EDVALDO MONTEIRO LISBÔA

OBTENÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE E GRANITO E ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

MACEIÓ

2004

EDVALDO MONTEIRO LISBÔA

OBTENÇÃO DO CONCRETO AUTO-ADENSÁVEL UTILIZANDO RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE E GRANITO E ESTUDO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal de Alagoas como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Estruturas

Orientador: Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima
Co-orientador: Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes

MACEIÓ
2004

Lisbôa, Edvaldo Monteiro

Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas. Maceió, 2004. 121p.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Alagoas. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

1. Resíduo 2. Concreto auto-adensável 3. Pasta 4. Estado fresco. I. Universidade Federal de Alagoas. Centro de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil.

Dedico este trabalho a meu Pai (in memorian), a minha Mãe Maria de Lourdes, a minha Esposa Alba Helena, a meu Filho Bruno, a meus Irmãos e a todos que contribuíram para o desenvolvimento do mesmo.

Agradecimentos

Aos orientadores Prof. Dr. Flávio Barboza de Lima e Prof. Dr. Paulo César Correia Gomes, pela dedicação demonstrada, pelos conhecimentos transmitidos, pelas críticas construtivas, pela revisão do texto, que foram decisivos para elaboração e conclusão desta Dissertação. A Profª. Drª. Aline da Silva Ramos Barboza pelo incentivo, apoio e valiosas orientações. Ao Coordenador do Mestrado Prof. Dr. Severino Pereira Cavalcanti Marques pelo grande apoio.

Aos Professores Abel Galindo Marques e Dilze Codá dos Santos Cavalcanti Marques, pela indicação para o Mestrado e a todos os Professores que ministraram as matérias pelos relevantes conhecimentos transmitidos.

A todos os Colegas de Mestrado, que de uma forma ou de outra contribuíram para o sucesso dessa caminhada, e em especial ao Colega Antônio Carlos dos Santos, pela grande contribuição e companheirismo.

A todos os funcionários do Núcleo de Pesquisa Tecnológica, pela ajuda indispensável para o desenvolvimento da pesquisa; em especial a Secretária Girley Vespaziano da Silva pelo relevante apoio e os técnicos Alexandre Nascimento de Lima e Valdemir Gomes de Farias pela ajuda participativa na maior parte dos experimentos.

Aos, então, formandos Jonathas Judá Lima Tenório e Rodrigo de Melo Lameiras pela participação na etapa de caracterização dos materiais. Ao aluno bolsista Alexandre Rodrigues de Barros e ao colega de Mestrado Diogo Jatobá de Holanda Cavalcanti, pela fundamental ajuda na parte experimental deste trabalho.

Ao Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal de Alagoas na pessoa da Professora Seleude Wanderley da Nóbrega, pela participação nos ensaios de caracterização do resíduo.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

A DEUS pela presença constante, permitindo o início, o desenvolvimento e conclusão dessa longa caminhada.

Créditos

A elaboração deste trabalho foi possível devido ao apoio de instituições e empresas, através de sugestões e apoio técnico financeiro. Assim são dignos de crédito:

Universidade Federal de Alagoas

- Centro de Tecnologia
- Núcleo de Pesquisa Tecnológica
- Departamento de Engenharia Estrutural

Universidade Federal de Campina Grande,

através do Prof. José Avelino Freire.

Britex Minerações Ltda

através do Engº Rafael Piatti.

Cimento Poty S. A.

através do Sr. Moraes.

IMCREL – Irmãos Moreira Extração Mineral Ltda,

através do Sr. Edenir.

INDARC – Indústria de Artefatos de Concreto Ltda

através do Engº Gilberto.

Marmogran Mármores e Granitos,

através do Engº José Fernandes.

MBT – Master Builders Technologies

Através do Sr. Paulo Trocoli.

FAPEAL – Através da concessão do Projeto de Pesquisa Nº 2003229073-3 do Prof. Paulo César Correia Gomes.

Sumário

Agradecimentos ..... **vi**

Lista de Figuras ..... **xi**

Lista de Tabelas ..... **xiv**

Lista de Símbolos ..... **xvi**

Lista de Abreviaturas ..... **xxi**

Resumo ..... **xxiii**

Abstract ..... **xxiv**

Capítulo 1 ..... **1**

1. Introdução **1**

1.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS 1

1.2 RELEVÂNCIA DO TEMA 2

1.3 OBJETIVOS 3

1.4 ESTRUTURA DA DISSERTAÇÃO 3

Capítulo 2 ..... **5**

2. Revisão bibliográfica **5**

2.1 INTRODUÇÃO 5

2.2 VANTAGENS E DESVANTAGENS 5

2.3 APLICAÇÕES E INDICAÇÕE DE USO 6

2.4 PROPRIEDADES DE FLUXO 7

2.5 PROPORÇÕES DE MISTURAS 8

2.6 MÉTODOS DE DOSAGENS 11

2.6.1 Método de Okamura 12

2.6.2 Método de Petersson et al. 15

2.6.3 Método de EFNARC 19
2.6.4 Método de Gomes 25
2.7 RESÍDUO DO BENEFICIAMENTO DO MÁRMORE E GRANITO 32
2.7.1 Considerações gerais 32
2.7.2 Geração do resíduo 33
2.7.3 Trabalhos com RBMG 39
Capítulo 3 43
3. Materiais e métodos 43
3.1 INTRODUÇÃO 43
3.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS 43
3.2.1 Cimento 43
3.2.2 Agregados 43
3.2.3 Adições minerais 48
3.2.4 Aditivo químico 54
3.2.5 Água 55
3.3 MÉTODOS DE ENSAIOS 56
3.3.1 Pasta 56
3.3.2 Argamassa 58
3.3.3 Determinação do esqueleto granular 59
3.3.4 Concreto auto-adensável 61
Capítulo 4 70
4. Composição e produção das misturas 70
4.1 INTRODUÇÃO 70
4.2 PASTA 70
4.3 ARGAMASSA 71
4.4 CONCRETO 73

Capítulo 5 77
5. Apresentação e análise dos resultados 77
5.1 INTRODUÇÃO 77
5.2 ENSAIOS DAS MISTURAS COM RBMG 77
5.2.1 Pasta 77
5.2.2 Argamassa 80
5.2.3 Concreto 85
5.3 ENSAIOS DAS MISTURAS COM RBMB E SÍLICA ATIVA 98
5.3.1 Pasta 98
5.3.2 Argamassa 99
5.3.3 Concreto 100
Capítulo 6 111
6. Considerações finais 111
6.1 COSIDERAÇÕES GERAIS 111
6.2 COSIDERAÇÕES ESPECÍFICAS 112
6.2.1 Quanto à caracterização dos materiais 112
6.2.2 Comportamento de fluxo das pastas e argamassas 112
6.2.3 Desenvolvimento dos concretos 113
6.3 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS 114
Referências bibliográficas.....116

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Forma para alcançar o auto-adensamento 13
Figura 2.2 – Método de dosagem para o concreto auto-adensável proposto por Okamura et. al..... 14
Figura 2.3 – Método de dosagem para a argamassa do CAA 15
Figura 2.4 – Processo simplificado para a dosagem da mistura de CAA 16
Figura 2.5 – Diagrama que descreve o método de dosagem (Gomes, 2002) 27
Figura 2.6 – Determinação da dosagem de superplastificante 29
Figura 2.7 – Aparato e ilustração do ensaio de mini-slump para otimização do filler na pasta 30
Figura 2.8 – Blocos de pedras graníticas em dimensões padronizadas 33
Figura 2.9 – Resíduo na forma de polpa abrasiva chamada de lama 34
Figura 2.10 – Vistas dos teares na operação de corte dos blocos 34
Figura 2.11 – Amostra da granalha, material constituinte do processo de corte do bloco de granito 35
Figura 2.12 – Processo de polimento das chapas brutas 36
Figura 2.13 – Destino do resíduo no processo de polimento das chapas 37
Figura 2.14 – (a) Lagoa em sua fase madura. (b) Detalhe da camada corrosiva provocada pela presença da granalha 38
Figura 2.15 – Corte das chapas polidas para comercialização 38
Figura 2.16 – Vistas de uma Indústria Beneficiadora de Mármore e Granito 39
Figura 3.1 – Curvas granulométricas da brita12,5 e da areia média 47
Figura 3.2 – Limites granulométricos para areia média de acordo com a NBR 7211/83 48
Figura 3.3 – Coleta do resíduo utilizado nessa pesquisa 49
Figura 3.4 – Etapa de pré-secagem e estocagem do resíduo 50
Figura 3.5 – Resíduo estocado em bandejas ao ar livre, abrigado para secagem 50
Figura 3.6 – (a) Apiloamento ; (b) Peneiramento do resíduo 51
Figura 3.7 – Resíduo processado e seco, em forma de pó 51
Figura 3.8 – Resultado da análise térmica diferencial (ATD) 53
Figura 3.9 – Resultado da análise termogravimétrica (ATG) 53
Figura 3.10 – (a) Cone de Marsh, (b) Mini-slump 56
Figura 3.11 – Tronco de cone da mesa de consistência 59
Figura 3.12 – (a) Cone de Abrams; (b) Detalhes dos círculos na chapa 62
Figura 3.13 – Detalhes do Funil V 63
Figura 3.14 – Caixa L 64
Figura 3.15 – Detalhes do Tubo em U 65
Figura 3.16 – Máquina Universal EMIC DL 30000 67
Figura 3.17 – Ensaio para estimativa das resistências dos concretos aos 7 dias de idade 67
Figura 3.18 – Prensa Amsler de 200 tf 68
Figura 3.19 – Ensaio de resistência à compressão de corpo-de-prova 10cm x 20cm aos 28 dias de idade 68

Figura 3.20 – Ensaios de Resistência à compressão (a,b), Módulo de deformação (c,d), em corpos-de-prova 15cm x 30cm aos 28 dias 69
Figura 3.21 – Ensaio de Resistência à tração na compressão diametral em corpo-de-prova de 15cm x 30cm aos 28 dias 69
Figura 4.1 – (a) Argamassadeira, (b) Balança eletrônica digital 71
Figura 4.2 – (a) Balança eletrônica digital, (b) Argamassadeira de 80 litros 73
Figura 4.3 – Misturador basculante de 400 litros de capacidade 76
Figura 5.1 – Curvas de ensaios de pasta com a/c=0,50; r/c=0,5 e r/c=0,6; (a) no cone de Marsh; (b) no Mini-Slump 78
Figura 5.2 – Evolução da pasta com r/c = 0,50, (a) sp/c = 0,15%, (b) ponto de saturação com sp/c = 0,25%, (c) início de segregação com sp/c = 0,30%, (d) sp/c = 0,35% 80
Figura 5.3 – Curvas de ensaio de argamassa com r/c=0,50 e r/c=0,60; (a) no cone de Marsh; (b) no Tronco de cone de consistência 81
Figura 5.4 – Colocação (a) do agregado, (b) da água de absorção do agregado, (c) dos materiais finos, (d) da água de amassamento, (e) do superplastificante com a água restante; (f) os dois minutos finais de funcionamento 82
Figura 5.5 – Seqüência de descarregamento da argamassadeira 83
Figura 5.6 – Pé de mesa pré-moldado com argamassa auto-adensável 84
Figura 5.7 – Preenchimento de um tijolo cerâmico utilizado em alvenaria estrutural e de corpos-de-prova cilíndricos 84
Figura 5.8 – Esqueleto granular, (a) equipamentos, (b) uma das pesagens 86
Figura 5.9 – Determinação da quantidade ótima dos componentes do esqueleto granular, 47,5% de areia e 52,5 de brita 86
Figura 5.10 – Espalhamento do concreto com sp/c = 0,25% 87
Figura 5.11 – Espalhamento do concreto com sp/c = 0,35% 88
Figura 5.12 – Espalhamento do concreto CR40 89
Figura 5.13 – Ensaio na Caixa L para o concreto CR40 90
Figura 5.14 – Espalhamento do concreto CR42 91
Figura 5.15 – Ensaio na Caixa L do concreto CR42 92
Figura 5.16 – Espalhamento do concreto C42C 93
Figura 5.17 – Ensaio no Funil V do concreto CR42C **94**
Figura 5.18 – Ensaio na Caixa L do concreto CR42C **94**
Figura 5.19 – Seqüência do ensaio no Tubo U do concreto CR42C 95
Figura 5.20 – Curvas de ensaio de pasta com r/c=0,5 e sf/c=0,03; (a) no cone de Marsh; (b) no Mini-Slump 98
Figura 5.21 – Curvas de argamassas com 3% de sílica ativa, (a) no Cone de Marsh (b) no Tronco de cone da mesa de consistência 99
Figura 5.22 – Argamassas com 3% de sílica ativa, (a) sp/c=0,375%, (b) sp/c=0,40% no ponto de saturação, (c) sp/c = 0,425% 100
Figura 5.23 – Espalhamento para o concreto CRS38 101
Figura 5.24 – Espalhamento para o concreto CRS40 102
Figura 5.25 – Espalhamento para concreto CRS42 102
Figura 5.26 – Espalhamento do concreto CRS42, diâmetro médio 67cm e T_{50} = 2,81s.. 103
Figura 5.27 – Ensaio da Caixa L do concreto CRS42 103
Figura 5.28 – Espalhamento do concreto CRS42C 104

Figura 5.29 – Ensaio no Funil V do concreto CRS42C 105
Figura 5.30 – Ensaio da Caixa L do concreto CRS42C 106
Figura 5.31 – Ensaio do Tubo U do concreto CRS42C 107
Figura 5.32 – Superfície interna de corpos-de-prova 15cm x 30cm, (a) sem sílica ativa (b) com sílica ativa 110

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Faixa de valores para os parâmetros dos testes de caracterização das propriedades de fluxo adotados pela EFNARC (2002) 8
Tabela 2.2 – Faixa de valores para proporções de misturas de CAA 9
Tabela 2.3 – Misturas de concreto auto-adensáveis 10
Tabela 2.4 – Faixa dos parâmetros que asseguraram o auto-adensamento dos concretos 31
Tabela 2.5 – Resultados obtidos por Gonçalves et al.,2003; na utilização de RBMG em concreto convencional 40
Tabela 2.6 – Resultados de Resistência à compressão e Módulo de deformação estática, em argamassas com RBMG, encontrados por CRUZ, D. F. M. et al., 2003 41
Tabela 2.7 – Resultados de Resistência à compressão e Módulo de deformação estática, em argamassas com RBMG, sem granalha, encontrados por TENÓRIO, J. J. L., 2004 42
Tabela 2.8 – Resultados de Resistência à compressão e Módulo de deformação estática, em concretos convencionais com RBMG, sem granalha, encontrados por LAMEIRAS, R. M., 2004 42
Tabela 3.1 – Tabela 1 – Limites granulométricos de agregado miúdo 44
Tabela 3.2 – Tabela 2 – Limites granulométricos de agregado graúdo 45
Tabela 3.3 – Caracterização dos agregados 46
Tabela 3.4 - Composição granulométrica da brita e areia utilizada 47
Tabela 3.5 – Características do resíduo usado 52
Tabela 3.6 – Análise química do RBMG utilizado na pesquisa e os utilizados por Neves (2002) 52
Tabela 3.7 – Características da sílica ativa utilizada, nessa pesquisa, fornecida pelo fabricante 54
Tabela 3.8 – Comparação da sílica ativa com outros materiais com relação à finura 54
Tabela 3.9 – Propriedades do Superplastificantes utilizado na pesquisa 55
Tabela 4.1 – Equações utilizadas para o cálculo da dosagem em massa dos materiais componentes do CAA 75
Tabela 5.1 – Argamassas produzidas em argamassadeiras diferentes 82
Tabela 5.2 – Dosagem, Resistência à compressão e Módulo de Deformação da argamassa aos 28 dias 85
Tabela 5.3 – Composição do concreto 87
Tabela 5.4 – Dosagens do concreto sp/c = 0,35% e os resultados dos ensaios no estado fresco 89
Tabela 5.5 – Dosagem e resultados dos ensaios no estado fresco do concreto CR42C ... 93
Tabela 5.6 – Parâmetros de ensaios do CAA no fresco recomendados por alguns autores 96
Tabela 5.7 – Resultados dos ensaios no estado endurecido dos CR42 e CR42C 97
Tabela 5.8 – Dosagens e resultados dos ensaios dos concretos com 38% , 40% e 42% de pasta, 3% de sílica ativa e sp/c = 0,40% 101
Tabela 5.9 – Dosagem e resultados dos ensaios do concreto CRS42C 104

Tabela 5.10 – Resultados dos ensaios no estado endurecido do concreto CRS42C 108
Tabela 5.11 – Resumo dos resultados dos ensaios nos concretos no estado endurecido 109

Lista de Símbolos

%	Percentagem
$?_a$	Massa específica da água
$?_{ab}$	Densidade absoluta específica da mistura de areia e brita no ensaio do esqueleto granular
$?_{ar}$	Massa específica da areia
$?_{br}$	Massa específica da brita
$?_c$	Massa específica do cimento
$?_r$	Massa específica do RBMG
$?_{sf}$	Massa específica da sílica ativa
$?_{sp}$	Massa específica do superplastificante líquido
$?_u$	Massa unitária da mistura de areia e brita no ensaio do esqueleto granular
<	Menor
±	Mais ou menos
?	Somatório
=	Menor ou igual
=	Maior ou igual
a/c	Relação água/cimento
A_{ar} (%)	Absorção da areia em percentagem
A_{br} (%)	Absorção da brita em percentagem
Al_2O_3	Óxido de alumínio
c	Espaçamento entre as armaduras
C	Massa de cimento
$Ca(OH)_2$	Hidróxido de cálcio

CaO	Óxido de cálcio
cm	Centímetro
cm^2/g	Centímetro quadrado por grama
d	Diâmetro do orifício inferior do Cone de Marsh
D (%)	Percentual do desvio em relação à média
E_c	Módulo de deformação estática
f/c	Relação fíler/cimento
f_c	Resistência à compressão
Fe_2O_3	Óxido de ferro
f_{tD}	Resistência à tração na compressão diametral
g	Grama
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
g/ml	Grama por mililitro
H_2/H_1	Relação entre as alturas do concreto no final e no início da parte horizontal da caixa L após o repouso do concreto no ensaio
H_{ar} (%)	Umidade da areia em percentagem
H_{br} (%)	Umidade da brita em percentagem
K_2O	Óxido de potássio
kg	Quilograma
kg/m^3	Quilogramas por metro cúbico
log T	Logaritmo do tempo T
m	Metro
m^2/kg	Metro quadrado por quilograma
m^3	Metro cúbico
MgO	Óxido de magnésio
M_i	Dimensões da peneira superior do agregado do grupo i

M_{i-l}	Dimensões da peneira inferior do agregado do grupo i
ml	Mililitro
mm	Milímetro
MPa	Mega Pascal
Na_2O	Óxido de sódio
n_{abi}	Volume de agregado bloqueado do grupo i pelo volume total de concreto da mistura
n_{sbi}	Relação de volume bloqueado de agregado do grupo de tamanho i pelo volume total de concreto
n_{si}	Relação de volume de agregado do grupo de tamanho i pelo volume total de concreto
^{o}	Graus
^{o}C	Graus centígrados
P_a	Massa de água
P_{ac}	Massa de água adicionada corrigida
P_{ar}	Massa de areia
P_{arc}	Massa de areia corrigida
P_{asp}	Massa de água contida no superplastificante
P_{br}	Massa de brita
P_{brc}	Massa de brita corrigida
P_r	Massa de RBMG
P_{sf}	Massa da sílica ativa
P_{sp}	Massa de superplastificante sólido
P_{spl}	Massa do superplastificante líquido
P_t	Massa total da mistura de areia e brita no ensaio do esqueleto granular
r/c	Relação RBMG/cimento
r_0	Diâmetro interno inferior do tronco de cone da mesa de consistência

	(10cm)
RB	Razão de bloqueio no ensaio da Caixa L (igual a H_2/H_1)
r_m	Média de duas medidas perpendiculares do diâmetro do fluxo máximo do tronco de cone da mesa de consistência
R_m	Velocidade relativa da argamassa no Funil V para argamassa
rpm	Rotações por minuto
RS	Relação de segregação no ensaio do Tubo U
s	Segundo
sf/c	Relação sílica ativa/cimento
SiO	Monóxido de silício
SiO_2	Óxido de silício
sp/c	Relação superplastificante sólido/cimento
sp/f	Relação superplastificante sólido/finos
t	Tempo medido, em segundos, para o fluxo total da argamassa ou do concreto através do Funil V
T	Tempo de esvaziamento do cone de Marsh em segundos
T_{115}	Tempo para a pasta alcançar um diâmetro de 115mm no ensaio mini-slump
T_{50}	Tempo para o concreto alcançar um diâmetro de 50cm no ensaio de espalhamento
tf	Tonelada força
T_{L20}	Tempo para o concreto percorrer 20cm na parte horizontal da Caixa L
T_{L40}	Tempo para o concreto percorrer 40cm na parte horizontal da Caixa L
T_{sp} (%)	Teor de sólido do superplastificante em percentagem
V	Volume de pasta ou argamassa que é introduzido no Cone de Marsh no ensaio
v	Volume de pasta ou argamassa que é medido seu tempo de fluxo no Cone de Marsh
V (%)	Volume de vazios da mistura de areia e brita em percentual no ensaio do esqueleto granular

V_a/V_f	Relação entre o volume de água e volume de materiais finos
V_{abi}	Volume de agregado bloqueado do grupo i
V_{ag}	Volume de agregado
V_{ar}	Volume de areia
V_{arg}	Volume de argamassa
V_{br}	Volume de brita
V_c	Volume de concreto
V_p	Volume de pasta
V_t	Volume total de areia mais brita no ensaio do esqueleto granular
µm	Micrometro
$?_m$	Área relativa de fluxo da argamassa no tronco de cone de consistência

Lista de Abreviaturas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACI	American Concrete Institute
AL	Estado de Alagoas
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATD	Análise Térmica Diferencial
ATG	Análise Termogravimétrica
CAA	Concreto Auto-Adensável
CADAR	Concreto Auto-Adensável de Alta Resistência
CP II-F	Cimento Portland composto com filler
CP	Corpo-de-Prova
EFNARC	European Federation of National Trade Associations
EN	European Norma
LAM	Laboratório de Análises Minerais da Universidade de Campina Grande/Paraíba
LEMA	Laboratório de Estruturas e Materiais do NPT/UFAL
NBR NM	Norma Brasileira Registrada - Norma Mercosul
NBR	Norma Brasileira Registrada
NPT	Núcleo de Pesquisa Tecnológica
PF	Perda ao Fogo
RBCM	Resíduo de Blocos Cerâmicos Moídos
RBMG	Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito
RILEM	*International Union of Testing and Research*
SCC	*Self-Compacting Concrete*

TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
UFAL	Universidade Federal de Alagoas
UFCG	Universidade Federal de Campina Grande

Resumo

LISBOA, E. M. (2004) Obtenção do Concreto Auto-Adensável Utilizando Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito e Estudo de Propriedades Mecânicas. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFAL, Maceió, 2004.

O Concreto Auto-Adensável (CAA) necessita de uma alta quantidade de finos em sua composição para atender suas propriedades no estado fresco. No contexto dos materiais finos se apresenta o Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito (RBMG), o qual foi escolhido para compor a dosagem do CAA nessa pesquisa. Esta foi uma forma de contribuir com o avanço tecnológico e desenvolvimento sustentável do concreto. Utilizando a Metodologia de Gomes (2002) para obtenção do CAA, foi desenvolvido o estudo da pasta através dos ensaios no Cone de Marsh e no Mini-slump e o estudo da argamassa usando os ensaios no Cone de Marsh e no Tronco de cone da mesa de consistência, todos, no sentido de se obter o percentual ótimo de superplastificante e uma quantidade adequada do RBMG na composição da mistura. A partir de parâmetros obtidos no estudo da pasta e argamassa foi dado segmento a uma aplicação prática de preenchimento de peças pré-moldadas, sem a utilização de nenhum tipo de vibração mecânica, com argamassa auto-adensável. Em seguida, através do estudo da composição do esqueleto granular foi obtida a relação ótima entre o agregado miúdo e graúdo. O estudo do concreto foi desenvolvido utilizando os ensaios de Espalhamento, Funil V, Caixa L e Tubo em U, para os testes de suas propriedades no estado fresco, tais como: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem por obstáculos e resistência à segregação. Neste estudo foram obtidos dois Concretos Auto-Adensáveis, um usando apenas o RBMG e outro com 3% de sílica ativa; neste foi verificado algumas melhoras na viscosidade e na coesão da mistura. Para ambos concretos foram moldados corpos-de-prova cilíndricos de 10cm x 20cm e 15cm x 30cm para estudo da resistência à compressão aos 7 dias e aos 28 dias; módulo de deformação estática e resistência à tração na compressão diametral aos 28 dias. Os resultados dos ensaios realizados indicaram pela viabilidade técnica da utilização do RBMG na produção de CAA.

Palavras-chave: resíduo; concreto auto-adensável; pasta; estado fresco.

Abstract

LISBOA, E. M. (2004) Obtaining of the Self Compacting-Concrete using Residue of the Improvement of the Marble and Granite and Study of Mechanical Properties. Dissertation (Master's degree in Engineering) - Program of Masters degree in Civil Engineering, UFAL, Maceió, 2004.

The Self-Compacting Concrete (SCC) it needs of the high amount of fine in your composition to assist your properties in the fresh state. In the context of the fine materials if show the Residue of the Improvement of the Marble and Granite (RBMG), which was chosen to compose the dosagem of CAA in that research. This was a form of contributing with the technological progress and maintainable development of the concrete. Using Gomes' Methodology (2002) for obtaining of SCC, the study of the paste was developed through the rehearsals in the Cone of Marsh and in the Mini-slump and the study of the mortar using the rehearsals in the Cone of Marsh and in the cone log of the consistence table, all, in the sense of obtaining the percentile great of superplasticizer and an appropriate amount of RBMG in the composition of the mixture. Starting from parameters obtained in the study of the paste and mortar was given segment to a practical application of completion of premolded pieces, without the use of any type of mechanical vibration, with self-compacting mortar. Soon after, through the study of the composition of the granular skeleton it was obtained the great relationship among the small and great aggregate. The study of the concrete was developed using the rehearsals of Slump-flow, V Funnel, L Box and U Pipe, for the tests of your properties in the fresh state, such as: filling ability, passing ability and segregation resistance. In this study they were obtained two Self Compacting Concrete, a just using RBMG and other with 3% of sílica fume; in this it was verified some improvements in the viscosity and in the cohesion of the mixture. For both concretes they were moulded cylindrical specimens of 10cm x 20cm and 15cm x 30cm for study of the resistance to the compression to the 7 days and the 28 days; module of static deformation and resistance to the traction in the diametrical compression to the 28 days. The results of the accomplished rehearsals indicated for the technical viability of the use of RBMG in the production of SCC.

Keywords: residue; self-compacting concrete; paste; been fresh.

Capítulo 1

Introdução

1.1 Considerações iniciais

Entende-se por Concreto Auto-Adensável (CAA), o concreto capaz de preencher os espaços vazios das formas e se auto-adensar apenas sobre o efeito da gravidade e de sua própria capacidade de fluxo. O CAA é caracterizado pela grande capacidade de fluxo sem perda da estabilidade. A capacidade de se auto-adensar é obtida com o equilíbrio entre alta fluidez com grande mobilidade e moderada viscosidade e coesão entre as partículas do concreto fresco. A alta fluidez é alcançada com a utilização de Aditivos Superplastificantes de última geração e a moderada viscosidade e coesão entre suas partículas é conseguida com o incremento de um percentual adequado de adição mineral de granulometria muito fina. Além disto, um alto volume de pasta, um menor diâmetro característico máximo do agregado graúdo, são importantes para obtenção de CAA. O concreto para ser considerado Auto-Adensável tem que satisfazer determinadas propriedades no estado fresco, preencher todos os espaços das formas sobre o efeito apenas do seu próprio peso; passar entre obstáculos sem sofrer bloqueio, preenchendo todos os espaços das formas, mesmo os mais confinados pela concentração de armaduras e manter a estabilidade, sem sofrer segregação de seus componentes, até o momento pós-lançamento. Deve atender os mesmos requisitos de resistência e durabilidade dos concretos convencional e de alto desempenho (Skarendahl, 2000, Petersson, 2000; EFNARC, 2002; Gomes, 2002; Rooney, 2002).

O Concreto Auto-Adensável foi desenvolvido na Universidade de Tokyo, no Japão, em 1986, com seu primeiro protótipo obtido em 1988 (Gomes, 2002). O desenvolvimento do CAA no Japão se fez necessário, devido à dificuldade de se executar estruturas com formas complexas e altas taxas de armaduras sem prejudicar a qualidade e durabilidade do concreto. Havia, também, uma preocupação com o meio ambiente, a eliminação de parte da poluição sonora, que seria obtida com a ausência do uso de vibradores mecânicos, como também, a

solução de dois outros problemas que era a redução de custos e de prazos de execução, que seria conseguida com a diminuição do número de trabalhadores e melhor trabalhabilidade do concreto, respectivamente, durante o processo de aplicação. Essas preocupações atingiram aos países da Europa e hoje, já conseguiram atingir todo o Mundo, inclusive o Brasil.

Inúmeras pesquisas sobre CAA vêm se desenvolvendo com o objetivo de obter o mesmo, com diferentes materiais, conhecer seu comportamento, melhorar suas propriedades e verificar sua aplicabilidade em diferentes elementos estruturais. Propostas de novos equipamentos de ensaios são desenvolvidas com intuito de melhor caracterizar suas propriedades, principalmente no estado fresco.

A partir dos anos 90 surgiram vários métodos de dosagem de CAA, dentre eles: o de Ouchi et al. (1996) e Okamura (1997), Sedran et al. (1996), Petersson et al. (1996) e Billberg (1999), EFNARC (2001) e Gomes e Gettu (2002).

1.2. Relevância do tema

A utilização de resíduo na industria da construção civil constitui não apenas uma resposta racional na melhora da gestão ambiental de atividade industrial, se não também uma necessidade, como se tem assumido em boa parte da indústria da construção em países como, por exemplo, Holanda e Japão. Atualmente, o uso de resíduos industriais, como, por exemplo, os provenientes das indústrias metalúrgicas e termoelétricas, como componente do concreto tem crescido em todo mundo. Seu uso geralmente proporciona ao concreto melhores desempenhos no estado fresco e endurecido. Nesse contexto, se apresenta o resíduo da indústria de beneficiamento de mármore e granito (RBMG).

Em cálculo feito conjuntamente com o Engº José Fernandes, proprietário de uma empresa de beneficiamento de mármore e granito, estimou-se que em Maceió, no ano de 2004, são geradas aproximadamente 1600 toneladas do resíduo por mês. Segundo o Engº Alan Barros Coelho, responsável técnico de uma empresa produtora de concreto usinado, no ano de 2004, na cidade de Maceió, são aplicados, em média, 8000m^3 de concreto, onde 6000m^3 são usinados e 2000m^3 produzidos na própria obra. Admitindo-se a massa média de cimento de 400kg/m^3 de concreto e a utilização do resíduo num percentual de 20% sobre a massa de cimento por metro cúbico de concreto (80kg), seriam consumidas apenas 640 toneladas do resíduo por mês, restando ainda, 960 toneladas para serem utilizados em argamassas, produtos cerâmicos, etc. Neste trabalho apresenta-se uma alternativa de aproveitamento, utilizando alta dosagem de RBMG em concretos auto-adensáveis uma vez

que, tais materiais podem ser obtidos com um alto volume de finos. Desta forma está sendo dada uma contribuição para o avanço tecnológico e desenvolvimento sustentável do concreto.

1.3. Objetivos

No âmbito geral, este trabalho tem como objetivo principal obter o Concreto Auto-Adensável, utilizando o Resíduo do Beneficiamento do Mármore e Granito.

Para a realização da pesquisa, foram estabelecidas como objetivos específicos às metas a serem atingidas para obtenção do CAA. O método experimental utilizado no estudo foi baseado na Metodologia de Gomes usada para obtenção de concreto auto-adensável de alta resistência (CADAR). Tais objetivos são: caracterizar os materiais utilizados, obter as dosagens adequadas dos materiais componentes da pasta e argamassa, encontrar os percentuais ótimos dos agregados miúdo e graúdo na composição do esqueleto granular, obter os percentuais adequados de pasta e de agregados na dosagem do CAA, avaliar suas propriedades no estado fresco e estudar suas propriedades mecânicas, tais como, Resistência à compressão, Módulo de deformação estática e Resistência à tração na compressão diametral.

1.4 Estrutura da dissertação

Os diferentes capítulos da dissertação são brevemente descritos da forma a seguir. A dissertação é composta de 06 capítulos. O primeiro capítulo retrata uma pequena introdução, relevância do tema, objetivos e apresentação do trabalho.

No Capítulo 2, está apresentada uma Revisão bibliográfica do Concreto Auto-Adensável, tratando de suas vantagens e desvantagens, aplicações, de suas propriedades no estado fresco, das proporções dos materiais componentes das misturas, da descrição de alguns métodos de dosagem e alguns fundamentos sobre o resíduo utilizado na pesquisa.

O Capítulo 3 apresenta os Materiais e Métodos. Descreve a metodologia utilizada para a caracterização dos materiais e seus resultados, como também os métodos de ensaios para o estudo da pasta, da argamassa, do esqueleto granular e das propriedades do concreto no estado fresco. Apresenta também os métodos do estudo do concreto com relação às propriedades mecânicas no estado endurecido.

No capítulo 4 apresentam-se a metodologia utilizada para a composição e produção das misturas de pasta, argamassa e CAA.

No Capítulo 5, estão apresentados todos os resultados da pesquisa em suas fases, desde o estudo das pastas, argamassas e esqueleto granular; estudo das propriedades no estado fresco, para obtenção do CAA com RBMG e com RBMG mais sílica ativa e estudo das propriedades mecânicas do concreto no estado endurecido; todas as etapas foram acompanhadas de análises e comparações dos resultados encontrados.

No capítulo 06 são feitas as Considerações finais sobre os resultados obtidos no trabalho, e em seguida, apresentam-se recomendações para futuras pesquisas.

Finalizando, apresentam-se as referências bibliográficas.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

2.1. Introdução

Okamura propôs estudos iniciais sobre CAA no sentido de se obter estruturas mais duráveis e de maior confiabilidade, tendo em vista que o Japão teve severas experiências de problemas de durabilidade nas construções, devido ao reduzido número de trabalhadores preparados na vibração mecânica do concreto. O Concreto Auto Adensável foi à solução encontrada para se obter estruturas duráveis, sem a necessidade de mão de obra qualificada em adensamento mecânico. A falta desses tipos de trabalhadores não foi à única causa dos problemas de durabilidade. A baixa trabalhabilidade dos concretos também dificultava o adensamento dos mesmos em elementos estruturais com formas complexas e com alta taxa de armaduras (Billberg, 1999).

Na Suécia, projetos e pesquisas sobre CAA tiveram início a partir dos anos 90. Estudos sobre a utilização de diferentes tipos de fíleres e critérios de bloqueio para agregados britados e seixos, em ensaios na Caixa L, foram significativos (Van, 1994; Tangtermsirikul et al., 1995; Peterson et al., 1996). A pesquisa da reologia do concreto e da pasta de cimento começou em 1992 e serviu de base para o método de dosagem de Petersson et al. (1996).

2.2. Vantagens e desvantagens

O concreto auto-adensável tem como principais vantagens: redução do custo de aplicação por metro cúbico de concreto, garantia de excelente acabamento em concreto aparente; permite bombeamento em grandes distâncias horizontais e verticais; otimização de mão-de-obra; maior rapidez na execução da obra; melhoria nas condições de segurança na obra; eliminação do ruído provocado pelo vibrador; eliminação da necessidade de espalhamento e de vibração; aumento das possibilidades de trabalho com formas de pequenas

dimensões; redução do custo final da obra em comparação ao sistema de concretagem convencional (Camargos, 2002).

Constantes pesquisas estão sendo desenvolvidas com novos materiais no sentido de obter o CAA, de forma que o mesmo se tornará cada vez mais viável, mas apresenta algumas desvantagens possíveis de ser contornadas; são as seguintes: não é fácil de ser obtido, precisando de mão de obra especializada para sua confecção, controle tecnológico e aplicação; tem maior necessidade de controle, durante sua aplicação, do que o concreto convencional; necessita de cuidados especiais com o transporte, para evitar a segregação; apresenta menor tempo disponível para aplicação em relação ao concreto convencional.

2.3. Aplicações e indicações de uso

Billberg (1999), cita o Japão como o País pioneiro no estudo de métodos científicos do CAA. Em função disso, as primeiras obras de vulto tiveram início neste País, logo em seguida se estendendo para a Suécia e vários outros Países da Europa. Atualmente, tendo se estendido pelo Mundo inteiro, inclusive no Brasil.

No Japão, na construção da ponte Akashi Kaikyo, foram utilizados 500.000 m³ de CAA, em seus dois blocos de ancoragem. Com a utilização do CAA, se conseguiu uma diminuição no tempo dessa obra de aproximadamente três meses.

Também no Japão, o CAA foi muito aplicado em várias construções de túneis, tendo se destacado um com três metros de diâmetro e um quilômetro de comprimento, construído em Yokohama. Nessa obra, foram utilizadas duas camadas de aço protendido, tendo sido aplicado 40 m³ de concreto (Takeuchi et. al., 1994 apud Gomes).

Utilizado, também no Japão, na execução de grandes tanques para gases liquefeitos, a exemplo do construído em Ozaka. O tipo de fino utilizado foi o fíler calcário e o agregado graúdo com diâmetro máximo de 20 mm. O espalhamento em torno de 65 cm. Com o uso do CAA, houve redução de quatro meses no tempo previsto para execução da obra, e, o número de trabalhadores que era de 150 pôde ser reduzido para 50 (Peterson, Rilem 2000).

Três pontes foram construídas na Suécia, a primeira delas no início de 1998, foi a primeira ponte fora do Japão onde a estrutura inteira foi executada em CAA (Billberg, 1999).

Tem crescido acentuadamente o uso do CAA em obras de reparos. Numa ponte em UK, foi usado o CAA, tendo atingido aos sete dias uma resistência à compressão média de 60 MPa (McLeish, 1996 apud Gomes, 2002). Na Suíça, também foi utilizado o CAA na

recuperação de uma ponte, onde a resistência à compressão média atingiu 40 MPa aos 28 dias (Campion e Jost, 2000 apud Gomes, 2002).

Houve outras aplicações do CAA, em viadutos e torres no Japão, em pontes na Suécia, em diversas estruturas na Tailândia, em túneis na Suíça, pontes na Coréia, etc.

O CAA também tem sido bastante utilizado em elementos pré-fabricados, principalmente naqueles com grande concentração de armaduras, onde o concreto convencional tem certa dificuldade de preencher seus vazios.

As principais indicações de uso do CAA são: Fundações executadas por hélice contínua; paredes, vigas e colunas; paredes diafragma; estações; reservatórios de água e piscinas; pisos contrapisos, lajes, pilares, muros, painéis; obras com acabamento em concreto aparente; obras de concreto em locais de difícil acesso; em peças pequenas, com muitos detalhes ou com formatos não convencionais, onde seja difícil a utilização de vibradores e em formas de peças com grande concentração de ferragens (Camargos, 2002).

2.4. Propriedades de fluxo

A capacidade de preencher formas, a capacidade de fluir bem entre obstáculos sem sofrer bloqueio dos seus componentes, principalmente do agregado graúdo, e a estabilidade ou resistência à segregação, são consideradas propriedades do CAA no estado fresco. Essas propriedades são verificadas através de ensaios específicos. Tais ensaios não se aplicam ao concreto convencional, pois o mesmo não apresenta as mesmas características do CAA no estado fresco.

A capacidade de preencher formas ou a capacidade de fluxo, é comandada pela alta fluidez e alta coesão da mistura. Já a capacidade de fluir bem entre os obstáculos é comandada pela moderada viscosidade da pasta e da argamassa e pelas propriedades dos agregados, principalmente, o tamanho máximo do agregado graúdo. A estabilidade ou resistência à segregação requer providências no sentido de se manter a consolidação e a uniformidade da mistura durante seu transporte. Os mecanismos que comandam essa propriedade são a viscosidade e a coesão da mistura (Gomes, 2002).

Essas propriedades são caracterizadas usando técnicas recentemente desenvolvidas, através de equipamentos de ensaios específicos para o CAA. Dentre os vários tipos de ensaios existentes, os mais utilizados são: Para caracterizar a capacidade de fluxo são recomendados os ensaios de Espalhamento, Funil V e Orimet. Para a capacidade de passagem por obstáculos

são recomendados o Orimet com anel de armaduras, a Caixa L, a Caixa em U e a Caixa de preenchimento. Já para caracterização da resistência à segregação são adotados os ensaios GTM e Funil V. Na tabela 2.1 estão apresentadas as faixas de valores típicas para o CAA adotadas pela EFNARC[1].

Tabela 2.1 – Faixa de valores para os parâmetros dos testes de caracterização das propriedades de fluxo adotados pela EFNARC (2002).

Propriedades	Ensaios	Unidade	Faixas típicas dos parâmetros	
			Mínimo	Máximo
Capacidade de preenchimento de formas	Espalhamento Cone Abrams	mm	650	800
	T_{50cm} Cone Abrams	seg.	2	5
	Funil V	seg.	6	12
	Orimet	seg.	0	5
Capacidade de passagem por obstáculos	Caixa em L	(h_2/h_1)	0,8	1,0
	Caixa em U	(h_2-h_1) mm	0	30
	Caixa de preenchimento	%	90	100
	Orimet c/ anel de armaduras	mm	0	10
Resistência à segregação	GTM	%	0	15
	Funil V em $T_{5\ minutos}$	seg.	0	+3

Devido à carência de equipamentos de ensaio para caracterizar a resistência à segregação do CAA, alguns equipamentos foram criados e usados em recentes pesquisas, tais como o Tubo U de Gomes, 2002; a Coluna de Rooney, 2002; através deles, foram obtidos resultados mais concretos, nas análises de tal característica.

2.5. Proporções de misturas

A alta capacidade de fluxo, boa estabilidade e baixo bloqueio do CAA fresco são características obtidas com alta fluidez, e moderada viscosidade e coesão. Essas características estão diretamente ligadas aos seus componentes e as suas proporções na mistura. A moderada viscosidade e coesão que deverá existir na pasta e argamassa para evitar a segregação dos agregados e para diminuir o atrito entre o agregado graúdo justificam a alta

[1] EFNARC é uma Federação Européia dedicada as especialidades de produtos químicos para construções e sistemas estruturais em concreto. Foi fundada em Março de 1989 com o nome de *European Federation of National Trade Associations* (EFNARC), representando os produtores e aplicadores de produtos especiais para edifícios.

dosagem de finos do CAA. O alto volume de pasta é necessário para garantir sua fluidez mantendo a estabilidade do concreto. Como uma alta dosagem de cimento gera uma grande quantidade de calor, é recomendável usar pozolanas e fíleres substituindo parte do cimento (Gomes, 2002).

Na tabela 2.2 estão apresentados algumas proporções de misturas de CAA, com níveis de resistência à compressão usual e de alta resistência.

Na tabela 2.3 apresentam-se dosagens de misturas de CAA elaboradas por alguns autores, com suas respectivas resistências à compressão.

Tabela 2.2 – Faixa de valores para proporções de misturas de CAA.

Proporções da mistura de CAA (1 m³)	CAA (*)	CADAR (**)
Volume de pasta (%)	35 – 40	38 – 45
Massa de finos (kg/m³)	400 – 650	605 – 735
Cimento (kg/m³)	200 – 400	430 – 480
Massa de água (kg/m³)	150 – 180	170 – 185
Rel. água/finos (massa)	0,25 – 0,40	0,25 – 0,29
Rel. água/(finos+ag.miúdo) (massa)	0,12 – 0,14	0,11 – 0,14
Volume de agregado graúdo (%)	30 – 35	26 – 31
Rel. agregado graúdo/concreto (massa)-(%)	32 – 40	29 – 35
Massa de agregado graúdo (kg/m³)	750 – 920	695 – 835
Rel. agregado graúdo/agregados (volume)	0,44 – 0,64	0,47 – 0,50
Tamanho do agregado graúdo (mm)	10 – 20	12
Rel. agregado miúdo/argamassa (volume)-(%)	40 – 50	39 – 45
Massa de agregado miúdo (kg/m³)	710 – 900	740 – 790

(*) Domone e Chai, 1996; Skarendahl e Peterson, 2000; Saak et al., 2001; Su et al. 2001; (**) Gomes, 2002.

Fazendo uma análise comparativa entre CAA de resistência convencional e CAA de alta resistência, através dos parâmetros apresentados na tabela 2.2, observa-se que o CAA de alta resistência apresenta um maior volume de pasta, maior massa de finos, menor relação água/finos e conseqüentemente menor massa de agregados, que são características usuais também no concreto convencional, para o alcance de alta resistência.

Tabela 2.3 – Misturas de concreto auto-adensáveis.

Misturas (kg/m³)	Autores						
	Su (2001)	Marquardt et al. (2001)	Fornasier et al. (2001)	Gomes et al. (2001)	Gomes (2002)	Araújo (2003)	Tutikian et al. (2004)
Cimento	300	300	370	478	458	350	205
Sílica ativa	-	-	-	47,8	-	-	-
RBCM	-	-	-	-	-	154	-
Metacaulim	-	-	-	-	-	-	88
Cinza volante	148	212	-	-	275	-	-
Escória	63	-	-	-	-	-	-
Fíler Calcário	-	-	240	143	-	-	-
Areia	928	571	762	739	744	836	793
Agreg. graúdo		326 (8mm)				-	963
10 mm						795	-
12 mm	-	-	-	767	696	-	-
12,5 mm	-	-	840	-	-	-	-
16 mm	-	734	-	-	-	-	-
20 mm	718	-	-	-	-	-	-
Superplastificante	8,8	19	3,4 (*)	17,2	8,2	11,7	5,1
Modif. Viscosidade	-	15	0,4 (*)	-	-	-	-
Rel a/c	0,57	0,48	0,47	0,40	0,40	0,56	1,16
Rel água/finos	0,40	0,28	0,28	0,29	0,25	0,39	0,81
Resistência à compressão (MPa)							
7 dias	-	-	-	61,7	-	33	14,53
28 dias	41	67	47,6	-	68,2	35,1	15,45

(*) Aditivo sólido (kg)

Observa-se nas misturas de CAA, apresentadas na tabela 2.3, a presença usual de materiais finos, tais como: sílica ativa, resíduo de bloco cerâmico moído (RBCM), metacaulim, cinza volante, escória e fíler calcário. Para a obtenção de CAA de alta resistência é comum a utilização da combinação de cimento mais cinza volante ou cimento com fíler calcário, acrescido de um percentual de sílica ativa (Gomes et al., 2001-2002).

No presente trabalho, os materiais finos utilizados em combinação com o cimento foram RBMG e sílica ativa; com relação a este primeiro é apresentado um breve estudo no item 2.7.

Na tabela 2.3, também, é observado o uso indispensável nos CAA dos superplastificantes de grande poder redutor de água, principalmente aqueles de nova geração, tal como policarboxílicos e outros copolímeros (Bilberg, et al., 1996 apud Gomes, 2002). Em substituição aos fíleres minerais, freqüentemente são usados agentes modificadores de

viscosidade que são solúveis em água, baseados nos polissacarídeos e celulose (Sakata, et al., 1996; Khayat e Guizani, 1997; Khayat eYahia, 1997; Miura et al., 1998 apud Gomes, 2002).

ARAÚJO, J. L. (2003) em seu trabalho "Considerações sobre concreto auto-adensável e uma aplicação com materiais locais" utilizou, independentemente, o resíduo obtido por moagem e peneiramento de tijolos de barro que se quebram durante seu processo de fabricação (tabela 2.3) e o pó calcário obtido da moagem de pedra calcária, como adições minerais na obtenção de concretos auto-adensáveis. Foram determinadas suas resistências à compressão e executadas análises comparativas de custo/resistência entre os dois CAA e um concreto convencional C30 de referência, onde os resultados apresentaram os seguintes valores: R$5,60/MPa; R$8,56/MPa e R$6,51/MPa; respectivamente.

TUTIKIAN, B. F. et al. (2004) através da pesquisa Comparação da curva de dosagem, resistência à tração, consumo de materiais e custo dos concretos auto-adensáveis com metacaulim e fíler calcário; utilizaram o método de dosagem proposto por Tutikian, onde se produziram dois tipos de CAA, um com metacaulim (tabela 2.3) e outro com fíler calcário, donde observou-se que nas primeiras idades o CAA com fíler calcário apresentou desempenho superior, mas o CAA com metacaulim teve um expressivo ganho de resistência à compressão nas idades posteriores, obtendo melhores relação custo/resistência.

2.6. Métodos de dosagens

Os métodos de dosagem do CAA diferem muito dos utilizados para os concretos convencionais, mas também são empíricos. No CAA as dosagens das misturas são comandadas pelas propriedades de fluxo no estado fresco.

A partir do desenvolvimento do CAA no Japão surgiram diversos métodos de dosagens. Neste trabalho descrevem-se os métodos de Okamura, Petersson e Billberg, EFNARC e Gomes.

Nos métodos de dosagens apresentam-se ensaios característicos com pastas, argamassas e com o concreto no estado fresco. Os estudos das pastas são executados através dos ensaios no Cone de Marsh e no Mini-slump, ambos descritos no item 3.3.1. As argamassas são estudadas através dos ensaios no Cone de Marsh e no Tronco de cone da mesa de consistência, descritos no item 3.3.2. Já os estudos dos concretos, através da verificação de suas propriedades no estado fresco, são desenvolvidos através dos ensaios de Espalhamento, Funil V, Caixa L e Tubo U, todos descritos no item 3.3.4.

2.6.1. Método de Okamura

Segundo Gomes (2002), os primeiros procedimentos de um método de dosagem de misturas para o CAA, foram propostos por Ouchi et al. (1996) e Okamura (1997).

Em princípio, pensava-se que seria fácil se obter esse novo concreto, porque o concreto submerso já estava em uso na prática. O concreto submerso era lançado em baixo d' água e a segregação era inibida simplesmente adicionando-se uma grande quantidade de agente modificador de viscosidade, constituído de um polímero solúvel em água, que impedia que as partículas de cimento fossem arrastadas pela água circunvizinha. Porém, chegou-se a conclusão que o mesmo concreto submerso não era aplicável às estruturas expostas ao ar, por duas razões: a grande quantidade de ar incorporado não podia ser eliminada por causa da alta viscosidade, como também, a grande dificuldade de adensamento do concreto nas regiões confinadas das barras de armaduras. A partir destas conclusões, deu-se início as pesquisas para eliminação dessas características, no sentido de obter o CAA.

Através de experimentos chegou-se a conclusão que para o concreto fluir suavemente entre obstáculos era necessário que a tensão de cisalhamento na pasta, fosse pequena o bastante para permitir tal deslocamento relativo entre as partículas dos agregados. Os resultados experimentais indicaram que a tensão de cisalhamento necessária para um grande deslocamento relativo dependia da relação água-cimento da pasta (a/c). Em função disso foi encontrado um valor ótimo para a relação água/cimento, de forma a minimizar a tensão de cisalhamento. Mas, quando se adequava o valor para a relação água-cimento melhorando a capacidade de fluxo da pasta de cimento, ocorria em paralelo uma diminuição na viscosidade, que era um fator negativo em função da diminuição da resistência à segregação do concreto. De forma que ficou clara a necessidade da presença de um aditivo superplastificante para que a auto-adensamento fosse conseguido sem a ocorrência de segregação. Com a presença do superplastificante a pasta apresentava aumento na capacidade de fluir com apenas uma pequena diminuição paralela da viscosidade. Foi observado também que a causa do bloqueio no fluxo do concreto numa pequena seção transversal, era o contato direto entre as partículas do agregado, de forma que se o contato entre as partículas do agregado graúdo excedesse a um certo limite, o bloqueio do concreto ocorria, mesmo, apesar da moderada viscosidade da argamassa. Então a quantidade máxima de agregado graúdo foi limitada em 50% do volume total de agregados. Semelhantemente, se a quantidade de agregado miúdo excedesse a um certo limite, o contato direto entre as partículas de areia provocava uma diminuição na

deformabilidade do concreto, apesar da moderada viscosidade da pasta. Da mesma forma que o agregado graúdo, o volume do agregado miúdo também foi limitado. O limite de volume do agregado miúdo foi de 40% do volume da argamassa. A partir desse ponto, foram desenvolvidas pesquisas para se obter a combinação ótima entre a relação água-cimento e superplastificante, com a quantidade fixa de agregados, para se obter o auto-adensamento do concreto.

A relação água-cimento, em volume, foi assumida entre 0,9 e 1,0 dependendo das propriedades do cimento utilizado. A dosagem de superplastificante e o valor final da relação água-cimento eram determinados de forma que assegurasse o grau de auto-adensamento desejado do concreto.

A forma para alcançar o auto-adensamento do concreto nesse método, controlando a proporção da mistura, está resumido na figura 2.1.

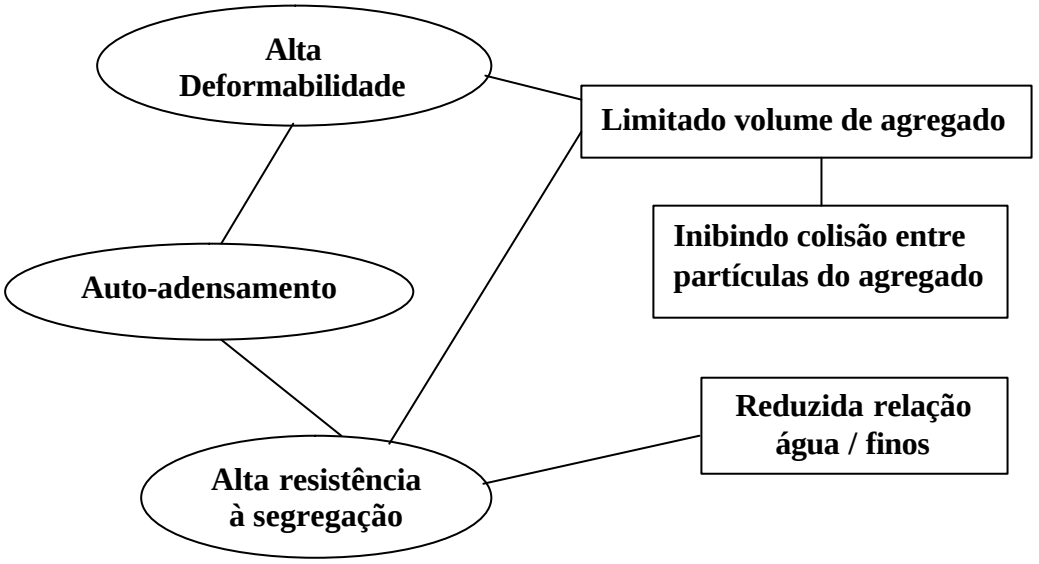

Figura 2.1 – Forma para alcançar o auto-adensamento.

Neste método considera-se que o concreto consiste de duas fases: argamassa e agregado graúdo. Desta forma o efeito do superplastificante, no equilíbrio entre a capacidade de fluir e viscosidade da argamassa do CAA, foi estudado quantitativamente. O método proposto por Okamura et al. para obtenção do concreto auto-adensável está resumido na figura 2.2.

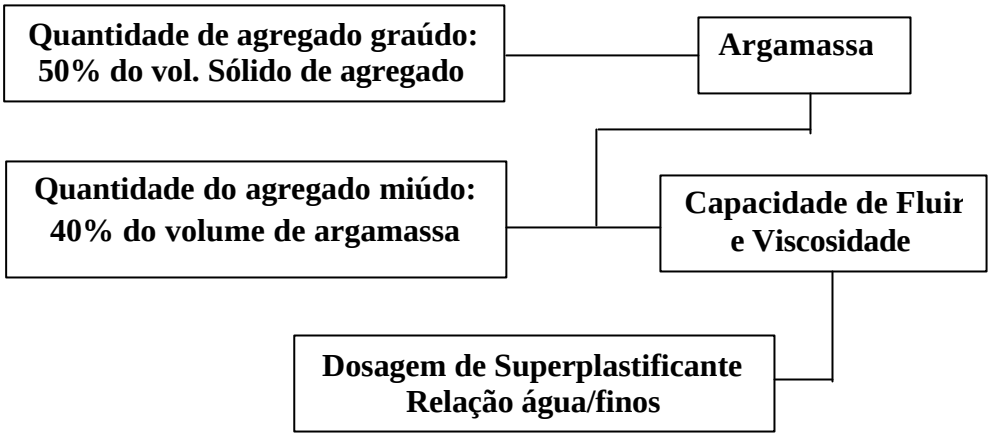

Figura 2.2 – Método de dosagem para o concreto auto-adensável proposto por Okamura et. al.

No método de teste das propriedades da argamassa os índices que expressavam a capacidade de fluxo e a viscosidade foram definidos como $?_m = (r_m^2 - r_0^2) / r_0^2$ e $R_m = 10 / t$, respectivamente. Onde $?_m$ é a Área relativa de fluxo obtida através do ensaio da argamassa no Tronco de cone de consistência, R_m é a Velocidade relativa de fluxo obtida no ensaio da argamassa no Funil V para argamassa, r_m é a média de duas medidas perpendiculares do diâmetro do fluxo máximo do tronco de cone, r_0 = 10cm é o diâmetro interno inferior do tronco de cone, t era o tempo medido, em segundos, para o fluxo total da argamassa através do Funil V para argamassas. Grande valor de $?_m$ indicava alta capacidade de fluxo e baixo valor de R_m, indicava alta viscosidade. Argamassas com valores de $?_m$ = 5 e R_m = 1, foram consideradas bastante apropriadas para se obter o concreto auto-adensável. Foi descoberto também que a relação entre a dosagem de superplastificante e seus efeitos eram totalmente diferentes, dependendo do tipo de finos e do superplastificante utilizados. Sendo sp/f a relação entre a massa de superplastificante e a massa de finos e V_a/V_f a relação entre o volume de água e volume de materiais finos, na figura 2.3 apresenta-se o método de dosagem proposto para a argamassa do CAA.

Domone e Jin (1999) apud Gomes, 2002, apresentaram sugestões para G_m = 8 correspondentes a diâmetros de espalhamento = 300 mm e R_m de 1 a 5, correspondentes a tempos de fluxo de 2 s. a 10 s.. Já, os valores de G_m entre 3 e 7, correspondentes a diâmetros de espalhamento da argamassa de 200 mm a 283 mm e valores de R_m entre 1 e 2, correspondentes aos tempos de fluxo de 5 s. a 10 s., foram adotados para o CAA por Edamatsu et. al. (1999) apud Gomes 2002.

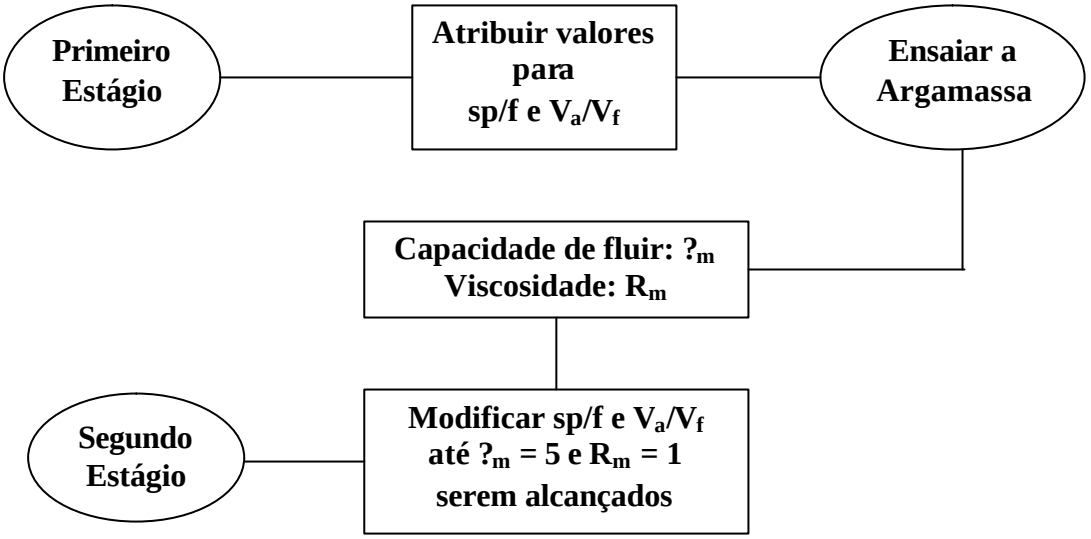

Figura 2.3 – Método de dosagem para a argamassa do CAA.

2.6.2. Método de Petersson et al.

Petersson et. al. (1996), propuseram um procedimento que consiste na determinação de um certo esqueleto granular e um mínimo volume de pasta que garanta boa trabalhabilidade do CAA, para boa passagem no ensaio Caixa L e um adequado valor no ensaio de Espalhamento. As quantidades de superplastificantes, água e finos (partículas < 250 μm), são ajustadas para alcançar a resistência a compressão desejada, para obter a necessária viscosidade e uma baixa tensão de escoamento, compatíveis para um comportamento de auto-adensamento do concreto (Gomes, 2002).

Para se produzir um concreto que preenchesse totalmente os vazios das fôrmas, inclusive os cantos, sem sofrer bloqueio das armaduras e sem sofrer segregação do agregado graúdo, ou seja, para se produzir um CAA, era necessário o uso de aditivos superplastificantes para criar alta mobilidade; e eliminar a segregação utilizando um grande volume de materiais finos ou adicionando agentes modificadores de viscosidade. A característica do concreto de passar entre as barras das armaduras de aço é controlada pelas propriedades reológicas da argamassa e o volume do agregado graúdo.

Nesse método de dosagem foi calculada a mínima quantidade de pasta para um certo espaço livre entre as armaduras. Foi usado fíler para criar o conteúdo de pasta necessário. O bloqueio do concreto foi pesquisado através de ensaios na Caixa L. Foram feitos testes com

agregados com diâmetros máximos diferentes. Nesses ensaios a quantidade de pasta foi mantida constante. Foi estudada também a possibilidade de substituir um percentual de fíler da mistura por um agente modificador de viscosidade. O Método de dosagem estabeleceu a quantidade necessária de pasta que devia ser usada para evitar o bloqueio. Ao mesmo tempo que as pesquisas do bloqueio, também foram estudadas, através do ensaio de Espalhamento com o Cone de Abrams, as condições das superfícies, tais como molhadas, secas ou úmidas. O Método para a Dosagem da Mistura de CAA está esboçado na figura 2.4**.**

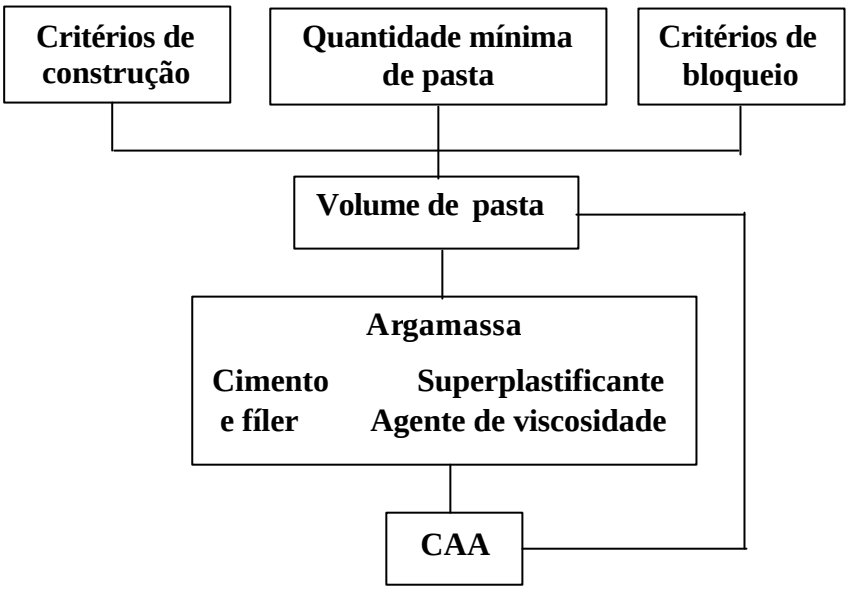

Figura 2.4 – Processo simplificado para a dosagem da mistura de CAA.

Os Critérios de Construção são determinados através dos parâmetros especiais particulares de cada projeto. Alguns deles podem ser: resistência do concreto, resistência inicial do concreto, durabilidade e espaçamento entre as armaduras. Para dada resistência de projeto do concreto é especificada a relação água/cimento, adequada para a relação normal entre a resistência do concreto e a relação água/cimento. A resistência inicial do concreto é função da relação água/cimento e do tipo de cimento especial especificado. Para atender os critérios de durabilidade são necessários o uso de tipos de cimentos especiais, de agentes incorporadores de ar e outros tipos de especificações de acordo com o caso específico. No concreto convencional o procedimento normal dos critérios de construção é dar as

especificações, para a dosagem da mistura, excluindo a abertura entre as armaduras. No CAA essa informação é necessária e obrigatória.

O passo seguinte é achar o volume de pasta mínimo da mistura entre o agregado miúdo e o graúdo. Isso é feito medindo a quantidade de vazios para as diferentes relações entre os agregados miúdo e graúdo. A relação entre os agregados miúdo e graúdo não afeta apenas a quantidade de vazios, mas também a área total de superfície de agregados. O volume de pasta mínimo deve ocupar todo o espaço vazio entre os agregados e cobrir também toda a superfície das partículas de agregado. Duas diferentes misturas de agregados miúdo e graúdo podem ter diferentes áreas de superfície, mesmo se eles tiverem o mesmo volume sólido. Uma maior superfície de agregado requer maior cobertura de volume de pasta para dar a mesma deformabilidade.

Segundo os autores nesta pesquisa foram utilizados dois tipos de agregados graúdos, um de 0mm-16mm e outro de 8mm-16mm. Ambos eram meio lamelares. Foram usados também dois tipos de areia, ambas de 0mm-8mm. Tanto as areias como as britas eram do tipo fluvial.

Quanto aos critérios de bloqueio foi estudado o mecanismo da fluência da argamassa por entre os vazios e do vazio da areia no bloqueio da argamassa fresca. Foi chegada a conclusão que o risco de bloqueio pode ser computado pela adição linear do efeito de cada tamanho de areia. Foi proposta uma equação: Risco de Bloqueio = ? (n_{si} / n_{sbi}) = 1. Onde n_{si} é a relação de volume de agregado do grupo de tamanho i (pelo volume total de concreto) e n_{sbi} é a relação de volume bloqueado de agregado do grupo de tamanho i (pelo volume total de concreto). A areia era definida como partículas maiores que 1/10 dos vazios aproximadamente. Partículas menores que esse tamanho, incluindo os finos, têm diferentes papéis no bloqueio que a areia.

No estudo do risco de bloqueio dos agregados se chegou a uma relação n_{abi} / c/D_{af}. Onde $n_{abi} = V_{abi} / V_t$; V_{abi} = Volume de agregado bloqueado do grupo i; V_t = Volume total de concreto da mistura; c = Espaço vazio entre as armaduras e $D_{af} = M_{i-1} + 3/4.(M_i - M_{i-1})$. M_i e M_{i-1} são as dimensões da peneira superior e inferior do agregado do grupo i. Desta forma, pode-se calcular a quantidade máxima permissível de agregado para não causar bloqueio e o volume de pasta médio mínimo, correspondente para a relação entre o agregado graúdo e o agregado total de acordo com o critério de bloqueio. Nesse método além de se obter o volume

de pasta mínimo no ponto da relação ideal entre os agregados graúdo e miúdo, estuda-se também o volume de pasta ideal em função do espaço livre entre as armaduras.

Os estudos do uso dos diferentes tipos de cimentos e filers, em pastas e argamassas para o CAA foram executados através da utilização de Viscosímetros. A quantidade de superplastificante para os diversos tipos de misturas foi calculada através de percentuais em cima da massa de finos, enquanto que a quantidade dos agentes modificadores de viscosidade utilizados foi encontrada através de percentuais em cima da massa de água. Nesse estudo foi observado que as pastas de cimento com fileres apresentaram resultados muito melhores que as pastas com apenas cimento, quanto aos requisitos ideais para o CAA. Permitiu-se chegar também a conclusão que era necessária uma quantidade de finos no intervalo de 500kg/m³ - 525kg/m³ de concreto, para se alcançar boas propriedades reológicas sem qualquer segregação. Podem ser encontradas as quantidades adequadas de Superplastificantes e Agentes modificadores de viscosidade, para o CAA, através de testes da argamassa no Viscosímetro de pasta.

No concreto foram utilizados os testes de Espalhamento e Caixa L para os diversos tipos de misturas. Os critérios adotados para o Espalhamento eram entre 670 mm e 720 mm. Na Caixa L o que se devia alcançar era uma profundidade de esvaziamento da parte vertical da caixa, maior que 490 mm.

O estudo das diversas misturas de concreto permitiu a elaboração de curvas, para cada tamanho de abertura entre as armaduras, do volume de pasta por m³ de concreto (em litros) versos relação brita / total de agregado (em massa), onde nos pontos da curva e acima da curva não ocorreu bloqueio. Desta forma essas curvas fornecem o volume de pasta que deve ter o concreto para cada tipo de abertura entre armaduras e para cada relação brita/agregado, para que não ocorra bloqueio.

Também foi pesquisado o bloqueio do CAA com diferentes tamanhos máximos de agregados graúdos. O volume de pasta foi mantido constante em 377,2 litros. A consistência foi medida nos ensaios de Espalhamento, tendo dado entre 650 mm e 725 mm. Quando foram feitas as medições no Espalhamento, foram estabelecidas três condições para a superfície. Seca, úmida e molhada. No procedimento convencional nos projetos, são usadas à condição de superfície úmida. Foi comprovada uma tendência do espalhamento crescer com o crescimento da umidade na superfície. Foram feitas diferentes considerações nas caixas L usadas, comparados com a normal de três barras. Caixas L com diferentes números de barras

(mais de três barras), menor abertura entre as paredes e entre as armaduras. Todos esses fatores influenciam no comportamento do bloqueio. O número de barras das armaduras é de grande influência, principalmente quando a largura da caixa é constante. Observou-se que o bloqueio é mais acentuado quando são usadas mais de 3 barras de armaduras. A recomendação é manter a quantidade de armaduras constante (3 barras) e usar 1,4 vezes da abertura entre as barras, para a abertura entre barras e parede da caixa, pelo fato do efeito de parede ser maior do que o efeito de barra.

Também foram feitas pesquisas da redução da quantidade de fíler e a substituição desse fíler por um agente modificador de viscosidade. O espalhamento decresce mais rapidamente seu valor quando a quantidade de agente modificador de viscosidade é aumentada. Mostrou-se também que nas misturas em que foram usados agentes modificadores de viscosidade a trabalhabilidade diminuiu antes do tempo, comparada a misturas só com fíler. Esta é uma dificuldade ao usar o agente modificador de viscosidade para o CAA. Nos resultados dos testes na Caixa L verificou-se que nas misturas onde foram substituídos mais de 10% de fíler por agente modificador de viscosidade, ocorreu bloqueio. Desta forma concluiu-se que o uso do agente modificador de viscosidade só pode substituir uma quantidade de fíler, da mistura, de no máximo 10%. Os resultados também indicaram que depois de um longo tempo, apenas a mistura sem agente modificador de viscosidade é que não causa severo bloqueio.

2.6.3. Método de EFNARC

Como o uso do CAA, tem crescido de forma acentuada, em vários países da Comunidade Européia, tem sido implantados diversos programas de pesquisas relacionados com o uso e aplicação do CAA. Estas especificações e diretrizes mostradas a seguir, refletem a larga experiência prática da EFNARC sobre o CAA. Sua elaboração foi baseada nas mais recentes pesquisas, como também na abundância de experiências vividas pelos sócios da EFNARC por toda a Europa. Mas, a própria EFNARC reconhece que esta é uma tecnologia que ainda se encontra em estado de evolução e vários avanços adicionais podem impor modificações ou extensões nas exigências desta Especificação. O Comitê Técnico responsável continuará monitorando o progresso neste campo e deverá atualizar o documento a intervalos regulares. De forma que, a própria EFNARC, sugere avaliações de sua especificação, por parte dos usuários, para serem levadas em conta na próxima revisão do referido documento. A

Especificação da EFNARC define exigências específicas para o material do CAA, sua composição e sua aplicação. Seus anexos, também, incluem uma grande riqueza de conselhos úteis a pesquisadores, a projetistas, fabricantes de concreto, empresas construtoras, etc.

Conceitos essenciais

No sentido de melhor compreender as peculiaridades do CAA, algumas definições são essenciais, no entender da EFNARC, tais como: - Adições são materiais inorgânicos de granulometria muito fina, usado em concreto no sentido de melhorar suas propriedades ou alcançar propriedades especiais. Admite dois tipos de adições inorgânicas: Tipo I - adições quase inertes, que são os fílers de agregados e os pigmentos; Tipo II - pozolânicas ou adições hidráulicas latentes, que são as cinzas volantes, a sílica ativa e a escória granulada de alto forno. – Aditivos são materiais adicionados ao concreto durante seu processo de mistura, em quantidade pequena em relação à massa de cimento, com a finalidade de modificar as propriedades frescas ou endurecidas do concreto. – Binder é a combinação do cimento com outros materiais cimentícios no CAA. - Habilidade de Preenchimento é a capacidade do CAA de fluir, preenchendo completamente todos os espaços das formas sob o efeito do seu próprio peso. - Habilidade de Passagem é a capacidade do CAA de fluir entre pequenas aberturas, como os espaços entre as barras de aço das armaduras, sem sofrer segregação ou bloqueio. - Estabilidade ou Resistência a Segregação é a capacidade do concreto de permanecer com sua composição homogênea durante o tempo de transporte e aplicação. - Argamassa é a fração do concreto composta da pasta mais o agregado menor que 4 mm. - Finos é o material de tamanho de partícula menor que 0,125 mm. Deverão estar inclusos nesse material as frações de areia com esses tamanhos. – Pasta é a fração do concreto composta de finos mais água e ar. - Tensão de escoamento do material é o valor da tensão cisalhante que deverá ocorrer no material, para se dar inicio ao processo de fluxo do mesmo. - Viscosidade é uma medida da resistência de um material para fluir, devido à fricção interna entre suas partículas e é a razão de ampliação da tensão de cisalhamento do material. - Trabalhabilidade é a medida de facilidade pela qual, o concreto fresco pode ser aplicado e adensado, ou seja, uma complexa combinação de aspectos como, fluidez, coesão, transportabilidade, compactabilidade e viscosidade. - Bloqueio acontece quando o concreto não puder fluir por uma determinada abertura (ou orifício) devido ao engrenamento entre as partículas do agregado. - Concreto Auto-Adensável é aquele que tem o poder de fluir sob o efeito de seu próprio peso,

preenchendo completamente as formas, até mesmo na presença de armaduras densas, sem a necessidade de qualquer vibração, e ainda assim, mantendo sua homogeneidade.

Exigências sobre os materiais constituintes

Os materiais constituintes do CAA deverão obedecer às exigências da EN 206-1 Especificação, desempenho, produção e conformidade do concreto. Os materiais são considerados adequados para o uso em concreto, quando não contiverem ingredientes prejudiciais, em tais quantidades, que possam prejudicar a qualidade, a durabilidade, ou provocar corrosão nas armaduras.

Os cimentos utilizados devem satisfazer as exigências da EN 197-1 Composição, especificações e critérios de conformidade do Cimento. A seleção do tipo do cimento dependerá das exigências globais para o concreto, como resistência, durabilidade, etc. Cimentos contendo mais de 10% de C_3A podem causar problemas de baixa trabalhabilidade. A quantidade típica de cimento é na faixa entre 350kg/m³ – 450kg/m³. Mais de 500kg / m³ poderá ser perigoso, e aumentar a retração. O uso de menos de 350 kg/m³ só poderá ser satisfatório com a inclusão de outro material cimentício, tais como cinza volante, pozolanas, etc.

Os agregados devem atender as exigências da EN 12620 Agregados para concreto. Seu tamanho máximo dependerá do tipo particular de aplicação do concreto, mas é normalmente limitado a 20 mm. Suas partículas menores que 0,125 mm devem ser consideradas fazendo parte do conteúdo de finos e serão muito importantes no comportamento reológico do CAA. Seu percentual de umidade deverá ser controlado de perto e levado em conta para se produzir CAA de qualidade constante. Todas as areias sem agentes nocivos são satisfatórias para o uso no CAA. Ambos os tipos, tanto a britada como a arredondada natural, podem ser usadas. Podem ser usadas tanto as quartzosas como as calcárias. Uma quantia mínima de finos deve ser estabelecida (presentes nos materiais cimentícios e na própria areia) para evitar a segregação. Todos os tipos de agregados graúdos são satisfatórios. O tamanho máximo normal é geralmente entre 16mm – 20mm, mas partículas de tamanho até 40 mm ou mais já foram usadas em CAA. A homogeneidade de graduação granulométrica é de vital importância. Relativa às características geométricas dos agregados, os laminares tendem a melhorar a resistência por causa dos engrenamentos das partículas angulares, mas os arredondados melhoram o fluxo por causa do baixo atrito interno

entre as partículas. As aberturas entre as armaduras são quem melhor decidem sobre o tamanho máximo adequado do agregado graúdo, pois a compatibilidade entre esses tamanhos, é um dos fatores preponderantes na diminuição do atrito interno entre as partículas e na melhora da capacidade de fluir do concreto.

A água utilizada no CAA deve atender as exigências da EN 1008 Água para concreto. Os aditivos utilizados no CAA deverão atender as exigências da EN 934-2. O uso do superplastificante apropriado é essencial para promover a trabalhabilidade necessária. Os aditivos mais importantes são os superplastificantes, redutores de água de alta gama, usados com uma redução de água maior que 20%.

Outros tipos de aditivos podem ser necessários, como agentes modificadores de viscosidade, para melhorar a estabilidade; aditivos incorporadores de ar, para diminuir as tensões de congelamento e descongelamento dos concretos em regiões de baixa temperatura; aditivos retardadores de pega, etc. O uso de um Agente modificador de viscosidade aumenta as condições de controle da segregação, quando a quantidade de finos é limitada. Esse aditivo ajuda a melhorar a homogeneidade e reduz a tendência à segregação. Na EN 934-2 Definições e exigências para aditivos de concreto; não constam as especificações para os agentes modificadores de viscosidade, mas a aplicação do mesmo, deverá atender as exigências estabelecidas nos ensaios específicos do CAA.

As adições semi-inertes (Tipo I), que são os fílers de agregados e os pigmentos, têm suas especificações regidas, respectivamente, pela EN 12620 Agregados para concreto e EN 12878 Pigmentos para coloração de edifícios baseado em materiais no cimento. As adições Tipo II (pozolânicas ou hidráulicas latentes), que são as cinzas volantes, sílica ativa; têm suas especificações regidas, respectivamente, pela EN 450 Definições, exigências e controle de qualidade de cinzas volantes para concreto e EN 13263 Definições, exigências e controle de conformidade em sílica ativa para concreto. Devido às exigências reológicas especiais do CAA, ambas as adições, as inertes e reativas, são usadas para melhorar e manter a trabalhabilidade, como também regular a quantidade de cimento, reduzindo o calor de hidratação. As adições tipo II podem melhorar significativamente a durabilidade do concreto. As adições típicas são a cinza volante, a sílica ativa, a escória granulada de alto forno, o fíler de vidro moído, o pó de pedra e o pigmento. Como pó de pedra, podem ser usadas pedras calcárias, dolomíticas ou graníticas finamente trituradas, em frações de partículas menores que 0,125 mm. As dolomíticas podem vir a apresentar riscos de durabilidade do concreto,

devido à reação álcali-carbono. A cinza volante é um bom material inorgânico com propriedades pozolânicas que pode ser acrescentado ao CAA para melhorar suas propriedades. A sílica ativa é capaz de promover uma melhoria das condições reológicas do concreto, bem como uma melhora na durabilidade e em suas propriedades químicas e mecânicas. A escória granulada de alto forno é um material latente hidráulico granular fino, que pode ser adicionado ao concreto para melhorar suas propriedades reológicas. O fíler de vidro moído é geralmente obtido através da moagem de vidro reciclado, em partículas menores que 0,1 mm e a área de superfície específica maior que 2500 cm^2 / g., onde partículas maiores podem causar reação álcali-sílica.

Os tipos de fibras comumente usadas no CAA são as de aço ou de polímeros. Suas especificações ainda se encontram em fase de elaboração. Podem ser usadas para melhorar as propriedades do CAA como também do concreto convencional. As fibras de aço são normalmente usadas no CAA, para aumentar os parâmetros das características mecânicas de resistência a flexão e tenacidade. As fibras de polímeros são usadas geralmente para reduzir a segregação e a retração plástica, ou aumentar a resistência ao fogo.

Exigências sobre o CAA

O CAA deverá ser projetado de forma que atenda as exigências da EN 206, relativas a densidade, ao aumento progressivo de resistência, a resistência final e a durabilidade. Devido ao grande conteúdo de finos, o CAA pode apresentar mais retração plástica ou deformação lenta que os concretos convencionais, de forma que esses aspectos devem ser levados em consideração. O conhecimento atual desses aspectos ainda é muito limitado, ou seja, é uma área que requer muita pesquisa. Deverá, também, ser tomado um cuidado especial para começar o processo de cura do concreto assim que possível. O nível de fluidez do CAA é governado, principalmente, pela dosagem de superplastificante, mas uma grande quantidade do mesmo pode conduzir ao risco de segregação e bloqueio. A tendência de segregação e bloqueio pode ser controlada pelo uso de uma quantia suficiente de finos (< 0,125 mm) ou um aditivo controlador do nível de Viscosidade. De forma que, durante o processo de aplicação, suas características no estado fresco precisam ser controladas, usando preferivelmente, de forma cuidadosa, dois tipos diferentes de testes. O tempo durante o qual o CAA mantém suas propriedades reológicas, é muito importante, no sentido de obter bons resultados, durante o processo de aplicação do mesmo. Este tempo pode ser ajustado através da escolha correta do

superplastificante ou do uso combinado de aditivos retardadores. Cada aditivo tem seu efeito em função do tempo, portanto, eles podem ser usados de acordo com o tipo de cimento e a cronometragem do transporte e da colocação. A trabalhabilidade do CAA pode ser caracterizada pelas propriedades de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem por obstáculos e resistência a segregação. Uma mistura de concreto só pode ser classificada como Concreto Auto-Adensável se todas as exigências, provenientes de resultados de ensaios, para essas três características, forem totalmente atendidas.

Métodos de ensaios

Foram desenvolvidos muitos métodos de ensaios diferentes na tentativa de caracterizar as propriedades do CAA no estado fresco. Mas, nenhum único ensaio ou combinações de ensaios, alcançou aprovação universal, e alguns deles têm seus partidários. Semelhantemente, ainda não foi descoberto nenhum único ensaio, que fosse capaz de caracterizar todos os aspectos da trabalhabilidade, assim cada dosagem de mistura deverá ser submetida a mais de um ensaio para caracterizar os diferentes parâmetros de trabalhabilidade. Na tabela 2.1, já foram listados alguns ensaios alternativos adotados pela EFNARC para os diferentes parâmetros de trabalhabilidade.

Composição das misturas

A composição do CAA deverá satisfazer a todos os critérios de desempenho em ambos os estados, tanto fresco, como endurecido. Seus requisitos no estado endurecido devem atender as exigências da EN 206.

Na fase de projeto da mistura, é muito útil considerar as proporções relativas dos componentes fundamentais, por volume, em lugar de massa. Em seguida, modificações serão necessárias no sentido de satisfazer valores da resistência requerida e outras condições de desempenho, também estabelecidas em projeto.

As quantidades e proporções típicas para se obter o Concreto Auto-Adensável são as seguintes: - relação água/finos (em volume) de 0,80 a 1,10; - o volume de ar geralmente é fixado em torno de 2 %; - quantidade total de finos de 160 litros a 240 litros (400 kg/m³ - 600 kg/m³); - quantidade de agregado graúdo, que tem o tamanho mínimo de suas partículas maior que 4 mm, é normalmente de 28% a 35% do volume da mistura; - a relação água/cimento é selecionada se baseando nas exigências da EN 206, mas normalmente a quantidade de água

não excede a 200 litros/m³; a quantidade de areia, que são todas as partículas com tamanho mínimo maior que 0,125 mm e tamanho máximo menor que 4 mm, deverá ser balanceada de acordo com os volumes dos outros componentes da mistura, mas seu volume ótimo na argamassa, varia entre 40 % e 50 %, e o percentual exato é função das propriedades da pasta. É aconselhável se projetar à mistura do concreto para atender suas propriedades frescas específicas, apesar das variações antecipadas das características da matéria-prima a ser utilizada. Algumas variações na umidade dos agregados já devem ser esperadas. De forma que, os aditivos agentes modificadores de viscosidade devem ser usados como ferramenta compensadora de qualquer variação na composição granulométrica da areia e no percentual de umidade dos agregados.

Para a determinação ótima da relação volumétrica de água/finos e dosagem de superplastificante são executados testes do tronco de cone de consistência e do funil V, na argamassa, com a relação volumétrica água/finos, variando na faixa de 0,8 a 0,9. O superplastificante é usado para equilibrar as características reológicas da argamassa. A quantidade de areia na argamassa permanece a mesma determinada anteriormente. O objetivo é atingir resultados para o espalhamento de 24 cm a 26 cm e no funil V de 7s. a 11s..

Caso ocorra comprovação em laboratório do não atendimento, por parte da mistura, dos requisitos pré-estabelecidos ou de alguma propriedade no estado fresco, deverá ser procedido ajuste na composição, seguindo as seguintes orientações: - usar tipos adicionais ou diferentes de fíleres (se disponível); - modificar as proporções da areia ou do agregado graúdo; - usar aditivo agente modificador de viscosidade, caso já não tenha sido incluso na mistura; - ajustar a dosagem do superplastificante e (ou) do aditivo agente de viscosidade; - usar um outro tipo, do superplastificante e (ou) do aditivo agente modificador de viscosidade, mais compatível com os materiais locais; - ajustar a dosagem de aditivo para modificar o conteúdo de água, e conseqüentemente a relação água/finos. Uma vez atendidas todas as exigências, a mistura está adequada para ser aplicada nas formas das peças do projeto.

2.6.4. Método de Gomes

O método apresenta um procedimento de caráter experimental para obtenção da dosagem do concreto auto-adensável de alta resistência. Esse procedimento constitui uma extensão do desenvolvido por Toralles et. al. 1996-1998, para concretos de alta resistência, no sentido de incorporar critérios de dosagem, relativo aos concretos auto-adensáveis.

Os critérios de otimização adotados na aplicação dos procedimentos, vêm acompanhados por uma resistência mínima a compressão e por um cumprimento de diferentes requisitos de auto-adensamento no estado fresco, tudo isso com uma quantidade mínima de superplastificante e cimento. Apresentam-se, também, detalhes de procedimentos de ensaios utilizados para a caracterização do estado fresco do CAA.

Princípios do método

O procedimento proposto por Gomes, nesse estudo, foi fundamentado na otimização separada da composição da pasta e do esqueleto granular de agregados. A pasta é constituída por cimento e sílica ativa (no caso de concreto de alta resistência), fíler, água e superplastificante, enquanto que o esqueleto granular é definido pela relação ótima entre agregado miúdo e agregado graúdo, que proporcione uma máxima densidade em seco e sem compactação.

No método são designadas as relações água/cimento, sílica ativa/cimento, superplastificante sólido/cimento e fíler/cimento, respectivamente por: a/c, sf/c, sp/c e f/c. No caso de um concreto de alta resistência, a dosagem de sílica ativa ou microssílica ou fumo de sílica deverá ser fixado em 10 % em massa de cimento, levando em consideração que este é um percentual ótimo para um concreto de alta resistência em termos de benefícios e custo.

A relação água/finos deverá ser fixada, a principio, no limite superior de 0,4 para em seguida ir sendo diminuída, até se atingir a resistência requerida para o concreto. Quanto ao esqueleto granular, deverá ser adotado um tamanho característico máximo para o agregado = 20 mm.

Neste estudo Gomes utilizou um cimento de alta resistência inicial; foi utilizado juntamente com uma sílica ativa com baixa demanda de água, um superplastificante copolímero de última geração, um fíler com tamanho máximo das partículas em torno de 80μm e baixa demanda de água e agregados com baixo coeficiente de absorção.

A figura 2.5 mostra uma seqüência do método de dosagem de Gomes para o CAA de alta resistência.

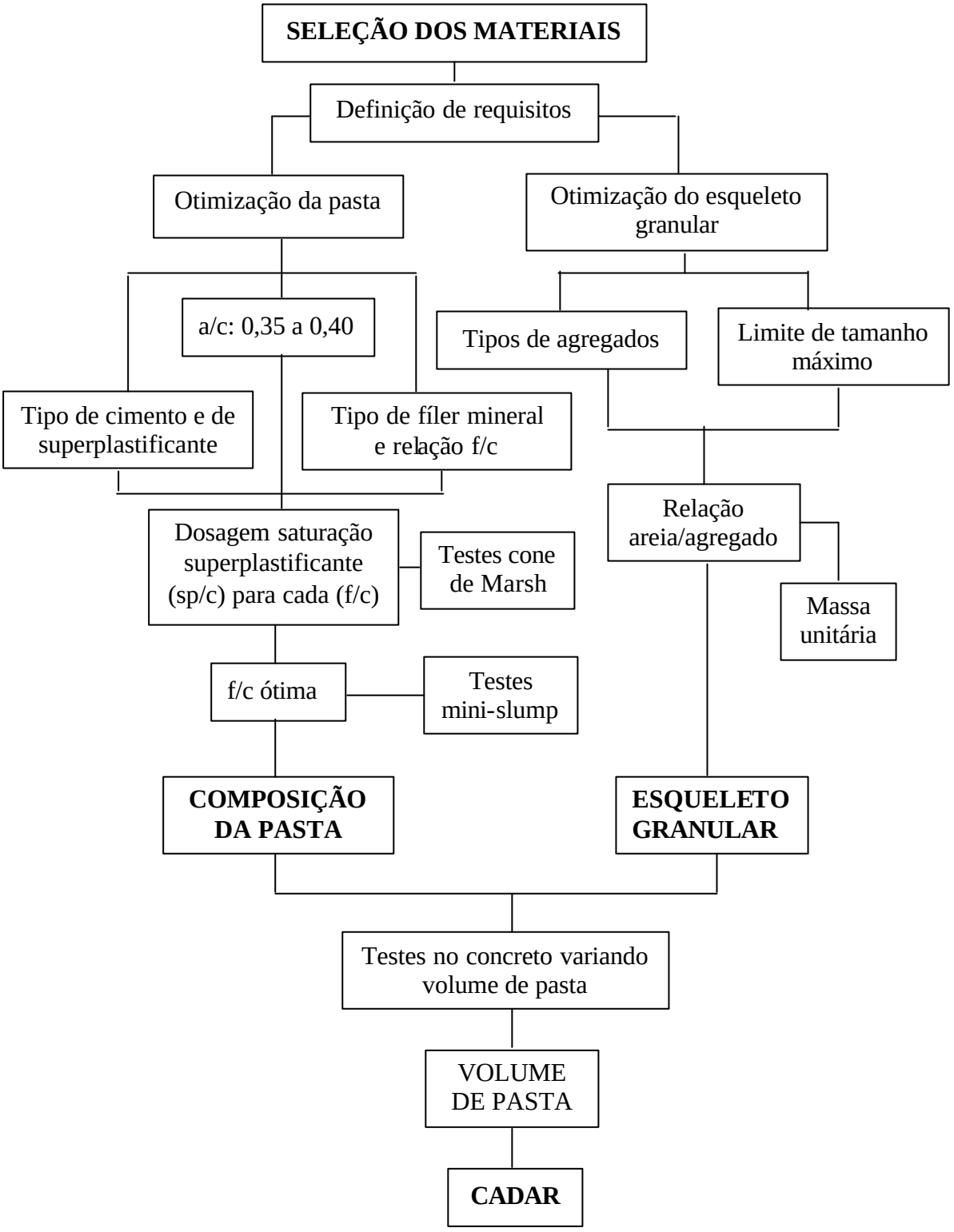

Figura 2.5 – Diagrama que descreve o método de dosagem (Gomes, 2002).

Definição da composição da pasta

A composição da pasta é definida pela quantidade de cimento e das relações a/c, sp/c, sf/c e f/c. Como já foi exposto anteriormente, para um concreto de alta resistência, é fixado, a principio, a relação água/finos = 0,4 (limite superior) e a relação sf/c = 0,1 (10 % da massa do cimento). E, em função disso, os parâmetros a serem determinados neste caso são as relações sp/c e f/c.

A dosagem de superplastificante é determinada através de ensaios do cone de Marsh, com abertura de saída de 8 mm de diâmetro conforme figura 2.6, de acordo com as recomendações da EN 445 (Norma Européia – Grautes para bainhas de protendidos. Métodos de Ensaio, 1996). Tal procedimento consistia em introduzir 1 litro de pasta no cone e medir o tempo (T) que passa, para 500 ml de pasta fluir completamente pela abertura inferior do cone. Este tempo de fluxo se apresenta como um parâmetro inverso da fluidez da pasta. Variando a relação sp/c se obtém uma curva log T versos sp/c, conforme mostra a figura 2.6. A quantidade de cimento, água e fíler foram fixadas, anteriormente, a variável é a quantidade sólida de superplastificante. O gráfico log T versos sp/c é utilizado para a definição do ponto de saturação de superplastificante, que constitui a percentagem ótima de aditivo para a pasta utilizada. O ponto de saturação significa a relação sp/c para a qual um incremento da dosagem de superplastificante não provoca nenhuma melhora significante na fluidez da pasta. E é determinado como sendo a relação de sp/c, correspondente a um ângulo interno de $140^{o} \pm 10^{o}$ na curva log T versos sp/c, conforme figura 2.6. Mas, a dosagem de superplastificante correspondente ao ponto, de saturação, depende da relação f/c da pasta, das quais devem ser realizados ensaios para distintos valores da relação citada, de forma que podem ser adotados valores de 0,1 a 0,5 para f / c.

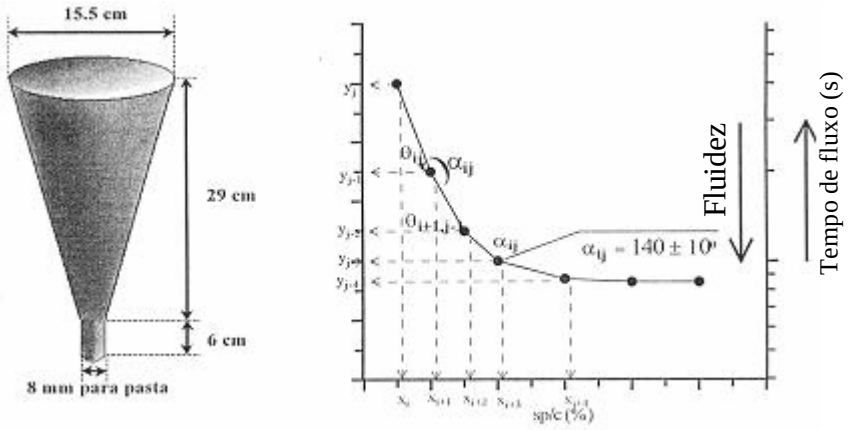

Figura 2.6 – Determinação da dosagem de superplastificante.

A dosagem ótima de fíler é obtida através de ensaios de mini-slump. O equipamento utilizado, nesses ensaios, foi o proposto por Kantro, 1980, que consiste de um molde em forma de tronco de cone, como mostra a figura 2.7. No ensaio se mede o diâmetro da extensão final, em paralelo com o tempo gasto para se alcançar um diâmetro de 115 mm, denominado de T_{115}. Os ensaios são realizados com diferentes relações f/c, cada uma com sua dosagem de superplastificante, correspondente ao ponto de saturação, já determinada, anteriormente, com ensaios do cone de Marsh, já citados anteriormente. A relação f/c ótima, da pasta, é aquela que apresenta um diâmetro de extensão final de 180 ± 10 mm e um tempo T_{115} no intervalo de 2 a 3,5 s. Os ensaios das pastas com o cone de Marsh e o mini-slump permitem obter as respectivas relações de sp/c e f/c, que geram misturas de concreto, com fluidez máxima, sem segregação e com alto nível de coesão interna, coesão essa, que não prejudique significativamente a fluidez do material.

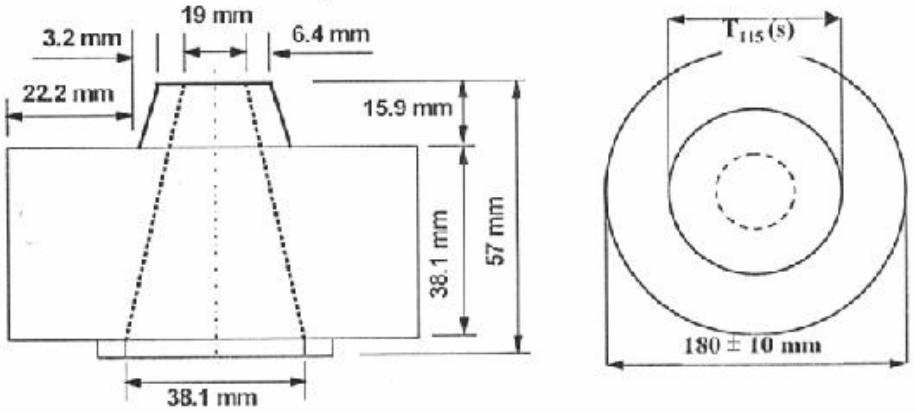

Figura 2.7 – Aparato e ilustração do ensaio de mini-slump para otimização do fíler na pasta.

Definição do esqueleto granular

A relação areia/brita é determinada, segundo um critério de máxima densidade em seco e sem compactação, no sentido de ser obtida uma mínima quantidade de vazios entre os dois materiais. Esse ensaio segue as orientações da norma ASTM C29/C29M, porém é feita uma adaptação pelo fato da não compactação dos materiais. O ensaio consiste em preencher um recipiente com 5 litros de uma mistura seca com uma certa relação areia/brita. A partir dos dados dos dois materiais, densidades e peso de cada componente, obtêm-se a massa unitária e o volume de vazios de cada mistura. O ensaio é realizado para varias relações entre os componentes, até se chegar a conclusão de qual relação entre eles, apresenta maior densidade e menor volume de vazios.

Otimização do volume de pasta

Após terem sido determinadas as relações ótimas de sp/c e f/c para a pasta e a relação areia/brita, segundo o critério de maior densidade com menor volume de vazio, se faz necessária a obtenção do volume de pasta ótimo para satisfazer as condições de resistência e auto-adensamento exigidos pelo concreto. Em função de tais parâmetros pré-estabelecidos, são fabricados concretos com diferentes quantidades ótimas de pasta, em função de cada tipo de aplicação. A quantidade mínima de pasta deve preencher os vazios do esqueleto granular, proporcionando a característica de auto-adensamento no estado fresco e a resistência a compressão desejada no estado endurecido. Desta forma, os concretos devem ser submetidos aos diversos ensaios no estado fresco, no sentido de satisfazer as faixas de parâmetros, que confiram sua característica de auto-adensamento. Os parâmetros que conferem o auto-

adensamento são estabelecidos através de ensaios, de acordo com os critérios de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre armaduras e estabilidade ou ausência de segregação. Para o estabelecimento dos parâmetros da capacidade de preenchimento são utilizados os ensaios de Espalhamento (cone de Abrams) e Funil V, para os parâmetros da capacidade de passagem por armaduras é usada a Caixa L e finalmente para os parâmetros de ausência de segregação é utilizado o ensaio do Tubo em U. Na tabela 2.4**,** a seguir, estão apresentados os parâmetros estabelecidos para o atendimento dos tais critérios citados acima.

Tabela 2.4 – Faixa dos parâmetros que asseguraram o auto-adensamento dos concretos.

Propriedades	Ensaios	Parâmetros	Faixa ideal
Capacidade de Preenchimento	Slump-flow	Extensão final do fluxo	60 a 75 cm
		T_{50}	5 ± 2 s.
	Funil V	Tempo total de fluxo	10 ± 3 s.
Capacidade de Passagem	Caixa L	T_{L20}	1 ± 0,5 s.
		T_{L40}	1,5s. a 3s.
		RB = H2 / H1	= 80
Estabilidade	Tubo em U	Relação de Segregação	= 90

Os ensaios de Espalhamento consistem em preencher cones de Abrams de concreto sem compactar, em seguida levanta-los, lentamente, deixando o concreto se estender em forma quase circular. As médias de duas medidas perpendiculares dos concretos espraiados resultam nos valores dos parâmetros extensão final do fluxo. E os tempos medidos em segundos, para os concretos alcançarem um diâmetro de 50 cm, são chamados de T_{50}.

Os ensaios do Funil V consistem em medir os tempos que amostras de aproximadamente 10 litros de concreto passam para fluir totalmente através do orifício inferior do funil, onde tal seção deverá ter uma dimensão mínima de 3 vezes o tamanho máximo do agregado; e para os CAA suas dimensões deverão variar de 6,5cm a 7,5 cm.

Para estabelecer os parâmetros de capacidade de passagem por armaduras são utilizados ensaios com a Caixa L, que consiste em preencher o cômodo vertical da caixa com a amostra de concreto de aproximadamente 12 litros e após a abertura da porta da caixa são medidos os parâmetros T_{L20}, T_{L40} e H_2 / H_1, que são respectivamente, o tempo para o concreto em fluxo alcançar um comprimento horizontal de 20 cm, 40 cm e a relação final entre as alturas do concreto no final do trecho horizontal e a altura do concreto remanescente do trecho vertical da caixa.

Os parâmetros de ausência de segregação dos concretos são estabelecidos através de ensaios com o tubo em U, de 16 cm de diâmetro. Os ensaios consistem em fazer fluir amostras de concreto sem sofrer compactação, através do tubo e após algum tempo, quando os concretos já se encontram em estado de semi-endurecimento, são cortados, em cada caso, três fatias de 10 cm de espessura (a primeira no início do tubo de entrada, a segunda no início do trecho horizontal e a terceira no final do trecho horizontal do tubo). Após a retirada das argamassas através de processos de lavagem das fatias sobre peneiras de 5 mm, são pesados os agregados de cada conjunto de três fatias. As Relações de Segregação (RS), são obtidas dividindo a massa dos agregados existentes, após a lavagem e enxugamento com papel toalha; da segunda fatia pela primeira fatia, o mesmo com a terceira fatia pela primeira fatia. O menor valor das duas relações é a Relação de Segregação, que deve ser maior ou igual a 0,90.

2.7. Resíduo do beneficiamento do mármore e granito

2.7.1. Considerações gerais

A industria de mineração e beneficiamento de granitos é uma das áreas promissoras de negócios do setor mineral, apresentando um crescimento médio na produção mundial estimado em 6% a. a, nos últimos dez anos, e com uma comercialização de materiais brutos e produtos acabados/semi-acabados que movimenta em torno de US$ 6 bilhões/ano, no mercado internacional. O Brasil possui grandes reservas de mármores e granitos com os mais variados aspectos estéticos. Dentre os estados produtores destacam-se o Espírito Santo, Minas Gerais, São Paulo, Mato Grosso do Sul, Rio de Janeiro, Bahia, Ceará e Paraíba (Filho e Rodrigues, 1999 apud Neves, 2002).

As indústrias beneficiadoras de granitos têm como principal atividade sua serragem e polimento para produção de rochas ornamentais, que são utilizadas na indústria da construção civil. O sistema de desdobramento de blocos de rochas para produção de chapas gera uma quantidade significativa de resíduos na forma de lama (polpa abrasiva). Tal material é proveniente da polpa utilizada nos teares, cujos objetivos são: lubrificar e resfriar as lâminas, evitar sua oxidação de modo a impedir o aparecimento de manchas nas chapas. Essa polpa é geralmente, constituída de água, granalha e cal moída. Costuma-se utilizar outros materiais tais como: calcário moído, escória de alto forno, etc., em substituição à cal (Silva, 1998 apud Neves, 2002).

Nos últimos quinze anos, essas indústrias vêm sendo citadas pelos ambientalistas como fontes de contaminação e / ou poluição do meio ambiente, devido à enorme quantidade de resíduos gerados e freqüentemente lançados diretamente nos ecossistemas, sem um processo de tratamento para eliminar ou reduzir os constituintes presentes (Neves, 2002, p.1).

A eliminação dos resíduos industriais gerados por empresas mineradoras é um dos grandes desafios deste século. Em todo o mundo vêm sendo desenvolvidas pesquisas sobre reciclagem de resíduos.

2.7.2 Geração do resíduo

As empresas mineradoras de rochas ornamentais causam impactos ambientais em três diferentes etapas. Primeiro, grandes problemas hidrológicos, gerados pelo desmatamento na fase da pesquisa mineral. Em seguida, a geração de elevada quantidade de resíduos gerada pela obtenção dos blocos com dimensões padronizadas em 2,40m (Larg.) x 2,90m (Comp.) x 1,70m (Alt.) ou 1,70m (Larg.) x 2,90m (Comp.) x 1,70m (Alt.), ou ainda; 0,90m (Larg.) x 2,90m (Comp.) x 1,70m (Alt.); dimensões estas adequadas ao tamanho do tear utilizado pela empresa da figura 2.8. Os volumes dos blocos variam de 4,4m^3 a 11,8m^3. E por fim, a produção do resíduo na forma de polpa abrasiva chamada de lama (Figura 2.9), gerada pelo beneficiamento resultante da ação dos teares (Figura 2.10).

Figura 2.8 – Blocos de pedras graníticas em dimensões padronizadas.

Figura 2.9 – Resíduo na forma de polpa abrasiva chamada de lama.

O corte dos blocos no beneficiamento da ação dos teares (Figura 2.10) transformando-os em chapas é a etapa de maior geração do resíduo. Esta fase é conhecida como desdobramento ou serragem do bloco de granito.

Figura 2.10 – Vistas dos teares na operação de corte dos blocos.

Os teares são equipamentos robustos, constituídos por quatro colunas, que sustentam quadros que realizam movimentos pendulares. Nesses quadros, são dispostas lâminas de aço, na direção sentido longitudinal do equipamento; paralelas umas às outras. As citadas lâminas são de aço carbono, de alta dureza e boa resistência mecânica, para melhor resistir aos esforços de tração e abrasão (Senai, 1993 apud Neves, 2002).

A mistura abrasiva é bombeada sobre o (s) bloco (s) de modo homogêneo e contínuo, em todas as lâminas (cerca de 100 lâminas constituem os teares, atualmente). Em geral, estes sistemas são constituídos de distribuidores multibraços, cada qual com bicos para a aspersão do fluido abrasivo (Anônimo, 1998 apud Neves, 2002).

A polpa utilizada nos teares é geralmente constituída de água, granalha e cal moída ou calcário moído ou escória de alto forno, etc, como já citado anteriormente. A granalha (Figura 2.11), tem função abrasiva no processo de corte.

No processo de serragem pode-se perder até 30% dos blocos, na forma de costaneiras e lamas abrasivas. Outras perdas costumam ocorrer causadas por quebra de placas, falhas de empilhamento, defeitos de corte, uso de polpa abrasiva de composição inadequada, lâminas de corte pouco tensionadas e blocos fraturados. Deve-se ressaltar que, durante a manufatura de ladrilhos, pode-se atingir perdas da ordem de 10%. Finalmente, estima-se que quando da aplicação de pedras ornamentais na construção civil, as perdas podem alcançar a cifra de até 30%, sem mencionar os rejeitos do polimento. Deve-se esclarecer que os percentuais acima não são cumulativos (Neves, 2002).

Figura 2.11 – Amostra da granalha, material constituinte do processo de corte do bloco de granito.

Após o processo de corte e obtenção de chapas brutas, as mesmas são submetidas aos processos de acabamento para obtenção do produto final. O processo seguinte ao corte é o polimento da superfície superior (Figura 2.12). Nesta fase a quantidade de resíduo gerado é muito menor que no processo de corte e tem a característica particular de ser desprovido de granalha.

Figura 2.12 – Processo de polimento das chapas brutas.

Durante o processo de polimento, o resíduo gerado segue através de canaletas de concreto para tanques cheios d'água (Figura 2.13). Quando os tanques se encontram relativamente cheios, o resíduo sem granalha, juntamente com a água, é bombeado para as lagoas se misturando com o resíduo do corte, com granalha.

Figura 2.13 – Destino do resíduo no processo de polimento das chapas.

As lagoas que já atingiram seus níveis máximos de armazenamento, sofrem um processo de evaporação da água, de forma que o resíduo fica acumulado em camadas úmidas (Figura 2.14 – a). Na superfície se forma uma camada de resíduo com acentuado processo de corrosão da granalha (Figura 2.14 – b). Na figura 2.15 mostra-se os cortes das chapas em várias formas e tamanhos para comercialização. Essa é a fase do beneficiamento de menor percentual de geração de resíduo. Na figura 2.16 apresenta-se vistas de uma indústria beneficiadora de mármore e granito para comercialização.

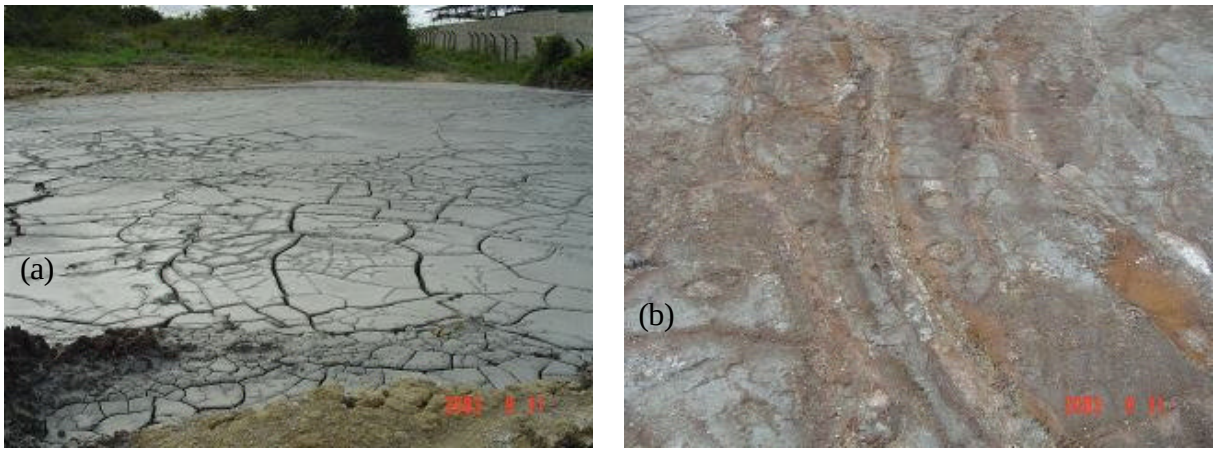

Figura 2.14 – (a) Lagoa em sua fase madura. (b) Detalhe da camada corrosiva provocada pela presença da granalha.

Figura 2.15 – Corte das chapas polidas para comercialização.

Figura 2.16 – Vistas de uma Indústria Beneficiadora de Mármore e Granito.

2.7.3. Trabalhos com RBMG

Neste item apresentam-se alguns trabalhos recentes utilizando resíduos em produtos cerâmicos, argamassas, concretos convencionais e concretos auto-adensáveis.

NEVES, G. A., 2002 em seu trabalho Reciclagem de resíduos da serragem de granitos para uso como matéria-prima cerâmica; pesquisou a aplicação do mesmo na substituição de

parte de materiais não plásticos. Segundo ele, esses resíduos têm em sua constituição um elevado percentual de quartzo, feldspato, mica e calcário, e apresentam-se na forma de pó com granulometria muito fina (diâmetro médio equivalente abaixo de 20 µm) que facilita a sua utilização em composições para produtos cerâmicos. Utilizou cinco tipos do resíduo, de cinco regiões diferentes, visando sua aplicação em Cerâmica vermelha (blocos cerâmicos e telhas), revestimentos cerâmicos e grês sanitários.

GONÇALVES, J. P. et al., 2003 no trabalho Utilização de resíduos sólidos industriais e urbanos para produção de concretos; utilizaram, individualmente, três tipos de resíduos sólidos (escória de cobre finamente moída, RBMG e resíduo de construção e demolição), os dois primeiros como adições minerais e o último como agregado, em concretos convencionais. Os resultados obtidos, quando utilizado o RBMG, para resistência a compressão axial e resistência à tração na compressão diametral dos concretos aos 28 dias, em corpos-de-prova cilíndricos de 10cm x 20cm, estão apresentados na tabela 2.5.

Tabela 2.5 – Resultados obtidos por Gonçalves et al.,2003; na utilização de RBMG em concreto convencional.

Mistura	Composição em massa (kg/m^3)				f_c	f_{tD}
	a/c	Cimento	Ag. miúdo	Ag. graúdo	(MPa)	(MPa)
REF.	0,40	480	638	1114	31,10	4,40
	0,55	347	763	1110	21,40	3,40
	0,70	271	832	1103	18,10	2,50
RBMG 10%	0,40	491	550	1139	35,40	4,50
	0,55	360	706	1148	23,60	3,70
	0,70	277	773	1125	19,00	2,80
RBMG 20%	0,40	505	460	1151	35,80	4,20
	0,55	364	615	1147	26,30	3,30
	0,70	284	707	1136	20,90	2,60

O Departamento de Engenharia Estrutural, através do Núcleo de Pesquisas Tecnológicas do Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Alagoas vem a algum tempo investindo em pesquisas de reciclagem de resíduos sólidos. E, como o resíduo do beneficiamento do mármore e granito também está se tornando um problema grave de agressão ao meio ambiente, no Brasil e em particular em Maceió, o mesmo foi escolhido como elemento de pesquisas no sentido de estudar seu aproveitamento em argamassas e concretos conforme os trabalhos:

CRUZ, D. F. M. et al., 2003 no Estudo das propriedades mecânicas de argamassas produzidas utilizando-se resíduo do corte de mármore e granito; utilizaram quatro tipos de RBMG como adição mineral em argamassas, dois de cada Empresa beneficiadora, e todos com massas específicas diferentes, M1-3.178kg/m³, M2-2.974kg/m³, G1-2.861kg/m³ e G2-2.812kg/m³. A dosagem de referência em massa foi 1:3:0,48 (cimento:areia:água). Os percentuais de substituição em volume, do agregado miúdo pelo resíduo foram: 5%, 10%, 15% e 20%. Entre outros parâmetros obtidos, foi feita uma análise comparativa das propriedades mecânicas de Resistência à compressão e Módulo de deformação estática, aos 7 dias e 28 dias, para os resíduos M1 e G1, através de corpos-de-prova cilíndricos de 5cm x 10cm, conforme resultados apresentados na tabela 2.6.

Tabela 2.6 – Resultados de Resistência à compressão e Módulo de deformação estática, em argamassas com RBMG, encontrados por CRUZ, D. F. M. et al., 2003.

Tempo (dias)	RBMG	Resist. à compressão (MPa)					Módul. Deform. Estática (GPa)				
		Ref.	5%	10%	15%	20%	Ref.	5%	10%	15%	20%
7	M1	19,1	23,7	23,89	18,95	24,93	22,48	23,93	24,21	24,21	21,70
	G1		19,2	15,47	22,51	24,88		23,45	23,21	22,78	21,09
28	M1	21,1	31,4	32,66	32,94	31,11	23,94	27,95	27,67	26,02	24,58
	G1		23,8	23,16	24,63	29,84		26,96	25,42	23,34	24,16

TENÓRIO, J. J. L., 2004 no trabalho Desenvolvimento de argamassa através da utilização do resíduo do beneficiamento de chapas de granito; utilizou o resíduo do polimento e corte de mármore e granito, sem granalha, como adição mineral, na produção de argamassas, substituindo por resíduo, percentuais de 5% e 10% sobre o volume de cimento e 5% e 10% sobre o volume de areia. A massa específica encontrada para o resíduo utilizado foi 2.670kg/m³. A dosagem de referência foi 1:3:0,60 (cimento:areia:água). Foram feitas análises comparativas de índice de consistência, resistência à compressão, módulo de deformação, absorção por imersão, índice de vazios e massa específica real, entre as quatro argamassas e com a de referência sem resíduo. Os resultados da Resistência à compressão aos 7dias, 28 dias e 56 dias e Módulo de deformação estática aos 28 dias, através de corpos-de-prova cilíndricos de 5cm x 10cm, estão apresentados na tabela 2.7.

LAMEIRAS, R. M., 2004 no trabalho Desenvolvimento de concretos através da utilização do resíduo do beneficiamento de chapas de granito; utilizou o resíduo do polimento e corte do granito, sem granalha, como adição mineral, na produção de dez concretos

convencionais, nos quais foram utilizados dois tipos de brita (brita 00 e brita 01) e dois tipos de relação água/cimento (0,45 e 0,65). Para cada relação água/cimento o resíduo substituiu 5% e 10% do volume de cimento e 5%, 10% e 30% do volume de areia. A massa específica encontrada para o resíduo utilizado foi 2.670kg/m³. As dosagens dos concretos em massa, na seqüência cimento:areia:brita 00:brita 01, foram: para a relação a/c=0,45 (1:1,37:1,26:1,26) e para a/c=0,65 (1:2,36:1,82:1,82). O volume de água se manteve constante em 195 litros. Foi feita uma análise comparativa de consistência, massa específica no estado fresco, resistência à compressão, módulo de deformação, absorção por imersão, índice de vazios e massa específica, entre os dez concretos e seus respectivos concretos de referência. Os resultados da Resistência à compressão aos 7dias, 28 dias e 56 dias e Módulo de deformação estática há 28 dias, para a/c=0,45 e a/c=0,65; obtidos através de corpos-de-prova cilíndricos de 10cm x 20cm, estão apresentados na tabela 2.8.

Tabela 2.7 – Resultados de Resistência à compressão e Módulo de deformação estática, em argamassas com RBMG, sem granalha, encontrados por TENÓRIO, J. J. L., 2004.

Tempo (dias)	Resistência à compressão (MPa)				
	Ref.	5% CIM	10% CIM	5% AR	10% AR
7	15,86	15,20	15,11	17,50	19,31
28	20,27	19,79	19,17	22,23	24,23
56	22,95	20,84	20,77	23,16	24,96
	Módulo de Deformação Estática (Mpa)				
28	20.270	19.790	19.170	22.230	24.230

Tabela 2.8 – Resultados de Resistência à compressão e Módulo de deformação estática, em concretos convencionais com RBMG, sem granalha, encontrados por LAMEIRAS, R. M., 2004.

Tempo (dias)	Resistência à compressão (MPa)						
	a/c	Ref.	5% CIM	10% CIM	5% AR	10% AR	30% AR
7	0,45	33,71	31,80	26,44	35,30	35,74	31,37
28		43,97	39,64	40,15	45,04	43,77	40,17
56		46,92	44,44	43,29	46,66	45,96	44,40
7	0,65	19,04	17,41	15,13	18,27	20,42	20,85
28		23,16	21,68	19,57	23,11	25,61	29,28
56		25,78	22,25	20,41	25,49	28,26	29,56
28	Módulo de Deformação Estática (MPa)						
	0,45	13.875	13.529	13.738	13.924	13.509	11.866
	0,65	13.051	12.027	12.458	12.596	12.910	12.257