesse aos parâmetros e apresentasse o menor volume de pasta requerido.

2.7. ALGUNS TRABALHOS FEITOS SOBRE CAA

FORNASIER, FAVA e ZITZER (2001) realizaram a primeira experiência de CAA na Argentina. Dois tipos de mistura foram estudados: uma com aditivo para aumentar a viscosidade e outra com filler calcário. Utilizou-se o Cone de Marsh para verificação da compatibilidade do cimento com o superplastificante. Foi feito o estudo das propriedades reológicas do concreto através dos ensaios: Slump Flow (68 e 67cm), L-Box Test ($H_1/H_2 = 0,93$ e $0,96$), V-Funnel Time (7,8 e 7s). Ambas as misturas foram executadas em escala industrial numa central de concreto onde duas paredes experimentais foram construídas. Para avaliar a homogeneidade do concreto in situ, foram extraídos testemunhos para verificação da resistência.

RIBEIRO e GONÇALVES (2001) desenvolveram um estudo em Portugal onde foi feita uma análise sobre a possibilidade de se obter um CAA com baixo custo. Para tanto foram usados baixo teor de cimento e alta dosagem de adições minerais, incorporando baixo consumo de superplastificante e maior volume de água. Foi feita uma mistura de CAA, suas propriedades no estado fresco foram obtidas através de diversos ensaios: Slump Flow (72cm), L-Box ($H_1 = 50,6$ cm), V-Funnel (6s). Foram moldados corpos de prova para análise das propriedades no estado endurecido. O custo desta mistura foi comparado com o custo de um concreto convencional com resistência similar resultando num CAA com custo de 40,95 Euros contra 39,32 Euros do concreto convencional.

JANSSON, OMARI e WIRJE (2001) estudaram um novo conceito para garantir estabilidade na reologia do CAA permitindo uma redução no consumo de cimento. Com a incorporação de Sílica Coloidal Modificada (MCS) na mistura do CAA é possível reduzir consideravelmente o teor de finos. Foram executadas 4 misturas diferentes, das quais, 2 receberam MCS, e evidenciaram uma redução de 15% no consumo de aglomerante e 20% no consumo dos demais finos, sem qualquer segregação ou exsudação. O concreto resultante apresentou propriedades estáveis no estado fresco, que foram obtidas através dos ensaios: Slump Flow (≈ 69 cm) e V-Funnel (M_1 e $M_2 = 12$ s contra $M_3 = 4$ s e $M_4 = 9$ s).

GOMES, GETTU e BERNAD (2001) desenvolveram um concreto de Alta Resistência Auto-Adensável usando um processo de otimização. O concreto é considerado um material bi-fásico, constituído da pasta e do esqueleto sólido composto pelos agregados, cada fase sendo otimizada individualmente.

CAPÍTULO III - MATERIAIS

3.1. MATERIAIS

3.1.1. Cimento

Foram usados cimentos das três marcas disponíveis no mercado de João Pessoa, aqui chamadas de A, B e C. Trata-se de cimentos compostos tipo CPII-F 32, que têm entre 6% e 10 % de pó calcário como adição e resistência mínima de 32 MPa aos 28 dias.

3.1.2. Adições

Foram empregadas como adições:

- a) pozolana (ALVES, 2002) obtida por moagem e peneiramento de resíduos de tijolos de barro que se quebram durante o processo de fabricação (Figura 3.1).



Figura 3.1 – Pozolana obtida de resíduos de blocos cerâmicos

b) Pó calcário

Obtido da moagem de pedra calcária, foi doado pelas empresas POLIMASSA (Fabricante de argamassas industrializadas) e pela CIMEPAR (fabricante do cimento Zebu, do grupo CIMPOR) ambas atuantes em João Pessoa - PB. A Figura 3.2 mostra o aspecto dessa adição.



Figura 3.2 – Pó calcário empregado

3.1.3. Agregados

Os agregados miúdo e graúdo foram obtidos por peneiramento de um material quartzoso local. Trata-se de uma jazida nas vizinhanças do Rio Caxitu, próximo a João Pessoa, que apresenta grãos desde os mais finos até seixos rolados de mais de 20 mm de diâmetro.

O agregado miúdo, areia, foi obtido separando-se a fração que passa na peneira 4,8 mm.

O agregado graúdo foi constituído por seixos rolados passando na peneira # 10mm e retidos na # 4,8mm. A Figura 3.3 mostra as duas frações após o peneiramento.



Figura 3.3 – Agregado graúdo e agregado miúdo

3.1.4. Aditivos

Neste trabalho foram testados 4 aditivos superplastificantes (ou tipo SP) e um aditivo retardador de pega (tipo R).

No início da pesquisa foram usados três superplastificantes aqui chamados SP1, SP2 e SP3, e um retardador, R. SP1 é à base de naftaleno sulfonado. SP2 e SP3 são à base de melanina sulfonada. Posteriormente passou-se a empregar um aditivo superplastificante de última geração com base em uma cadeia de éter carboxílico modificado, indicado por SP4. Apenas este último tinha o teor de sólido indicado, daí porquê as referências nos ensaios são feitas em relação à porcentagem em massa do aditivo (água+sólidos), considerando-se a massa específica, esta sim, indicada nos catálogos.

O teor de sólidos do SP4 é em torno de 30%.

CAPÍTULO IV - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.1. INTRODUÇÃO

Neste capítulo apresenta-se a metodologia adotada na parte experimental deste trabalho, tendo como base as recomendações do EFNARC (2002).

Os principais passos do procedimento adotado foram:

- caracterização dos materiais
- verificação da compatibilidade do cimento com o superplastificante;
- obtenção de uma dosagem inicial que obedeça a certas relações entre os diversos componentes do concreto;
- ajuste da relação água/finos;
- ajuste da argamassa introduzindo-se o superplastificante;
- ajuste final do traço no próprio concreto fresco;
- obtenção das características mecânicas do concreto endurecido.

4.2. CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

O módulo de finura e a dimensão máxima dos agregados foram obtidos através do ensaio de granulometria descrito na NBR 7217 (ABNT, 1987 a).

A massa unitária do agregado graúdo em estado solto foi obtida conforme a NBR 7251 (ABNT, 1987 b).

A massa específica do agregado graúdo foi obtida através do ensaio Método da Proveta.

A massa específica do agregado miúdo foi obtida pelo Método do Frasco de Chapman conforme NBR 9776 (ABNT, 1987 c).

A massa específica do cimento e das adições foram obtidas segundo a NBR 7212 (ABNT, 1997).

4.3. VERIFICAÇÃO DA COMPATIBILIDADE DO CIMENTO COM O SUPERPLASTIFICANTE E OBTENÇÃO DO PONTO DE SATURAÇÃO

A verificação da compatibilidade das três marcas de cimento e dos três tipos de superplastificantes e os respectivos pontos de saturação foi feita conforme descrito no item 2.2.2 do Capítulo II.

4.4. OBTENÇÃO DE UMA DOSAGEM INICIAL

Com base nos parâmetros sugeridos pelo EFNARC (2002) indicados no item 2.5.1.1 (pág. 34), foi desenvolvido um método para a obtenção dos componentes do traço e seu proporcionamento. Nele, procura-se obter o volume de finos necessário a completar o volume final dos componentes, sendo daí que se obtém a quantidade de adições.

4.4.1. Considerações Iniciais

No processo de dosagem do CAA convém considerar a proporção relativa dos materiais em volume. Assim, em 1 m³ de concreto tem-se:

$$V_C + V_{Ad} + V_A + V_P + V_{Adit} + V_{Ag1} + V_{Ar} = 1000 \text{ dm}^3 \quad (4.1)$$

com:

V_C = volume de cimento em dm³/m³ de concreto

V_{Ad} = volume de adição em dm³/m³ de concreto

V_A = volume de areia (incluindo seus finos) em dm³/m³ de concreto

V_{Adit} = volume de aditivo (incluindo sólidos e água) em dm³/m³ de concreto

V_{Ag1} = volume de água a adicionar na mistura em dm³/m³ de concreto

V_{Ar} = volume de ar incorporado

Se γ é a massa específica de um material qualquer, componente do concreto, a massa de cada componente por m³ de concreto fresco (aqui chamada consumo) vai ser dada por:

$$C = \gamma \cdot V \quad (4.2)$$

Assim, é necessário conhecer-se a massa específica (γ) de todos os componentes.

Então:

$$\frac{C}{\gamma_C} + \frac{Ad}{\gamma_{Ad}} + \frac{A}{\gamma_A} + \frac{P}{\gamma_P} + \frac{Ag}{\gamma_{Ag}1} + \frac{Adt}{\gamma_{Adt}} + V_{Ar} = 1000dm^3 \quad (4.3)$$

onde:

- C = consumo de cimento em kg por m³ de concreto
- Ad = consumo de adições em kg por m³ de concreto
- A = consumo de areia em kg por m³ de concreto
- P = consumo de pedra em kg por m³ de concreto
- Ag = consumo de água em kg por m³ de concreto
- Adt = consumo de aditivo em kg por m³ de concreto
- γ_C = massa específica real do cimento em kg por m³
- γ_{Ad} = massa específica real da adição em kg por m³
- γ_A = massa específica real da areia em kg por m³
- γ_P = massa específica real da pedra em kg por m³
- γ_{Ag} = massa específica da água (igual a 1 kg por m³)
- γ_{Adt} = massa específica do aditivo em kg por m³
- V_{ar} = volume de ar, aprisionado e/ou incorporado por aditivos, em dm³ por m³ de concreto.

A areia foi dividida em dois componentes: a areia propriamente dita, e a parte de menor dimensão que vai fazer parte dos finos.

$$A = \text{Areia1} + \text{Areia2}$$

Areia1: partículas maiores que 0,125mm e menores que 4,8 mm

Areia2: partículas menores que 0,125 (finos da areia)

A água foi considerada composta por duas partes:

$$Ag = \text{Água1} + \text{Água2}$$

Água1 = Água a adicionar na mistura

Água2 = Água presente no aditivo

O aditivo por sua vez foi admitido ser formado por água mais partículas sólidas

$$\text{Adit} = \text{Água2} + \text{Sólido}$$

Sólido = massa de sólido no aditivo

4.4.2. Mecanismo de Obtenção dos Componentes do Traço

Com base no que segue foi feito um programa em linguagem basic para obtenção do traço inicial de CAA, considerando que:

a) são conhecidos os seguintes parâmetros:

- massa específica de todos os materiais
- percentagem de finos da areia
- teor de sólidos do aditivo
- ponto de saturação do aditivo

b) são fixados os parâmetros:

- teor de ar incorporado (entre 2 e 4%)
- consumo de cimento desejado, C em kg/m³
- teor de aditivos igual ao correspondente ao ponto de saturação

c) são deixados como parâmetro de entrada:

- volume de pedra (entre 280 e 340 dm³/m³)
- relação pedra/areia (menor que 1,0)
- relação água/finos (entre 0,80 e 1,00)

O procedimento do que foi programado é, pois, o que segue (tudo se refere a um m³ de concreto, assim os volumes são expressos em dm³/m³ e os consumos em kg/m³):

1) Arbitrado um teor de ar incorporado de %Ar, o volume de ar é:

$$V_{Ar} = \%Ar \times 1000 \quad (4.4)$$

2) Admitido o consumo de cimento C, seu volume vai ser:

$$V_C = C/\gamma_c \quad (4.5)$$

3) O consumo de aditivo com base no ponto de saturação vai ser:

$$C_{Adit} = \%Adit \times C/100 \quad (4.6)$$

Com %Adit correspondendo ao ponto de saturação, sendo um dado de entrada do programa.

Assim, o volume de aditivo é:

$$V_{\text{Adt}} = C_{\text{Adt}}/\gamma_{\text{Adt}} \quad (4.7)$$

Se a percentagem do volume de sólidos do aditivo é $\%V_{\text{solAdit}}$, então:

$$V_{\text{solAdit}} = \%V_{\text{solAdit}} \times V_{\text{Adit}}/100 \quad (4.8)$$

e o volume de água existente no aditivo é:

$$V_{\text{Ag2}} = V_{\text{Adit}} - V_{\text{solAdit}} \quad (4.9)$$

4) O volume de Pedra, V_P , recomendado entre 280 a 350 dm^3/m^3 , é um dado de entrada. Pode-se fixar V_P e o consumo de pedra será:

$$C_P = V_P/\gamma_P \quad (4.10)$$

5) Com a relação pedra/areia, (RPA) que também é um dado de entrada, pode ser encontrado o consumo de areia (sem a parcela dos finos):

$$C_{\text{Areia1}} = C_P/\text{RPA} \quad (4.11)$$

Então, conhecida a percentagem de finos da areia ($\%FA$), o consumo de areia total vai ser:

$$C_{\text{Areia}} = C_{\text{Areia1}}/(1 - \%FA/100) \quad (4.12)$$

Daí a massa de finos da areia ser:

$$C_{\text{Areia2}} = C_{\text{Areia}} - C_{\text{Areia1}} \quad (4.13)$$

Os volumes desses componentes, admitindo-se a mesma massa específica para a parte fina são:

$$V_{\text{Areia1}} = C_{\text{Areia1}} \times \gamma_A \quad (4.14)$$

$$V_{\text{Areia2}} = C_{\text{Areia2}} \times \gamma_A \quad (4.15)$$

$$V_{\text{Areia}} = V_{\text{Areia1}} + V_{\text{Areia2}} \quad (4.16)$$

6) Determinação dos volumes e consumo de adições e de água

São obtidos por diferença:

$$V_{\text{Ad}} + V_{\text{Ag1}} = 1000 - V_C - V_{\text{Areia}} - V_P - V_{\text{Adit}} - V_A \quad (4.17)$$

Como:

$$V_{Adit} = V_{solAdit} + V_{Ag2} \quad (4.18)$$

vem:

$$V_{Ad} + V_{Ag} = 1000 - V_C - V_{Areia1} - V_{Areia2} - V_P - V_{solAdt} - V_{Ar} \quad (4.19)$$

Daí:

$$V_{Ad} + V_{Areia2} + V_C + V_{Ag} = 1000 - V_{Areia1} - V_P - V_{solAdt} - V_{Ar} = V_{AA} \quad (4.20)$$

Como:

$$V_{Ad} + V_{Areia2} + V_C = V_{Finos} \quad (4.21)$$

Pode-se fazer:

$$V_{Finos} + V_{Ag} = V_{AA} \quad (4.22)$$

Adotando-se uma relação volumétrica entre a água e os finos (RAF entre 0,8 e 1,0):

$$RAF = V_{Ag} / V_{Finos} \quad (4.23)$$

Então:

$$V_{Ag} = RAF \times V_{Finos} \quad (4.24)$$

Substituindo na equação (4.22):

$$V_{Finos} + RAF \times V_{Finos} = V_{AA} \quad (4.25)$$

daí:

$$V_{Finos} = V_{AA} / (1 + RAF) \quad (4.26)$$

Logo, de (4.21), obtém-se o volume de adições:

$$V_{Ad} = V_{Finos} - V_C - V_{Areia2} \quad (4.27)$$

e o consumo de adições é:

$$C_{Ad} = V_{Ad} / \gamma_{Ad} \quad (4.28)$$

Finalmente obtém-se o volume e consumo de água total, que numericamente coincidem:

$$V_{Ag} = V_{AA} - V_{Finos} \quad (4.29)$$

$$C_{Ag} = V_{Ag} \quad (4.30)$$

Volume de água a adicionar na mistura é obtido descontando-se a água presente nos agregados:

$$V_{Ag1} = V_{Ag} - V_{Ag2} \quad (4.31)$$

4.4.3. Traço Unitário em Massa

Obtidos todos os componentes por metro cúbico de concreto, pode-se então obter o traço inicial.

$$1 : \frac{C_{Ad}}{C} : \frac{C_A}{C} : \frac{C_P}{C} : \frac{Ag}{C} \quad (4.32)$$

4.4.4. Verificações Preliminares

Antes de passar a fazer a mistura experimental verifica-se se os principais parâmetros indicados pelo EFNARC (2002) são satisfeitos.

Assim é necessário saber-se os volumes de pasta e de argamassa presentes no traço.

$$V_{Pasta} = V_C + V_{Ad} + V_{FA} + V_{Adit} + V_{Ag} + V_{Ar} \quad (4.33)$$

$$V_{Argamassa} = V_{Pasta} + V_{Ar} \quad (4.34)$$

Verifica-se se:

- Volume de água $\leq 200 \text{ dm}^3/\text{m}^3$
- Volume de finos entre 160 e $240 \text{ dm}^3/\text{m}^3$
- Volume de pasta $> 400 \text{ dm}^3/\text{m}^3$
- Relação areia/pasta $< 0,5$

Se os parâmetros estiverem satisfeitos pode-se passar ao passo seguinte de otimização da pasta com ajuste da relação água/finos e da argamassa. Se não, convém fazer nova tentativa, modificando-se os parâmetros de entrada.

4.4.5. Massa Específica do Concreto Fresco

Somando-se o consumo por metro cúbico de todos os componentes, obtém-se a massa específica do concreto fresco:

$$MECF = C + C_{Ad} + C_{Areia} + C_P + C_{Adt} + C_{Ag1} \quad (4.35)$$

4.5. AJUSTE DA RELAÇÃO ÁGUA-FINOS

A partir do traço inicial, tira-se o quantitativo dos componentes principais da pasta: Cimento, Adição, Finos da Areia e Água. Misturando-se esses materiais na proporção indicada no traço (eq. 4.32), procede-se então aos ensaios de espalhamento relativo da pasta, conforme descrito no item 2.5.1.1 do Capítulo II, página 34, para se obter a quantidade de água mais conveniente para a pasta em questão.

4.6. DETERMINAÇÃO DO TEOR ÓTIMO DE SUPERPLASTIFICANTE NA ARGAMASSA

A argamassa é composta pela pasta mais a areia. Usando-se a proporção dos materiais obtida no traço inicial, utiliza-se o procedimento descrito no capítulo II item 2.5.1.1. (página 34) para estabelecer o teor ótimo de superplastificante. Com ele, e com a nova relação água/finos, volta-se ao programa com a informação do teor de superplastificante e da nova relação água/finos, para obtenção de novos quantitativos dos materiais.

4.7. OBTENÇÃO DAS PROPRIEDADES DO CONCRETO FRESCO ATRAVÉS DE ENSAIOS

Com os quantitativos dos materiais procede-se à mistura experimental, para verificar capacidade de preenchimento, capacidade de escoamento e resistência à segregação. Foram usados os teste de:

- Espalhamento e T_{50} pelo Cone de Abrams – Capacidade de Preenchimento;
- Caixa em L – Capacidade de Escoamento;
- GTM – Resistência à Segregação.

4.8. VERIFICAÇÃO DA RESISTÊNCIA À COMPRESSÃO DO CONCRETO ENDURECIDO

A resistência à compressão do concreto foi obtida pelo ensaio de corpos de prova cilíndricos de dimensão 10 cm x 20 cm aos 7 e 28 dias (NBR 9739, ABNT, 1994). Os corpos de prova foram moldados sem adensamento.

CAPÍTULO V - APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

A seguir, mostram-se e discutem-se os resultados da parte experimental deste trabalho.

5.1. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

Agregados

A Tabela 5.1 apresenta os resultados dos ensaios de caracterização dos agregados empregados.

Tabela 5.1 – Caracterização dos agregados

Ensaio	Agregado Graúdo	Agregado Miúdo
Massa Específica γ (g/cm ³)	2,65	2,65
Massa Unitária γ (g/cm ³)	1,49	1,66
Absorção (%)	0,21	0,1
Diâmetro Máximo (mm)	10	4,8
Módulo de Finura	-	2,3

A Tabela 5.2 mostra a distribuição granulométrica do agregado miúdo. Pode-se ver que cerca de 17% das partículas passa na malha 0,15 mm e cerca de 11 % são menores que 0,106 mm. Pelo critério da EFNARC (2002), que considera como parte dos finos partículas de dimensões inferiores a 0,125 mm, essa areia vai ter então cerca de 12 % a 13 % de finos. Na consideração do teor de finos no CAA foi assumido que a areia apresenta 12% de pó.

Tabela 5.2 – Análise granulométrica da areia empregada

Peneiras (mm)	Peso retido (g)	Porcentagem retida (%)	Porcentagem retida acumulada (%)
4,80	0	0	0
2,40	121,90	12,19	12
1,20	134,10	13,41	25
0,60	157,7	15,77	41
0,30	221,2	22,12	63
0,15	204,00	20,40	83
0,106	58,40	5,84	89
0,075	50,5	5,05	94
Resíduo	52,2	5,22	-
Total	1000,00	100,00	

Na Figura 5.1 tem-se a curva granulométrica da areia em discussão. Vê-se que ela encontra-se fora da faixa comumente desejada para um agregado miúdo usado para fabricação de concreto convencional.

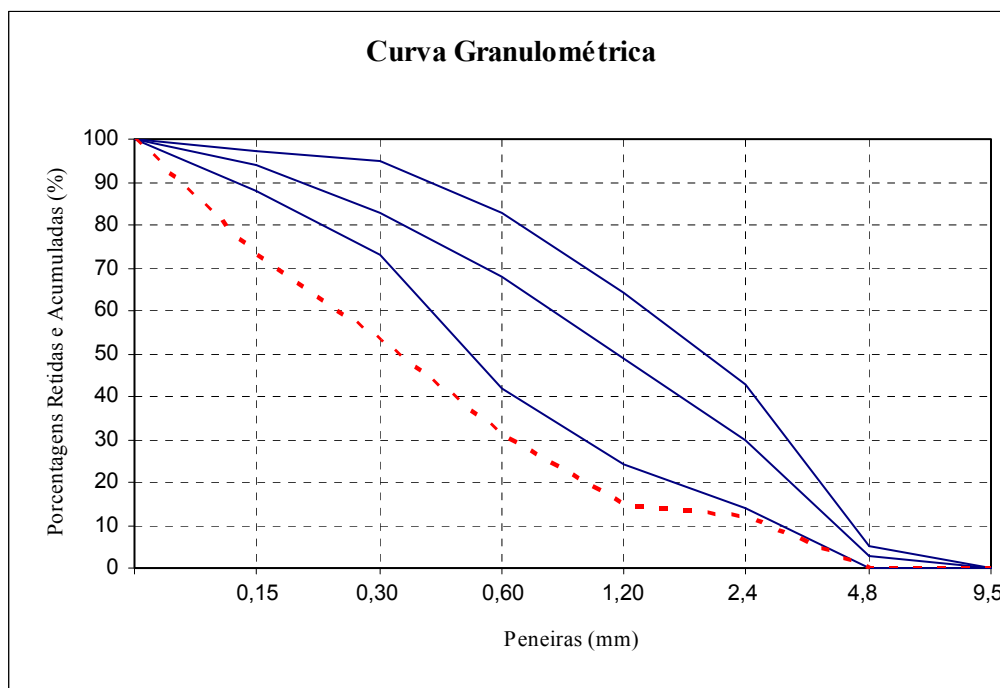


Figura 5.1 – Curva Granulométrica do Agregado Miúdo

Cimento e adições

Para se comparar o tamanho dos grãos das adições com o dos grãos do cimento, foi feito o ensaio de peneiramento cujos resultados estão na Tabela 5.3. Também se indica a massa específica desses três materiais.

Tabela 5.3 – Propriedades físicas do cimento e das adições

	Cimento	Pó calcário	Pozolana
% retida na #100 (0,149 mm)	0	1,5	0,6
% retida na #200 (0,074 mm)	4,2	18,6	4,4
% retida na #325 (0,045mm)	48,1	81,2	65,8
% de partículas menores que 0,045mm	51,9	18,8	34,2
Massa específica g/cm ³	3,15	2,72	2,78

Vê-se que o pó calcário apresenta grãos de maior tamanho que o cimento e que os resíduos pozolânicos. O cimento utilizado apresentou mais de metade das partículas menores que 0,045 mm enquanto a pozolana teve cerca de 34 % de seus grãos passando nessa malha e o pó calcário 18,8%.

Nota-se também que a massa específica das adições é um pouco inferior à do cimento.

5.2. COMPATIBILIDADE DOS ADITIVOS COM OS CIMENTOS

Antes de se escolher o aditivo, foram testados quatro tipos de superplastificantes SP1, SP2, SP3, SP4, e uma combinação com retardador, SP1 e R, e três marcas do mesmo tipo de cimento (CPII F) A, B e C.

A Figura 5.2 mostra o efeito das marcas de superplastificante SP1, SP1 e RP, SP2, SP3, mantida fixa a marca de cimento, sobre o Ponto de Saturação.

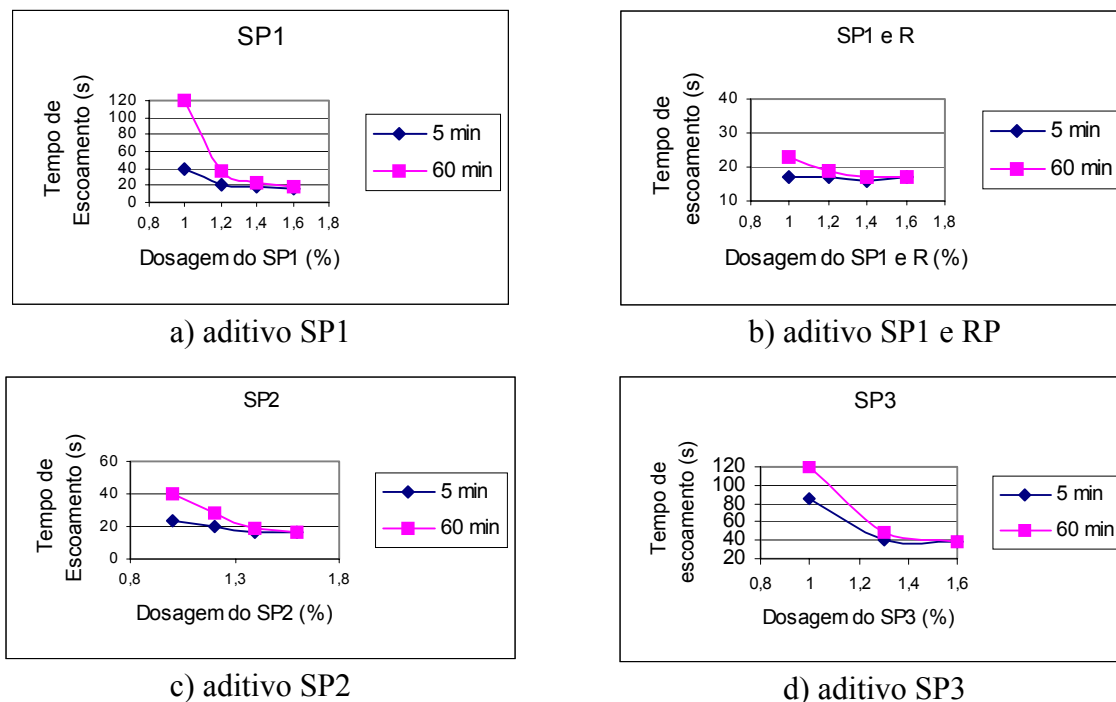


Figura 5.2 - Influência da marca de superplastificante no Ponto de Saturação para SP1, SP1 com RP, SP2 e SP3.

Comparando-se os gráficos a) e b) é possível observar a influência do aditivo Retardador. A dosagem de 1% do aditivo no gráfico a) corresponde a um tempo de escoamento da mistura, após 5 minutos, igual a 40 segundos contra aproximadamente 20 segundos encontrados na Figura b). Após 60 minutos da mistura, o tempo de escoamento no gráfico a) corresponde a 120 segundos contra aproximadamente 20 segundos encontrados na figura b). Embora em ambos os casos o Ponto de Saturação encontrado tenha sido igual a 1,6% da massa de cimento, as dosagens iniciais de SP e R apresentaram tempo de escoamento da mistura aos 60 minutos bastante inferior, o que evidencia a influência do aditivo Retardador. A elevada temperatura ambiente no Nordeste brasileiro contribui negativamente acelerando o processo de reação dos componentes do cimento, daí a necessidade do uso do aditivo retardador, caso a aplicação do concreto não seja feita logo após a mistura.

O gráfico c) mostra o efeito do aditivo SP2 na mistura que também apresentou Ponto de saturação igual a 1,6% do consumo de cimento. A curva correspondente aos 5 minutos aproxima-se bastante da curva do gráfico b), embora SP1 e R seja mais eficiente.

Finalmente o gráfico d) apresenta o efeito do aditivo SP3 na pasta, observa-se uma grande perda de plasticidade ao longo do tempo. O Ponto de Saturação equivalente a 1,6% do consumo de cimento apresentou um tempo de escoamento duas vezes maior que o encontrado nos gráficos anteriores (40 segundos no gráfico d) contra 20 segundos nos gráficos de a) a c)).

Pode-se dizer que o aditivo SP3 não apresenta uma compatibilidade muito boa com o cimento utilizado.

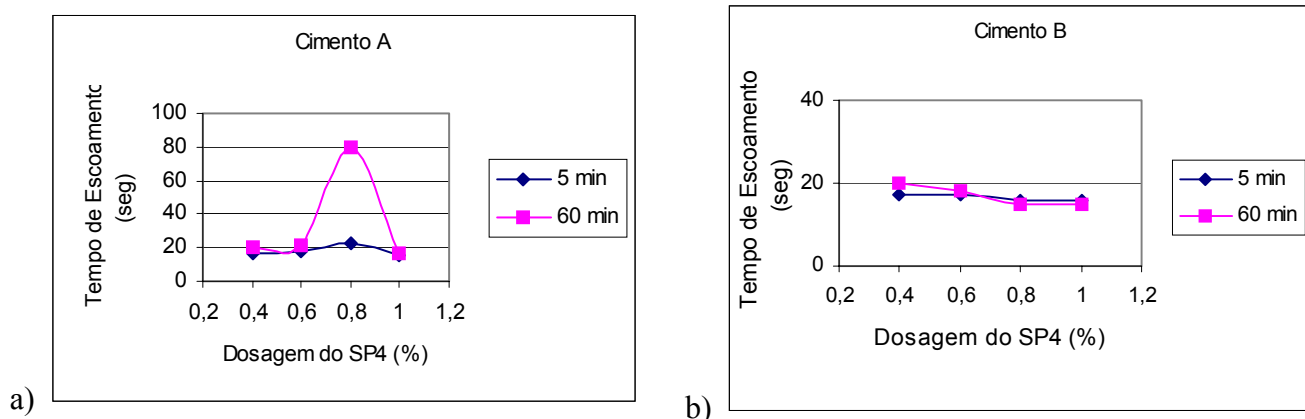
Do exposto, a se escolher seria o aditivo SP1 e R por permitir maior rapidez no escoamento da mistura e maior plasticidade ao longo do tempo. Foi admitido o percentual de 1,6% de aditivo em massa relativo ao consumo de cimento.

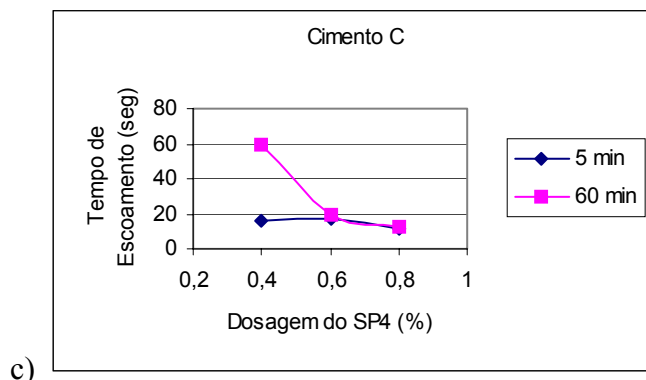
A Figura 5.3 mostra agora a influência das marcas de cimento no tempo de escoamento da mistura da pasta de cimento com o aditivo SP4, que é um produto mais moderno e mais eficiente.

A Figura 5.3 a) mostra um resultado inconsistente. É válido salientar que esta marca de cimento, A, apresentou problemas nos ensaios. Em várias repetições, eles apresentavam valores bastante diferentes, mesmo mantidos iguais os parâmetros de temperatura, dosagem e manuseio dos materiais. Pode-se dizer que há certa incompatibilidade entre o cimento A e o aditivo SP4.

Em 5.3 b) é possível observar-se que o consumo de aditivo diminuiu bastante graças à maior eficiência do aditivo SP4. Foi inclusive dispensado o uso de aditivo Retardador. O Ponto de Saturação encontrado foi equivalente a 0,7% do consumo de cimento. A proximidade das curvas relativas a 5 e 60 minutos revela que não houve perda significativa de plasticidade ao longo do tempo.

A Figura 5.3 c) indica que o Ponto de Saturação encontrado com o cimento C, igual a 0,6%, foi ligeiramente inferior ao achado com o cimento da marca B, igual a 0,7%. Porém, com teor mais baixo de SP4, por exemplo, 0,4%, o tempo de escoamento da pasta deste cimento é maior que o do cimento B. A relação água/cimento foi mantida sempre constante.

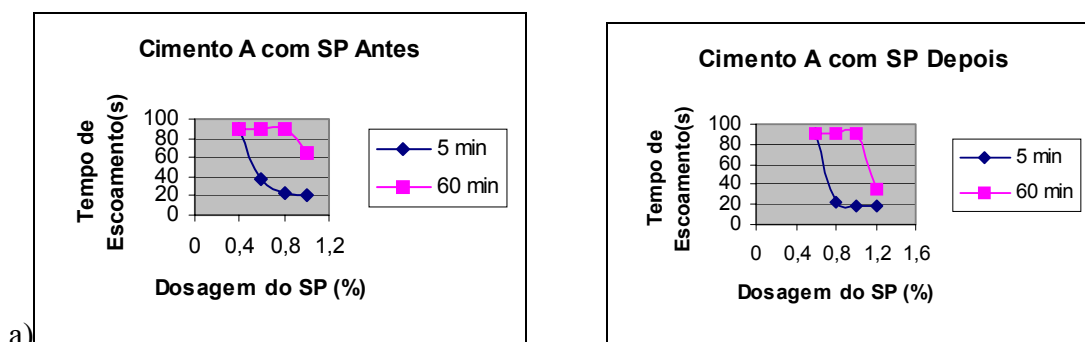




c) Figura 5.3 - Influência da marca de cimento nos tempos de escoamento da pasta e no ponto de saturação do aditivo SP4

Para continuação do trabalho foi escolhida a marca de cimento B, com base nos resultados dos ensaios realizados e na sua excelente compatibilidade com o SP4. Este último mostrou maior eficiência em termos do teor de aditivo correspondente ao ponto de saturação de 0,7% da massa de cimento contra 1,6% necessário para os aditivos SP1, SP2 e SP3 (ressalte-se, no entanto, que o preço do SP4 é bem superior ao dos demais).

Nos resultados até aqui apresentados o aditivo foi adicionado à água antes da mistura com o cimento, conforme sugestão de AICTIN (2000). Para verificar se havia influência do instante de se adicionar o aditivo na mistura, foram repetidos alguns ensaios de compatibilidade do cimento com superplastificante utilizando a mesma metodologia anterior. Foram utilizadas as marcas de cimento A, B e C e o aditivo SP4. Isto porque há informações que esse tipo de aditivo atua sobre os produtos de hidratação dos aluminatos. Assim o aditivo foi adicionado após a mistura da pasta bater um pouco no misturador, quando produtos de hidratação daqueles compostos potenciais do cimento já começam a se formar. A Figura 5.4 mostra uma comparação dos tempos de escoamentos quando se adicionou o aditivo antes do preparo da mistura e após alguns poucos minutos de ela estar sendo agitada no misturador.



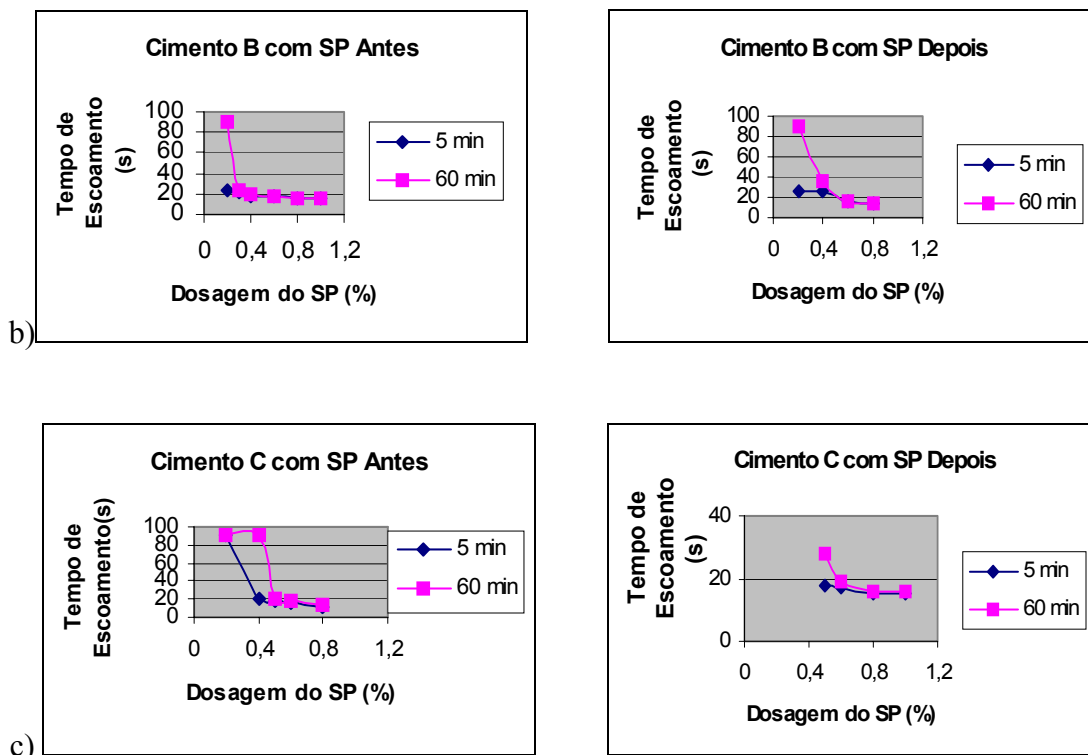


Figura 5.4 – Influência do instante de colocação do aditivo SP4

Na Figura 5.4 a) observou-se mais uma vez a incompatibilidade da marca de cimento A com o aditivo SP4. Mesmo com teores bem mais altos do que os dos casos dos cimentos B e C, não se conseguiu muita mobilidade da pasta após os 60 minutos de repouso.

Nas Figuras 5.4 b) e c) não se nota diferença significativa de comportamento nas proximidades do ponto de saturação, quer o aditivo seja adicionado antes, quer depois de iniciada a mistura .

5.3. OBTENÇÃO DE UMA DOSAGEM INICIAL

Foi fixado um consumo cimento de 350 kg/m^3 . Também se admitiu um teor de superplastificante SP4 inicial correspondente ao ponto de saturação, qual seja, 0,7 %.

Considere-se a notação abaixo e os limites indicados pelo EFNARC (2002):

- VP – volume de pedra: de 280 a 350 l/m^3
- RPA – relação pedra/areia: menor que 1
- RAF – relação água/finos: entre 0,80 e 1,00;
- C – consumo cimento (kg/m^3);

Capítulo V – Apresentação e Discussão dos Resultados

- Ad – consumo de adição (kg/m^3);
- A – consumo de areia (kg/m^3);
- P – consumo de pedra (kg/m^3);
- Ag – volume de água (l/m^3): menor que 200 l/m^3
- VF – volume de finos : de 160 a 240 l/m^3 ;
- VPasta – volume de pasta: superior a 400 l/m^3 ;
- A/P – relação areia/pasta: menor ou igual a $0,5$;
- A/Arg – relação areia/argamassa: maior ou igual a $0,4$.

Para escolha do traço, fez-se um rápido estudo paramétrico, fazendo-se variar o volume de pedra de 280 a 320 kg/m^3 e a relação água/finos de $0,8$ a $1,0$, verificando-se os parâmetros recomendados pelo EFNARC (2002): Volume de água, Volume de Finos, Volume de Pasta, Relação Areia/Pasta, Relação Areia/Argamassa. A Tabela 5.4 mostra os parâmetros obtidos.

Tabela 5.4 - Parâmetros dos traços obtidos com o programa computacional

Nº	VP	RPA	RAF	C	Ad	A	P	Ag	VF	VPasta	A/P	A/Arg
1	280	1,00	0,80	350	228	843	742	186	232	439	0,64	0,39
2	280	1,00	0,90	350	194	843	742	198	220	439	0,64	0,39
3	280	1,00	1,00	350	164	843	742	209	209	439	0,64	0,39
4	300	1,00	0,80	350	160	903	795	168	210	399	0,75	0,43
5	300	1,00	0,90	350	130	903	795	179	199	399	0,75	0,43
6	300	1,00	1,00	350	102	903	795	189	189	399	0,75	0,43
7	320	1,00	0,80	350	92	964	848	150	188	359	0,89	0,47
8	320	1,00	0,90	350	65	964	848	160	178	359	0,89	0,47
9	320	1,00	1,00	350	41	964	848	169	169	359	0,89	0,47
10	280	0,90	0,90	350	138	937	742	183	204	408	0,76	0,43
11	280	1,00	0,90	350	194	843	742	198	220	439	0,64	0,39
12	280	1,10	0,90	350	240	767	742	210	234	464	0,55	0,35

13	300	0,90	0,90	350	69	1004	795	183	182	366	0,91	0,48
14	300	1,00	0,90	350	130	903	795	179	199	399	0,75	0,43
15	300	1,10	0,90	350	179	821	795	192	214	426	0,64	0,39
16	320	0,90	0,90	350	1	1071	848	143	159	323	1,10	0,52
17	320	1,00	0,90	350	65	964	848	160	178	359	0,89	0,47
18	320	1,10	0,90	350	117	876	848	174	193	388	0,75	0,43

Observa-se que para se ter um volume de pasta superior a 400 l/m^3 é necessário que o volume de pedra seja menor que 300 l/m^3 , a menos que se aumente muito a relação pedra/areia, fora dos domínios do EFNARC.

A partir dos dados da Tabela 5.4, a Tabela 5.5 mostra a influência dos parâmetros de entrada do programa desenvolvido em alguns componentes do concreto.

Tabela 5.5-Influência dos parâmetros de entrada do programa em alguns componentes do concreto (→ constante, ↑ aumenta, ↓ diminui)

Considerações sobre os dados de entrada	Efeito em					
	Adição	VAg	VF	VP	A/Pasta	A/Arg
VP e RPA → , A/F ↑	↓	↑	↓	→	→	→
RPA e A/F → , VP ↑	↓	↓	↓	↓	↑	↑
VP e A/F → , RPA ↑	↑	↑	↑	↑	↓	↓

Nota-se que os volumes de adição e de finos diminuem com o aumento da relação água/finos e com o aumento de volume de pedra, aumentando com a relação pedra/areia.

Já o volume de pasta não é influenciado pela relação água/finos, diminui com o acréscimo do volume de pedra e aumenta com a relação pedra/areia.

A relação areia/pasta só seria alcançada para baixos valores de teor de pedra, relação pedra/areia superior a um, o que indica uma contradição do EFNARC (2002).

A Tabela 5.4 mostra que nenhum dos traços listados satisfaz inteiramente a todos os critérios. Como um dos mais importantes é o limite do consumo de água em 200 l/m^3 ,

procurou-se um traço que obedecesse a esse limite e conduzisse a um volume de pasta superior aos 400 dm³/m³.

Adotou-se então o traço 2 para as devidas correções experimentais. Foram feitos concretos com as duas adições: a) pó calcário e b) resíduo de tijolos moídos.

a) Traço com Pó Calcário

Correção da relação água/finos

Usando-se o critério descrito na revisão bibliográfica, preparou-se a pasta com 700g de cimento, 388g de pó calcário e 202g de finos da areia, com base nos resultados do traço inicial (Traço 2 da Tabela 5.4).

Dividindo-se cada uma das massas acima pelas respectivas massas específicas, obtém-se o volume de finos. Fez-se variar a relação água/finos de 1,1 a 1,4, e pelo ensaio do cone obteve-se o espalhamento relativo que foi expresso no gráfico da Figura 5.5.

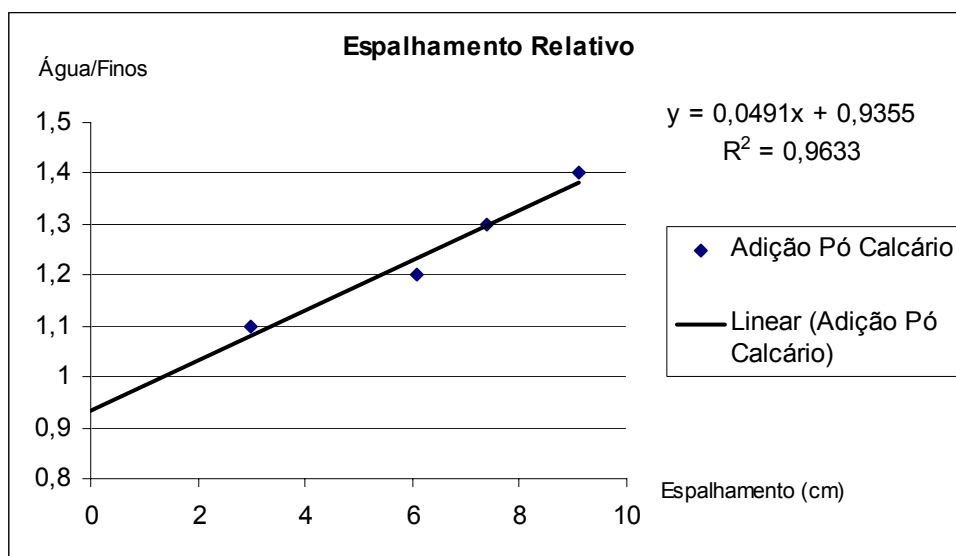


Figura 5.5 - Espalhamento relativo em função da relação água/finos

Obteve-se, pois, o parâmetro $\beta_p = 0,935$ que vai servir para dosagem do SP na argamassa.

Otimização do teor de SP na argamassa

Foi empregada a metodologia descrita no item 2.2.2. Foram usadas as relações água/finos iguais a $0,8\beta_p$ e $0,9\beta_p$ com $\beta_p = 0,935$.

Preparou-se a argamassa do traço 2 num volume que permitisse o ensaio do cone da Figura 2.18 e do funil da Figura 2.20. Foram medidos os diâmetros do espalhamento e o tempo de escoamento do funil. Os resultados encontram-se na Tabela 5.6.

Tabela 5.6 - Resultados do espalhamento e do tempo de escoamento da argamassa no funil

RAF	0,8 β_p = 0,748						0,9 β_p = 0,8415		
	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1	0,6	0,7	0,8
%SP	-	-	16,8	21,5	27,3	30,5	19	25,9	27,2
Espalhamento d (cm)	-	-	≥40	39	22	16	0	14	10
Tempo de escoamento, t (s)	-	-	≥40	39	22	16	0	14	10

Vê-se da Tabela 5.6 que com o teor de SP correspondente ao Ponto de Saturação não se conseguiu sequer obter espalhamento. A única combinação que se aproximou mais dos limites desejados ($d = 24$ a 26 cm e $t = 7$ a 11 s) foi relação água/finos de $0,8415$ e % de SP de $0,8\%$.

Verificação no Concreto

Com base nos resultados dos ensaios anteriores sobre a pasta e a argamassa, quando foram obtidos a relação água/finos igual a $0,9\beta_p = 0,9 \times 0,935 = 0,8415$ e teor de superplastificante igual a $0,8\%$, entrou-se novamente no programa com esses valores obtendo-se os quantitativos indicados na segunda linha da Tabela 5.7.

Tabela 5.7 - Parâmetros do traço 2 inicial e após correção.

Traço	VP	RPA	RAF	C	Ad	A	P	Ag	VF	VPasta	RAP	RAArg	Adt
Inicial	280	1,0	0,90	350	194	843	742	198	220	439	0,64	0,39	2,45
Corrigido	280	1,0	0,8415	350	213	843	742	191	227	439	0,64	0,39	2,8

Note-se que quando houve a diminuição da relação água/finos para manutenção do volume de mistura constante ocorreu ligeiro aumento do consumo de adições e conseqüente aumento de volume de finos.

Preparado o concreto usando-se os quantitativos do traço corrigido chegou-se a um espalhamento no teste do cone de Abrahms de apenas 33cm. Foi então aumentada em 5% a relação água/finos e foi-se acrescentando aditivo até se chegar ao espalhamento conveniente, conforme indicado na Tabela 5.8.

Tabela 5.8- Espalhamento do traço 2 após correções em função do teor de aditivos.

% Aditivo	Espalhamento (cm)
0,8	33,0
0,9	42,0
1,0	45,0
1,1	54,5
1,2	58,0
1,3	64,5
1,4	68,0

Note-se que foi necessário um teor de aditivo bem superior ao indicado no ensaio da argamassa.

Procedeu-se ao ensaio da Caixa em L e GTM, obtendo-se os resultados indicados na Tabela 5.9.

Tabela 5.9 - Resultados do ensaio da Caixa em L e GTM.

Caixa em L	$h_1 = 7,5 \text{ cm}$	$h_2 = 11 \text{ cm}$	$h_1 / h_2 = 0,68$
GTM	4,5%		

O ensaio da Caixa em L conduziu a um resultado ligeiramente abaixo do desejado, (h_1/h_2 maior ou igual a 0,8), indicando uma viscosidade elevada, visto que não houve blocagem de agregados.

A resistência média de três corpos de prova ensaiados aos 7 dias foi de 27,0 MPa e 28,2 MPa aos 28 dias. Observando-se os corpos de prova rompidos, vê-se que a ruptura

ocorre na zona de transição pasta-agregado. Sobre os agregados vê-se a presença do pó calcário prejudicando na aderência com a pasta endurecida.

O traço após as correções resultou na composição e propriedades indicadas na Tabela 5.10.

Tabela 5.10 – Traço com pó calcário após correções

VP	RPA	RAF	C	Ad	A	P	Ag	VF	VPasta	A/Pasta	A/Arg	Adt
280	1,0	0,8836	350	199	843	742	196	222	438	0,64	0,39	1,4%

Repetição da mistura

Foi repetida a experimentação acrescentando-se agora todo o aditivo de uma única vez. Como no procedimento anterior houve ligeira modificação na composição da pasta, embora o volume de pasta tenha se mantido constante, foi feita uma modificação deixando-se fixa a composição da pasta e variando-se ligeiramente o volume de pedra e a relação pedra/areia (Tabela 5.11).

Tabela 5.11 - Traço com pó calcário repetido

VP	RPA	RAF	C	Ad	A	P	Ag	VF	VPasta	A/Pasta	A/Arg	Adt
273	0,975	0,8836	350	194	843	723	196	222	438	0,64	0,39	1,4%

Os resultados obtidos com o concreto fresco constam na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resultados dos ensaios Espalhamento, Caixa em L e GTM.

Ensaio	Valor obtido	Valor alvo
Espalhamento	72cm	65cm a 80 cm
T _{50cm}	2,8s	2 a 5s
Caixa em L	$h_1 / h_2 = 0,90$	0,8 a 1,0
GTM	6,7%	5 a 15%

Nota-se que este concreto atingiu os valores alvo podendo ser classificado como um CAA.

A resistência à compressão aos 7 dias, média de dois corpos de prova, foi de 26,6 MPa, praticamente o mesmo do anterior. Aos 28 dias foi encontrada praticamente a mesma

resistência que aos 7 dias. Isto pode ser atribuído ao grande volume de pó calcário presente na mistura. Em massa, a relação adição/cimento neste traço foi da ordem de 0,55.

b) Traço com Pozolana

A pozolana obtida dos resíduos de tijolos moídos dá uma coloração avermelhada à pasta, à argamassa e ao próprio concreto.

A otimização da pasta em que se substitui o pó calcário pela pozolana tomando-se como referência o traço 2 modificado foi feita conforme descrito no item 2.2.2. O aspecto da pasta com a pozolana pode ser vista na Figura 5.6 e os resultados do espalhamento relativo estão indicados na Figura 5.7. Chegou-se a um $\beta_p = 1,03$, o que mostra a maior demanda de água desta adição.

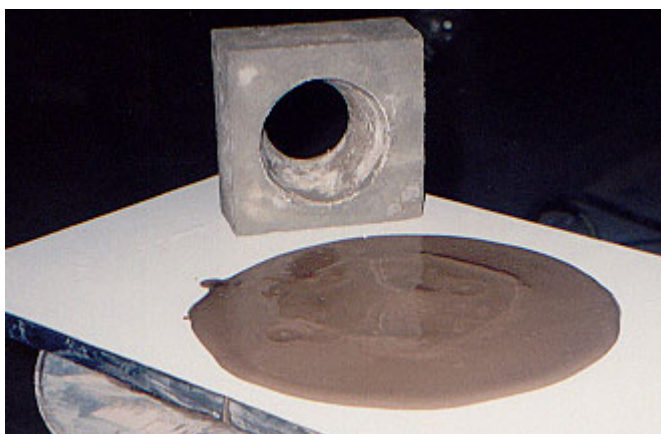


Figura 5.6 – Aspecto da pasta com adição de resíduos de cerâmica moída

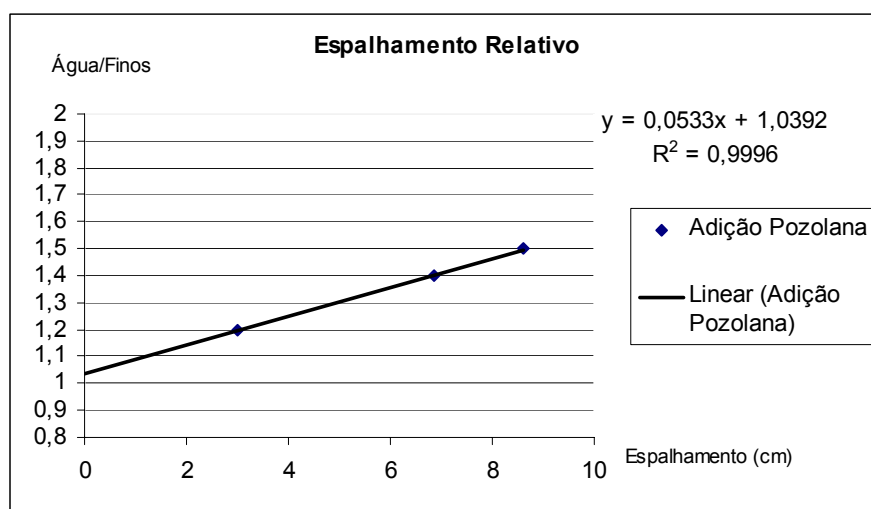


Figura 5.7 - Espalhamento Relativo da pasta em função da relação água-finos

Otimização do Teor de SP na Argamassa

Como na experiência com pó calcário e em outras anteriores já se notou uma maior necessidade de água que indicam os dados da literatura, em vez de se fazer a argamassa com as relações água/finos de $0,8\beta_p$ e $0,9\beta_p$, partiu-se para um valor superior e os ensaios no cone e no funil em V foram feitos usando-se a relação água/finos de $0,96\beta_p$, variando-se o teor de superplastificante (Figura 5.8). Os resultados estão na Tabela 5.13.



Figura 5.8 – Otimização do teor de SP na argamassa com pozolana

Tabela 5.13 - Resultado do espalhamento e escoamento no funil V

RAF	0,96 β_p = 1,00		
	0,7	0,8	1,0
%SP	0,7	0,8	1,0
Espalhamento d (cm)	22	22	28,5
Tempo de escoamento t (s)	>60	55	14

Vê-se que a demanda de aditivo foi maior que no caso do pó calcário, no caso 1,0% da massa de cimento.

Verificação no Concreto

Foi utilizado o traço que consta na Tabela 5.14.

Tabela 5.14 - Traço para verificação das propriedades do concreto

VP	RPA	RAF	C	Ad	A	P	Ag	Adt	VF	VPasta	A/Pasta	A/Arg
273	1,0	1,0	350	189	822	723	216	1,4%	216	452	0,6	0,38

O resultado foi um concreto ainda sem a fluidez necessária. Para se chegar ao desejado foi necessário acrescentar 3,1% de água e 14,7% de aditivo em relação às quantidades iniciais. O consumo de aditivo passou então para 1,6% da massa de cimento, bem superior ao indicado pelo ensaio de dosagem na argamassa. O aspecto deste concreto pode ser visto na Figura 5.9.

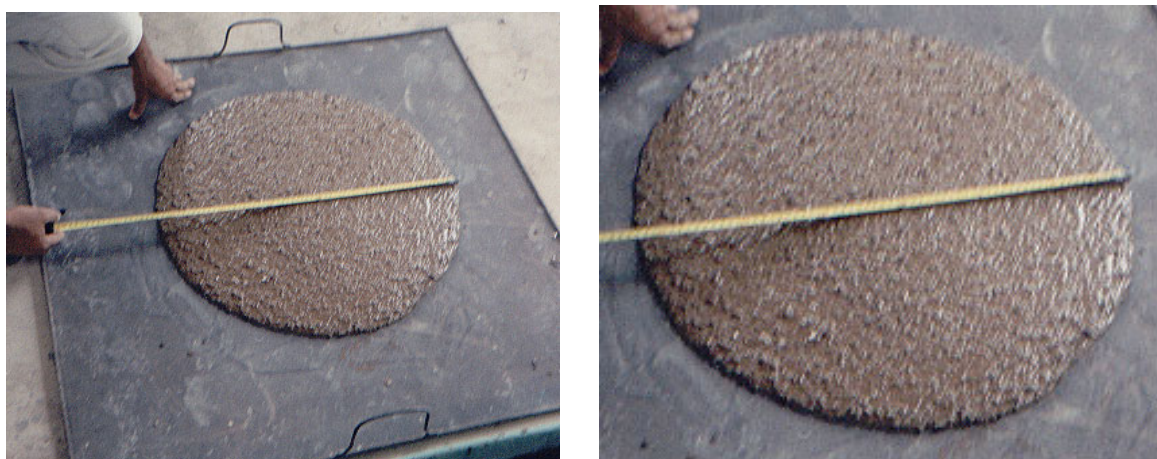


Figura 5.9 – Aspecto do concreto fresco com pozolana

Na Figura 5.10 vê-se o concreto quando da realização do ensaio da Caixa em L. Os resultados dos ensaios feitos no concreto fresco estão indicados na Tabela 5.15.

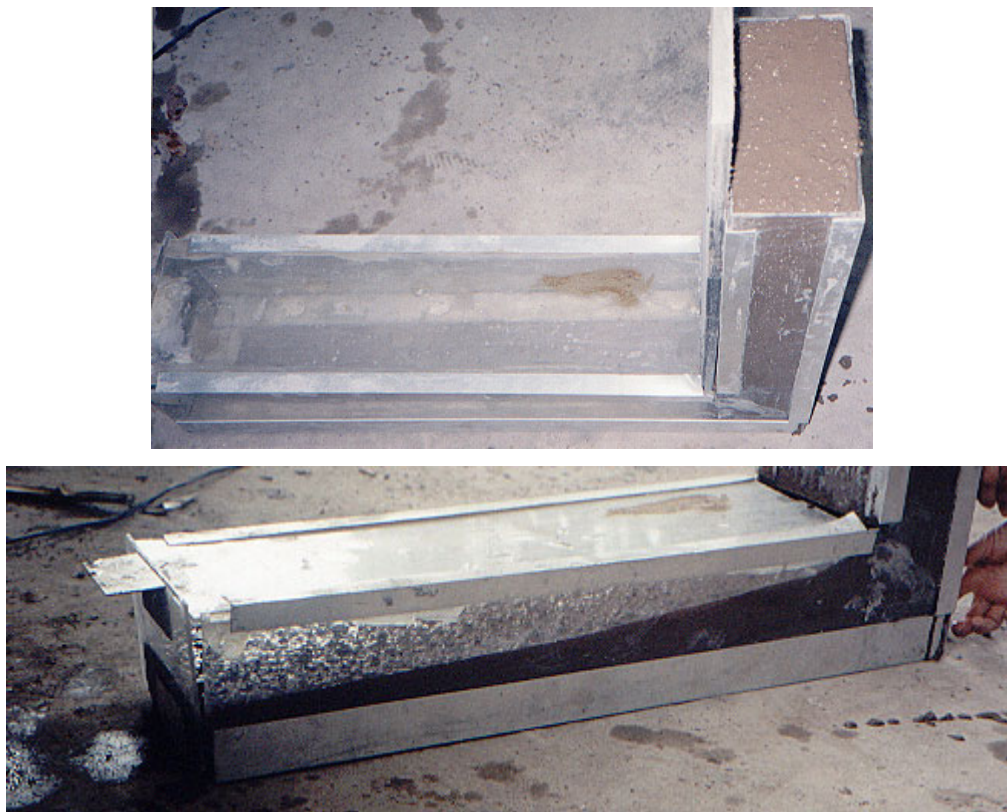


Figura 5.10 - Ensaio da Caixa em L

Tabela 5.15 - Resultado dos ensaios no concreto fresco

Ensaio	Valor obtido	Valor alvo
Espalhamento	67,5 cm	65 cm a 80 cm
T _{50cm}	3 s	2 a 5 s
Caixa em L	$h_1 / h_2 = 0,64$	0,8 a 1,0
GTM	1	0 ou 5 a 15%

O aspecto do concreto pareceu muito bom, mas vê-se que o material está ainda com viscosidade elevada, o que é indicado pelos resultados do GTM e Caixa em L, apesar de o consumo de água estar nas vizinhanças de 200l/m³. Para melhorá-lo, talvez um pequeno aumento no teor de aditivos seja suficiente.

Na Figura 5.11 é possível observar o aspecto do concreto endurecido. Vê-se que a superfície ficou bem acabada.



Figura 5.11 – Aspecto do concreto endurecido com pozolana

A resistência à compressão média de dois corpos de prova aos 7 dias foi de 33,7 MPa, bem superior ao CAA em que se usou pó calcário. Aos 28 dias ela passou a 43,1 MPa mostrando o efeito benéfico da pozolana. Examinando-se os corpos de prova rompidos vê-se que agora a ruptura ocorreu fraturando os agregados. A zona de transição ficou, pois, bem fortificada.

Na Figura 5.12 pode-se observar a diferença de coloração entre o concreto com a adição de pó calcário e a de pozolana.



Figura 5.12 – Diferença de coloração entre o concreto com pó calcário e com pozolana

OUTROS TRAÇOS EXPERIMENTAIS

Sendo o aditivo um dos itens mais caros do CAA, procurou-se ver se seria possível usar uma quantidade próxima do ponto de saturação. Para tanto se preferiu aumentar a quantidade de pedra e foram adotados os parâmetros:

- relação água/finos (A/F) = 0,95;
- relação pedra/areia (P/A) = 1,08;
- volume de pedra (VP) = 300 kg/m³.

Traço 1B:

- consumo de cimento: C = 350kg/m³ (cimento da marca B)
- consumo de adições: Ad = 124kg/m³ (Pó calcário)
- consumo de areia: A = 866kg/m³
- consumo de pedra: P = 795kg/m³
- consumo de água: Ag = 194,22 l/dm³
- consumo de aditivo: Adt = 2,19 l/dm³ (0,7 % de SP4)

Para se ter fluidez, procurou-se usar água gelada, com temperatura de 7°C. Após a mistura, a temperatura desta atingiu 25°C, quando se fizeram os ensaios do concreto.

Tabela 5.16 - Resultado dos ensaios no concreto fresco

Ensaio	Valor obtido	Valor alvo
Espalhamento	73 cm	65cm a 80 cm
T _{50cm}	2,7 s	2 a 5s
Caixa em L	h ₁ / h ₂ = 0,62	0,8 a 1,0
GTM	4,5	0 ou 5 a 15%

Os resultados dos ensaios foram satisfatórios, com exceção do L-Box que apresentou o valor da relação h₁ / h₂ = 0,61 menor que o esperado: 0,8.

A resistência média de 4 corpos de prova aos 7 dias foi de 33,1 MPa.

A menor quantidade de adição utilizada melhorou a resistência em relação ao outro traço com pó calcário.

O resfriamento da água teve efeito benéfico permitindo reduzir o aditivo. No entanto, em climas quentes como no Nordeste brasileiro, a medida não é eficaz por muito tempo, pois ocorre rápido aquecimento da mistura.

Finalmente, mantidos os parâmetros de entrada do traço anterior, foi aumentado o consumo de adição e de superplastificante. O resultado foi o traço 2B indicado na Tabela 5.17.

Tabela 5.17 – Parâmetros do traço 2B

VP	RPA	RAF	C	Ad	A	P	Ag	VF	VPasta	A/Pasta	A/Arg	Adt
300	1,08	0,95	350	154	836	795	195	205	421	0,66	0,4	1%

Os resultados dos ensaios com o concreto fresco estão na Tabela 5.18.

Tabela 5.18 - Resultado dos ensaios

Ensaio	Valor obtido	Valor alvo
Espalhamento	69 cm	65 cm a 80 cm
T _{50cm}	2,5 s	2 a 5 s
Caixa em L	$h_1 / h_2 = 0,92$	0,8 a 1,0
GTM	17,7	5 a 15%

Vê-se que foi obtido um CAA, porém o ensaio GTM foi ligeiramente superior ao limite de 15% indicando necessidade de uma ligeira redução na água ou no aditivo.

Para uma melhor visualização dos resultados obtidos nos ensaios foi feita a Tabela 5.19 com o resumo dos valores encontrados.

Tabela 5.19 – Tabela com valores dos resultados encontrados nos ensaios feitos com o concreto fresco.

CAA	Espalhamento (cm)	T _{50cm} (s)	Caixa L H ₁ /H ₂	GTM (%)	f _c (MPa) aos 7 dias	f _c (MPa) aos 28 dias
Traço 2 Modificado Pó Calcário	72	2,8	0,9	6,7	27,7	28,2
Traço 2 Modificado Pozolana	67,5	3	0,64	1	33,7	43,1
Traço 1B Pó Calcário	73	2,7	0,62	4,5	32,0	35,0
Traço 2B Pozolana	69	2,5	0,92	17,7	33,0	35,1

CONSIDERAÇÕES SOBRE CUSTO

Para se ter idéia do custo dos concretos auto-adensáveis aqui apresentados e de sua viabilidade econômica, foi feita uma comparação com um concreto comum da classe C30 comumente usado em João Pessoa. Para tanto, foram adotados os seguintes preços para os materiais:

- Cimento: R\$ 0,38/m³
- Adição: R\$ 0,06/m³
- Areia: R\$ 10,00/m³
- Pedra: R\$ 38,00/m³
- Aditivo: R\$ 14,00/dm³

A tabela 5.20 sumariza os consumos e o custo, considerando materiais secos, tendo sido adotadas as massas unitárias de 1,41 para a areia e de 1,45 para a pedra. Comparando-se os traços 2 modificados com pó calcário e com pozolana, vê-se que o concreto auto-adensável com adição de pó calcário custou 9% a mais e teve uma resistência inferior ao concreto convencional. Já o CAA com resíduos de tijolos moídos teve uma performance bem superior no que diz respeito à resistência e embora por metro cúbico custe quase 15 % a mais, por unidade de tensão ele foi 14 % mais barato. Isto mostra o potencial do CAA empregando resíduos de construção.

Tabela 5.20 – Quantitativos e custo aproximados para os concretos

Concreto	Cimento kg/m³	Adição kg/m³	Areia m³	pedra m³	Aditivo l/m³	Custo R\$/m³	fc₂₈ MPa	Custo em R\$/MPa
ConvencionalC30	470	-	0,50	0,70	-	210,30	32,3	6,51
CAA pó-calcário	350	194	0,59	0,50	4,4	231,14	27,0	8,56
CAA resíduos	350	203	0,60	0,53	5,0	241,32	43,1	5,60

CAPÍTULO VI - CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste trabalho foi feita uma revisão bibliográfica sobre metodologias para obtenção de concretos auto-adensáveis.

Apresentaram-se as metodologias do EFNARC (2002) e de GOMES (2002) para obtenção do CAA. Estas apresentam algumas diferenças entre si, inclusive na definição do agregado miúdo: enquanto o primeiro considera como areia a fração entre 0,125 mm e 4 mm, o segundo adota as partículas com dimensões entre 0 e 5 mm.

Foram descritos os ensaios propostos para se avaliar as capacidades de preenchimento das fôrmas, de escoamento entre as armaduras do concreto armado e a resistência à segregação do CAA no estado fresco.

O trabalho constou também de uma parte experimental a partir da qual pode-se comentar, que:

- a incompatibilidade do superplastificante com o cimento é uma realidade podendo ser detectada através de ensaio com o Cone de Marsh. Das três marcas de cimento testadas, uma delas apresentou problemas de compatibilidade com alguns dos superplastificantes.
- testados vários aditivos, só se conseguiu bom desempenho no CAA com o SP à base de éter carboxílico modificado.
- o ponto de saturação do aditivo obtido com os ensaios na pasta de cimento não correspondeu ao teor ótimo nem para a argamassa nem para o concreto.
- os ensaios para definição do teor de SP na argamassa mostraram ser necessárias taxas superiores à correspondente ao ponto de saturação na pasta
- os ensaios com o cone e com o funil em V para a definição da relação água/finos não se mostraram 100% eficientes quando se passou para o concreto

Foi desenvolvido um programa computacional baseado na metodologia do EFNARC (2002) para obtenção dos quantitativos dos materiais a partir dos parâmetros de entrada: volume de pedra, relação pedra/areia, relação água/finos, para um certo consumo de cimento e certa porcentagem de superplastificante.

A partir do programa obtém-se um traço inicial que procura satisfazer a certas condições descritas no EFNARC (2002). Vale salientar que não é simples obedecer-se ao mesmo tempo a todos os limites indicados.

O CAA é muito sensível a pequenas variações nas propriedades de seus componentes e de seu proporcionamento.

Os ensaios da pasta e da argamassa para refinamento da relação água/finos e do teor de superplastificante não se mostraram muito eficientes. Em geral, no concreto houve sempre maior demanda de água e de superplastificante.

A adição pozolânica obtida a partir de resíduos de tijolos moídos apresenta uma demanda de água superior ao pó calcário.

Apesar da maior demanda de água, os resíduos moídos conduziram a uma resistência do CAA bem superior à obtida com o pó calcário, mostrando tratarem-se os resíduos de uma adição ativa.

Com consumo de cimento de 350 kg/m³ foi conseguido um CAA com resistência superior a 43 MPa aos 28 dias usando-se materiais locais, resíduos de tijolos cerâmicos moídos.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base no que foi aqui apresentado e na demanda de maiores conhecimentos sobre o concreto auto-adensável e suas adaptações aos materiais locais, sugere-se:

- estudar a influência das características de outros agregados locais na obtenção do CAA;
- estudar a influência da sílica ativa nas misturas de CAA com os materiais locais;
- estudar outras adições locais, como caulim, calcinado ou não, disponível fartamente no interior da Paraíba;
- pesquisar um balanceamento de materiais que conduza a um CAA com resistência e custo equivalentes aos concretos convencionais das classes C25 e C30;
- estudar emprego de resíduos da construção como agregado e mesmo como finos no CAA;

- estudar o efeito de fibras naturais locais (como de sisal, de coco, por exemplo) no melhoramento da resistência à segregação do CAA;
- pesquisar e desenvolver agentes de viscosidade locais;
- tentar obter uma metodologia de dosagem do CAA mais facilmente adaptável aos materiais locais e ao clima do Nordeste do Brasil;
- estudar a durabilidade desses concretos em ambientes agressivos, principalmente os com adição de pó calcário em presença de sulfatos;
- estabelecer melhor as relações constitutivas do CAA;
- estudar mais detalhadamente as deformações diferidas (fluência e retração) desses concretos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, NBR 11768 – Aditivos para Concreto de Cimento Portland, Rio de Janeiro, 1992.

ABNT, NBR 7211 – Agregado para Concreto, Rio de Janeiro, 1983.

ABNT, NBR 7217 – Agregados – Determinação da Composição Granulométrica, Rio de Janeiro, 1987 a.

ABNT, NBR 7223 – Concreto – Determinação da Consistência pelo Abatimento do Tronco de Cone, Rio de Janeiro, 1983.

ABNT, NBR 7251 – Agregados em Estado Solto – Determinação da Massa Unitária, Rio de Janeiro, 1987 c.

ABNT, NBR 9739 – Concreto – Ensaio de Compressão de Corpos de Prova Cilíndricos – Método de Ensaio, Rio de Janeiro, 1994.

ABNT, NBR 9776 – Agregados – Determinação da Massa Específica de Agregados Miúdos por Meio do Frasco de Chapman, Rio de Janeiro, 1987 b.

AGUILA, I., Productive Tecnology of Pozolanic Cement Start from the Rice Husk, Central University of Venezuela, Caracas, 2000.

AİTCIN, P. –C., Concreto de Alto Desempenho, São Paulo, Editora Pini, 2000.

AİTCIN, P. –C., JOLICOEUR, C. and MACGREGOR, J. G., Superplasticizers: How They Work and Why They Occasionally Don't, Concrete International, Vol. 16, Nº 5, pp. 45-52.

ALVES, S. M. 2002– Desenvolvimento de compósitos resistentes através da substituição parcial do cimento por resíduo da indústria Cerâmica. Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica-UFPB, João Pessoa, 27/07/2002.

BARTOS, P. J. M. and GRAUERS, M., Self-Compacting Concrete, Concrete, Vol. 33, Nº 4, pp. 9-13, 1999.

BARTOS, P. J. M., An Appraisal of the Orimet Test as a Method for On-site Assessment of Fresh SCC Concrete, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete, pp. 121-135, Japão, 1998.

EFNARC, Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete, United Kingdom, 2002.

EURO-NORMA EN445, Lechadas para Tendones de Pretensado. Métodos de Ensayo, CEN, 12p, 1996.

Referências Bibliográficas

FORNASIER, G., FAVA, C., e ZITZER, L., Self-Compacting Concrete in Argentina: The First Experience, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete, pp. 309-318, Japão, 2001.

GASTTALDINI, A. L., ISAIA, G. C. and ALVES, A. S., Concrete Carbonation with Fly Ash, Rice Husk Ash and Calcareous Filler, Universidade de Santa Maria –RS, 2000.

GOMES, P. C. C., GETTU, R., AGULLÓ, L., e BERNAD, C., Experimental Optimization of High-Strength Self-Compacting Concrete, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete, pp. 377-386, Japão, 2001.

GOMES, P. C. C., Optimization and Characterization of High-Strength Self-Compacting Concrete, Barcelona, 2002.

HAYAKAWA, M., Matsuoka, Y. and Shindoh, T., Development and Application of Super-Workable Concrete, Proc. International RILEM Workshop on Special Concretes Workability and Mixing, P. J. M. Bartos (editor), E&FN Spon, pp. 183-190, 1993.

JANSSON, I. e outros, A new Concept for Improved Rheological Stability to Allow Reduction in Cement Content of Self-Compacting Concrete, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete, pp. 369-375, Japão, 2001.

KÖNIG, G., e outros, Self-Compacting Concrete-Time Development of Material Properties and Bond Behavior, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete, pp. 507-516, Japão, 2001.

LYNSDALE, C. J. AND KHAN, M. I., High Performance Low Environmental Impact Concrete Utilizing Cement Replacements in Ternary System, University of Sheffield, United Kingdom, 2000.

MARQUARDT, I. e outros, Optimization of Self-Compacting Concrete Mixes, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete, pp. 295-302, Japão, 2001.

MEHTA, P. K., MONTEIRO, P. J. M., Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais, São Paulo, Editora Pini, 1994.

MOURET, M., Rhéologie: BAP – Mise en Ouvre. Projet Marengo, LMDC, INSA, Toulouse, France, 2001.

NEVILLE, A. M., Propriedades do Concreto, São Paulo, Editora Pini, 1997.

OKAMURA, H., Self-Compacting High-Performance Concrete, Concrete International, Vol. 19, Nº 7, pp. 50-54, 1997.

OZAWA, K., SAKATA, N., OKAMURA, H., Evaluation of Self-Compatibility of Fresh Concrete Using the Funnel Test, Concrete Library of JSCE, pp. 59-75, 1995.

Referências Bibliográficas

RIBEIRO, A. B., e GONÇALVES, A., A Low Cost Self-Compacting Concrete, Proceedings of International Workshop on Self-Compacting Concrete, pp. 339-348, Japão, 2001.

SAAK, W. A., JENNINGS, H. M and SHAH, S. P., New Methodology for Designing Self-Compacting Concrete, ACI Materials Journal, Vol. 94, No 6, pp. 429-439, 2001.

SAMPAIO, M. N., Sustainable Construction into the Next Millennium: Environmentally Friendly and Innovative Cement based Materials, Proceedings of the International Conference, João Pessoa, 2000.

SU, N., HSU, K. and SHAI, H., A Simple Mix Design Method for Self-Compacting Concrete, Cement and Concrete Research No 31, pp. 1799-1807, 2001.

SWAMY and BARBOSA, Desenvolvimento de Concretos Duráveis e Resistentes através do uso de Cinzas Volantes e Escória de Alto Forno Moídas, Publicação Técnica, LABEME, Centro de Tecnologia, UFPB, 1998.

WHITING, D., Effects of High-Range Water Reducers on Some Properties of Fresh and Hardened Concretes, Portland Cement Association Research and Development Bulletin RD 061.01T, pp. 15, 1979.