



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

JANAÍNA DAS GRAÇAS ARAÚJO

INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS E DE FINOS DE  
PEDREIRA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DO  
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Dissertação apresentada ao curso  
de Mestrado em Engenharia Civil  
da Universidade Federal de  
Goiás.

Goiânia  
2007



UNIVERSIDADE FEDERAL DE GOIÁS  
ESCOLA DE ENGENHARIA CIVIL  
CURSO DE MESTRADO EM ENGENHARIA CIVIL

JANAÍNA DAS GRAÇAS ARAÚJO

INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS E DE FINOS DE  
PEDREIRA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA MICROESTRUTURA DO  
CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Dissertação apresentada ao curso de  
Mestrado em Engenharia Civil da  
Universidade Federal de Goiás.

Área de Concentração:  
Estrutura e Materiais

Orientador:  
Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer

Goiânia  
2007

**Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)**  
**(GPT/BC/UFG)**

Araújo, Janaína das Graças.  
A663      Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedra-  
ra nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto  
auto-adensável [manuscrito] / Janaína das Graças Araújo – 2007.  
149 f. : il., figs., tabs.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Goiás.  
Escola de Engenharia Civil, 2007.

Orientador: Prof. Dr. André Luiz Bortolacci Geyer.

Bibliografia: f. 137-149.

Inclui listas de figuras e de tabelas.

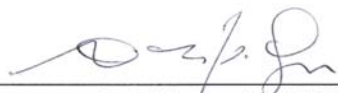
1. Concreto - Adição mineral 2. Concreto auto-adensável  
3. Concreto – Propriedades mecânicas 4. Microestrutura I. Geyer,  
André Luiz Bortolacci II. Universidade Federal de Goiás. **Escola  
de Engenharia Civil** III. Título.

CDU: 693.542.3

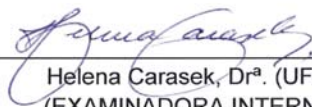
INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS E DE FINOS  
DE PREDREIRA NAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E NA  
MICROESTRUTURA DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

JANAÍNA DAS GRAÇAS ARAÚJO

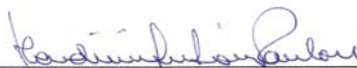
Dissertação de Mestrado defendida e aprovada em 27 de agosto de 2007 pela  
banca examinadora constituída pelos professores:



André Geyer, Dr. (UFG)  
(ORIENTADOR)



Helena Carasek, Dr<sup>a</sup>. (UFG)  
(EXAMINADORA INTERNA)



Vladimir Antônio Paulon, Dr. (UNICAMP)  
(EXAMINADOR EXTERNO)

*A meu tio João Dias, minha mãe “Dna Graçona”, meu noivo  
Edilson e a meu amigo e orientador André.*

## **AGRADECIMENTOS**

Ao professor André Geyer, que foi muito mais que um orientador, tornou-se amigo, conselheiro e companheiro para todas as horas. Obrigada pela confiança e amizade.

A todos os professores e colegas do CMEC, em especial os professores Oswaldo Cascudo e Helena Carasek, pela paciência nos trabalhos realizados durante o mestrado e amizade, as minhas grandes amigas Andrielli, Eliane e Aline, que se não fosse pela inclusão no curso de mestrado, as várias histórias cômicas e trágicas não teriam acontecido. Não posso deixar de agradecer a paciência e atenção do Tancredo e do Mário.

Ao Eng. Bernardo Tutikian pelas dicas na realização do trabalho.

Ao Centro Tecnológico de Engenharia Civil de Furnas Centrais Elétricas S.A., aos seus diretores Rubens Bittencourt e Moacir Souza Andrade e, em especial ao coordenador desta pesquisa, Eng. Alexandre de Castro pelo enorme apoio na realização dos ensaios.

Aos técnicos dos Laboratórios de Furnas, pelo empenho e bom humor durante os ensaios.

À ANEEL, que por meio de Furnas financiou a realização deste trabalho e a CAPES pelo suporte financeiro na forma de bolsa de pesquisa.

Aos amigos do grupo CAED, da Universidade Católica de Goiás, que me ensinaram não só a trabalhar com concreto, mas a amar e dedicar à pesquisa sobre o assunto. Também pelos “projetos de pizza”, pela persistência e vontade de ser o melhor.

A minha irmãzinha Renata, que me convenceu a cursar Engenharia Civil. Rê, você é a culpada por tudo isso. Obrigada pelos puxões de orelha, conselhos e amizade.

A minha família, que suportou todos os momentos difíceis ao meu lado, me incentivando e apoiando. Tio João, graças ao senhor hoje eu sou uma profissional respeitada e não quero jamais decepcioná-lo. Obrigada por ser meu paizão. À minha mãe, que nunca me deixou desistir, que sempre incentivou meus estudos... desculpe o mau humor. Te amo!

Ao meu noivo Edilson, que sempre esteve ao meu lado e foi compreensível nos momentos críticos. A seus pais, meus sogros, pelos momentos de descontração e o delicioso biju.

Finalmente as empresas Pedreira Izaíra e Pedreira Araguaia pela doação dos finos utilizados no trabalho experimental.

*Eng<sup>a</sup> Janaína Araújo*

“O conhecimento que se baseia em um único efeito como se ele fosse um todo, sem razão, sem fundamento, na verdade é limitado e, portanto, trivial”.

*Krishna – Srimad Bhagvad Gita*

## RESUMO

**ARAÚJO, J. G. Influência de adições minerais pozolânicas e de finos de pedra nas propriedades mecânicas e na microestrutura do concreto auto-adensável.** 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

Para atender suas propriedades no estado fresco, o concreto auto-adensável (CAA) demanda uma grande quantidade de finos em sua composição, em média 450 kg/m<sup>3</sup>. Os finos de pedra, material resultante do processo de britagem, surgem como alternativa econômica e sustentável no desenvolvimento do CAA.

Além dos finos, adições minerais pozolânicas, muito utilizadas em concretos convencionais, podem ser utilizadas também no concreto auto-adensável, com os mesmos benefícios.

Utilizando-se o método de dosagem para CAA proposto por Tutikian (2004), foi desenvolvido um estudo para avaliação das propriedades mecânicas do CAA, onde foram realizadas substituições parciais da areia natural por finos de pedra – micaxisto, granito e gnaiss – e substituições parciais de cimento por sílica ativa, metacaulim e pozolana de argila calcinada.

Os ensaios no estado fresco realizados foram Espalhamento (FURNAS, 2005a), Caixa U (FURNAS, 2005b), Teor de Ar (NM 47, 2002) e Massa Específica (NBR 9833, 1997). Corpos-de-prova cilíndricos com dimensões de 100x200 mm foram moldados para ensaios no estado endurecido – resistência à compressão (NBR 5739, 1994), módulo de elasticidade (NBR 8522, 1984), tração por

compressão diametral (NBR 7222, 1994) e tração na flexão (NBR 12142, 1991) – na idade de 28 dias. Foram analisadas amostras das composições intermediárias (1:4,5) em microscópio eletrônico de varredura (MEV).

Os resultados obtidos mostram ser possível a utilização de diferentes adições na produção de CAA's de qualidade. Destaca-se a pouca variabilidade das massas específicas, bem como dos teores de ar, que apresentaram valores baixos. Para concretos de mesma resistência à compressão, os valores obtidos para o módulo de elasticidade variaram entre 5 e 60% e as resistências à tração mantiveram-se entre 10 e 15%.

Palavras-chave: Adições minerais, concreto auto-adensável, finos de pedreira, microestrutura, propriedades mecânicas.

## ABSTRACT

**ARAÚJO, J. G. Influence of the mineral additions and the quarry dust in the mechanical properties and the microstructure of the self-compacting concrete.** 2007. Thesis (Master of Science in Civil Engineering) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2007.

For the benefits of its properties in fresh state, self-compacting concrete (SCC) demands a high powder content in the composition, nearby  $450\text{kg/m}^3$ . The quarry dust, resultant material of the coarse aggregate production, can be considered as an economic and sustainable alternative for the development of the SCC.

As well as the quarry dust, mineral additions, is used in conventional concretes and can also be used in the self-compacting concrete, with the same kind of benefits.

Using the mix design for SCC developed by Tutikian (2004) a study for evaluation of the SCC mechanical properties were done, where natural sand had been partially replaced by quarry – micaschist, granite and gneiss - and cement for silica fume, metakaolin and calcined clay pozolan.

The test methods for fresh state used was Slump-flow (FURNAS, 2005a), U-Box (FURNAS, 2005b), Entrained air (NM 47, 2002) and Specific gravity (9833, 1997). Cylindrical test specimen 100x200 mm had been molded for tests - compressive strength (NBR 5739, 1994), modulus of elasticity (NBR 8522, 1984), splitting tensile strength (NBR 7222, 1994) and flexural strength (NBR 12142, 1991) -

in the age of 28 days. Samples using the mixture 1: 4,5 had been analyzed by scanning electron microscope (SEM).

The results show that it can be possible the use of different additions for the production of high quality SCC. We detach the small variability of the specific gravity, as well as the entrained air, wide presented low values.

For concretes with same compressive strength, the values of modulus of elasticity had varied between 5 and 60% and the splitting tensile strength and flexural strength had been remained between 10 and 15%.

Key-words: mechanical properties, microstructure, mineral additions, quarry dust, self-compacting concrete.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                                                                             |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1. 1 - Ponte Akashi-Kaikyo (Geyer, 2006) .....                                                                                                       | 4  |
| Figura 1. 2 - Interior do bloco de ancoragem da Ponte Akashi-Kaikyo (Geyer, 2006).                                                                          | 4  |
| Figura 1. 3 - Obra realizada em Goiás com CAA pela construtora Arcel Engenharia LTDa. (GEYER <i>et al.</i> , 2005) .....                                    | 5  |
| Figura 2. 1 - Lançamento de CAA em steel deck de um shopping Center .....                                                                                   | 12 |
| Figura 2. 2 - Detalhe da armadura do pavimento tipo .....                                                                                                   | 12 |
| Figura 2. 3 - Concretagem pavimento tipo de um edifício .....                                                                                               | 13 |
| Figura 2. 4 - Edifícios residenciais construídos utilizando o CAA executados pela construtora Toctao Engenharia LTDa. ....                                  | 13 |
| Figura 2. 5 - Aeroporto Internacional de Goiânia Santa Genoveva – concretagem da parede do sub-solo com CAA – construtoras Odebrecht e Via Engenharia ..... | 14 |
| Figura 2. 6 - Parede do sub-solo após desforma .....                                                                                                        | 15 |
| Figura 2. 7 - Equipamento para realização do ensaio de espalhamento.....                                                                                    | 28 |
| Figura 2. 8 - Vista frontal da Caixa U .....                                                                                                                | 30 |
| Figura 2. 9 - Vista superior da Caixa U .....                                                                                                               | 30 |
| Figura 2. 10 - Estágios de aplicação do CAA no processo construtivo (OZAWA, 2001) .....                                                                     | 34 |
| Figura 3. 1- Distribuição das unidades geológicas fundamentais (HASUI, 1990 apud BARTORELLI; HARALYI, 1998).....                                            | 42 |
| Figura 5. 1 - Curva granulométrica agregado miúdo .....                                                                                                     | 55 |
| Figura 5. 2 - Curva granulométrica agregado graúdo.....                                                                                                     | 57 |
| Figura 5. 3 - Granulometria a laser dos finos e do cimento .....                                                                                            | 60 |
| Figura 5. 4 - Difratoograma dos finos de micaxisto .....                                                                                                    | 61 |
| Figura 5. 5 - Difratoograma dos finos de granito .....                                                                                                      | 62 |
| Figura 5. 6 - Difratoograma dos finos de gnaiss.....                                                                                                        | 63 |
| Figura 6. 1 - Concreto pouco argamassado e áspero (50%).....                                                                                                | 67 |
| Figura 6. 2 - Teor ideal de argamassa, com bom acabamento (56%).....                                                                                        | 68 |

|                                                                                                                         |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| Figura 6. 3 - Preenchimento do cone para realização do ensaio de espalhamento ..                                        | 74     |
| Figura 6. 4 - Medição do espalhamento .....                                                                             | 74     |
| Figura 6. 5 - Preenchimento da caixa U .....                                                                            | 75     |
| Figura 6. 6 - Desnível entre as câmaras da caixa U .....                                                                | 75     |
| Figura 6. 7 - Curva de dosagem para o concreto referência (convencional) .....                                          | 76     |
| Figura 6. 8 - Curva de dosagem para o CAA com sílica ativa .....                                                        | 77     |
| Figura 6. 9 - Curva de dosagem para o CAA com metacaulim .....                                                          | 77     |
| Figura 6. 10 - Curva de dosagem para o CAA com pozolana de argila calcinada ....                                        | 78     |
| Figura 6. 11 - Curva de dosagem para o CAA com finos de micaxisto .....                                                 | 78     |
| Figura 6. 12 - Curva de dosagem para o CAA com finos de granito .....                                                   | 79     |
| Figura 6. 13 - Curva de dosagem para o CAA com finos de gnaissse .....                                                  | 79     |
| <br>Figura 7. 1 - Moldagem dos corpos-de-prova .....                                                                    | <br>82 |
| Figura 7. 2 - Curvas de dosagem dos concretos estudados .....                                                           | 87     |
| Figura 7. 3 - Fragmentação dos corpos-de-prova .....                                                                    | 88     |
| Figura 7. 4 - Amostras para análise no MEV .....                                                                        | 88     |
| Figura 7. 5 - Porta-amostra pronto para análise .....                                                                   | 89     |
| Figura 7. 6 - Curvas resistência à compressão versus relação água/aglomerante ...                                       | 92     |
| Figura 7. 7 - Curvas módulo de elasticidade versus relação água/aglomerante .....                                       | 96     |
| Figura 7. 8 - Curvas resistência à tração por compressão diametral versus relação<br>água/aglomerante .....             | 100    |
| Figura 7. 9 - Curvas resistência à tração na flexão versus relação água/aglomerante<br>.....                            | 103    |
| Figura 7. 10 - Correlação entre resistência à compressão e módulo de elasticidade<br>.....                              | 105    |
| Figura 7. 11 - Curvas de correlação entre módulo de elasticidade e resistência à<br>compressão .....                    | 109    |
| Figura 7. 12 - Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração por<br>compressão diametral .....       | 110    |
| Figura 7. 13 - Correlação entre resistência à compressão e resistência à tração na<br>flexão .....                      | 112    |
| Figura 7. 14 - Correlação entre resistência à tração na flexão e resistência à tração<br>por compressão diametral ..... | 114    |
| Figura 7. 15 - Interface do concreto referência .....                                                                   | 117    |

|                                                                                               |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 7. 16 - Interface do concreto com adição de sílica ativa.....                          | 118 |
| Figura 7. 17 - Interface do concreto com adição de metacaulim.....                            | 119 |
| Figura 7. 18 – Interface do concreto com adição de pozolana de argila calcinada .             | 120 |
| Figura 7. 19 - Interface do concreto com finos de micaxisto .....                             | 121 |
| Figura 7. 20 - Interface do concreto com finos de granito .....                               | 122 |
| Figura 7. 21 - Interface do concreto com finos de gnaiss.....                                 | 123 |
| Figura 7. 22 - Consumo de aglomerante ( $\text{kg/m}^3$ ) dos concretos .....                 | 125 |
| Figura 7. 23 - Comparativo de custos dos concretos para diferentes resistências..             | 127 |
| Figura 7. 24 - Comparativo de custos globais dos concretos para diferentes resistências ..... | 128 |

## LISTA DE TABELAS

|                                                                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 2. 1 - Valores de espalhamento citados por diferentes autores.....                                         | 29 |
| Tabela 3. 1 - Principais estatísticas - Brasil.....                                                               | 41 |
| Tabela 5. 1 - Características químicas do cimento.....                                                            | 53 |
| Tabela 5. 2 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V - ARI.....                                         | 54 |
| Tabela 5. 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo .....                                                   | 55 |
| Tabela 5. 4 - Composição granulométrica do agregado graúdo.....                                                   | 56 |
| Tabela 5. 5 - Caracterização da sílica ativa .....                                                                | 58 |
| Tabela 5. 6 - Caracterização do metacaulim .....                                                                  | 59 |
| Tabela 5. 7 - Caracterização da pozolana de argila calcinada .....                                                | 59 |
| Tabela 5. 8 - Características do aditivo superplastificante utilizado .....                                       | 63 |
| Tabela 6. 1 - Determinação do teor de argamassa .....                                                             | 66 |
| Tabela 6. 2 - Traços unitários do concreto referência .....                                                       | 68 |
| Tabela 6. 3 - Traços com sílica ativa .....                                                                       | 69 |
| Tabela 6. 4 - Traços com metacaulim .....                                                                         | 70 |
| Tabela 6. 5 - Traços dos concretos com pozolana de argila calcinada .....                                         | 70 |
| Tabela 6. 6 - Traços utilizando finos de pedreira.....                                                            | 71 |
| Tabela 6. 7 - Limites de resultados segundo algumas bibliografias .....                                           | 72 |
| Tabela 6. 8 - Caracterização dos concretos no estado fresco .....                                                 | 73 |
| Tabela 6. 9 – Equações e coeficientes de correlação das curvas de dosagem .....                                   | 80 |
| Tabela 7. 1 - Maiores valores obtidos no ensaio de resistência à compressão aos 28 dias.....                      | 90 |
| Tabela 7. 2 - Análise de variância (ANOVA): Resistência à compressão .....                                        | 91 |
| Tabela 7. 3 - Maiores valores obtidos no ensaio de módulo de elasticidade aos 28 dias.....                        | 95 |
| Tabela 7. 4 - Análise de variância (ANOVA): Módulo de elasticidade.....                                           | 96 |
| Tabela 7. 5 - Maiores valores obtidos no ensaio de resistência à tração por compressão diametral aos 28 dias..... | 98 |

|                                                                                                                         |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 7. 6 - Análise de variância (ANOVA): Resistência à tração por compressão diameral .....                          | 99  |
| Tabela 7. 7 - Maiores valores obtidos no ensaio de resistência à tração na flexão aos 28 dias .....                     | 102 |
| Tabela 7. 8 - Análise de variância (ANOVA): Tração na flexão.....                                                       | 103 |
| Tabela 7. 9 - Equações para determinação do módulo de elasticidade dos concretos referência (convencionais) .....       | 107 |
| Tabela 7. 10 - Equações para determinação do módulo de elasticidade dos concretos com sílica ativa .....                | 107 |
| Tabela 7. 11 - Equações para determinação do módulo de elasticidade dos concretos com metacaulim.....                   | 107 |
| Tabela 7. 12 - Equações para determinação do módulo de elasticidade dos concretos com pozolana de argila calcinada..... | 107 |
| Tabela 7. 13 - Equações para determinação do módulo de elasticidade dos concretos com finos de micaxisto.....           | 108 |
| Tabela 7. 14 - Equações para determinação do módulo de elasticidade dos concretos com finos de granito.....             | 108 |
| Tabela 7. 15 - Equações para determinação do módulo de elasticidade dos concretos com finos de gnaiss .....             | 108 |
| Tabela 7. 16 - Equações para determinação do módulo de elasticidade em função da resistência à compressão.....          | 108 |
| Tabela 7. 17 - Resultados de resistência à tração na flexão .....                                                       | 113 |
| Tabela 7. 18 - Custos por m <sup>3</sup> de cada concreto produzido.....                                                | 126 |
| Tabela 7. 19 - Preços dos materiais utilizados .....                                                                    | 127 |

## SUMÁRIO

|                                                                |      |
|----------------------------------------------------------------|------|
| RESUMO.....                                                    | viii |
| ABSTRACT .....                                                 | x    |
| LISTA DE FIGURAS .....                                         | xii  |
| LISTA DE TABELAS .....                                         | xv   |
| 1. INTRODUÇÃO.....                                             | 1    |
| 1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA .....                 | 1    |
| 1.2. OBJETIVOS GERAIS.....                                     | 6    |
| 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....                               | 6    |
| 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO.....                             | 7    |
| 2. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL.....                                | 8    |
| 2.1. CONCEITO .....                                            | 8    |
| 2.2. HISTÓRICO .....                                           | 9    |
| 2.3. PROPRIEDADES.....                                         | 15   |
| 2.3.1. Propriedades no estado fresco .....                     | 16   |
| 2.3.2. Propriedades no estado endurecido .....                 | 17   |
| 2.4. MATERIAIS .....                                           | 18   |
| 2.5. DOSAGEM .....                                             | 19   |
| 2.5.1. Métodos de dosagem.....                                 | 20   |
| 2.5.1.1. Método proposto por Okamura (1995) .....              | 20   |
| 2.5.1.2. Método EFNARC (2002) .....                            | 21   |
| 2.5.1.3. Método proposto por Gomes (2002) .....                | 22   |
| 2.5.1.4. Método proposto por Tutikian (2004) .....             | 23   |
| 2.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL..... | 24   |
| 2.6.1. Espalhamento .....                                      | 28   |
| 2.6.2. Caixa U .....                                           | 29   |
| 2.7. VANTAGENS / PONTOS CONTROVERSOS .....                     | 31   |

|        |                                                                        |    |
|--------|------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.7.1. | Vantagens: .....                                                       | 31 |
| 2.7.2. | Pontos controversos: .....                                             | 32 |
| 3.     | FINOS DE PEDREIRA COMO ADIÇÕES MINERAIS .....                          | 35 |
| 3.1.   | DEFINIÇÃO .....                                                        | 35 |
| 3.2.   | CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES .....                                   | 36 |
| 3.3.   | UTILIZAÇÃO NO CONCRETO .....                                           | 37 |
| 3.3.1. | Efeitos no concreto fresco .....                                       | 37 |
| 3.3.2. | Efeitos na durabilidade .....                                          | 39 |
| 3.4.   | IMPACTO AMBIENTAL .....                                                | 39 |
| 4.     | ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS .....                                     | 43 |
| 4.1.   | SÍLICA ATIVA .....                                                     | 44 |
| 4.1.1. | Características .....                                                  | 44 |
| 4.1.2. | Influência no concreto fresco .....                                    | 46 |
| 4.1.3. | Influência no concreto endurecido .....                                | 47 |
| 4.1.4. | Uso no concreto auto-adensável .....                                   | 47 |
| 4.2.   | METACAULIM .....                                                       | 48 |
| 4.2.1. | Características .....                                                  | 48 |
| 4.2.2. | Influência no concreto fresco .....                                    | 49 |
| 4.2.3. | Influência no concreto endurecido .....                                | 49 |
| 4.3.   | POZOLANA DE ARGILA CALCINADA .....                                     | 49 |
| 4.3.1. | Características .....                                                  | 50 |
| 4.3.2. | Influência no concreto fresco .....                                    | 50 |
| 4.3.3. | Influência no concreto endurecido .....                                | 51 |
| 4.3.4. | Uso no concreto auto-adensável .....                                   | 51 |
| 5.     | PROGRAMA EXPERIMENTAL: CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS<br>MATERIAIS ..... | 53 |
| 5.1.   | CIMENTO PORTLAND .....                                                 | 53 |
| 5.2.   | AGREGADOS .....                                                        | 54 |
| 5.2.1. | Agregado miúdo .....                                                   | 54 |

|          |                                                                                               |    |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.2.2.   | Agregado graúdo .....                                                                         | 56 |
| 5.3.     | ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS .....                                                            | 57 |
| 5.3.1.   | Sílica ativa.....                                                                             | 57 |
| 5.3.2.   | Metacaulim.....                                                                               | 58 |
| 5.3.3.   | Pozolana de argila calcinada .....                                                            | 59 |
| 5.4.     | FINOS DE PEDREIRA.....                                                                        | 60 |
| 5.4.1.   | Análise granulométrica.....                                                                   | 60 |
| 5.4.2.   | Análise química.....                                                                          | 61 |
| 5.5.     | ADITIVO .....                                                                                 | 63 |
| 6.       | PROGRAMA EXPERIMENTAL: DOSAGEM E OBTENÇÃO DOS TEORES DE<br>ADIÇÃO .....                       | 65 |
| 6.1.     | MÉTODO DE DOSAGEM .....                                                                       | 65 |
| 6.1.1.   | Determinação do teor de argamassa.....                                                        | 66 |
| 6.1.2.   | Cálculo dos traços.....                                                                       | 68 |
| 6.1.2.1. | Concreto referência .....                                                                     | 68 |
| 6.1.2.2. | Concreto com Sílica Ativa .....                                                               | 69 |
| 6.1.2.3. | Concreto com Metacaulim.....                                                                  | 69 |
| 6.1.2.4. | Concreto com pozolana de argila calcinada.....                                                | 70 |
| 6.1.2.5. | Concretos com finos de pedreira.....                                                          | 70 |
| 6.2.     | ENSAIOS NO ESTADO FRESCO .....                                                                | 72 |
| 6.2.1.   | Caracterização dos concretos no estado fresco .....                                           | 72 |
| 6.3.     | CURVAS DE DOSAGEM.....                                                                        | 76 |
| 7.       | ANÁLISE DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS E DA MICROESTRUTURA.....                                   | 81 |
| 7.1.     | PLANEJAMENTO DOS ENSAIOS.....                                                                 | 82 |
| 7.1.1.   | Variáveis independentes.....                                                                  | 82 |
| 7.1.1.1. | Adições minerais pozolânicas: sílica ativa, metacaulim e pozolana de argila<br>calcinada..... | 82 |
| 7.1.1.2. | Finos de pedreira.....                                                                        | 83 |
| 7.1.1.3. | Cura.....                                                                                     | 83 |

|          |                                                                                                    |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.1.1.4. | Consistência .....                                                                                 | 84  |
| 7.1.1.5. | Espalhamento.....                                                                                  | 84  |
| 7.1.1.6. | Idade.....                                                                                         | 84  |
| 7.1.2.   | Variáveis dependentes.....                                                                         | 84  |
| 7.1.2.1. | Resistência à compressão simples .....                                                             | 84  |
| 7.1.2.2. | Módulo de elasticidade.....                                                                        | 85  |
| 7.1.2.3. | Resistência à tração por compressão diametral .....                                                | 85  |
| 7.1.2.4. | Resistência à tração na flexão .....                                                               | 85  |
| 7.1.2.5. | Microestrutura.....                                                                                | 86  |
| 7.2.     | METODOLOGIA DE ENSAIO .....                                                                        | 86  |
| 7.3.     | APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....                                                        | 89  |
| 7.3.1.   | Análise das propriedades mecânicas .....                                                           | 90  |
| 7.3.1.1. | Resistência à compressão .....                                                                     | 90  |
| 7.3.1.2. | Módulo de elasticidade.....                                                                        | 94  |
| 7.3.1.3. | Tração por compressão diametral.....                                                               | 98  |
| 7.3.1.4. | Tração na flexão.....                                                                              | 101 |
| 7.3.2.   | Correlações entre as propriedades mecânicas.....                                                   | 105 |
| 7.3.2.1. | Resistência à compressão <i>versus</i> módulo de elasticidade .....                                | 105 |
| 7.3.2.2. | Resistência à compressão <i>versus</i> resistência à tração por compressão<br>diametral.....       | 110 |
| 7.3.2.3. | Resistência à compressão <i>versus</i> resistência à tração na flexão .....                        | 112 |
| 7.3.2.4. | Resistência à tração por compressão diametral <i>versus</i> resistência à tração<br>na flexão..... | 114 |
| 7.3.3.   | Análise microscópica – interface.....                                                              | 116 |
| 7.3.3.1. | Referência .....                                                                                   | 117 |
| 7.3.3.2. | Sílica ativa .....                                                                                 | 118 |
| 7.3.3.3. | Metacaulim .....                                                                                   | 119 |
| 7.3.3.4. | Pozolana de argila calcinada.....                                                                  | 120 |
| 7.3.3.5. | Finos de micaxisto.....                                                                            | 121 |

|          |                                                                                                    |     |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.3.3.6. | Finos de granito.....                                                                              | 122 |
| 7.3.3.7. | Finos de gnaiss ..... 123                                                                          | 123 |
| 7.3.4.   | Consumo de material aglomerante.....                                                               | 124 |
| 7.3.5.   | Custos dos concretos em função da resistência à compressão.....                                    | 126 |
| 8.       | CONSIDERAÇÕES FINAIS.....                                                                          | 130 |
| 8.1.     | PRODUÇÃO DE CONCRETOS AUTO-ADENSÁVEIS .....                                                        | 130 |
| 8.2.     | PROPRIEDADES NO ESTADO FRESCO.....                                                                 | 131 |
| 8.3.     | PROPRIEDADES NO ESTADO ENDURECIDO .....                                                            | 131 |
| 8.3.1.   | Resistência à compressão.....                                                                      | 131 |
| 8.3.2.   | Módulo de elasticidade .....                                                                       | 132 |
| 8.3.3.   | Resistência à tração por compressão diametral.....                                                 | 132 |
| 8.3.4.   | Resistência à tração na flexão.....                                                                | 132 |
| 8.4.     | CORRELAÇÕES ENTRE AS PROPRIEDADES MECÂNICAS.....                                                   | 133 |
| 8.4.1.   | Resistência à compressão <i>versus</i> módulo de elasticidade .....                                | 133 |
| 8.4.2.   | Resistência à compressão <i>versus</i> resistência à tração por compressão<br>diametral.....       | 134 |
| 8.4.3.   | Resistência à compressão <i>versus</i> resistência à tração na flexão .....                        | 134 |
| 8.4.4.   | Resistência à tração por compressão diametral <i>versus</i> resistência à tração na<br>flexão..... | 134 |
| 8.5.     | MICROSCOPIA.....                                                                                   | 134 |
| 8.6.     | CONSUMO DE MATERIAL AGLOMERANTE .....                                                              | 135 |
| 8.7.     | CUSTOS DOS CONCRETOS EM FUNÇÃO DA RESISTÊNCIA À<br>COMPRESSÃO.....                                 | 136 |
| 8.8.     | SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS .....                                                             | 136 |
|          | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                                                   | 137 |

## 1. INTRODUÇÃO

---

### 1.1. JUSTIFICATIVA E IMPORTÂNCIA DO TEMA

O concreto é, provavelmente, o material de construção mais extensivamente utilizado no mundo. Essa grandiosidade se deve a abundância de matéria-prima para produção de cimento, relativo baixo custo e a versatilidade e adaptação do concreto em várias formas estruturais (SABIR *et al.*, 2001).

Ferreira *et al.* (2006a) afirmam que o concreto convencional, com cimento portland e agregado natural, apresenta deficiências no lançamento e adensamento de estruturas densamente armadas ou com formatos geometricamente complexos, além da grande demanda de mão-de-obra.

A concretagem eficiente das estruturas depende essencialmente da compactação para atingir os requisitos de resistência e durabilidade especificados em projeto. Uma compactação insuficiente tem como consequência a grande redução do desempenho estrutural, independentemente da qualidade da produção e da própria composição do material (NUNES, 2001).

Proporcionalmente ao crescimento do consumo de concreto está a extração de areia natural, sendo que, atualmente, 90% da produção nacional é extraída em leito de rios (ALMEIDA; SILVA, 2005). A exaustão de áreas próximas aos grandes centros e a restrição da atividade extrativa pelos órgãos ambientais tem resultado na exploração de areia em locais cada vez mais distantes, aumentando seu custo final.

Os finos de pedra, resultantes do processo de produção de brita, totalizam 10 a 15% do volume de brita produzida e geram transtornos às pedreiras, pois estão sujeitos à ação dos ventos, liberando material particulado contaminando o ar e as chuvas, que provocam o carreamento dos finos, entupindo tubulações, assoreamento de drenagens e turvamento das águas (D'AGOSTINO; SOARES, 2003).

Assim como as demais indústrias, o progresso na tecnologia do concreto deve, necessariamente, levar em consideração a necessidade de conservação de recursos nacionais, ambientais e utilização adequada de energia (MALHOTRA *et al.*, 1987).

Sabir *et al.* (2001) destacam que o mais importante passo do desenvolvimento do concreto, neste último século, foi o início da utilização de subprodutos industriais na produção do concreto, como a pozolana de argila calcinada, escória de alto-forno e sílica ativa. Esta utilização é estendida a outros resíduos, como a cinza de casca de arroz e o metacaulim.

O desenvolvimento de concreto auto-adensável (CAA) com resíduos sólidos é uma contribuição positiva a sustentabilidade da tecnologia do concreto. O uso de resíduos sólidos em forma de pó, inertes ou pozolânicos, podem contribuir na dosagem deste concreto, reduzindo a demanda de cimento, da fração de finos dos agregados e de areia, que são requeridos em grandes quantidades no CAA.

O cimento portland, quando utilizado juntamente com as pozolanas, pode gerar matrizes mais duráveis, graças à reação pozolânica que consome parte do hidróxido de cálcio formando compostos do grupo dos silicatos e aluminatos de cálcio hidratados (NITA, 2006).

A adição de finos no CAA proporciona melhoria em diversas propriedades, tanto no estado fresco como no endurecido. Acredita-se que os finos atuam como pontos de nucleação, isto é, quebram a inércia do sistema fazendo com que as partículas de cimento sofram reação mais rápida com a água, ocasionando ganhos de resistências nas primeiras idades. Atuam ainda no melhor empacotamento dos grãos, fazendo com que haja um crescimento na densidade da pasta, dificultando a penetração de agentes agressivos e melhorando a zona de transição (BOSILJKOV, 2003).

Gomes *et al.* (2003) afirmam que a contribuição do CAA no desenvolvimento sustentável é refletida na diminuição do consumo de recursos naturais não-renováveis, usando subprodutos industriais que prejudicam o meio-ambiente, e na melhora de estruturas mais duráveis.

O concreto auto-adensável é definido como aquele concreto em que nenhuma vibração interna ou externa é necessária para sua compactação. É compactado por si só, devido sua alta coesão. Em peças estruturais com alta porcentagem de armaduras preenche todas as reentrâncias cobrindo as armaduras (DEHN; HOLSCHEMACHER; WEIßE, 2000).

Nunes (2001) comenta que, após o desenvolvimento do protótipo do CAA na Universidade de Tóquio, iniciou-se uma investigação intensiva em diversos lugares, especialmente nos institutos de pesquisa de grandes construtoras. Como resultado, o CAA tem tido aplicação prática em diversas estruturas. Sua maior aplicação em obras civis ocorreu em 1997, no Japão, com a concretagem das ancoragens de concreto da ponte metálica de maior vão livre do mundo. A ponte Akashi-Kaikyo (Figura 1.1), inaugurada em 1998, com 1991 metros de vão livre,

consumiu nas ancoragens (Figura 1.2) 290.000 m<sup>3</sup> de concreto auto-adensável (GEYER, 2006).



Figura 1. 1 - Ponte Akashi-Kaikyo (Geyer, 2006)



Figura 1. 2 - Interior do bloco de ancoragem da Ponte Akashi-Kaikyo (Geyer, 2006)

A Figura 1.3 mostra a primeira grande concretagem com CAA em um empreendimento residencial realizado no estado de Goiás, em 2004.



Figura 1. 3 - Obra realizada em Goiás com CAA pela construtora Arcel Engenharia Ltda. (GEYER *et al.*, 2005)

Apesar de estar se difundindo por vários países e estar ampliando o seu potencial de aplicação, este material ainda carece de muitas pesquisas. Portanto, com o intuito de poder acrescentar maiores conhecimentos neste assunto, esta dissertação apresenta um estudo das propriedades mecânicas e da microestrutura do concreto auto-adensável produzido com finos de pedreira e adições minerais pozolânicas.

O estudo discutido nesta dissertação é parte de um Projeto de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do setor elétrico brasileiro coordenado pela ANEEL – Desenvolvimento de método de dosagem e avaliação das propriedades do concreto

reodinâmico. Este projeto está sendo desenvolvido no Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A.

## 1.2. OBJETIVOS GERAIS

Constitui objetivo geral desta dissertação estudar as características e propriedades do concreto auto-adensável, avaliando a influência da adição de finos de pedreira e adições minerais pozolânicas.

## 1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Análise do método de dosagem proposto por Tutikian (2004) para utilização de finos de pedreira;
- Análise das propriedades mecânicas dos concretos auto-adensáveis, como resistência à compressão, resistência à tração por compressão diametral, tração na flexão e módulo de elasticidade;
- Estabelecer correlações entre as propriedades mecânicas dos concretos auto-adensáveis com o concreto convencional;
- Análise da influência da adição de finos de pedreira e adições minerais pozolânicas na zona de transição agregado-pasta;
- Estudo da viabilidade de uso dos finos de pedreira em substituição parcial a areia natural.

#### 1.4. ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO

A dissertação está dividida em 9 capítulos. No primeiro capítulo tem-se a introdução da pesquisa e seus objetivos.

No Capítulo 2 tem-se a história e o desenvolvimento do CAA, apresentando as características e propriedades. No Capítulo 3 comenta-se sobre os finos de pedreira e no Capítulo 4, sobre as adições minerais.

O programa experimental foi seccionado em três capítulos: Capítulo 5 com a caracterização e análise dos materiais utilizados, o Capítulo 6 apresenta a dosagem e os teores de adição e o Capítulo 7 traz a análise das propriedades mecânicas e a microestrutura.

Finalizando, no Capítulo 8, encontram-se as conclusões e as considerações finais. Encerrando o trabalho, a lista das referências bibliográficas.

## 2. CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

---

### 2.1. CONCEITO

Um concreto auto-adensável (CAA) é definido como um concreto que tem excelente deformabilidade e alta resistência à segregação, podendo fluir sobre uma área altamente reforçada sem necessidade de vibração (ROLS; AMBROISE; PÉRA, 1999).

O CAA é compactado por si só devido sua alta coesão. Em peças estruturais com alta porcentagem de armaduras preenche todas as reentrâncias cobrindo as armaduras (DEHN; HOLSCHEMACHER; WEIßE, 2000).

O concreto endurecido é denso, homogêneo e tem as mesmas propriedades e durabilidade do concreto convencional (EFNARC, 2005).

Zhu e Bartos (2003) afirmam que o CAA tem sido considerado como uma “revolução silenciosa” no processo de construção utilizando concreto, com benefícios importantes no aumento da produtividade e da qualidade construtiva, além de melhorar o ambiente de trabalho na obra.

De acordo com Goodier (2003), as três propriedades que caracterizam um concreto como auto-adensável são:

- Habilidade de fluir - habilidade de preencher completamente todas as áreas e cantos da fôrma em que é colocado;
- Habilidade de passar - habilidade de passar entre o reforço congestionado sem separação dos constituintes ou de obstruir;

- Resistência à segregação - habilidade de reter os componentes graúdos da mistura a fim manter um material homogêneo.

Estas propriedades devem ser totalmente satisfeitas para projetar um CAA adequado, juntamente com outras exigências, incluindo aquelas para o estado endurecido.

## 2.2. HISTÓRICO

O concreto auto-adensável foi primeiramente desenvolvido no Japão (BARBOSA *et al.*, 2002; HOLSCHEMACHER; KLUG, 2002; ARAÚJO *et al.*, 2003; ROLS; AMBROISE; PÉRA, 1999). Na China, em 1995, o nível de resistência usado no lançamento de peças pré-moldadas de concreto para construção de um túnel, foi de 50 a 60 MPa (XIE *et al.*, 2002). Países como Canadá, França, Escócia, entre outros, têm buscado maiores conhecimentos sobre as propriedades desse concreto (BARBOSA *et al.*, 2002). No Brasil, até a década de 70, o concreto auto-adensável era utilizado somente em concretagens submersas, por exemplo, a fundação da ponte Rio Niterói e as paredes diafragmas da Estação São Bento do metrô paulistano. No início deste século, outras utilizações para este tipo de concreto foram feitas, tais como concretagens onde há excesso de armaduras ou fundações de difícil acesso para vibração (GEYER; SENA, 2002). A partir de 2004, em cidades como Goiânia, Belo Horizonte, Florianópolis e Porto alegre, surgiram as aplicações de CAA em edifícios.

De sua origem no Japão, nos anos 80, a pesquisa, o desenvolvimento e o uso do CAA espalharam-se firmemente pelo mundo. Aproximadamente 7-10% do

mercado de concreto dosado em central sueco é de CAA e a pesquisa está sendo conduzida virtualmente cada país da Europa. Os grupos nacionais de trabalho sobre o material existem de alguma forma na maioria dos países da Europa, com alguns deles trabalhando para produzir normas para uso do CAA (GOODIER, 2003).

Ainda segundo Goodier (2003), as grandes quantidades de pesquisa e de desenvolvimento estão sendo conduzidas também no Canadá e nos EUA, em lugares como a universidade de Sherbrooke e do Université' Laval. A primeira conferência norte-americana sobre o CAA foi realizada em novembro de 2002 pela universidade Northwestern. Organizações americanas de concreto, como o Instituto Americano do Concreto (ACI), a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) e o PCI (Instituto do Concreto Protendido) têm comitês, recentemente formados, para produzir normas, padrões e especificações para o CAA. Esse material está ganhando lentamente a aceitação no mercado e já estima-se que aproximadamente 4000 - 5000 m<sup>3</sup> são usados por dia em aplicações protendidas na América do Norte.

Persson (2001) relata que, na Suécia, o CAA foi utilizado em 19 pontes em vias expressas e em lajes para casas populares e um aumento de 60% na produção pôde ser observado.

Não se espera que o CAA substitua completamente o concreto convencional. O uso do material em ambos os mercados pré-moldado e dosado em central no Reino Unido, Europa e no resto do mundo espera-se continuar a aumentar. Os principais motivos para este aumento no uso incluem (GOODIER, 2003):

- Aumento na experiência de produtores, contratantes, projetistas e clientes;
- Aumento na orientação disponível para produção, projeto e uso do CAA;
- Redução no custo do material, com a tecnologia e ganho de experiência;
- Demanda dos clientes para um material de melhor qualidade de acabamento;
- Redução do trabalho hábil disponível em muitos países para concretagens e acabamento do concreto.

No Brasil, se tomarmos como exemplo a cidade de Goiânia, a partir de 2004, entre 2 e 3% dos concretos produzidos para execução de edifícios, nas concreteiras, foi auto-adensável (GEYER, 2006).

Na cidade de Goiânia, Goiás, o concreto auto-adensável tem sido utilizado em diversos tipos de obra, alcançando ótimos níveis de satisfação. A seguir, disponibilizamos algumas fotos de empreendimentos onde o CAA foi utilizado (cedidas pelo Prof. Dr. André Geyer).



Figura 2. 1 - Lançamento de CAA em steel deck de um shopping Center



Figura 2. 2 - Detalhe da armadura do pavimento tipo



Figura 2. 3 – Concretagem do pavimento tipo de um edifício



Figura 2. 4 - Edifícios residenciais construídos utilizando o CAA executados pela construtora Toctao Engenharia Ltda.

Nos empreendimentos citados foram utilizados os concretos estudados nesta dissertação, verificando sua utilização *in situ*. Nas lajes *steel deck*, o concreto aplicado contém adição de 8% de sílica ativa em substituição parcial ao cimento em massa e fck de 45 MPa. Os pavimentos tipo apresentados nas Figuras 2.2 e 2.3 foram concretados com CAA com adição de finos de micaxisto e fck de 20 MPa. Já os edifícios residenciais da Figura 2.4 consumiram concreto com adição de finos de granulito e fck de 30 MPa.

No Aeroporto Internacional de Goiânia Santa Genoveva, foi aplicado o CAA com adição de sílica ativa (substituição parcial ao cimento de 8% em massa) e fck de 40 MPa nas paredes do subsolo. Essas paredes possuem 6 m de altura. Nas Figuras 2.5 e 2.6 têm-se as imagens da obra.



Figura 2. 5 - Aeroporto Internacional de Goiânia Santa Genoveva – concretagem da parede do subsolo com CAA – construtoras Odebrecht e Via Engenharia



Figura 2. 6 - Parede do sub-solo após desforma

### 2.3. PROPRIEDADES

Okamura e Ouchi (1999) citam que o protótipo para o CAA foi primeiramente finalizado em 1988 utilizando materiais existentes no mercado japonês. O protótipo teve desempenho satisfatório, recebeu o nome “Concreto de Alto Desempenho” e foi definido de acordo com os seguintes estágios do concreto:

- Fresco: auto-compactável;
- Endurecido: proteção contra fatores externos.

Em princípio, as propriedades do CAA fresco e endurecido, que dependem da dosagem, não devem ser diferentes do concreto convencional. Uma exceção é a consistência (DEHN *et al.*, 2000).

### 2.3.1. Propriedades no estado fresco

O CAA apresenta alta fluidez, habilidade de auto-compactação e resistência à segregação no estado fresco, que contribuem na redução do risco de formação de nichos no concreto (SU *et al.*, 2001).

Uma boa resistência à segregação significa uma distribuição equivalente das partículas dos agregados no volume de concreto. A resistência à segregação tem papel importante para o CAA, uma vez que uma baixa resistência à segregação pode causar baixa deformabilidade, bloqueio em volta das armaduras e alta retração por secagem, além de uma resistência à compressão não uniforme (TVIKSTA, 2000; BUI *et al.*, 2002).

A resistência à segregação não pode somente ser definida pela viscosidade da mistura, mas deve também depender da quantidade e do tamanho do agregado gráudo. Já a propriedade de não bloquear é governada pela deformabilidade, pela resistência à segregação e pelas condições de contorno das estruturas onde o concreto for aplicado (TAKADA, 2004).

Grauers (2000) também afirma que quando um bom concreto auto-adensável é utilizado, melhores superfícies, com menos poros e necessitando de menos reparos e acabamentos, são obtidos quando comparado às superfícies do concreto tradicional vibrado. Os nichos de concretagem, que geralmente aparecem na parte inferior dos pilares e paredes quando o concreto convencional é utilizado, praticamente desaparecem com o uso do concreto auto-adensável.

Geyer (2006) afirma que o CAA não é um fluído como a água. Embora seja muito mais trabalhável que os concretos convencionais, não é um líquido.

### 2.3.2. Propriedades no estado endurecido

As correlações entre as propriedades mecânicas de um CAA, por exemplo, entre  $f_c \times E_c$ , ainda não são totalmente conhecidas. Devido a isto e eventuais diferenças que apresentam em relação ao CCV (concreto convencional) é necessário que sejam estudadas (GEYER; SENA, 2002).

A resistência do CAA, segundo Su *et al.* (2001), é provida pela aglomeração do agregado pela pasta no estado endurecido, enquanto que a trabalhabilidade do CAA é provida pela pasta aglomerante no estado fresco. Entretanto, os agregados - gráudo e miúdo, aglomerantes, água e aditivo superplastificante são os principais fatores que influenciam as propriedades do CAA.

As razões para possíveis diferenças entre as propriedades do CAA endurecido e do concreto convencional podem ser:

- Melhor microestrutura e homogeneidade do CAA;
- Alto teor de materiais ultrafinos / adição de aditivos.

Holschemacher e Klug (2002) afirmam que o módulo de elasticidade do CAA pode ser até 20% menor em relação ao concreto convencional, de mesma resistência à compressão e mesma composição. Entretanto, Mehta e Monteiro (1994) defendem que o módulo de elasticidade é governado pelo teor e forma do agregado gráudo utilizado nas composições, ou seja, se o mesmo agregado gráudo é utilizado tanto no concreto convencional como no auto-adensável, com os mesmos teores, os módulos tendem a ser iguais.

Pesquisadores investigaram a resistência de aderência entre o CAA e as barras de reforço usando peças de concreto armado, em escala real, moldadas com CAA e concreto convencional (CHAN *et al.*, 2003). As peças de CAA foram moldadas sem aplicar nenhuma compactação, e as peças de concreto convencional

foram moldadas com vibração mecânica substancial. Os resultados, de acordo com Labonte (2004), mostraram que as peças de CAA geraram uma aderência mais elevada às barras em comparação às peças de concreto convencional.

## 2.4. MATERIAIS

A respeito de sua composição, o concreto auto-adensável é composto de alguns componentes do concreto convencional tradicionalmente vibrado, como cimento, agregado, água, aditivos químicos e adições minerais. Entretanto, há o indispensável uso de superplastificante para reduzir a quantidade de água e melhorar a trabalhabilidade, o alto teor de finos como lubrificantes dos agregados graúdos, bem como o uso eventual de agentes modificadores de viscosidade para aumentar a viscosidade do concreto (DEHN; HOLSCHEMACHER; WEIßE, 2000). Os índices elevados de finos são necessários no concreto auto-adensável para aumentar a coesão. Escória granulada de alto-forno, pozolana, ou um material inerte tal como pó de pedra calcária são, geralmente, utilizados. É possível, entretanto, produzir um concreto auto-adensável sem adicionar nenhum material fino extra (GOODIER, 2003), desde que a areia contenha finos ou adicione-se aditivo modificador de viscosidade.

## 2.5. DOSAGEM

De acordo com Su *et al.* (2001), para produzir o CAA, o trabalho principal envolve o desenvolvimento de uma dosagem com o proporcionamento adequado dos materiais e análise das propriedades do concreto obtido. Com essas propriedades, o CAA produzido pode melhorar a confiabilidade e a durabilidade das estruturas de concreto armado. Além disso, o CAA possui bom desempenho na resistência à compressão e pode atender outras necessidades construtivas porque sua produção leva em consideração os requisitos do projeto estrutural.

O concreto auto-adensável é certamente um dos concretos mais difíceis de dosar devido à necessidade de encontrar o equilíbrio entre as diferentes propriedades que dependem de mecanismos distintos: de fato, o CAA fresco deve ter uma ótima fluidez, alta estabilidade até o momento final da concretagem e, geralmente, uma boa habilidade de passar entre a armadura. Além disso, os requerimentos de trabalhabilidade levam ao grande volume de pasta, o que promove fissurações e retrações (GRAUERS, 2000).

Considerando que atualmente os concretos convencionais são praticamente todos bombeados, com altos teores de argamassa, e que com estes mesmos teores, desde que com adição de finos, podemos produzir CAA, as retrações seriam nos mesmos níveis.

O CAA pode ser utilizado tanto moldado *in loco* como na indústria de pré-moldados, pode ser dosado no canteiro de obras ou em centrais de concreto. Pode ser lançado com bombas, guias ou espalhado, sendo o CAA tão versátil como o concreto convencional (TUTIKIAN, 2004).

Skarendahl (2003) menciona que o CAA, assim como o concreto convencional, nunca poderá ser ligado a composições específicas ou performances específicas. Sua composição é ainda mais criteriosa do que a do concreto convencional dependendo dos materiais locais utilizados, da dosagem e dos parâmetros de processo. O desenvolvimento do CAA tem mudado o concreto fresco, de um material granular que necessita vibração para compactação a um fluído. Essa mudança tem um número de implicações no processo construtivo do concreto, produto e importância organizacional.

#### 2.5.1. Métodos de dosagem

Os métodos de obtenção do concreto auto-adensável não são fundamentados apenas na questão da alta fluidez do concreto, mas também considerando a capacidade do concreto passar entre obstáculos sem ocorrer bloqueio nem resistência à segregação.

Serão descritos resumidamente os métodos de dosagem considerados mais importantes para o concreto auto-adensável e o método utilizado no programa experimental.

##### 2.5.1.1. Método proposto por Okamura (1995)

O método limita a quantidade de agregados, considera baixa relação água/cimento e utiliza altas dosagens de aditivo superplastificante (TUTIKIAN, 2004).

Tutikian (2004) explica que no procedimento de dosagem, o agregado graúdo é limitado em 50% do volume total de concreto e o agregado miúdo limita-se em 40% do volume total da argamassa. O aditivo é determinado experimentalmente, até que se atinjam as características desejadas. Neste método não são consideradas adições.

#### 2.5.1.2. Método EFNARC (2002)

EFNARC impõe algumas exigências quanto à produção, composição e aplicação do CAA, tais como:

- Os materiais constituintes do CAA devem satisfazer às exigências da EN 206-1 (Especificação, desempenho, produção e conformidade do concreto);
- Os cimentos utilizados devem satisfazer às exigências da EN 197-1 (Composição, especificações e critérios de conformidade do cimento). A seleção do tipo de cimento dependerá de suas exigências quanto à resistência, durabilidade, dentre outros. O consumo de cimento é da ordem de 350 kg/m<sup>3</sup> a 450 kg/m<sup>3</sup>, pois acima deste valor, pode causar retração excessiva e abaixo só poderá ser utilizado com a adição de outro material cimentício, tal como as pozolanas;
- Os agregados devem satisfazer às exigências da EN 12620. A dimensão máxima para o agregado graúdo é de 20 mm. Geralmente, são utilizados agregados graúdos com dimensão máxima entre 16 mm e 20 mm. Para o agregado miúdo, todas as areias podem ser utilizadas, contanto que isenta de agentes nocivos e impurezas. É importante salientar a necessidade de se fazer um controle de umidade dos agregados para a obtenção de um CAA com composição uniforme;

- A água deve satisfazer às exigências da EN 1008 (Água para concreto);
- Os aditivos químicos como os superplastificantes, devem atender às exigências da EN 934-2;
- Os aditivos minerais ou adições minerais, como fíleres de agregados e pigmentos, devem atender às exigências da EN 12620 (Agregados para concreto); EN 450 (Definições, exigências e controle de qualidade de cinzas volantes para concreto); EN 13263 (Definições, exigências e controle de qualidade da sílica ativa para concreto);
- A produção e dosagem do CAA devem atender às exigências da EN 206 (Densidade, aumento de resistência, resistência final e durabilidade);
- A dimensão máxima dos finos deve ser menor que 125 µm para que as propriedades do CAA no estado fresco sejam satisfatórias. Caso contrário deve ser utilizado um agente regulador de viscosidade no concreto.

#### 2.5.1.3. Método proposto por Gomes (2002)

O método apresenta um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do concreto auto-adensável de alta resistência.

O procedimento proposto por Gomes (2002), para CAA de alta resistência, foi fundamentado na otimização do esqueleto granular de agregados, otimização separada da composição da pasta, com a determinação da dosagem ótima de superplastificante, variando a quantidade de superplastificante e mantendo constantes as relações água/cimento (a/c) e fíler/cimento (f/c), bem como a

produção do concreto com a dosagem de superplastificante igual à dosagem ótima da pasta.

#### 2.5.1.4. Método proposto por Tutikian (2004)

A base do método proposto por Tutikian (2004) é o método de dosagem para concretos convencionais descrito por Helene e Terzian (1992). O princípio básico do método é a obtenção de um CAA a partir de um CCV (concreto convencional) cujo teor ideal de argamassa deverá ser previamente determinado. Os materiais devem ser escolhidos e devidamente caracterizados a fim de que possam ser conhecidas as propriedades que influenciam na dosagem. Uma vez escolhidos os materiais, que são também função dos requisitos de projeto, começa-se por definir os parâmetros de dosagem, como relação água/cimento pretendida de acordo com os requisitos de durabilidade estabelecidos em projeto.

A seguir devem ser definidos três traços que irão formar a família do concreto a ser dosado, normalmente, para concretos de resistências convencionais, são indicados, por exemplo, os traços 1:3,5, 1:5 e 1:6,5. Porém, nem sempre é assim e outros traços podem ser usados. Determina-se o teor ideal de argamassa a partir do traço central ou intermediário.

Com o teor de argamassa determinado para o traço intermediário procede-se da mesma maneira para os outros dois traços (podem ser mais do que três traços) quando se desejar montar uma curva de dosagem para o concreto de partida, que é ainda um concreto convencional.

Coloca-se então o aditivo superplastificante na mistura, o que vai causar uma segregação dos materiais. A partir desse ponto começa o processo iterativo do

método, que é o acerto da viscosidade da mistura através da introdução de finos sobre o teor de areia (isso quando se trata de fino não-pozolânico).

## 2.6. ENSAIOS DE CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL

Três propriedades são necessárias serem medidas nos concretos auto-adensáveis: fluidez, capacidade de passar por entre obstáculos e resistência à segregação. Para essas medidas existem os seguintes ensaios:

- Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando o cone de Abrams (Slump flow test)

De acordo com EFNARC (2005) e FURNAS (2007a), este ensaio é usado para avaliar o fluxo livre horizontal do CAA na ausência das obstruções. Esse método de ensaio determina o espalhamento do concreto, essa medida avalia a habilidade de preenchimento do concreto e este ensaio também avalia alguma indicação da resistência a segregação. Hodgson (2003) *apud* Melo (2005) cita algumas informações complementares que podem ser obtidas, de forma a auxiliar a avaliação, que são: análise da distribuição do agregado graúdo, verificando se há concentração de partículas no centro; análise da segregação e exsudação, verificando a presença de uma fina camada de pasta ou água de exsudação ao redor da região de espalhamento e análise de forma assumida pelo concreto durante o espalhamento, verificando se a abertura regular.

— *Slump flow*  $T_{50\text{cm}}$  test

Segundo EFNARC (2002) e FURNAS (2007a), o  $T_{50\text{cm}}$  é o tempo em segundos que o concreto leva para alcançar o círculo de 50 cm de diâmetro. Este ensaio é realizado juntamente com o espalhamento. O tempo medido deve se situar entre 2 e 5 segundos.

— Teste do funil V

EFNARC (2005) comenta que o ensaio do Funil V é usado para determinar a habilidade de preenchimento de concreto com agregado graúdo de dimensão máxima de 20 mm. O Funil V é preenchido com aproximadamente 12 litros de concreto e é medido o tempo de escoamento através do equipamento, que deve situar de 8 a 12 segundos (FURNAS, 2007c). Após a determinação do tempo, este funil pode ser preenchido novamente, e a medida de escoamento realizada após 5 minutos de espera deste preenchimento, tende a aumentar significativamente, quando o concreto apresentar a segregação, e com relação à medida inicial esse tempo terá um acréscimo maior que 3 segundos.

— Caixa L

Nesse ensaio determina-se a capacidade do concreto de passar por restrições, simulando-se as armaduras, bem como sua deformabilidade, resistência ao bloqueio e resistência à segregação (MELO, 2005; FURNAS, 2007d). A realização do ensaio da Caixa L consiste em encher a parte vertical da caixa e abrir a portinhola para o concreto escoar por entre a grade de aço. Então são medidas as alturas  $H_1$  e  $H_2$  após o escoamento e o valor da razão  $H_2/H_1$  deve estar entre 0,8 e 1,0 (EFNARC, 2005). Gomes (2002) mostra outra possibilidade de medir o tempo

decorrido quando o concreto atingir as distâncias de 20 cm e 40 cm na horizontal da caixa, esse tempo é definido como:  $T_{20} < 1$  s e  $T_{40} < 2$  s.

### — Caixa U

Esse ensaio avalia a capacidade do concreto fresco, sob pressão hidrostática, de passar por obstáculos (FURNAS, 2007b).

### — *Fill Box test*

O ensaio da caixa de preenchimento, também conhecido por método de Kajima ou *vessel-test*, serve tanto para avaliação da resistência à segregação do CAA como da habilidade de preenchimento (FURNAS, 2007e). Utiliza-se um aparelho constituído de um recipiente, de cerca 45 litros, transparente com uma superfície lisa e impermeável, no qual são colocados obstáculos. O recipiente é preenchido com o concreto e então é medido o desnível do concreto, isto é, a diferença de altura entre o lado por onde penetrou o concreto e o lado oposto, após o escoamento do material. Todo o ensaio deve ser realizado em aproximadamente cinco minutos da coleta da amostra. Para a mistura ser considerada auto-adensável, o valor do desnível deve estar situado entre 0% e 10% da altura do lado entre colocou-se o concreto (FURNAS, 2007e).

### — *Orimet test*

O Orimet consiste em um tubo vertical com um formato cônico na parte inferior, que é empregado para se medir a facilidade de fluidez do concreto, estando também relacionado com a viscosidade (MELO, 2005). Geralmente o orifício inferior do Orimet tem um diâmetro interno de 80 milímetros para a avaliação das misturas

com dimensão máxima do agregado que não excedem 20 mm (EFNARC, 2005). O procedimento do ensaio se dá pelo preenchimento do tubo com CAA, medindo-se o tempo gasto para seu escoamento completo. EFNARC (2005) comenta que o tempo de fluxo apropriado é um valor igual ou inferior a 5 segundos. Pois, tempos prolongados do fluxo podem indicar alguma sensibilidade da mistura à obstrução ou a segregação (LIMA, 2007).

### — *J-ring test*

Este ensaio conhecido como *J-ring* ou Anel Japonês é usado para determinar a capacidade de escoamento do concreto. O equipamento consiste em um anel com diâmetro de 300 mm composto de barras verticais de aço. Esse ensaio pode ser utilizado conjuntamente com o ensaio de espalhamento ou com Orimet. As armaduras podem apresentar diferentes diâmetros e diferentes intervalos de espaçamento (EFNARC, 2005; ARAÚJO *et al.*, 2003). Melo (2005) cita que após o escoamento através do cone de Abrams “Slump flow” ou do Orimet, é avaliado a diferença de altura entre a porção da mistura que permaneceu no interior do anel, e a outra parcela que se espalhou para o exterior do anel. Nesse ensaio pode avaliar de forma visual a ocorrência de bloqueio ou segregação. A diferença das alturas deve compreender entre 0 mm e 10 mm (EFNARC, 2005).

São descritos nos próximos itens os ensaios mais conhecidos e utilizados na caracterização dos concretos produzidos no programa experimental.

### 2.6.1. Espalhamento

O ensaio de espalhamento determina a habilidade de preenchimento, ou deformabilidade do CAA, sob ação do seu peso próprio. O método de ensaio é descrito pelo Manual da Qualidade de Furnas - Determinação da habilidade de preenchimento do concreto auto-adensável utilizando-se o cone de Abrams (Slump flow test) (FURNAS, 2005a). O ensaio consiste em preencher o cone de Abrams até sua totalidade, sem qualquer adensamento. O cone deverá estar umedecido e posicionado no centro de uma base impermeável e plana, conforme a Figura 2.7. Um círculo com diâmetro de 500 mm deve ser marcado na base previamente. Após o cone ser preenchido é retirado verticalmente, liberando o concreto. Ao retirar-se o cone, marca-se o tempo para o concreto atingir o círculo da base. Quando o concreto se estabiliza, duas medidas são realizadas, ortogonalmente, dos diâmetros.

Com esse ensaio podemos avaliar a fluidez - diâmetros, a viscosidade – tempo de fluidez e segregação – análise visual.



Figura 2. 7 - Equipamento para realização do ensaio de espalhamento

Na literatura encontramos valores de espalhamento considerados ideais ao concreto auto-adensável. A Tabela 2.1 apresenta alguns valores, que podem variar segundo o tipo de aplicação do concreto, bem como os materiais empregados. Cabe ao responsável pela produção do concreto auto-adensável definir o melhor espalhamento observando a ocorrência ou não de segregação e/ou exsudação.

Tabela 2. 1 - Valores de espalhamento citados por diferentes autores

| Referências                  | Espalhamento (mm) |            |
|------------------------------|-------------------|------------|
|                              | Mínimo            | Máximo     |
| EFNARC (2002)                | 650               | 800        |
| Gomes (2002)                 | 600               | 700        |
| Gomes <i>et al.</i> (2003)   | 600               | 750        |
| Araújo <i>et al.</i> (2003)  | 650               | 800        |
| Barbosa <i>et al.</i> (2003) | 550               | 700        |
| <i>Média</i>                 | <i>610</i>        | <i>750</i> |

### 2.6.2. Caixa U

Esse ensaio avalia a capacidade do concreto fresco, sob pressão hidrostática, de passar por obstáculos.

De acordo com o Manual da Qualidade de Furnas (FURNAS, 2005), que descreve o procedimento “Determinação da habilidade passante do concreto auto-adensável pelo método da Caixa U”, habilidade passante é a propriedade que caracteriza a capacidade do concreto auto-adensável de fluir dentro da fôrma, passando por entre as armaduras sem obstrução do fluxo ou segregação. As Figuras 2.8 e 2.9 mostram o equipamento para realização do ensaio.

Para realização do ensaio, a caixa U deverá estar limpa e umedecida, deixando a comporta fechada e apoiando a mesma em uma superfície rígida, plana

e horizontal. Em tempo não superior a 5 minutos após a coleta, a amostra de concreto deverá ser colocada na caixa, preenchendo-a totalmente, sem adensamento, de forma uniforme e sem interrupção. Em seguida, o excesso de concreto da superfície deverá ser retirado, fazendo-se o nivelamento da superfície. Simultaneamente ao final do preenchimento da “câmara A”, o cronômetro deverá ser acionado e, após o intervalo de 60 segundos, deverá ser efetuada a abertura da comporta, permitindo o escoamento do concreto. Cessado o escoamento, deverá ser calculada a altura de preenchimento (em milímetros), ou seja, o desnível ( $D$ ) entre as superfícies do concreto nas “câmaras A e B”, de acordo com a Equação 1:

$$D = H_1 - H_2$$



Figura 2. 8 - Vista frontal da Caixa U

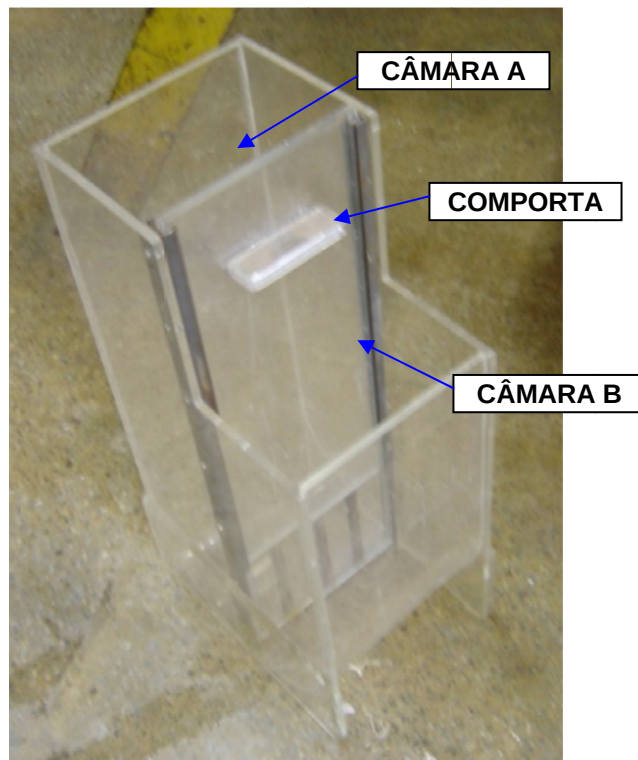


Figura 2. 9 - Vista superior da Caixa U

## 2.7. VANTAGENS / PONTOS CONTROVERSOS

O uso do CAA oferece vários benefícios para a construção: a eliminação da vibração resulta na redução de custos de concretagem, redução do tempo da obra e aumento na produção (HOLSCHEMACHER; KLUG, 2002).

A grande vantagem do CAA é a garantia de que um concreto bem dosado, que atende às especificações de projeto e características no estado fresco com lançamento e cura adequados, vai propiciar um produto final endurecido com qualidade, ao contrário do concreto convencional cujo produto final depende largamente do processo de adensamento ou compactação (MANUEL, 2005).

O CAA possui vantagens (MAAGE, 2005) e pontos controversos encontrados na bibliografia como desvantagens, as quais são comentadas e refutadas.

### 2.7.1. Vantagens:

- CAA oferece superfícies com reduzido número de poros, possibilitando o uso de concreto em novas aplicações;
- O trabalho necessário no canteiro de obras é reduzido graças a sua capacidade de auto-compactação, mesmo na presença de muitos obstáculos (armadura densa);
- A eliminação da vibração melhora o ambiente nas proximidades da obra, reduzindo a exposição dos operários a ruídos e vibração, acarretando melhoria na saúde e segurança dos operários;

- A eliminação da vibração reduz a necessidade de cabos e tubulações nos andaimes, reduzindo o risco de acidentes;
- CAA oferece uma rápida taxa de concretagem, com prazos de construção menores e um alto nível de homogeneidade do concreto;
- CAA torna fácil a produção de peças com seções detalhadas, permitindo o desenvolvimento arquitetônico.

#### 2.7.2. Pontos controversos:

- O custo do CAA em relação ao convencional é muito superior (MAAGE, 2005):

Para  $f_{ck}$  superior a 25 MPa, o custo se equipara. Tutikian (2004), Geyer *et al.* (2005) e Ferreira *et al.* (2006b) realizaram estudos comparativos entre o CAA e o concreto convencional, concluindo que o concreto auto-adensável é economicamente compatível com o concreto convencional;

- A pressão nas formas pode ser maior para o CAA do que para o convencional devido à fluidez e maior velocidade de concretagem (GOODIER, 2003):

A pressão das fôrmas depende da fluidez e da coesão do CAA, relação da altura vertical e o método de concretagem. O projeto da fôrma, incluindo o suporte e sistema de fixação, deve normalmente assumir que toda pressão hidrostática do concreto é aplicada na fôrma (EFNARC, 2005). Lajes e vigas não necessitam de reforço nas formas;

- CAA possui normalmente um maior teor de matriz e volume de pasta do que o convencional, resultando em fissurações intrínsecas e por secagem (HOLSCHEMACHER; KLUG, 2002):

Manuel (2005) em sua dissertação, afirma, após realização de vários testes, que o teor de matriz e o volume de pasta do CAA são os mesmos utilizados para o concreto convencional, fato também defendido por Tutikian (2004) que utiliza o mesmo método de determinação do teor de argamassa do concreto convencional desenvolvido por Helene e Terzian (1992) para determinar o teor para o concreto auto-adensável. Sendo assim, em princípio, as fissurações devem ocorrer na mesma ordem para ambos os tipos de concreto;

- O alto teor de co-polímeros pode resultar em um maior tempo de pega do concreto (NUNES, 2001):

A substituição dos aditivos modificadores de viscosidade (VMA) por finos evita este retardo no tempo de pega.

Ozawa (2001) destaca que é importante reduzir o risco de novas tecnologias e aumentar o incentivo ao desenvolvimento tecnológico. Até 2001, no Japão, a normalização da tecnologia tem sido realizada tendo como base vários experimentos realizados. No passado, o projeto em larga escala teve um papel importante. No futuro, será necessário reavaliar o processo e o sistema de construção no projeto para aquele propósito. A Figura 2.10 mostra um fluxograma de processo construtivo para o CAA proposto por Ozawa.

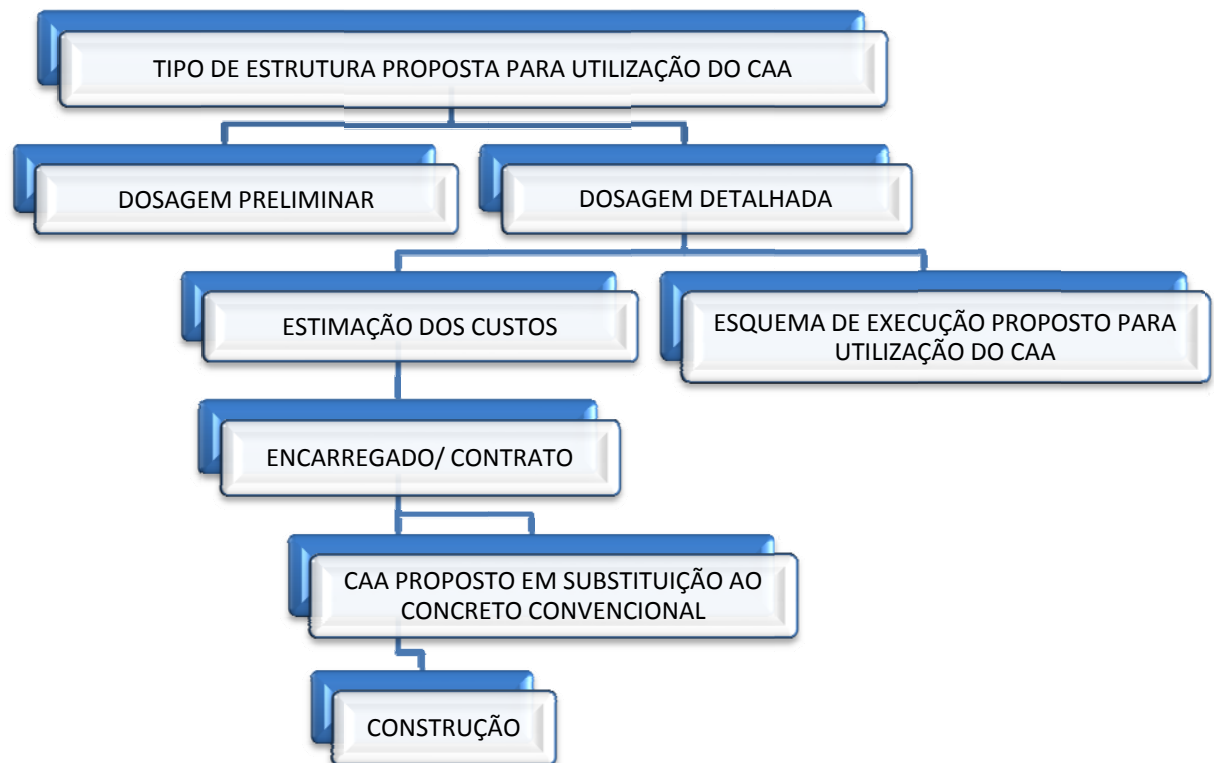


Figura 2. 10 - Estágios de aplicação do CAA no processo construtivo (OZAWA, 2001)

### 3. *FINOS DE PEDREIRA COMO ADIÇÕES MINERAIS*

---

#### 3.1. DEFINIÇÃO

Uma grande quantidade de material na graduação do filer mineral é produzida durante o processo de britagem, o qual pode ser utilizado como agregado. Se não forem do tipo argiloso, a aplicação desses materiais é benéfica para a composição do concreto. (TOPÇU; UĞURLU, 2003).

A NBR 7225 (ABNT, 1993) define finos de pedreira como “material proveniente do britamento de pedra, de dimensão nominal máxima inferior a 0,075 mm”.

No processo de britagem da rocha para produção dos agregados também é produzido o pó de pedra, nesta dissertação denominado finos de pedreira, cuja quantidade irá depender da dureza da rocha e dos equipamentos utilizados na britagem. Esse material, passante na peneira ABNT N° 200 (0,075 mm) e com finura próxima a do cimento, foi eliminado do processo de produção dos concretos durante um longo tempo, sendo lançado no leito dos rios ou deixado sobre o solo.

É importante ressaltar que, quando não possuem destinação definida, esses finos são estocados ao ar livre nos pátios das pedreiras, formando enormes pilhas expostas à ação de intempéries, podendo gerar danos ambientais, tais como: poluição atmosférica, assoreamento de rios e leitos d’água, além de contaminação pelo material lixiviado nas áreas de drenagem (NEVES; LIMA, 2001).

### 3.2. CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES

O processamento de agregados britados de rochas leva à obtenção de partículas com o mínimo possível de elementos fracos; a explosão e britagem de rochas resistentes, finamente texturada, propiciam a produção de partículas com quantidade mínima de microfissuras (AİTCIN, 2000).

Os finos britados possuem forma mais angulosa dos grãos. A textura superficial, quase sempre mais áspera e a maior porcentagem dos elementos finos levam a esperar um concreto menos trabalhável (BASTOS, 2003).

Estes finos podem ser considerados, ainda hoje, como materiais marginais ou resíduos de mineração de caráter inservível quando não possuem valor comercial de mercado (NEVES; LIMA, 2002).

O material fino do agregado era considerado argila, independentemente de sua origem petrográfica, o que é uma falsa impressão (TOPÇU; UĞURLU, 2003). A existência de argila no agregado provoca o enfraquecimento na aderência entre a pasta de cimento e o agregado no concreto.

Acredita-se que os finos atuam como pontos de reação, isto é, quebram a inércia do sistema fazendo com que as partículas de cimento sofram reação mais rápida com a água, ocasionando ganhos de resistência nas primeiras idades. Atuam ainda no aumento do pacote de finos, fazendo com que haja um crescimento na densidade da pasta, dificultando a penetração de agentes agressivos melhorando a zona de transição (TUTIKIAN, 2004).

### 3.3. UTILIZAÇÃO NO CONCRETO

Na mistura de concreto, quando adicionado com critérios, os finos de pedra proporcionam uma mistura de qualidade, sendo que seu desempenho depende da uniformidade granulométrica e da quantidade de material pulverulento (POSSAN *et al.*, 2003).

O emprego dos finos de pedra para concretos e argamassas tem sido investigado por vários pesquisadores, tanto no sentido do aproveitamento do resíduo indesejado para o meio ambiente, bem como na utilização de um novo material que melhore as propriedades dos concretos nos seus estados fresco e endurecido e, finalmente, para a redução dos custos de produção do concreto, através da diminuição do consumo de cimento (BATISTA, 2004).

Poitevin (*apud* SPENGLER; SCHIESSL, 2001) relata que o farol de Port-Said, no Egito, com 52 metros de altura, ainda em uso, foi construído com concreto contendo apenas areia. Na Rússia, em várias áreas, a areia é o único material de construção para uso em concreto. Desde os anos 50, muitos edifícios foram construídos com “concreto de areia” na Alemanha (SPENGLER; SCHIESSL, 2001).

#### 3.3.1. Efeitos no concreto fresco

Scobin *et al.* (2002) consideram que, em função das características dos grãos de quartzo moído, o material tem a capacidade de se posicionar em lugares no interior da pasta de cimento onde se concentram veios de água capilar, quando o sistema ainda está no estado fresco e, pela ação de forças capilares de adesão

superficial, esses grãos promovem a interrupção da continuidade dos veios capilares, seja na matriz da pasta ou na ligação pasta-agregado (zona de transição).

Abou-Zeid *et al.* (2003) relatam que a introdução dos finos provenientes da britagem de calcário dolomítico no concreto, em quase todas as normas existentes, em quantidades excessivas de finos menores que a peneira #200 são banidos para uso em concretos de boa qualidade devido à maior água requerida em razão da elevada área específica de suas pequenas partículas, à tendência que alguns tipos de finos têm de inchar, causando um incremento de volume, podendo provocar uma instabilidade interna da mistura e ao fato dos finos agirem como um filme fino isolante em torno das partículas maiores de agregados causando uma redução da aderência entre essas partículas e a pasta de cimento.

Inicialmente, numa observação visual, consideravam-se os finos com aspecto não coesivo, prejudicial ao concreto. Contudo, após alguns testes, o material foi incorporado aos concretos convencional e compactado com rolo, embora não tenham sido pesquisados quais os reais efeitos, sejam de origem química ou física (KREMPEL *et al.*, 1995).

Muniz *et al.* (2002) relatam que Ossipov observou que os agregados, após a sua moagem, poderiam apresentar características pozolânicas. Almeida (1991), citado por Muniz *et al.* (2002), complementa observando que, no processo de britagem, a rocha libera energia eletrostática durante a quebra de suas moléculas, o que tornaria os agregados pulverizados pozolanas.

Desde então, várias barragens passaram a empregar finos de pedreira como material que proporcionaria uma melhor trabalhabilidade e como um agente capaz de atuar no refinamento dos poros e, conseqüentemente, na redução da permeabilidade (BATISTA, 2004).

A distribuição granulométrica das partículas, forma e absorção dos fileres minerais podem afetar a demanda de água e, conseqüentemente, a adequação da produção de CAA. A fração mais vantajosa é a inferior a 0,125 mm e, em geral, é desejável que >70% seja passante na peneira 0,063 mm. Fileres especialmente produzidos para essa aplicação oferecem a vantagem de melhorar o traço e a consistência da composição granulométrica, oferecendo um melhor controle sobre a demanda de água e tornando-os particularmente adequados ao CAA em comparação a outros materiais avaliados (EFNARC, 2005).

### 3.3.2. Efeitos na durabilidade

Hasparyk *et al.* (2002) afirmam que o concreto contendo finos de pedreira, em substituição à areia, apresenta uma microestrutura mais fechada, similar à do concreto contendo 20% de pozolana.

Oliveira *et al.* (1995) consideram que teores de 5 a 15% de material passante na peneira de nº 100 e de 1 a 10% na peneira nº 200 atuam no concreto compactado a rolo (CCR) através de efeito filer, favorecendo o aumento do grau de compactação, redução da permeabilidade e que atuam também como uma pozolana.

## 3.4. IMPACTO AMBIENTAL

Atualmente 90% da produção nacional de areia natural, no Brasil, é obtida a partir da extração em leito de rios e os 10% restantes, de outras fontes (várzeas,

depósitos lacustre, mantos de decomposição de rochas, pegmatitos e arenitos decompostos) (ALMEIDA; SILVA, 2005).

Os recursos em agregados são, em geral, abundantes no Brasil, porém há algumas regiões com escassez significativa. Os grandes centros consumidores encontram-se em regiões geologicamente favoráveis à existência de reservas de boa qualidade. A participação dos tipos de rochas utilizadas na produção de pedra britada é a seguinte: granito e gnaiss – 85%; calcário e dolomito – 10%; basalto e diabásio – 5%. Algumas regiões, entretanto, têm recursos insuficientes em rochas adequadas para a produção de brita (VALVERDE, 2005).

De acordo com Valverde (2005), em 2004 foram produzidos, no Brasil, 315,7 milhões de toneladas de agregados, representando um decréscimo de 1,4% em relação a 2003. Deste total, 128,7 milhões de toneladas são representados por pedras britadas e 187,0 milhões de toneladas por areia. Desse total, 70% da produção de agregados do país foi destinada à mistura com cimento e 30% com asfalto betuminoso. Incluídos nos 70%, associados ao cimento, tem-se a seguinte distribuição: concreto (35%), pré-fabricados (15%), revenda (lojas de construção e depósitos) para o consumidor final (10%) e outros segmentos como cascalhamento, enrocamento, gabiões, lastro de ferrovias, construção de taludes etc, respondem pelos restantes 10%. Nos 30%, associados à mistura com asfalto betuminoso, está sendo considerada a produção destinada à pavimentação de ruas e bases e sub-bases para a construção de rodovias. A Tabela 3.1 traz algumas estatísticas brasileiras do consumo de agregados para construção civil.

Tabela 3. 1 - Principais estatísticas - Brasil

| Discriminação                                   |                      |                   | 2002  | 2003 <sup>®</sup> | 2004 <sup>(p)</sup> |
|-------------------------------------------------|----------------------|-------------------|-------|-------------------|---------------------|
| Areia                                           | Produção             | 10 <sup>6</sup> t | 229,6 | 190,6             | 187,0               |
|                                                 | Consumo              | t. per capita     | 1,4   | 1,1               | 1,1                 |
|                                                 | Preço <sup>(1)</sup> | US\$/t            | 2.0   | 2.15              | 2.12                |
| Pedra britada<br>(areia artificial e<br>britas) | Produção             | 10 <sup>6</sup> t | 156,4 | 129,8             | 128,7               |
|                                                 | Consumo              | t per capita      | 0,9   | 0,7               | 0,7                 |
|                                                 | Preço <sup>(2)</sup> | US\$/t            | 3.40  | 3.80              | 3.75                |

Fonte: Anepac/DNPM

(1) Preço médio líquido FOB - mina para o mercado da Região Metropolitana de São Paulo.

(2) Preço médio líquido FOB - mina no mercado da Região Metropolitana de São Paulo

(r) revisado

(p) previsto

Como pode ser observado na Figura 3.1, no estado de Goiás encontram-se Escudos gnáissico-granitóides, seqüências de xistos verdes e complexos de alto grau de cinturões granulíticos.

De acordo com Bartorelli e Haralyi (1998), o modelo evolutivo colisional, adotado para o embasamento cristalino, permite delinear uma distribuição litológica do Pré-Cambriano brasileiro em quatro unidades geotectônicas de primeira ordem:

- 1) Complexos de Alto Grau;
- 2) Seqüências de Xistos Verdes;
- 3) Escudos ou Complexos Gnáissico-Granitóides;
- 4) Faixas Vulcano-Sedimentares Dobradas e Metamorfizadas.

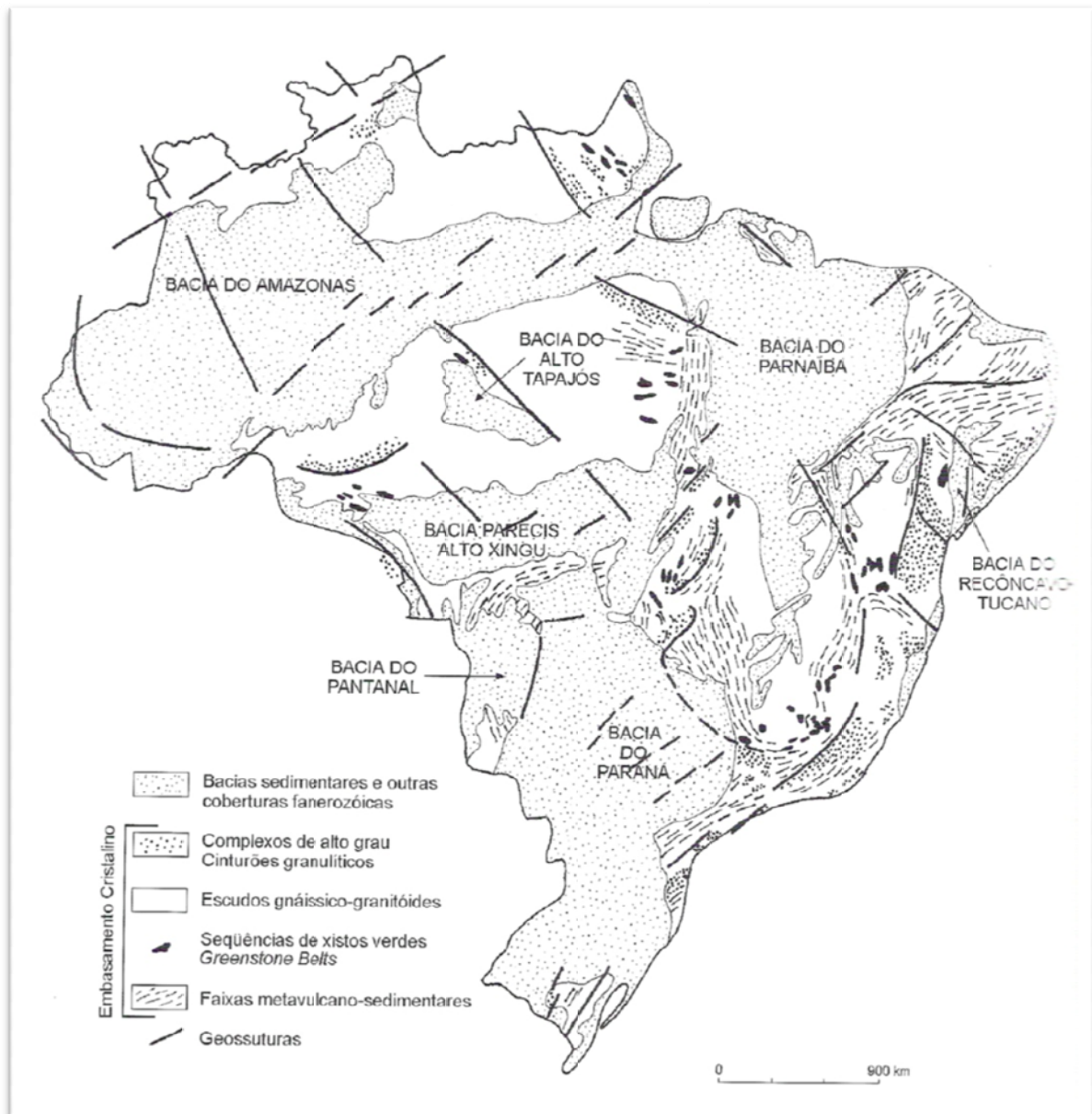


Figura 3. 1- Distribuição das unidades geológicas fundamentais (HASUI, 1990 apud BARTORELLI; HARALYI, 1998)

#### 4. ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS

---

A ação física das adições minerais traz benefícios quanto às propriedades do concreto, tais como: trabalhabilidade, exsudação, densidade, permeabilidade e resistência, contribuindo dessa forma para o aumento da durabilidade dos concretos (CASTRO, 2003).

Mesmo quando o diâmetro médio das adições minerais é semelhante ao do cimento, sua menor massa específica faz com que o volume da pasta de cimento com adição exceda o volume da pasta de cimento sem adição. O aumento da relação do volume de sólidos para o volume de água produz uma pasta com maior plasticidade e maior coesão. A exsudação e a segregação são reduzidas em função do maior volume de finos e menor consumo de água necessário para uma dada trabalhabilidade (DAL MOLIN, 2005).

Nehdi *et al.* (1998) explicam que existem forças de origem coloidal que aumentam as interações mútuas entre as partículas e são afetadas pela polarização da água. Quando as forças de Van der Waals entre os grãos de cimento e a atração eletrostática entre cargas opostas na superfície das partículas são dominantes, o resultado é a repulsão e as partículas tendem a floculação.

O fíler pode influenciar nas forças eletrostáticas dependendo de sua natureza mineralógica e das cargas em sua superfície. Devido a forças coloidais que dependem da distancia total entre as partículas mais próximas, da interposição dos grãos finos do fíler entre as partículas de cimento podem afetar sua atração eletrostática provocando sua estrutura floculada (NEHDI *et al.*, 1998).

Sabir *et al.* contam que, originalmente, o termo pozolana era associando com cinzas vulcânicas e terras calcinadas naturalmente formadas, as quais reagem com a cal em temperatura ambiente na presença de água. Recentemente, esse termo se estendeu para englobar todos os materiais sílico/aluminosos que, em formas finamente divididas e na presença de água, irão reagir quimicamente com o hidróxido de cálcio ( $\text{Ca(OH)}_2$ ) para formar componentes que possuem propriedades cimentantes.

Existe uma bibliografia extensa sobre as adições minerais disponíveis para utilização no concreto. Aborda-se neste capítulo apenas as propriedades das adições utilizadas nesta pesquisa que podem influenciar no comportamento do concreto auto-adensável.

#### 4.1. SÍLICA ATIVA

A sílica ativa é um subproduto da fabricação de silício ou ligas de ferro-silício a partir de quartzo de elevada pureza e carvão em forno elétrico de eletrodos de arco submerso. O  $\text{SiO}$  que se desprende na forma de gás, se oxida e se condensa na forma de partículas esféricas extremamente pequenas de sílica amorfa ( $\text{SiO}_2$ ) (NEVILLE, 1997).

##### 4.1.1. Características

A sílica, na forma de material vítreo é muito reativa, e o pequeno tamanho das partículas acelera as reações com o  $\text{Ca(OH)}_2$  produzido na hidratação do

cimento Portland. As pequenas partículas de sílica ativa entram no espaço entre as partículas de cimento melhorando assim uma pasta mais compacta (NEVILLE, 1997).

Nawi (1996) comenta que o diâmetro das partículas de sílica ativa é da ordem de 0,1  $\mu\text{m}$  a 0,12  $\mu\text{m}$  comparada a 10  $\mu\text{m}$  da média do cimento Portland e cinza volante e 1,5  $\mu\text{m}$  do metacaulim. A superfície específica é de 15 a 25  $\text{m}^2/\text{g}$ . O principal constituinte da sílica ativa são partículas esféricas de dióxido de silício, sendo uma substituição ideal ao cimento com relação a um acréscimo na resistência mecânica e no desempenho de concretos frente às ambientes agressivos.

Neville (1997) explica que o uso mais difundido da sílica ativa tem a finalidade de se obterem concretos com propriedades melhoradas, principalmente alta resistência inicial e baixa permeabilidade. Os efeitos benéficos da sílica ativa não se limitam à reação pozolânica; existe também um efeito físico da capacidade das partículas extremamente finas da sílica ativa se posicionarem muito próximas das partículas de agregado, isto é, na interface agregado-pasta. Essa região é conhecida como sendo a de menor resistência do concreto, em razão do efeito parede, que impede as partículas de cimento Portland de se arrumarem de forma compacta. Essa arrumação é conseguida pelas partículas de sílica ativa, que são, tipicamente, 100 vezes menores do que as partículas de cimento. Um fator a mais é o fato de que a sílica ativa, devido a sua grande finura, reduz a exsudação, de modo que não fica água aprisionada sob as partículas maiores de agregado graúdo.

A principal reação cimentícia é facilitada pela dissolução da sílica vítrea/amorfa, produzindo sílica em solução nos poros de água, que reage com o hidróxido de cálcio para formar o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H). A alumina irá se dissolver em um ambiente com alto pH. Uma pequena porcentagem é

incorporada no gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e o restante reage para formar aluminato de cálcio hidratado (C-A-H) (normalmente cristalino) e fases de alumino-silicato de cálcio hidratado (C-A-S-H), os quais podem auxiliar no processo cimentício e contribuir na resistência. A relação de dissolução irá depender da superfície específica, que é o principal fator depois das diferentes atividades mostradas pelas várias pozolanas com respeito com o tempo necessário para desenvolvimento de resistência do concreto (SABIR *et al.*, 2001).

#### 4.1.2. Influência no concreto fresco

A adição de sílica ativa ao cimento aumenta o valor de tensão e a viscosidade plástica. Devido a sua alta superfície específica, tem grande afinidade com a água e isso é refletido no concreto que a incorpora. As partículas de sílica ativa se aproximam às partículas de cimento adjacentes e reduzem os canais de exsudação. Concretos com adição de sílica ativa apresentam exsudação reduzida devido a mudanças em suas propriedades reológicas, tendem a ser mais coesivos e menos tendenciosos à segregação. Existe uma tendência do concreto com sílica ativa de perder o abatimento mais rapidamente que o concreto convencional (MALHOTRA *et al.*, 1987). Este fato foi observado durante a produção dos concretos estudados nesta dissertação.

#### 4.1.3. Influência no concreto endurecido

Para Nawi (1996), o grande ganho de resistências mecânicas em concretos contendo sílica ativa é nas primeiras idades em torno de 3-7 dias com poucos acréscimos na resistência mecânica aos 28 dias.

A adição de sílica ativa no concreto induz a redução da porosidade na zona de transição entre a matriz e o agregado no concreto fresco e atende os requisitos da microestrutura para uma forte zona de transição (VIEIRA, 2003; DOTTO *et al.*, 2004).

#### 4.1.4. Uso no concreto auto-adensável

As partículas de sílica ativa têm um efeito fluidificante sobre traços com relação água/aglomerante muito baixa, os quais, de outra forma, são muito viscosos. Esse comportamento reológico não tem sido completamente explicado, mas alguns pesquisadores o relacionam com a ação das microesferas da sílica ativa agindo como pequeníssimos rolamentos. As partículas de sílica ativa também deslocam uma parte de água presente entre os grãos floculados do cimento, aumentando assim a quantidade de água disponível para fluidificar o concreto (AİTCIN, 2000).

O alto nível de finura e a forma praticamente esférica da sílica ativa resultam em boa coesão e melhoram a resistência à segregação. Entretanto, a sílica ativa é muito efetiva na redução ou eliminação da exsudação e pode gerar problemas na formação rápida de crosta da superfície. Isso pode resultar em juntas frias ou defeitos na superfície se existirem pausas durante o fornecimento de concreto e ainda dificultar o acabamento da superfície (EFNARC, 2005).

## 4.2. METACAULIM

Metacaulim contém, tipicamente, 50-55% de  $\text{SiO}_2$  e 40-45% de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e é altamente reativo. Uma diferença importante entre o metacaulim e as pozolanas naturais ou outros tipos de pozolanas artificiais é que o metacaulim é um produto primário, enquanto que a sílica ativa e a pozolana de argila calcinada são produtos secundários ou resíduos. Assim, o metacaulim pode ser produzido através de processos controlados para ativar as propriedades desejadas (POON *et al.*, 2006).

### 4.2.1. Características

Metacaulim é uma pozolana ultrafina, produzida pela calcinação do caulim em temperaturas entre 700 e 900° C e moída até a finura de 0,7  $\text{m}^2/\text{g}$  ou 0,9  $\text{m}^2/\text{g}$  (NEVILLE, 1997; SABIR *et al.*, 2001). A temperatura de queima ou calcinação é extremamente importante e afeta diretamente a atividade pozolânica do produto resultante; assim, a argila está no seu estado mais reativo quando a temperatura de calcinação conduz a hidrólise e resulta no colapso e desarranjo da estrutura da argila (SABIR *et al.*, 2001).

Acima de 600°C a caulinita se transforma num produto não cristalino denominado metacaulim e, acima de aproximadamente 900°C, os produtos formados sofrem mudanças alcançando uma nova fase, agora cristalina, geralmente cristobalita, e acima de 1100°C resulta na mulita (TAYLOR, 1997).

#### 4.2.2. Influência no concreto fresco

A elevada superfície específica do metacaulim requer uma maior quantidade de água que, para uma dada relação água/aglomerante e quantidade de cimento, diminui a trabalhabilidade embora não tanto quanto ocorre com o concreto com sílica ativa (LACERDA; HELENE, 2002).

#### 4.2.3. Influência no concreto endurecido

O uso do metacaulim é indicado para aumento da resistência do concreto, principalmente nas primeiras idades. Após 14 dias de cura, a contribuição do metacaulim ao ganho de resistência é menor. O aumento na resistência à compressão do concreto com metacaulim é devido ao efeito fíler, onde as partículas de metacaulim preenchem os espaços entre as partículas de cimento, aceleram a hidratação do cimento e a reação pozolânica. Esse efeito é similar ao da sílica ativa. Embora o volume de poros aumente ligeiramente nas pastas contendo metacaulim, a estrutura de poros da pasta, entretanto, é refinada. A melhora da estrutura de poros da pasta é maior quando o total de substituição do cimento por metacaulim é de pelo menos 20% (KHATIB; HIBBERT, 2005).

#### 4.3. POZOLANA DE ARGILA CALCINADA

Um solo argiloso pode adquirir propriedades pozolânicas quando submetido a um processo de ativação térmica adequado e finamente moído. A

utilização de argilas calcinadas como pozolanas ocorre há mais de vinte séculos e é anterior ao uso do cimento Portland (CORDEIRO, 2001).

#### 4.3.1. Características

As partículas de pozolana de argila calcinada são esféricas e têm uma finura muito grande: a grande maioria das partículas tem um diâmetro entre menor que 1  $\mu\text{m}$  e 100  $\mu\text{m}$ , a área específica Blaine tem valores normalmente entre 250  $\text{m}^2/\text{kg}$  e 600  $\text{m}^2/\text{kg}$ . A grande área específica da pozolana de argila calcinada significa que o material está prontamente disponível para reação com o hidróxido de cálcio (NEVILLE, 1997).

#### 4.3.2. Influência no concreto fresco

Quando a pozolana de argila calcinada é utilizada com o cimento Portland, o hidróxido de cálcio liberado da hidratação do cimento reage com os alumino-silicatos presentes na pozolana de argila calcinada formando componentes cimentícios com propriedades coesivas e adesivas. No concreto fresco, a pozolana de argila calcinada tem papel importante na fluidez do concreto o que é comumente expressado nos fenômenos que podem ser mensurados como trabalhabilidade, capacidade de bombeamento, compactação, demanda de água, exsudação e segregação, e capacidade de acabamento. A adição de pozolana de argila calcinada tem influência significativa na relação das reações de hidratação assim como na efetivação dos aditivos, particularmente os incorporadores de ar e os superplastificantes (JOSHI; LOHTIA, 1997?).

#### 4.3.3. Influência no concreto endurecido

A ação benéfica da pozolana de argila calcinada é menos significativa em dosagens com teores maiores de 40% em relação à massa de cimento Portland. Uma explicação para esse fato seria a maior demanda de água para um teor maior de adição (CAMÕES *et al.*, 2002), promovendo decréscimos na resistência mecânica. Um concreto contendo pozolana de argila calcinada possui uma resistência inicial menor que a de um concreto de referência e isto se deve principalmente ao fato da redução na quantidade de cimento, que foi substituído pela pozolana de argila calcinada e, ainda, devido à pequena taxa de dissolução da sílica em virtude da pequena superfície específica apresentada pela pozolana de argila calcinada, de apenas 0,3 a 0,4 m<sup>2</sup>/g. Com o tempo, o concreto com pozolana de argila calcinada passa a apresentar maior resistência, pois uma maior quantidade de sílica em solução estará presente e, conseqüentemente, uma maior quantidade de gel de CSH é formada, o que leva ao desenvolvimento da resistência (LACERDA; HELENE, 2002).

#### 4.3.4. Uso no concreto auto-adensável

O formato esférico e a superfície vítrea de grande parte das partículas de pozolana de argila calcinada, usualmente mais finas que as do cimento, permitem melhor trabalhabilidade ou abatimento para as mesmas relações água/aglomerante. Na prática, devido ao volume absoluto de cimento mais pozolana de argila calcinada normalmente exceder o volume de cimento em uma dosagem de concreto similar, sem pozolana, a relação do volume de sólidos pelo volume de água produz uma pasta com melhores propriedades reológicas como plasticidade e coesão. Isso

resulta na estabilidade da dispersão do cimento e das partículas de pozolana de argila calcinada na pasta fresca que irá agir como aglomerante no concreto massa. O efeito lubrificante das partículas vítreas esféricas da pozolana de argila calcinada e a maior relação sólidos/líquido torna o concreto menos propenso a segregação e aumenta a fluidez do concreto (JOSHI; LOHTIA, 1997?).

A pozolana de argila calcinada tem se mostrado uma adição efetiva para o CAA promovendo o aumento da coesão e reduzindo a sensibilidade das mudanças no teor de água. Entretanto, altos teores de pozolana de argila calcinada podem produzir uma pasta tão coesiva que pode ser resistente ao espalhamento (EFNARC, 2005).

## 5. PROGRAMA EXPERIMENTAL: CARACTERIZAÇÃO E ANÁLISE DOS MATERIAIS

---

Neste capítulo apresentam-se as caracterizações de todos os materiais utilizados na pesquisa, quais sejam: cimento portland CP V – ARI, areia natural, brita 0 de granito, adições minerais pozolânicas – sílica ativa, metacaulim e pozolana de argila calcinada, finos de pedreira – finos de micaxisto, finos de granito e finos de gnaiss e aditivo superplastificante.

A caracterização dos materiais utilizados foi realizada no Departamento de Apoio e Controle Técnico de Furnas Centrais Elétricas S.A.

### 5.1. CIMENTO PORTLAND

O cimento utilizado na produção dos concretos foi o CP V – Cimento ARI (alta resistência inicial). Esse material foi escolhido por não possuir adições pozolânicas e estar disponível no mercado.

As características químicas, físicas e propriedades mecânicas estão apresentadas nas Tabelas 5.1 e 5.2.

Tabela 5. 1 - Características químicas do cimento

| Material         | SO <sub>3</sub> (%) | MgO (%) | SiO <sub>2</sub> (%) | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (%) | CaO (%) | Na <sub>2</sub> O (%) | K <sub>2</sub> O (%) |
|------------------|---------------------|---------|----------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------|-----------------------|----------------------|
| Cimento CP V ARI | 3,32                | 4,65    | 19,50                | 2,19                               | 4,23                               | 59,56   | 0,47                  | 1,13                 |

Tabela 5. 2 - Propriedades físicas e mecânicas do cimento CP V - ARI

| PROPRIEDADES DETERMINADAS<br>Análise Física   |                            | Valores encontrados | Limites           |
|-----------------------------------------------|----------------------------|---------------------|-------------------|
| Massa específica (g/cm³)                      |                            | 3,11                | -                 |
| Finura                                        | Resíduo na peneira 200 (%) | 0,4                 | $\leq 6,0$        |
|                                               | Resíduo na peneira 325 (%) |                     | $\leq -$          |
|                                               | Área específica (cm²/g)    | 4740                | $\geq 3000$       |
| Tempo de Pega (h:min)                         | Início                     | 2:20                | $\geq 1:00$       |
|                                               | Fim                        | 3:20                | $\leq 10:00$      |
| Água de Consistência - Pasta (%)              |                            | 29,6                | -                 |
| Expansibilidade de Le Chatelier (mm) a quente |                            | 0,0                 | $\leq 5$          |
| Expansibilidade de Le Chatelier (mm) a frio   |                            | 1,0                 | $\leq 5$          |
| Resistência à Compressão (MPa)                | 3 dias                     | 34,2                | $\geq 24,0$       |
|                                               | 7 dias                     | 36,5                | $\geq 34,0$       |
|                                               | 28 dias                    | 41,1                | $\geq - e \leq -$ |

O cimento especificado atende a todos os requisitos da NBR 5733 (ABNT, 1991). Um ponto a ser observado é sua finura, com área específica superior a 4500 cm²/g. Essa propriedade pode interferir diretamente no consumo de água da pasta e no comportamento reológico da mistura.

## 5.2. AGREGADOS

### 5.2.1. Agregado miúdo

Como agregado miúdo foi utilizado areia natural da cidade de Goiânia, a qual, de acordo com a norma NBR NM 52 (ABNT, 2003), apresenta uma massa específica de 2,66 g/cm³ e de acordo com a NBR 7251 (ABNT, 1982) apresenta uma massa unitária de 1,42 g/cm³. A composição granulométrica do agregado miúdo e seu módulo de finura (MF) foram realizados conforme a norma NBR NM 248 (ABNT, 2001) e são apresentados na Tabela 5.3.

Tabela 5. 3 – Composição granulométrica do agregado miúdo

| Peneiras                     |          | 1a. determinação |                 |                | 2a. determinação        |                 |                | % ret.      |
|------------------------------|----------|------------------|-----------------|----------------|-------------------------|-----------------|----------------|-------------|
| nº                           | Abertura | Massa retida (g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | Massa retida (g)        | % retida indiv. | % ret. acumul. | acum. médio |
| 3/8"                         | 9,5 mm   | -----            | 0,0             | 0              | -----                   | 0,0             | 0              | 0           |
| 1/4"                         | 6,3 mm   | -----            | 0,0             | 0              | -----                   | 0,0             | 0              | 0           |
| 4                            | 4,75 mm  | 3,1              | 0,6             | 1              | 2,5                     | 0,4             | 0              | 1           |
| 8                            | 2,34 mm  | 13,3             | 2,6             | 3              | 17,0                    | 2,9             | 3              | 3           |
| 16                           | 1,18 mm  | 36,1             | 7,0             | 10             | 39,9                    | 6,9             | 10             | 10          |
| 30                           | 600 µm   | 100,3            | 19,5            | 30             | 117,4                   | 20,4            | 31             | 30          |
| 50                           | 300 µm   | 115,2            | 22,4            | 52             | 131,9                   | 22,9            | 54             | 53          |
| 100                          | 150 µm   | 175,4            | 34,1            | 86             | 188,1                   | 32,6            | 86             | 86          |
| Fundo (g)                    |          | 70,4             | 13,7            | 100            | 80,1                    | 13,9            | 100            | 100         |
| Massa Total(g)               |          | 513,8            |                 |                | 576,9                   |                 |                | -----       |
| Mód. de finura               |          | 1,82             |                 |                | 1,84                    |                 |                | -----       |
| Módulo de finura médio: 1,83 |          |                  |                 |                | Dimensão máxima: 2,4 mm |                 |                |             |

Na Figura 5.1 tem-se a distribuição granulométrica da areia. A curva granulométrica do material utilizado, apesar de não se enquadrar na faixa de “limite ótimo”, está na faixa de “limite utilizável”, ou seja, pode ser utilizada.

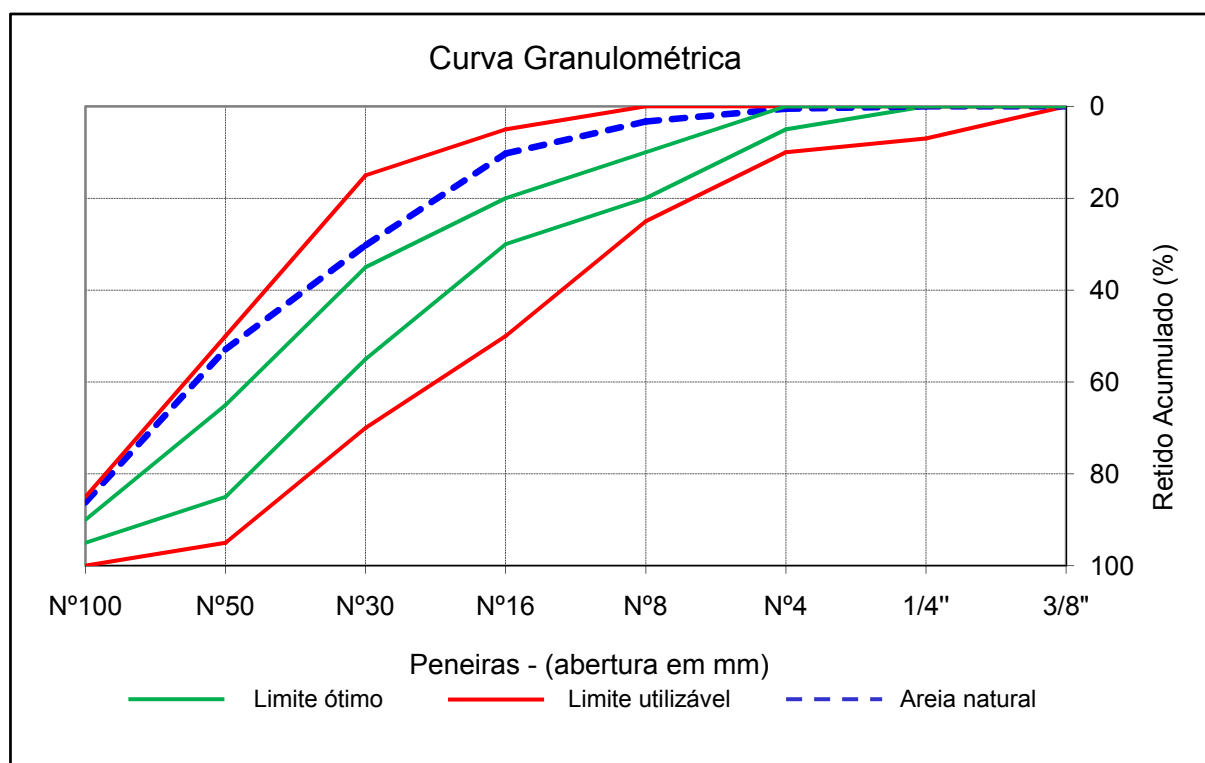


Figura 5. 1 - Curva granulométrica agregado miúdo

### 5.2.2. Agregado graúdo

Na produção dos concretos foi utilizado como agregado graúdo brita do tipo litológico granito, procedente de Goiânia, classificada pela ABNT NM 248 (ABNT, 2001) como brita 0, com dimensão máxima característica igual a 9,5 mm. A massa específica do material, ensaiado de acordo com a NBR NM 53 (ABNT, 2003), é de 2,63 g/cm<sup>3</sup> e a massa unitária, de acordo com a NBR 7251 (ABNT, 1982) é de 1,38 g/cm<sup>3</sup> e módulo de finura igual a 5,75. A composição granulométrica e seu módulo de finura (MF) foram determinados de acordo com a NBR NM 248 (ABNT, 2001) e constam na Tabela 5.4.

Tabela 5. 4 - Composição granulométrica do agregado graúdo

| Peneiras                |          | 1a. determinação |                 |                | 2a. determinação |                 |                | % ret.      |
|-------------------------|----------|------------------|-----------------|----------------|------------------|-----------------|----------------|-------------|
| nº                      | Abertura | massa retida (g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | massa retida (g) | % retida indiv. | % ret. acumul. | acum. Médio |
| 1/2"                    | 12,5 mm  | ----             | 0,0             | 0              | ----             | 0,0             | 0              | 0           |
| 3/8"                    | 9,5 mm   | ----             | 0,0             | 0              | ----             | 0,0             | 0              | 0           |
| 1/4"                    | 6,3 mm   | 2894,9           | 39,2            | 39             | 2208,1           | 40,1            | 40             | 40          |
| 4                       | 4,75 mm  | 3068,0           | 41,4            | 81             | 2314,4           | 42,0            | 82             | 81          |
| 8                       | 2,36 mm  | 1320,6           | 17,9            | 99             | 933,4            | 16,9            | 99             | 99          |
| 16                      | 1,18 mm  | ----             | 0,0             | 99             | ----             | 0,0             | 99             | 99          |
| 30                      | 600 µm   | ----             | 0,0             | 99             | ----             | 0,0             | 99             | 99          |
| 50                      | 300 µm   | ----             | 0,0             | 99             | ----             | 0,0             | 99             | 99          |
| 100                     | 150 µm   | ----             | 0,0             | 99             | ----             | 0,0             | 99             | 99          |
| Fundo (g)               |          | 109,5            | 1,5             | 100            | 56,1             | 1,0             | 100            | 100         |
| Massa Total(g)          |          | 7393,0           |                 |                | 5512,0           |                 |                | ----        |
| Mód. de finura          |          | 5,73             |                 |                | 5,77             |                 |                | ----        |
| Módulo de finura médio: |          | 5,75             |                 |                | Diâmetro máximo: |                 | 9,5 mm         |             |

A Figura 5.2 mostra a distribuição granulométrica da brita. A curva granulométrica do material utilizado encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela NBR 7211 (ABNT, 2005).

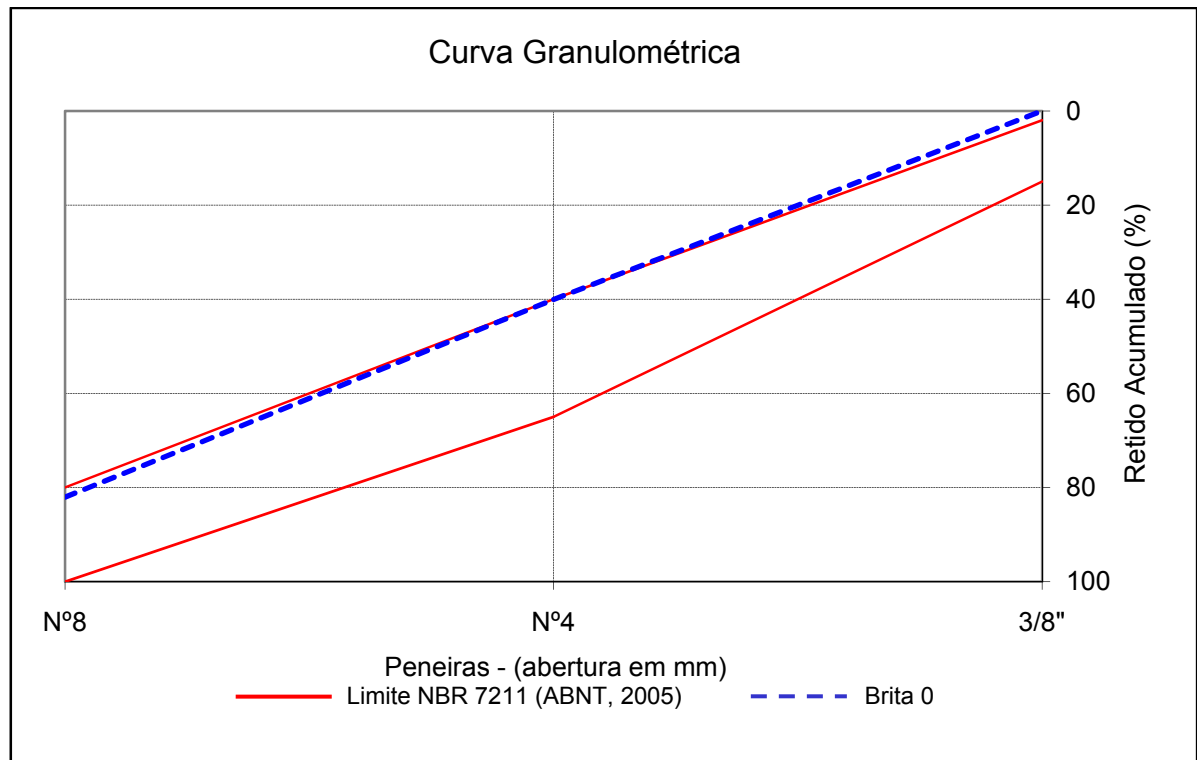


Figura 5. 2 - Curva granulométrica agregado graúdo

### 5.3. ADIÇÕES MINERAIS POZOLÂNICAS

#### 5.3.1. Sílica ativa

A sílica ativa utilizada no programa experimental foi adquirida em comércio local. A caracterização da sílica ativa encontra-se na Tabela 5.5.

Tabela 5. 5 - Caracterização da sílica ativa

| PROPRIEDADES DETERMINADAS                           |                                      | Valores encontrados | Limites NBR 13956 (ABNT, 1997)       |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|--------------------------------------|
| <i>Análise Química</i>                              |                                      |                     |                                      |
| Perda ao fogo                                       |                                      | 3,03                | ≤ 6,0                                |
| Óxido de magnésio (MgO)                             |                                      | 0,46                | -                                    |
| Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )              |                                      | 91,68               | ≥ 85,0                               |
| Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    |                                      | 0,18                | -                                    |
| Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |                                      | 0,18                | -                                    |
| Óxido de cálcio (CaO)                               |                                      | 0,56                | -                                    |
| Álcalis Totais                                      | Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)   | 0,27                | -                                    |
|                                                     | Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O) | 1,17                | -                                    |
|                                                     | Equiv. alcalino                      | 1,05                | -                                    |
| Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )              |                                      | 0,00                | -                                    |
| <i>Análise Física</i>                               |                                      |                     |                                      |
| Índice de atividade pozolânica com a cal (MPa)      |                                      | 7,4                 | ≥ 6,0 MPa<br>(NBR 5751 (ABNT, 1992)) |
| Índice de atividade pozolânica com o cimento (%)    |                                      | 115,8               | ≥ 75%<br>(NBR 5752 (ABNT, 1992))     |

As propriedades da sílica ativa, conforme Tabela 5.5, atendem aos requisitos da NBR 13956 (ABNT, 1997). Destaca-se o alto índice de atividade pozolânica com o cimento.

### 5.3.2. Metacaulim

Produto industrializado, adquirido no comércio local. A caracterização encontra-se na Tabela 5.6.

Tabela 5. 6 - Caracterização do metacaulim

| PROPRIEDADES DETERMINADAS                           |                                      | Valores encontrados | Limites NBR 12653 (ABNT, 1992)            |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| <i>Análise Química</i>                              |                                      |                     |                                           |
| Perda ao fogo                                       |                                      | 4,24                | $\leq 10,0$                               |
| Óxido de magnésio (MgO)                             |                                      | 0,09                | -                                         |
| Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )              |                                      | 54,07               | -                                         |
| Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    |                                      | 3,35                | -                                         |
| Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |                                      | 34,77               | -                                         |
| Óxido de cálcio (CaO)                               |                                      | 0,92                | -                                         |
| Álcalis Totais                                      | Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)   | 0,26                | -                                         |
|                                                     | Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O) | 0,54                | -                                         |
|                                                     | Equiv. alcalino                      | 0,62                | -                                         |
| Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )              |                                      | 0,00                | -                                         |
| <i>Análise Física</i>                               |                                      |                     |                                           |
| Índice de atividade pozzolânica com a cal (MPa)     |                                      | 16,4                | $\geq 6,0$ MPa<br>(NBR 5751 (ABNT, 1992)) |
| Índice de atividade pozzolânica com o cimento (%)   |                                      | 83,8                | $\geq 75\%$<br>(NBR 5752 (ABNT, 1992))    |

Assim como a sílica ativa, o metacaulim encontra-se dentro das especificações da NBR 12653 (ABNT, 1992).

### 5.3.3. Pozolana de argila calcinada

O material utilizado é produto resultante da calcinação de argila e foi obtido em uma fábrica de cimento da região, a qual o utiliza para produção do CP II – Z – 32 e do CP IV - 32. A caracterização está na Tabela 5.7.

Tabela 5. 7 - Caracterização da pozolana de argila calcinada

| PROPRIEDADES DETERMINADAS                           |                                      | Valores encontrados | Limites NBR 12653 (ABNT, 1992)            |
|-----------------------------------------------------|--------------------------------------|---------------------|-------------------------------------------|
| <i>Análise Química</i>                              |                                      |                     |                                           |
| Perda ao fogo                                       |                                      | 4,41                | $\leq 10,0$                               |
| Óxido de magnésio (MgO)                             |                                      | 4,61                | -                                         |
| Dióxido de silício (SiO <sub>2</sub> )              |                                      | 54,72               | -                                         |
| Óxido de ferro (Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )    |                                      | 3,39                | -                                         |
| Óxido de alumínio (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |                                      | 15,36               | -                                         |
| Óxido de cálcio (CaO)                               |                                      | 12,85               | -                                         |
| Álcalis Totais                                      | Óxido de sódio (Na <sub>2</sub> O)   | 0,47                | -                                         |
|                                                     | Óxido de potássio (K <sub>2</sub> O) | 2,85                | -                                         |
|                                                     | Equiv. alcalino                      | 2,34                | -                                         |
| Sulfato de cálcio (CaSO <sub>4</sub> )              |                                      | 0,00                | -                                         |
| <i>Análise Física</i>                               |                                      |                     |                                           |
| Índice de atividade pozzolânica com a cal (MPa)     |                                      | 9,4                 | $\geq 6,0$ MPa<br>(NBR 5751 (ABNT, 1992)) |
| Índice de atividade pozzolânica com o cimento (%)   |                                      | 95,61               | $\geq 75\%$<br>(NBR 5752 (ABNT, 1992))    |

A pozolana de argila calcinada, também dentro dos limites da NBR 12653 (ABNT, 1992), apresenta índices de atividade pozolânica intermediários aos obtidos pela sílica ativa e pelo metacaulim.

#### 5.4. FINOS DE PEDREIRA

##### 5.4.1. Análise granulométrica

Os finos de micaxisto apresentam dimensão média de 41,49  $\mu\text{m}$  e 90% de suas partículas apresentam diâmetro inferior a 85,41  $\mu\text{m}$ . Os finos de granito apresentam dimensão média de 51,84  $\mu\text{m}$  e 90% de suas partículas apresentam diâmetro inferior a 135,44  $\mu\text{m}$ . Os finos de gnaiss apresentam dimensão média de 40,63  $\mu\text{m}$  e 90% de suas partículas apresentam diâmetro inferior a 109,33  $\mu\text{m}$ . As curvas granulométricas destes finos e a curva do cimento são mostradas na Figura 5.3.

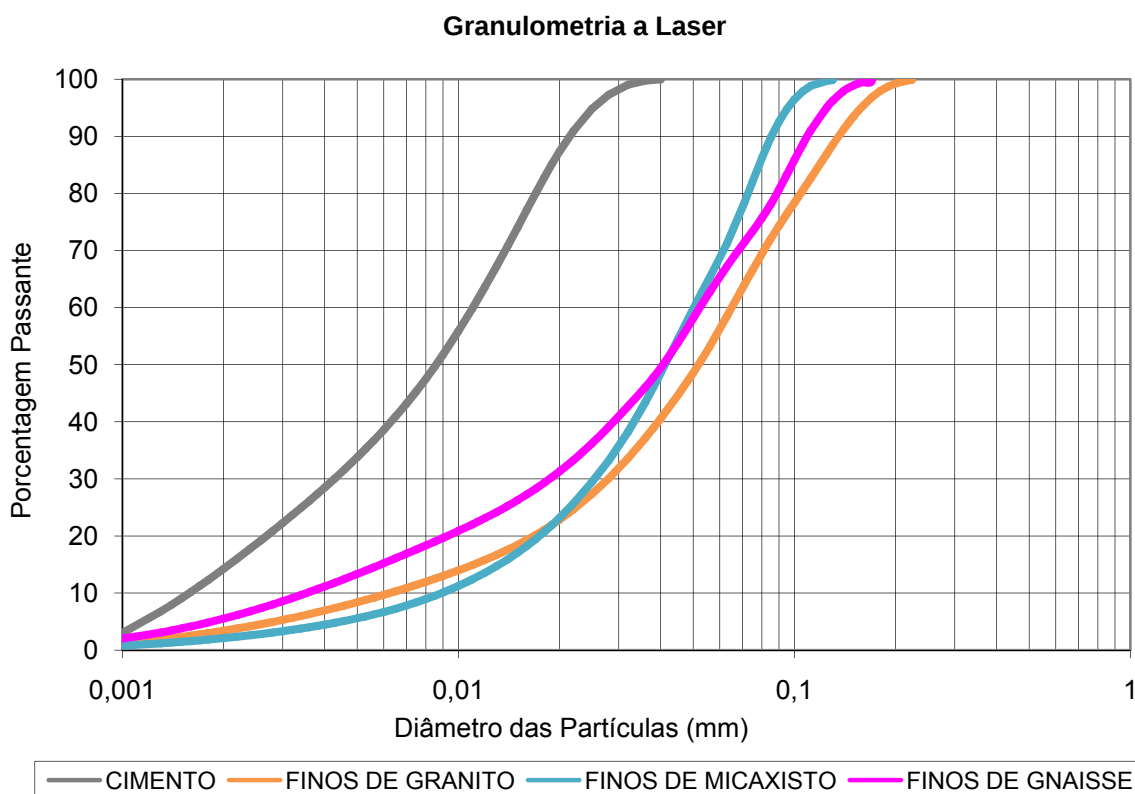


Figura 5. 3 - Granulometria a laser dos finos e do cimento

Os três finos apresentam dimensão média próximas, entre 40 e 52  $\mu\text{m}$ . A média das dimensões é 44,65  $\mu\text{m}$ . Os finos apresentam, em média, diâmetros cinco vezes maiores que o cimento, que possui dimensão média de 8,58  $\mu\text{m}$ .

#### 5.4.2. Análise mineralógica

O micaxisto é uma rocha com mais de 20% de filossilicatos e sua variedade é bastante grande, em função de uma mineralogia muito variável, que depende da composição química ou da rocha pretérita (MACHADO *et al.*, 2006) – a difração por raios-X dos finos de micaxisto é apresentada na Figura 5.4.

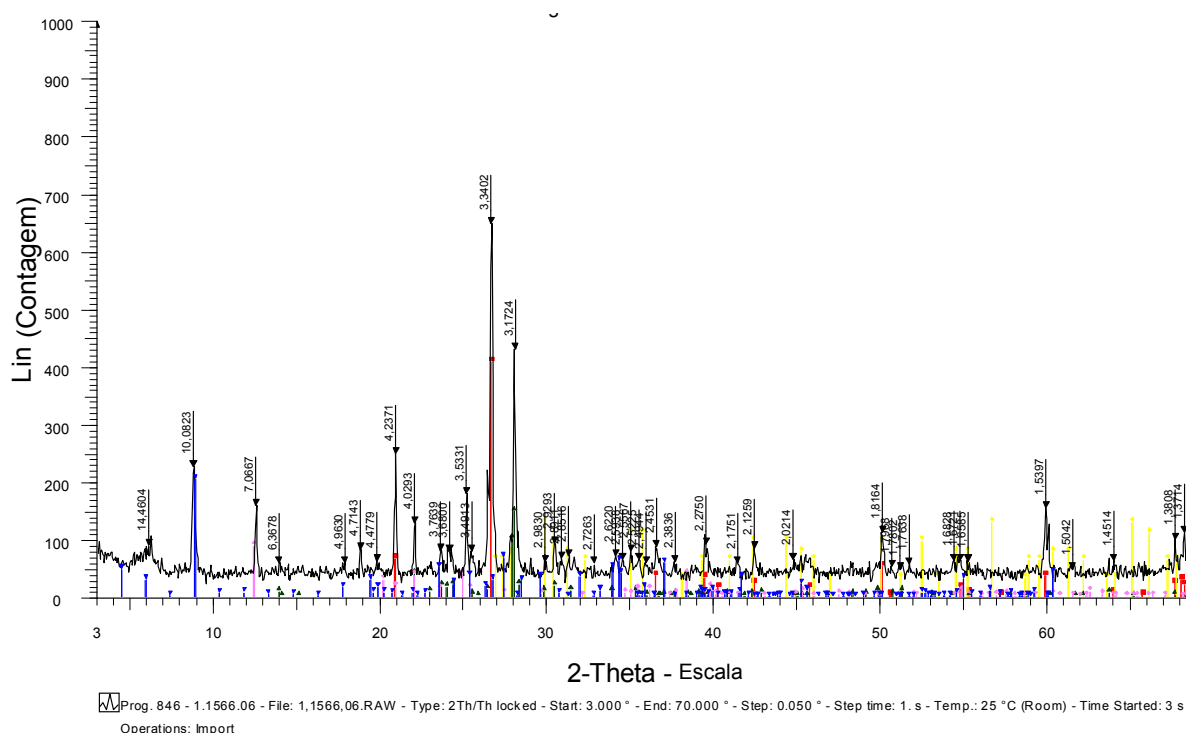


Figura 5. 4 - Difratograma dos finos de micaxisto

De acordo com o difratograma apresentado, o mineral em maior escala presente nos finos de micaxisto é o quartzo, representado pelo número 3,3402. Picos de augita (3,1724) e de biotita (10,0823) também estão presentes.

Granito é uma rocha eruptiva, com textura granular. No Brasil, em geral, dá-se o nome de granito às rochas eruptivas que contém quartzo, feldspatos e mica preta, seguindo a orientação da escola francesa (SOARES FILHO, 1990) – a difração por raios-X dos finos de granito é apresentada na Figura 5.5.

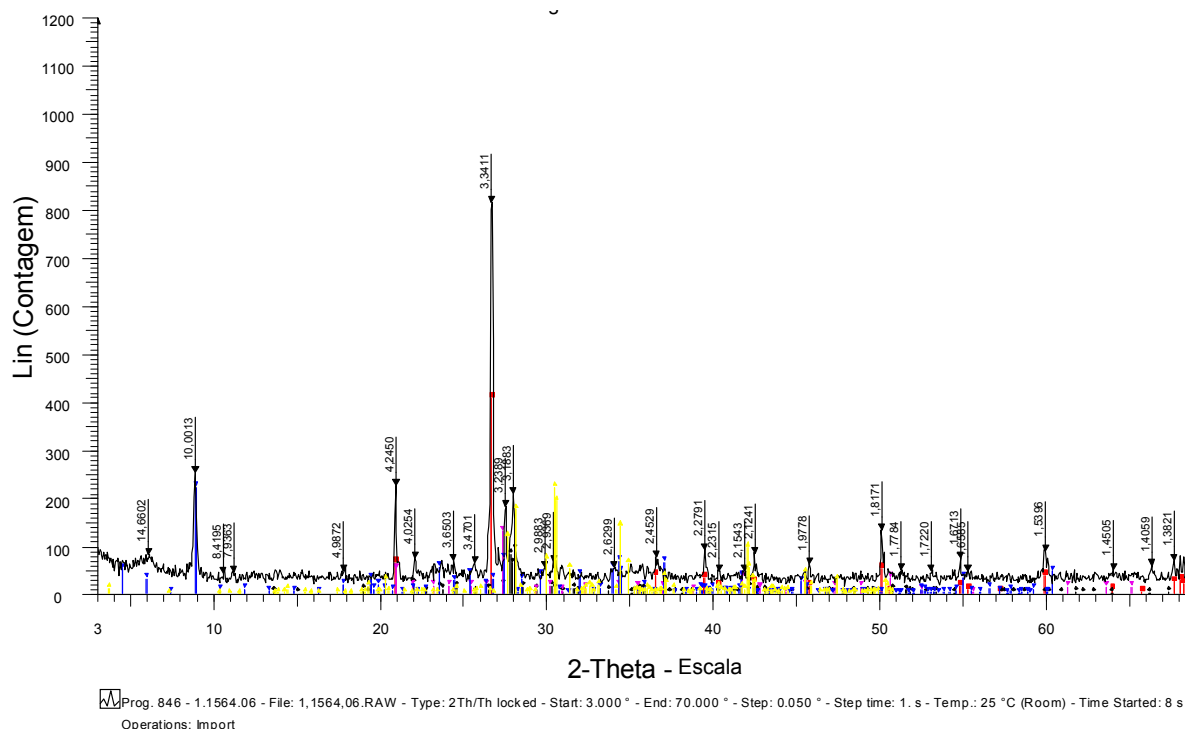


Figura 5. 5 - Difratograma dos finos de granito

Assim como os finos de micaxisto, o mineral em maior escala presente nos finos de granito é o quartzo – mineral cristalino, representado pelo número 3,3411. Picos de biotita (10,0013) também estão presentes.

Gnaiss utilizado nesta pesquisa é proveniente da UHE Peixe, cedido por Furnas Centrais Elétricas S.A. O gnaiss é uma rocha de grande variação mineralógica e grau metamórfico, é amplamente empregada como brita na construção civil e pavimentação além do uso ornamental (MACHADO *et al.*, 2006) – a difração por raios-X dos finos de gnaiss é apresentada na Figura 5.6.

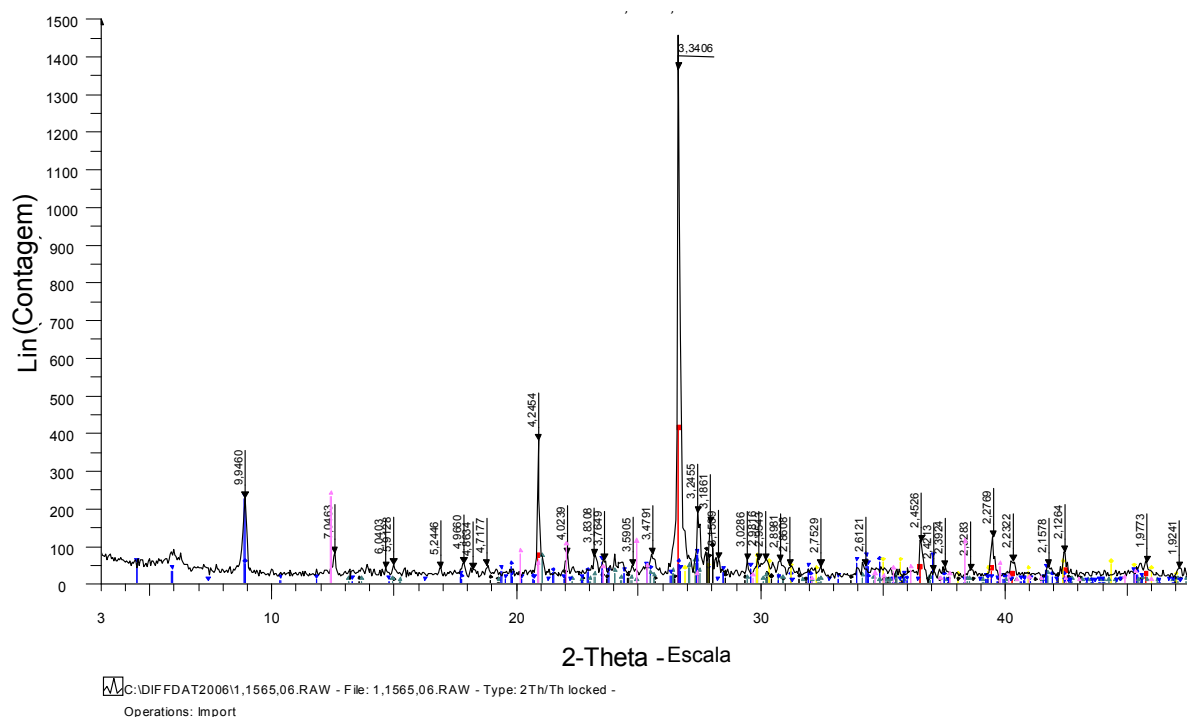


Figura 5. 6 - Difratoograma dos finos de gnaiss

Mais uma vez o mineral em maior escala presente, também nos finos de gnaiss é o quartzo, representado pelo número 3,3406. Picos de caolinita (7,0463) também estão presentes.

## 5.5. ADITIVO

Foi utilizado aditivo superplastificante à base de policarboxilato que apresenta-se sob a forma de líquido viscoso de cor castanha. As características do aditivo químico utilizado encontram-se na Tabela 5.8.

Tabela 5. 8 - Características do aditivo superplastificante utilizado

| Especificação                  | Resultados |
|--------------------------------|------------|
| Densidade (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,10       |
| pH                             | 5,7        |
| Teor de sólidos (%)            | 37,06      |

O aditivo superplastificante utilizado é recomendado para a produção de concretos que requerem altas resistências iniciais, altas reduções de água e excelente fluidez.

O aditivo superplastificante atua por diferentes mecanismos através da adsorção superficial e do efeito estérico age promovendo a separação das partículas de aglomerante.