

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO COMO ADIÇÃO
MINERAL PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL E DE ALTO DESEMPENHO

LUCIANO MOREIRA DE SOUSA NETO

MANAUS

2014

UNIVERSIDADE FEDERAL DO AMAZONAS
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

LUCIANO MOREIRA DE SOUSA NETO

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO COMO ADIÇÃO
MINERAL PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO
AUTOADENSÁVEL E DE ALTO DESEMPENHO

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil da
Universidade Federal do Amazonas como
parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Civil

Área de concentração: Materiais

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

MANAUS

2014

Ficha Catalográfica
Catalogação na fonte pela Biblioteca Central da
Universidade Federal do Amazonas - UFAM

Sousa Neto, Luciano Moreira de

S725u Utilização de resíduo de vidro moído como adição mineral para a produção de concreto autoadensável e de alto desempenho / Luciano Moreira de Sousa Neto. – Manaus, 2014.

150f. ; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas.

Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

1. Aditivos de concreto 2. Vidro 3. Construção com vidro 4. Resíduos de vidro I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de (Orient.) II. Universidade Federal do Amazonas II. Título

CDU 2007 666.97 (043.3)

LUCIANO MOREIRA DE SOUSA NETO

UTILIZAÇÃO DE RESÍDUO DE VIDRO MOÍDO COMO ADIÇÃO
MINERAL PARA A PRODUÇÃO DE CONCRETO AUTOADENSÁVEL E
DE ALTO DESEMPENHO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal do Amazonas, como parte do requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil, área de concentração Materiais e Componentes de Construção.

Aprovada em 21 de março de 2014.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. RAIMUNDO PEREIRA DE VASCONCELOS, Presidente.
Universidade Federal do Amazonas



Prof^a. Dr^a. VIRGINIA MANSANARES GIACON, Membro.
Universidade Federal do Amazonas



Prof. Dr. GUILHERME CHAGAS CORDEIRO, Membro Externo.
Universidade Estadual do Norte Fluminense

*Dedico este trabalho ao meu Avô Luciano Moreira de Sousa,
a minha Avó Ana Maria Miranda Moreira de Sousa,
ao meu Pai Luciano Moreira de Sousa Filho,
a minha Mãe Márcia Maria Rocha Montenegro,
a minha esposa Fabianni Magalhães Apolonio,
aos meus Irmãos e a todos que contribuíram
para o seu desenvolvimento.*

Agradecimentos

Aos professores Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Dr. João de Almeida Melo Filho e Dr.^a Virginia Mansanares Giacon, pela imensa atenção e grande dedicação.

Ao meu pai e amigo Luciano Moreira de Sousa Filho, pela grandiosa ajuda, incentivo, companheirismo, dedicação, paciência, orientação e ensinamentos que foram prestados desde o primeiro dia que iniciei essa árdua jornada. Além de um grande ser humano, mostrou-se ser um grande mestre na vida, na profissão, nos estudos e na pesquisa.

Aos funcionários do Laboratórios de Materiais, pela imensa ajuda prestada em todas as atividades desenvolvidas ao longo desta pesquisa, em especial Jorge Euvaldo Oliveira Santiago e Nilson Braz Videl. Ao engenheiro civil e tecnologista Leonardo Martins Carmo da Silva, pela realização de inúmeros ensaios de ruptura de corpos de prova.

A todos os Colegas de Mestrado e de profissão, que me acompanharam e me incentivaram nessa longa caminhada.

Às empresas que muito contribuíram, fornecendo materiais e apoio técnico, em especial a MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., a Konkrex Engenharia de Concreto Ltda., a Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda. e a Vidro Rios Ltda..

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

Sumário

Agradecimentos	vi
Lista de Figuras	x
Lista de Tabelas	xiii
Lista de Símbolos	xv
Lista de Abreviaturas	xviii
Resumo	xx
Abstract	xxi
1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivo Geral	3
1.2 Objetivos Específicos	3
2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 Concreto Autoadensável	5
2.1.1 Ensaios do CAA no Estado Fresco	11
2.2 Concreto de Alto Desempenho	12
2.3 Materiais Componentes	20
2.3.1 Cimento	22
2.3.2 Agregados	27
2.3.2.1 Generalidades	27
2.3.2.2 Reação Álcali-Agregado (RAA)	34
2.3.3 Adições	40
2.3.3.1 Generalidades	40
2.3.3.2 Classificação das Adições	43
2.3.3.3 Sílica Ativa	45
2.3.3.4 Resíduo de Vidro Industrial	49
2.3.3.5 Reação Pozolânica	54
2.3.3.6 Benefícios dos Finos para o CAA	55
2.3.3.7 Benefícios das Pozolanas nos Concretos	57
2.3.3.7.1 Benefícios Tecnológicos	58
2.3.3.7.2 Benefícios Econômicos	58
2.3.3.7.3 Benefícios Ecológicos	59
2.3.3.8 Característica das Pozolanas Altamente Reativas	59
2.3.4 Aditivos Superplastificantes	61
2.3.4.1 Generalidades	61
2.3.4.2 Compatibilidade Cimento-Adição-Aditivo	68
2.3.5 Água	70
3. MATERIAIS E MÉTODOS	72
3.1 Materiais	72
3.2 Métodos	73
3.2.1 Métodos dos Ensaios de Caracterização dos Agregados	73

3.2.2	Métodos de Coleta, Preparo e Caracterização das Adições Minerais	74
a.	Coleta do Resíduo de Vidro Industrial	74
b.	Preparo do resíduo de Vidro Moído - RVM	75
c.	Ensaio de Granulometria por Difração a Laser	77
d.	Ensaio de Determinação da Composição Química	78
e.	Ensaio de Perda ao Fogo	79
f.	Ensaio de Determinação da Massa Específica	79
g.	Ensaio de Determinação da Atividade Pozolânica	80
h.	Ensaio de Determinação da Reatividade Álcali-Agregado	80
i.	Ensaio de Determinação da Mitigação da Reatividade Álcali-Agregado ...	81
j.	Ensaio de Microscopia Óptica	82
3.2.3	Métodos dos Ensaios de Caracterização do Cimento	82
a.	Ensaio de Granulometria por Difração a Laser, Composição Química, Perda ao Fogo e Determinação da Massa Específica	82
3.2.4	Método de Ensaio para Determinação da Dosagem Ótima do Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow-1102 em Pastas e em Concretos	82
a.	Métodos dos Ensaios em Pastas	82
b.	Métodos dos Ensaios em Concretos	87
3.2.5	Método dos Ensaios de Caracterização dos Concretos nos Estados Fresco e Endurecido	89
a.	Caracterização dos Concretos no Estado Fresco	89
b.	Caracterização dos Concretos no Estado Endurecido	91
4.	RESULTADOS E ANÁLISES	93
4.1	Resultados e Análises dos Ensaios de Caracterização dos Materiais	93
4.1.1	Agregado Miúdo	93
4.1.2	Agregado Graúdo	95
4.1.3	Adições Minerais	96
4.1.3.1	Resíduo de Vidro Moído - RVM	96
a.	Granulometria (Estudo de Moagem)	96
b.	Composição Química e Perda ao Fogo	100
c.	Índice de Atividade Pozolânica, Massa Específica, Reatividade Álcali- Agregado e Mitigação Álcali-Agregado	101
4.1.3.2	Sílica Ativa em Pó - Silmix	104
a.	Granulometria e Microscopia Óptica	104
b.	Composição Química e Perda ao Fogo	105
c.	Índice de Atividade Pozolânica e Massa Específica	106
4.1.4	Cimento CP II-Z-32	106
a.	Granulometria	106
b.	Composição Química, Perda ao Fogo e Massa Específica	107
4.1.5	Dosagem Ótima do Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow 1102 em Pastas e em Concretos	108
4.1.5.1	Ponto de Saturação do Aditivo Superplastificante em Pastas	108
4.1.5.2	Ponto de Saturação do Aditivo Superplastificante em Concretos	112

4.1.5.3	Considerações	116
4.2	Resultados e Análises da Caracterização dos Concretos	117
4.2.1	Concretos no Estado Fresco	117
4.2.2	Concretos no Estado Endurecido	120
4.2.2.1	Avaliação da Resistência Mecânica	120
4.2.2.2	Avaliação Física (Absorção de Água por Imersão)	124
4.2.2.3	Microscopia Óptica	125
a.	Concreto de Referência - REF	125
b.	Concreto com Adição de RVM	126
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	129
5.1	Conclusões	129
5.2	Sugestões para Futuras Pesquisas	130
REFERÊNCIAS	132

Lista de Figuras

REVISÃO DA LITERATURA

Figura 2.1 – Classificação do grau de arredondamento dos agregados	31
Figura 2.2 – Efeito microfíler da sílica ativa no concreto	46

MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 3.1 – (a) Equipamento de desbastamento da empresa Vidro Rios Ltda. e (b) câmara d'água em série da empresa Vidro Rios Ltda.	75
Figura 3.2 – (a) Resíduo de vidro antes da extrusão e (b) peneiramento do resíduo após extrusão	75
Figura 3.3 – (a) e (b) Moagem do resíduo de vidro no moinho de bolas	76
Figura 3.4 – Forma correta de colocação do material no moinho de bolas	76
Figura 3.5 – (a) Esferas de porcelana, jarro de moagem e (b) resíduo de vidro em processo de moagem	77
Figura 3.6 – Granulômetro por difração laser – Malvern MaserSizer 2000	78
Figura 3.7 – Espectrômetro de fluorescência de raio X, PANalytical., Modelo Epsilon3-XL	78
Figura 3.8 – Picnômetro a gás hélio – AccuPyc 1340 – Micrometrics	80
Figura 3.9 – Estereoscópio LEICA EZ4	82
Figura 3.10 – (a) Funil de Marsh e (b) minicone de Kantro	83
Figura 3.11 – (a) Misturador Planetário e (b) preparo das pastas	84
Figura 3.12 – (a) Peneiramento das pastas e (b) descanso por 60 minutos	85
Figura 3.13 – (a) e (b) Ensaio do funil de Marsh	85
Figura 3.14 – (a) Preenchimento do minicone de Kantro com a pasta a ensaiar, (b) ergue-se o minicone de Kantro e (c) mede-se o espalhamento da pasta..	86
Figura 3.15 – (a) Chapa de base com círculo de 500mm de diâmetro para auxiliar no ensaio T ₅₀₀ e (b) ensaio de <i>slump flow</i> realizado com adição de RVM	90
Figura 3.16 – (a) Ensaio da caixa L, (b) ensaio da coluna de segregação e (c) ensaio do funil V	90
Figura 3.17 – Prensa hidráulica da empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda. ..	91
Figura 3.18 – Microscopia óptica da superfície interna dos corpos de prova	92

RESULTADOS E ANÁLISES

Figura 4.1 – Ensaio colorimétrico do agregado miúdo, à direita	94
Figura 4.2 – Curva granulométrica do agregado miúdo	94
Figura 4.3 – Curva granulométrica do agregado graúdo	95
Figura 4.4 – Curvas granulométricas das amostras de resíduo de vidro não moído e moído por 1, 2, 4, 8, 16, 24 e 32 horas em moinho de bolas	97
Figura 4.5 – Curvas granulométricas do RVM, do CP II-Z-32, do resíduo de vidro não moído e do agregado miúdo	99
Figura 4.6 – Resultados de reatividade álcali-agregado em resíduo de vidro não moído e em RVM	102
Figura 4.7 – Resultados da mitigação da reatividade álcali-agregado em RVM utilizando o cimento CP II-Z-32	103

Figura 4.8 – Curvas granulométricas do resíduo de vidro não moído, do RVM-32 horas, da sílica ativa, do CP II-Z-32 e do agregado miúdo	104
Figura 4.9 – (a) Microfotografias realizadas em amostra de sílica ativa e (b) RVM no estereoscópio LEICA EZ4 – ampliação 20x	105
Figura 4.10 – Curva granulométrica do RVM e do cimento CP II-Z-32	107
Figura 4.11 – Gráfico dos ensaios de funil de Marsh (ensaio em pasta)	109
Figura 4.12 – Gráfico dos ensaios de miniabatimento de Kantro (ensaio em pasta)	110
Figura 4.13 – (a) e (b) Ensaio do miniabatimento de Kantro em pastas produzidas com adição de sílica ativa em pó - Silmix	111
Figura 4.14 – (a) e (b) Ensaio do miniabatimento de Kantro em pastas produzidas com adição de RVM.....	112
Figura 4.15 – (a) e (b) Ensaio do miniabatimento de Kantro em pastas produzidas sem adição mineral	112
Figura 4.16 – Gráfico dos ensaios de <i>slump flow</i> em concretos produzidos com adição de RVM e sílica ativa em pó - Silmix	112
Figura 4.17 – Gráfico dos ensaios de T ₅₀₀ em concretos produzidos com adição de RVM e sílica ativa em pó - Silmix	113
Figura 4.18 – (a) Ensaio de <i>slump flow</i> realizado em concreto com adição de sílica ativa e (b) com adição de RVM na dosagem sp/c do superplastificante MC-PowerFlow 1102 em 1,20%	115
Figura 4.19 – (a) e (b) Medida de diâmetros perpendiculares entre si no ensaio de <i>slump flow</i> realizado em concreto com adição de sílica ativa na dosagem sp/c do superplastificante MC-PowerFlow 1102 em 1,20%.....	115
Figura 4.20 – (a) e (b) Medida de diâmetros perpendiculares entre si no ensaio de <i>slump flow</i> realizado em concreto com adição de RVM na dosagem sp/c do superplastificante MC-PowerFlow 1102 em 1,20%.....	115
Figura 4.21 – (a) Ensaio de <i>slump flow</i> e (b) T ₅₀₀ realizados em concretos com adição de RVM na dosagem ótima do superplastificante MC-PowerFlow 1102 (relação sp/c em 1,20%)	118
Figura 4.22 – (a) e (b) Medida de diâmetros perpendiculares entre si no ensaio de <i>slump flow</i> realizado em concreto com adição de RVM na dosagem ótima do superplastificante MC-PowerFlow 1102 (relação sp/c em 1,20%)	118
Figura 4.23 – (a) e (b) Ensaio da caixa L realizado em concreto com adição de RVM na dosagem ótima do superplastificante MC-PowerFlow 1102 (relação sp/c em 1,20%)	118
Figura 4.24 – Gráfico dos resultados dos ensaios de compressão axial nos concretos de referência e nos concretos produzidos com adição de RVM	122
Figura 4.25 – (a) Ensaio do módulo estático de elasticidade à compressão e (b) de resistência à compressão axial	122
Figura 4.26 – (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (13x à esq. e 20x à dir.): densa zona de transição	125
Figura 4.27 – (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (16x à esq. e 20x à dir.): densa zona de transição	125
Figura 4.28 – (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (25x à esq. e 32x à dir.): densa zona de transição	126

Figura 4.29 – (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (20x à esq. e 16x à dir.): sem poros	126
Figura 4.30 – Microfotografia REF – 90 dias (13x à esq. e 13x à dir.): (a) identificação de poros e (b) densa zona de transição	126
Figura 4.31 – (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (13x à esq. e 25x à dir.): densa zona de transição	127
Figura 4.32 – Microfotografia REF – 90 dias (16x à esq. e 16x à dir.): (a) identificação de poros e (b) densa zona de transição	127
Figura 4.33 – Microfotografia REF – 90 dias (25x à esq. e 25x à dir.): (a) identificação de poros e (b) densa zona de transição	127
Figura 4.34 – (a) e (b) Microfotografia RVM – 90 dias (25x à esq. e 32x à dir.): densa zona de transição	128

Lista de Tabelas

REVISÃO DA LITERATURA

Tabela 2.1 – Classes de CAD	14
Tabela 2.2 – Notação química simplificada usual das fases do cimento Portland	23
Tabela 2.3 – Medidas de mitigação	39
Tabela 2.4 – Composição química do vidro comum	50
Tabela 2.5 – Tipos de aditivos e suas abreviações	61
Tabela 2.6 – Desenvolvimento histórico dos aditivos redutores de água	62

MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 3.1 – Quadro da quantidade de materiais componentes dos concretos	73
Tabela 3.2 – Métodos dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos	73
Tabela 3.3 – Métodos dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos	73
Tabela 3.4 – Composição dos materiais para ensaio de determinação da reatividade álcali-agregado	81
Tabela 3.5 – Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços de referência	88
Tabela 3.6 – Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços com RVM	88
Tabela 3.7 – Normas empregadas na realização dos ensaios com os concretos frescos	89
Tabela 3.8 – Normas empregadas na realização dos ensaios com os concretos endurecidos	91

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado miúdo	93
Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado graúdo	95
Tabela 4.3 – Diâmetro dos grãos de resíduo de vidro para 10%, 50% e 90% nos diferentes tempos de moagem	97
Tabela 4.4 – Rendimento parcial e acumulado da moagem do resíduo de vidro em moinho de bolas nos diferentes tempos de moagem	98
Tabela 4.5 – Resultados de composição química e de perda ao fogo do RVM	100
Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do RVM	101
Tabela 4.7 – Resultados de composição química e de perda ao fogo da sílica ativa em pó - Silmix	105
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de caracterização da sílica ativa em pó - Silmix	106
Tabela 4.9 – Diâmetro dos grãos do cimento CP II-Z-32 e do RVM para 10%, 50% e 90%	106
Tabela 4.10 – Resultados de composição química e perda ao fogo do CP II-Z-32	107
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios de <i>slump flow</i> e T_{500} em concretos com adição de sílica ativa	113
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios de <i>slump flow</i> e T_{500} em concretos com adição de RVM	113

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios de caracterização em concretos no estado fresco	117
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios de caracterização dos concretos de referência no estado endurecidos	121
Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios de caracterização dos concretos com RVM no estado endurecidos	121
Tabela 4.16 – Determinação da absorção de água por imersão dos concretos endurecidos na idade de 90 dias	124

Lista de Símbolos

%	Porcentagem
γ_a	Massa específica da água
γ_{ar}	Massa específica da areia
γ_{br}	Massa específica da brita
γ_c	Massa específica do cimento
γ_{sf}	Massa específica da sílica ativa
γ_{sp}	Massa específica do superplastificante líquido
δ	Desvio padrão
\emptyset	Diâmetro
<	Menor
\pm	Mais ou menos
Σ	Somatório
\leq	Menor ou igual
\geq	Maior ou igual
a	Massa da água de amassamento
A	Al ₂ O ₃ (óxido de alumínio)
a/c	Relação água/cimento
Al ₂ O ₃	Óxido de alumínio
c	Massa de cimento
C	Carbono total (na composição química da sílica ativa)
C	CaO (óxido de cálcio livre)
C ₂ S	Silicato Dicálcico
C ₃ A	Aluminato Tricálcico
C ₃ S	Silicato Tricálcico
C ₄ AF	Ferro Aluminato Tetracálcico
CaCO ₃	Carbonato de cálcio
Ca(OH) ₂	Hidróxido de cálcio
CaO	Óxido de cálcio livre
CH	Hidróxido de cálcio (Ca(OH) ₂)
CO ₂	Dióxido de carbono (anidrido carbônico)
CSH	Silicato de cálcio hidratado
cm	Centímetro
cm ² /g	Centímetro quadrado por grama
D	Diâmetro
E _c	Módulo estático de elasticidade à compressão
F	Fe ₂ O ₃ (óxido de ferro)
f/c	Relação filer/cimento
f _c	Resistência à compressão axial
f _{ck}	Resistência característica à compressão axial
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
f _{tD}	Resistência à tração na compressão diametral
g	Gramas
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico
g/dm ³	Gramas por decímetro cúbico

g/ml	Gramas por mililitro
GPa	Giga Pascal
h	Hora
h:mim	Hora:minuto
H	H ₂ O (água)
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 ₂ O	Água
HP	Razão de bloqueio no ensaio da Caixa L (H ₂ /H ₁)
K ₂ O	Óxido de potássio
kg	Quilograma
km	Quilômetro
kg/cm ³	Quilogramas por centímetro cúbico
kg/dm ³	Quilogramas por decímetro cúbico
kg/m ³	Quilogramas por metro cúbico
L	Comprimento
M ₂ /M ₁	Relação entre massa da amostra 02 e a massa da amostra 01 no ensaio do tubo U (razão de segregação)
M ₃ /M ₁	Relação entre massa da amostra 03 e a massa da amostra 01 no ensaio do tubo U (razão de segregação)
m	Metro
m ² /kg	Metro quadrado por quilograma
m ³	Metro cúbico
m _B	massa em gramas dos agregados graúdos alojados no topo da coluna de segregação no ensaio SR
mg	Miligrama
mg/m ³	Miligrama por metro cúbico
Mg(OH) ₂	Hidróxido de magnésio (brucita)
MgO	Óxido de magnésio
mim	Minuto
ml	Mililitro
mm	Milímetro
Mn ₂ O ₃	Óxido de manganês
MPa	Mega Pascal
m _T	massa em gramas dos agregados graúdos alojados na base da coluna de segregação no ensaio SR
N	Normal
Na ₂ O	Óxido de Sódio
Na ₂ SO ₄	Sulfato de sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
°	Graus
°C	Graus centígrados
P ₂ O ₅	Pentóxido de fósforo
p	Massa do aditivo superplastificante (parte líquida + parte sólida)
p/c	Relação entre a massa do aditivo superplastificante (parte líquida + parte sólida) e a do cimento

pH	Grau de acidez
PL / PJ	Classe da viscosidade plástica aparente (caixa L e anel J, respectivamente)
ppm	Partes por milhão
ps	Massa da parte sólida da adição mineral, quando em suspensão
rpm	Rotações por minuto
RS	Relação de segregação no ensaio do tubo U (M_2/M_1 ou M_3/M_1)
s	Segundo
S	SiO ₂ (dióxido de silício)
SF	Classe de espalhamento (<i>slump flow</i>)
sf/c	Relação sílica ativa/cimento
SiO	Monóxido de silício
SiO ₂	Óxido de silício (anidrido sulfúrico)
sp	Massa da parte sólida do superplastificante
sp/c	Relação entre a massa da parte sólida do aditivo superplastificante e a do cimento
sp/f	Relação superplastificante sólido/finos
SO ₃	Trióxido de enxofre
SR	Classe de resistência à segregação (coluna de segregação)
SrO	Óxido de estrôncio
T-	Traço de concreto
T _{5min}	Tempo de escoamento do concreto após 5 minutos do preenchimento do funil V
T _{30seg}	Tempo em segundos de esvaziamento total do funil V
T ₁₁₅	Tempo para a pasta alcançar um diâmetro de 115 mm no ensaio mini- <i>slump</i>
T ₅₀₀	Tempo para o concreto alcançar um diâmetro de 500 mm no ensaio de espalhamento
tf	Tonelada força
TiO ₂	Óxido de titânio
TL ₂₀	Tempo para o concreto percorrer 20cm na parte horizontal da Caixa L
TL ₄₀	Tempo para o concreto percorrer 40cm na parte horizontal da Caixa L
TO	Resultado do ensaio Orimet
V _{ag}	Volume de agregado
V _{ar}	Volume de areia
V _{br}	Volume de brita
V _c	Volume de concreto
V _p	Volume de pasta
VS / VF	Classe de viscosidade plástica aparente (T ₅₀₀ e funil V, respectivamente)
µm	Micrometro ou micron
Ȳ	Média

Lista de Abreviaturas

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACGIH	<i>American Conference of Governmental Industrial Hygienists</i>
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AM	Estado do Amazonas
API	Adição predominantemente reativa
APR	Adição predominantemente inerte
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BEC	Batalhão de Engenharia e Construção
BISFA	<i>International Bureau Of Standardization Of Man-Made Fibres</i>
CAA	Concreto autoadensável
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CAS	<i>Chemical Abstract Service Registry Number</i>
CEB-FIB	<i>Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale du Béton</i>
CP II-E	Cimento Portland composto com escória
CP II-F	Cimento Portland composto com filler
CP II-Z	Cimento Portland composto com pozolana
CP II-Z-32	Cimento Portland composto com pozolana classe 32
CP III	Cimento Portland de alto forno
CP IV	Cimento Portland pozolânico
CP V-ARI	Cimento Portland de alta resistência inicial
CP	Corpo de prova
CRF	Concreto reforçado com fibras
CRFA	Concreto reforçado com fibras de aço
EFNARC	<i>European Federation of National Trade Associations</i>
EN	<i>European Norma</i>
ETA	Estação de tratamento de água
ETE	Estação de tratamento de esgoto
EUA	Estados Unidos da América
HP	Resultado do ensaio de habilidade passante
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
LS	Lignossulfonato
NS	Naftaleno sulfonato
MC	MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.
MC1102	Aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102
MC1159	Aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159
MC1160	Aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1160
NBR NM	Norma Brasileira Registrada - Norma Mercosul
NBR	Norma Brasileira Registrada
OSHA	<i>Occupational Safety e Health Administration</i>
PA	Estado do Pará
PC	Policarboxilato
PEL	<i>Permissible Exposure Limits</i>

PF	Perda ao fogo
PJ	Resultado do ensaio do anel J
PL	Resultado do ensaio de habilidade passante
PP	Polipropileno
RAA	Reação álcali-agregado
RAS	Reação álcali-sílica
RASS	Reação álcali-silicato
RAC	Reação álcali-carbonato
RI	Resíduo insolúvel
RILEM	<i>International Union of Testing and Research</i>
RR	Estado de Roraima
RS	Resultado do ensaio do tubo U (razão de segregação)
RVM	Resíduo de vidro moído
SCC	<i>Self-compacting concrete</i>
SF	Resultado do ensaio de <i>slump flow</i>
SIKA3535	Aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB
SP	Superplastificante
SR	Resultado do ensaio da coluna de segregação
SSS	Saturado superfície seca
TLV	<i>Thershold Limit Value</i>
TO	Resultado do ensaio Orimet
TWA	<i>Time Weighted Average</i>
UFAM	Universidade Federal do Amazonas
VF	Resultado do ensaio do funil V
VS	Resultado do ensaio T ₅₀₀

Resumo

O concreto de alto desempenho, além de alta resistência, tem baixa permeabilidade e maior durabilidade. O concreto autoadensável reduz a necessidade de adensamento e espalhamento e facilita a concretagem de peças esbeltas. A combinação desses dois concretos em um só permite a junção das qualidades de ambos. Na indústria da construção civil, a produção de concreto é um celeiro potencial para reutilizar alguns tipos de resíduos. Neste trabalho, o resíduo de vidro industrial foi usado como aditivo mineral na produção combinada de concreto de alto desempenho e autoadensável. O resíduo de vidro industrial, após o processo de moagem, foi adicionado ao concreto, com o objetivo de avaliar as suas propriedades no estado fresco e endurecido. Foi possível avaliar e comparar o desempenho do resíduo de vidro industrial com a sílica ativa. Seguindo o programa experimental, os materiais foram caracterizados e ensaios de funil de Marsh e minicone de Kantro foram realizados com o superplastificante MC-PowerFlow 1102. A dosagem ótima do superplastificante foi avaliada em ensaios de concreto fresco. Os concretos foram produzidos e caracterizados nos estados fresco e endurecido. Para a caracterização do concreto no estado fresco, foram realizados os seguintes ensaios: *slump flow*, T_{500} , caixa L, método de funil V e método da coluna de segregação. Para a caracterização do concreto no estado endurecido, foram realizados os seguintes ensaios: ensaio de compressão axial, tração por compressão diametral, determinação do módulo de compressão estático de elasticidade e determinação de absorção de água por imersão. O concreto com a adição de resíduo de vidro moído atingiu resistência próxima de 67 MPa aos 90 dias, enquanto o concreto com a adição de sílica ativa atingiu resistência próxima de 88 MPa na mesma idade. Como o concreto produzido com adição de resíduos de vidro industrial obteve qualidades técnicas de concreto de alto desempenho e de concreto autoadensável, os resultados desta pesquisa foram considerados satisfatórios.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho; concreto autoadensável; resíduo de vidro; materiais alternativos.

Abstract

High performance concrete, in addition to high strength, has lower permeability and higher durability. The self-compacting concrete reduces the need for densification and scattering and facilitates concreting of slender pieces. The combination of these two concrete on one allows the linking of the qualities of both. In the construction industry, concrete production has potential to reuse some kinds of residues. In this work, the residue of industrial glass was used as mineral additive in the combined production of high performance concrete and self-compacting concrete. The residue of industrial glass, after the grinding process, was added to the concrete with the aim to evaluate its properties in fresh and hardened state. It was possible to evaluate and compare the performance of industrial waste glass with silica fume. Following the experimental program, the materials were characterized and Marsh Funnel tests and minicone of Kanthro were performed with the superplasticizer MC-PowerFlow 1102. The optimum dosage of superplasticizer was evaluated in fresh concrete tests. Concrete were produced and characterized in fresh and hardened states. For characterization of concrete in the fresh state, the following tests were used: slump flow, T_{500} , L box, funnel method V and segregation column method. For characterization of concrete in the hardened state, the following tests were performed: axial compression tests, traction by diametrical compression, static modulus of elasticity and water absorption by immersion. Concrete with the addition of waste ground glass hit resistance close to 67 MPa at 90 days, while the concrete with addition of silica fume hit resistance close to 88 MPa at the same age. As the concrete produced with addition of industrial waste glass obtained swift technical skills of high performance concrete and self-compacting concrete, the results of this research were considered satisfactory.

Keywords: high performance concrete; self-compacting concrete; glass waste; alternative materials.

1 INTRODUÇÃO

A elevada produção de resíduos sólidos é um problema mundial. Encontrar soluções adequadas para a disposição final dos resíduos provenientes das diversas indústrias representa um grande desafio para o meio científico e tecnológico, tendo em vista os graves problemas ambientais que podem ser gerados por uma disposição inadequada.

Dentre os diversos resíduos gerados, o vidro assume um papel relevante, uma vez que o Brasil produz em média 980 mil toneladas por ano, dos quais apenas cerca de 441 mil toneladas (45%) são alvo de processos de reaproveitamento. O principal mercado para reciclagem de vidros é formado pelas vidrarias, que compram o material de sucateiros na forma de cacos ou recebem diretamente de suas campanhas de reciclagem (CEMPRE, 2013).

No Brasil a capacidade instalada de vidros planos para a indústria da construção Civil em 2006 era de 1,2 milhões de toneladas. Neste setor, o consumo de vidro plano comum representou 57%, o vidro temperado 29%, espelhado 7%, laminado 5% e metalizado e duplo 1% cada. Estima-se ainda que apenas 14% de todo o vidro consumido seja reciclado e que o índice de reciclagem de vidro é de 45% (ROSA, 2007; ABIVIDRO, 2007).

Atualmente, há uma busca, por parte de pesquisadores, de materiais alternativos que possam substituir os agregados e parcialmente o cimento Portland, na confecção de produtos cimentícios, visando manter e/ou melhorar as propriedades das matrizes cimentícias. Assim, uma forma possível de destinação encontrada para o resíduo de vidro gerado na região metropolitana de Manaus seria sua utilização como material alternativo para compor estruturas a base de cimento.

Dentro da indústria da construção civil, a produção de concreto surge como um celeiro potencial para absorver alguns tipos de resíduos. O uso de outros materiais no concreto, na forma de agregados miúdo ou graúdo, já foi estudado por SANTIS (2012), TENÓRIO (2007), ANGULO (2000) e QUEBAUD et al. (1999). Alguns desses materiais são adicionados com o intuito de melhorar as características mecânicas dos concretos como a sílica, misturas de materiais pozolânicos, cinzas, pó de basalto, escórias e outros (BABU e

PRAKASH, 1995). Outros simplesmente são adicionados para utilizar a capacidade de encapsulamento do concreto.

Sabe-se que materiais ricos em sílica, como sílica ativa e cinza da casca de arroz, são usados em conjunto com cimento em pastas, argamassas e concretos no intuito de melhorar as propriedades mecânicas e a durabilidade de matrizes cimentícias (MEHTA & MONTEIRO, 1994; DAL MOLIN, 2005; NEVILLE, 1997; CORDEIRO, 2006; LIMA, 2009).

Tendo em vista que o vidro é um material feito com uma massa de sílica em fusão, pode-se verificar que, ao final de seu processo de produção, o vidro apresenta-se como um material composto de sílica amorfa. Sendo o resíduo de vidro classificado como não perigoso e inerte, pode-se empregar este tipo de resíduo em matriz cimentícia, desde que esteja finamente moído. A presença de sílica amorfa em sua composição faz do vidro um material com potencialidade para promoção de pozolanicidade, quando apresentar alto grau de finura (PAIVA, 2009).

O vidro é composto, em mais de 70%, por dióxido de silício (SiO_2). Dessa forma, o pó de vidro apresenta-se como uma possibilidade viável de reaproveitar o resíduo de vidro gerado no polo industrial de Manaus.

O uso de resíduos industriais como materiais finos, em pastas, argamassas e concretos, geralmente proporcionam uma melhoria das suas propriedades nos estados fresco e endurecido (CAVALCANTI, 2006).

Os principais benefícios alcançados com a utilização de adições minerais são: ambiental, quando a adição é um resíduo industrial, pois evita que o material seja lançado ao ambiente sem nenhuma finalidade benéfica; econômico, devido à substituição parcial do cimento, o que reduz o consumo de cimento, e conseqüentemente, o custo do m^3 do concreto; e tecnológico, pela melhora das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Nas propriedades frescas, com relação à fluidez, quantidade de água e ausência de segregação e/ou exsudação. E nas propriedades do concreto no estado endurecido, pela melhora nas propriedades mecânicas, como a resistência.

O concreto autoadensável (CAA) representa uma evolução na tecnologia do concreto, podendo ser utilizado em qualquer tipo de estrutura, e capaz de apresentar benefícios econômicos (aumento da produtividade e redução de custos); tecnológicos (permitem estruturas com formas complexas e/ou altas taxas de armaduras); e ambientais (melhora do ambiente de trabalho e contribuição para diminuição do impacto ambiental) para a tecnologia sustentável do concreto. Atualmente, conhecendo tais vantagens, várias pesquisas têm sido desenvolvidas buscando o conhecimento e a obtenção do CAA.

Um concreto de alto desempenho, segundo AÏTCIN (2000), é essencialmente um concreto que possui uma relação água/aglomerante baixa. Ele sugere que a relação 0,40 seja adotada como fronteira entre os concretos usuais e os de alto desempenho. Do ponto de vista dos materiais, o CAD não é mais do que um concreto com porosidade muito baixa. Essa porosidade muito baixa é conseguida principalmente pelo uso de muito menos água de mistura do que no concreto usual, de tal forma que as partículas de cimento e de material cimentício suplementar estejam muito mais próximas umas das outras do que nos traços do concreto usual.

Nesta pesquisa, foi produzido um concreto autoadensável (CAA) e de alto desempenho (CAD) com materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus. O pó de vidro foi aplicado no concreto como adição mineral, substituindo materiais já consagrados, como a sílica ativa oriunda da indústria metalúrgica, a cinza volante, subproduto das usinas termoelétricas, a escória de alto forno moída, subproduto da fabricação do ferro gusa e as agrícolas, como a cinza de casca de arroz.

1.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a viabilidade técnica da produção de concreto de alto desempenho e autoadensável com a adição de resíduo de vidro moído.

1.2 Objetivos Específicos

- caracterizar o resíduo de vidro moído (RVM), a sílica ativa em pó - Silmix e os demais materiais empregados na produção de CAA e CAD;

- avaliar a compatibilidade do aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 com o cimento CP II-Z-32 e sem adições minerais; e em conjunto com as adições minerais utilizadas (resíduo de vidro moído – RVM e sílica ativa em pó – Silmix); e
- produzir, caracterizar e comparar os resultados obtidos em CAA e CAD com adição de RVM e com adição de sílica ativa em pó - Silmix, nos estados fresco e endurecido.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Concreto Autoadensável

O concreto autoadensável (CAA) foi proposto pelo professor Hajime Okamura, da Kochi University of Technology, em 1986 no Japão. Neste país, problemas de durabilidade das estruturas em concreto vinham se agravando continuamente, devido à redução do número de trabalhadores da construção civil qualificados para a execução de elementos estruturais. A solução encontrada para o problema, então, foi a busca de um concreto especial – o concreto autoadensável (CAA) – capaz de apresentar boa durabilidade, independentemente das atividades de adensamento exercidas pelos trabalhadores no momento da concretagem (OKAMURA et. al., 2000; OKAMURA e OUCHI, 2003).

O CAA consiste em um concreto com alta fluidez, capaz de preencher a fôrma onde é aplicado, compactando-se pela ação única de seu peso próprio e sem necessitar de qualquer tipo de vibração interna ou externa. Este concreto deve, ainda, ser capaz de sustentar os grãos do agregado graúdo, mantendo-os homogeneamente distribuídos no interior da mistura, quando o concreto flui através de obstáculos – como as barras de armaduras – e também quando o concreto encontra-se em repouso (OKAMURA, 1997; GETTU & AGULLÓ, 2003; EFNARC, 2005).

Em muitas estruturas, o emprego de concreto convencional é comprometido em consequência da elevada taxa de armadura, do difícil acesso e/ou da inviabilidade de bombeamento. Nesses casos, o concreto autoadensável, também denominado CAA, é a solução mais recomendável.

O CAA possui a capacidade de preencher perfeitamente as formas, aproveitando somente o seu peso próprio, eliminando a dependência de vibração mecânica e reduzindo tempo, ruído e custo de execução.

O CAA ainda elimina a necessidade de espalhamento e operações de acabamento superficial; facilita a concretagem de peças com formas complexas, pequenas dimensões e/ou armaduras densas; aumenta a produtividade e a rapidez da execução da obra,

otimizando a mão de obra; facilita o bombeamento a grandes distâncias e gera excelente acabamento em concreto aparente e/ou pré-moldado.

O CAA deve apresentar, basicamente, três propriedades que são essenciais a este tipo de concreto, no estado fresco, e que não competem ao concreto convencional (RILEM, 2006):

- a) fluidez para se autoadensar sob o efeito da gravidade e preencher os espaços vazios das formas, ou seja, deve possuir habilidade de preenchimento;
- b) coesão para que a mistura escoie intacta entre barras de aço, ou seja, deve possuir habilidade passante; e
- c) estabilidade para que resista à segregação.

Fazem-se necessários estudos adequados da reologia do concreto no estado fresco, de modo que os parâmetros reológicos que caracterizam o material possam ser controlados – em geral no momento da dosagem, através do uso de adições minerais e aditivos químicos – para que se tenham resultados adequados de fluidez e estabilidade do concreto fresco, de forma que o material apresente o auto-nivelamento e a coesão esperados (DACZKO & CONSTANTINER, 2001; BANFILL, 2003).

A moderada viscosidade e a coesão entre as partículas do concreto fresco são fundamentais para a manutenção de sua homogeneidade e para sua habilidade passante. Esta última garante sua passagem por obstáculos sem sofrer bloqueio. Essas propriedades são obtidas por meio de adições de granulometria muito fina, como fíleres de rocha, sílica ativa, metacaulim e outras. A areia utilizada na produção do CAA também deve possuir baixo módulo de finura. Além das características já mencionadas, um volume elevado de pasta e um menor diâmetro característico máximo do agregado graúdo também são fundamentais para obtenção do CAA.

De acordo com OKAMURA et al. (2000), a produção de CAA exige uma diminuição na quantidade de agregado graúdo presente no concreto, e aumento da quantidade de finos, podendo ser estes cimento ou adições minerais. Com isso, faz-se necessário cuidado extra durante a cura do CAA, para se evitar ocorrência de fissuras por retração do concreto no momento da pega e endurecimento.

Dentre as vantagens, um grande destaque deve ser dado ao fato de que o uso de CAA garante excelente compactação do material no estado fresco, mesmo em áreas densamente armadas, evitando-se, assim, a presença de nichos no interior do elemento estrutural e garantindo excelente acabamento ao concreto. Essa situação permite a produção de uma estrutura mais durável. Outra vantagem importante é a eliminação do ruído causado pelo vibrador, melhorando a qualidade do ambiente de trabalho, além de favorecer a concretagem em áreas urbanas, onde os ruídos são considerados um fator limitante.

Apesar da diminuição da equipe de trabalho, o CAA necessita de mão de obra especializada para sua confecção, seu controle tecnológico e sua aplicação, de cuidados especiais com o transporte, a fim de evitar a segregação, e de maior controle na aplicação. O CAA possui também menor tempo disponível para o lançamento em relação ao concreto convencional.

Outro fator a ser observado no CAA é o custo elevado do material quando considerado o metro cúbico do concreto, tanto devido ao aumento na quantidade de cimento para se obter autoadensabilidade, quanto à necessidade de uso de aditivos químicos. Embora possa haver redução do custo global da obra, este ainda é um fator limitante da utilização do CAA em obras.

A fluidez ideal do CAA é obtida somente por meio da utilização de superplastificantes. Esses aditivos garantem a alta trabalhabilidade e o autoadensamento, sem a necessidade de elevar a relação água/cimento.

Devido às exigências reológicas especiais do CAA, as adições são usadas para melhorar e manter a trabalhabilidade, como também para regular a quantidade de cimento, reduzindo o calor de hidratação. As adições podem melhorar significativamente a durabilidade do concreto.

Com a necessidade do alto teor de finos para a produção do CAA, o uso de adições minerais é importante, tendo em vista os seguintes fatores:

- Contribui para a diminuição da dosagem do cimento;

- Reduz o calor de hidratação e evita a presença de fissuras internas no concreto;
- Melhora o comportamento da microestrutura do concreto, preenchendo assim os poros de menor escala e aumentando a viscosidade, o que reduz a fricção entre os agregados, e conseqüentemente, aumenta a resistência à segregação e/ou exsudação.

Das propriedades relacionadas a dimensões dos grãos dos finos, uma que se destaca é a superfície específica. Segundo NUNES (2001), quanto maior a superfície específica dos finos, maior a viscosidade da mistura. No CAA, a dimensão das partículas das adições minerais utilizadas tem tido uma influência importante no alcance de suas propriedades. KHAYAT et al. (1999) afirma em seus estudos que finos com diâmetros médios da ordem de 80 μm acarretam numa melhor viscosidade e coesão da mistura de CAA. Para ESPING (2003), uma alta superfície específica, elevada quantidade de fíleres e agregados de pequena granulometria são parâmetros essenciais para uma maior trabalhabilidade e um maior controle das propriedades do CAA.

TRAGARDH (1999) verifica em seu trabalho que um fator importante que apresenta uma grande influência na microestrutura do CAA é a grande quantidade de finos com diâmetros médios $< 125 \mu\text{m}$. WESTERHOLM (2003) em seu trabalho constata que os resultados obtidos para as propriedades do CAA no estado fresco para finos da ordem de 0 μm - 75 μm e 75 μm - 125 μm são bastante similares.

Entretanto, a dimensão adequada dos grãos dos finos para a produção do CAA varia de um autor para outro. GOMES (2002) os limita a 100 μm , OKAMURA et al., (2003) a 90 μm , IZQUIERDO e EFNARC (2002) a 125 μm , dentre outros. Essa definição deve ser analisada com bastante cuidado, já que afeta diretamente a relação água/fíler (a/f), ou seja, água com relação aos finos (cimento + adições), que é um parâmetro muito utilizado na dosagem do CAA. Nenhum autor indica diferenças entre as distintas frações desses finos, mas recomendam que a relação a/f se encontre entre 0,9 e 1,1 (EFNARC, 2002).

Como uma alta dosagem de cimento gera uma grande quantidade de calor, é recomendável usar pozolanas e fíleres, substituindo parte do cimento. Os materiais finos

podem ser diversos e devem ser escolhidos, após uma análise técnica e econômica, pois existem vários materiais que são resíduos de indústrias e de baixo custo, mas que devem ser tratados respeitando legislações ambientais.

Dentre os materiais finos mais empregados, estão o pó de pedra, a cinza volante e a sílica ativa. 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-carbonato. 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 (LISBÔA, 2004). O fíler de vidro moído é geralmente obtido através da moagem de vidro reciclado, em partículas menores que 0,1 mm e área de superfície específica maior que 2.500 cm²/g, onde partículas maiores podem causar reação álcali-sílica (GOMES, 2002).

O consumo típico de cimento por metro cúbico de concreto costuma estar entre 350 e 450 kg/m³. Um consumo de cimento superior a 500 kg/m³ poderá ser perigoso, pois aumenta a retração. O uso de menos de 350 kg/m³ só poderá ser satisfatório com a inclusão de outro material cimentício, como cinza volante, pozolanas ou outros. Uma quantidade mínima de finos, presentes nos materiais cimentícios e na própria areia, deve ser estabelecida para evitar a segregação (LISBÔA, 2004).

Os finos podem ser pozolânicos, como cinza da casca de arroz, sílica ativa, metacaulim e outros, ou não pozolânicos, como cerâmica moída, escória de alto forno, fíler calcário e outros, desde que tenham área superficial maior do que o componente que está sendo substituído.

Se as adições forem pozolânicas, estas reagem com o Ca(OH)₂ resultante da hidratação do cimento, que é um composto pouco resistente e facilmente lixiviável, aumentando, dessa forma, a durabilidade do concreto (TUTIKIAN, 2004).

Em relação às características geométricas dos agregados, os grãos com forma angular e superfície áspera, proporcionam maior aderência entre a pasta e o agregado. Entretanto, os arredondados melhoram o fluxo por causa do baixo atrito interno entre as partículas. Também é recomendável que o agregado grão tenha um coeficiente de forma mais próximo possível de 1, o que diminui os vazios a serem preenchidos com argamassa entre as partículas.

As aberturas entre as armaduras são quem melhor decidem sobre o tamanho máximo adequado do agregado grão, pois a compatibilidade entre esses tamanhos é um dos fatores preponderantes na diminuição do atrito interno entre as partículas e na melhoria da capacidade de fluir do concreto (LISBÔA, 2004).

A fim de melhorar algumas propriedades do concreto convencional, como por exemplo, a trabalhabilidade, para uma mesma relação água/cimento (a/c), são requisitados os superplastificantes ao sistema, para a obtenção de concretos especiais, como o concreto autoadensável (CAA).

O uso de superplastificantes com grande capacidade de redução da água necessária para a trabalhabilidade do concreto fresco, principalmente aqueles de nova geração, tal como policarboxílicos e outros copolímeros, é indispensável ao CAA. Em substituição aos fíleres minerais, frequentemente são usados agentes modificadores de viscosidade que são solúveis em água, baseados nos polissacarídeos e celulose. 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 (GOMES, 2002).

A incorporação de superplastificante em pastas, argamassas e/ou concretos provoca alterações nas propriedades e características da mistura, tais como: hidratação, porosidade, morfologia dos hidratos, evolução da resistência, fluidez, tempo de pega, retração, segregação e/ou exsudação, dentre outras. Tais características podem ser influenciadas de forma positiva ou negativa na mistura. Para que estes efeitos provocados pela adição do superplastificante sejam satisfatórios, deve ser feito um estudo prévio de compatibilidade e uma adequada caracterização dos materiais empregados (RONCERO, 2000).

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 quantidade suficiente de finos ($< 0,125$ mm) ou um aditivo controlador do nível de viscosidade. Assim é que, durante o processo de aplicação, as características do CAA no estado fresco, precisam ser controladas usando, preferivelmente, de forma cuidadosa, tipos diferentes de ensaios (LISBÔA, 2004).

2.1.1 Ensaios do CAA no Estado Fresco

As propriedades analisadas do CAA no estado fresco são: capacidade de preenchimento, capacidade de passagem entre os obstáculos e resistência à segregação. Para classificar um concreto como autoadensável, todas estas exigências devem ser analisadas e atendidas. Essas propriedades são caracterizadas usando técnicas já conhecidas, a partir 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 “*Slump Flow Test*” e Funil V (V-Funnel);
- para a capacidade de passagem por obstáculos, são recomendados o Caixa L (L-Box), Tubo em U e o Teste de autoadensabilidade; e
- para caracterização da resistência à segregação, são adotados os ensaios do Funil V e da Coluna de Segregação.

As características do concreto autoadensável no estado fresco dependem do tipo de aplicação, da geometria da estrutura, do equipamento de lançamento (bomba, caçamba, grua ou outro), da importância do acabamento, entre outros (ALENCAR et al., 2010). A classificação do CAA no estado fresco, segundo a NBR 15823:2010, depende das seguintes características:

- a) fluidez e escoamento;
- b) viscosidade plástica aparente;

- c) habilidade passante; e
- d) resistência à segregação.

Para determinação das características do concreto autoadensável no estado fresco, a NBR 15823:2010 prevê os seguintes ensaios:

- a) o ensaio *Slump Flow* (SF) avalia o grau de fluidez e escoamento;
- b) os ensaios T₅₀₀ (VS) e Funil V (VF) avaliam o grau de viscosidade plástica aparente;
- c) os ensaios da Caixa L (PL) e do Anel J (PJ) avaliam a habilidade passante; e
- d) o ensaio da Coluna de Segregação (SR) avalia a resistência à segregação.

Outros ensaios, além dos adotados pela NBR 15823:2010, também estabelecem padrões para classificação, controle e aceitação do CAA no estado fresco. A seguir, são relacionados alguns exemplos desses ensaios:

- a) o ensaio do Tubo U (RS) avalia a resistência à segregação;
- b) os ensaios Orimet (TO) e Caixa U avaliam simultaneamente o grau de fluidez e escoamento, a habilidade passante e a resistência à segregação; e
- c) o ensaio da Coluna de Rooney avalia a resistência à segregação.

2.2 Concreto de Alto Desempenho

Para definir o concreto de alto desempenho, é necessário antes definir o concreto de alta resistência. Definem-se como concretos de alta resistência aqueles que apresentam média de resistência à compressão axial acima das usuais em um dado local ou época (DAL MOLIN et al., 1997).

O CEB-FIB - *Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale du Béton* considera concretos de alta resistência como concretos com resistência à compressão aos 28 dias de idade superior a 60 MPa (BIANCHINI, 2010).

MEHTA (2008) utilizou o termo Concreto de Alto Desempenho como aquele que é normalmente empregado com misturas que possuem alta trabalhabilidade, alta resistência e

baixa permeabilidade, que faz com que seu uso seja especificado visando uma longa durabilidade, principalmente em estruturas sujeitas a meios agressivos.

Segundo AITCIN (2000), até agora concreto de alto desempenho tem sido utilizado principalmente em aplicações de alta resistência, é inevitável que num futuro muito próximo o concreto de alto desempenho seja mais especificado e usado pela sua durabilidade do que especificamente, pela sua alta resistência à compressão. Quando a comunidade da engenharia vier a entender isto, e modificar sua percepção do concreto de alto desempenho, a indústria da construção dará definitivamente um grande passo adiante.

Segundo AITCIN (2000), um concreto de alto desempenho é essencialmente um concreto que possui uma relação água/aglomerante baixa. Ele sugere que a relação 0,40 seja adotada como fronteira entre os concretos usuais e os de alto desempenho. O termo aglomerante é usado por AITCIN (2000) para representar qualquer material finamente moído que seja usado na mistura do concreto, tendo finura próxima ou menor do que a do cimento Portland. Tanto a relação água/aglomerante como a relação água/cimento são muito importantes para o estudo e a compreensão dos concretos.

A NBR 8953:2009 classifica os concretos com resistências, aos 28 dias, acima de 55 MPa como de alta resistência. Segundo essa norma, os concretos são classificados em dois grupos, em função da resistência característica à compressão (f_{ck}), determinada a partir do ensaio de corpos de prova preparados de acordo com a NBR 5738 e rompidos conforme a NBR 5739. Os concretos do grupo I possuem f_{ck} até 55 MPa e do grupo II, acima de 55 MPa, sendo os concretos desse último grupo considerados como de alta resistência.

A diferença entre o concreto de alto desempenho – CAD e o concreto de alta resistência – CAR está relacionada à durabilidade, ou seja, o CAD possui alta resistência mecânica e durabilidade. AMARAL FILHO (1992) define a durabilidade do concreto como sua habilidade para resistir às ações atmosféricas, ataques químicos, abrasão e outros processos de deterioração. O concreto de alto desempenho, além da alta resistência, possui um conjunto de outras propriedades, tais como menor permeabilidade, maior durabilidade e menores prazos de execução, que o tornam um material de aplicação vantajosa quando comparado aos concretos convencionais.

Os concretos atingem um bom desempenho, a partir de uma resistência de compressão de 35 MPa, aos 28 dias, enquanto os concretos de alta resistência são aqueles que possuem mais de 55 MPa de resistência à compressão, aos 28 dias (DINIZ, 1997).

Atualmente, a expressão alto desempenho cobre uma larga faixa de resistências. Nesta pesquisa, para a classificação dos concretos, foi admitida a divisão do CAD em cinco classes, em função dos valores médios de resistência à compressão, obtidos aos 28 dias, com corpos de prova cilíndricos de 100 x 200 mm, curados sob condições de normas usadas para concretos usuais, conforme sugere Aïtcin (2000). Essa classificação é apresentada na tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Classes de CAD

Resistência à Compressão (MPa)	50 a 75	75 a 100	100 a 125	125 a 150	> 150
Classe de CAD	I	II	III	IV	V

Fonte: AÏTCIN, 2000

Em virtude dos altos consumos de cimento, uso de adições e superplastificantes, o CAD possui um custo por m³ de concreto muito superior ao dos concretos usuais. Entretanto, quando se analisa o custo total da estrutura, se percebe a economia proporcionada pelo uso do material. Também é possível perceber a vantagem financeira do uso do CAD, quando se analisa o custo de matéria prima por m³ de concreto para cada MPa de resistência à compressão (BIANCHINI, 2010). Estudos realizados em obras apontam reduções de custo na ordem de 15%.

As principais características do concreto de alto desempenho estão, em geral, associadas diretamente a benefícios propiciados com o seu emprego. As principais características do CAD:

- a) são concretos que apresentam boa durabilidade;
- b) possuem menor porosidade, maior impermeabilidade e maior coesão, devido ao emprego de adições, como sílica ativa ou metacaulim;
- c) possuem fator água/cimento baixo, com valor limitado a 0,40;
- d) apresentam melhor trabalhabilidade, que é traduzida pela excelente fluidez e maior facilidade de lançamento e adensamento do concreto fresco em relação ao

concreto convencional, devido à utilização de aditivos superplastificantes e aditivos minerais;

- e) exige cuidados mais rigorosos, com hidratação constante, devido a baixa relação água/cimento, evitando-se, assim, quaisquer efeitos de retração indesejados, seja por perda de água através da superfície (retração plástica) ou por redução do volume devido à hidratação contínua do cimento ao longo de sua massa (retração autógena);
- f) possui alta resistência à abrasão em relação ao concreto convencional, pois a aderência entre a matriz e o agregado impede o desgaste da superfície; e
- g) apresenta melhor aderência entre concreto e armadura, principalmente, quando é acrescentado um filler (aditivo mineral) na matriz da argamassa.

Sabe-se que o concreto de alto desempenho apresenta uma baixa relação água/cimento, obtendo ganhos de compacidade e fluidez devido à adição de aditivos superplastificantes e aditivos minerais, em geral, microssílica. Entretanto, a contrapartida de tal baixa relação, com ausência de exsudação, torna necessária uma cautela excessiva no processo de cura.

Considerando todas as particularidades do CAD, que pode ser considerado como um material constituído de pasta de cimento hidratada, zonas de transição entre pasta e agregados e os agregados miúdo e graúdo, torna-se importante o completo entendimento da função de cada material constituinte na qualidade final do concreto. Desta forma, as propriedades do CAD resultante serão diretamente influenciadas pelos seus materiais constituintes, assim como pela relação água/aglomerante.

As adições exercem influência sobre as propriedades do concreto, de tal forma que durante a hidratação do cimento, parte reage cristalizando-se liberando a cal livre (CaO), até então inerte e indesejável que vai reagir com estas adições tornando-se um novo produto cimentício. Também, por conta de serem partículas extremamente pequenas, se comparadas ao cimento, as adições se introduzem entre os grãos de cimento, reduzindo o espaço disponível para a água e atuando como pontos de nucleação.

Em termos de durabilidade, o CAD apresenta um melhor comportamento ao ataque químico, reações expansivas com sulfatos e a reações álcali-agregados. O CAD é altamente recomendável para estruturas expostas ao ataque de cloretos e sulfatos, como estações de tratamento de esgoto, coletores de esgoto, estações de tratamento de água, obras marítimas, instalações portuárias, fábrica de adubos, etc.

Observa-se que o emprego do concreto de alto desempenho torna-se uma necessidade em decorrência das exigências das especificações cada vez mais severas. Além disso, nas condições adversas dos ambientes industriais, marinhos e das grandes cidades o CAD surge de forma a viabilizar projetos de engenharia mais arrojados e complexos.

O CAD com facilidade pode atingir resistências bastante elevadas, em pequenas idades ou até em horas. Essa característica pode ser utilizada em estruturas emergenciais ou em obras onde há a necessidade de acelerar o cronograma de execução.

O CAD é indicado também para estruturas de pré-moldados, uma vez que as formas podem ser liberadas rapidamente, aumentando a produtividade. O CAD pode ainda permitir a redução nominal das seções das peças.

Entre as vantagens dos concretos de alta resistência, podem ser citadas:

- a) prédios mais altos;
- b) menores seções das peças estruturais em até 50%;
- c) maior espaço interno das edificações;
- d) menor volume de concreto;
- e) maiores vãos;
- f) maior durabilidade das estruturas; e
- g) menor carga nas fundações.

Em indústrias pesadas, onde há tráfego intenso de empilhadeiras pesadas, ou em ruas, estradas e paradas de ônibus, os pavimentos em concreto de alto desempenho são extremamente viáveis, pois aumentam a resistência à abrasão, ou seja, resistem ao desgaste superficial, devido à ação abrasiva de partículas, como areia, e da alta pressão exercidas por

pneus. O CAD ainda confere alta resistência à tração na flexão, superior aos concretos sem essas adições. É comum também sua utilização em pavimentos de aeroportos.

Em obras de recuperação ou reparos estruturais, o CAD aplicado sobre uma superfície limpa, rugosa e úmida de um concreto velho, confere aderência perfeita. São usuais consertos ou aplicações práticas com concreto contendo sílica ativa, como reparos em pisos, envelopamento de vigas e pilares, enchimento de ninhos ou recobrimento de armaduras expostas e outros.

Além de uma melhora no projeto arquitetônico propiciada pela possibilidade de maiores vãos, a economia proporcionada pelo uso de maiores resistências para o concreto, se reflete na redução da seção dos pilares e do aumento na vida útil.

As pequenas partículas das adições também elevam substancialmente a relação água/cimento (a/c). Para manter essa relação baixa, há a necessidade do uso de aditivos superplastificantes. No CAD, a redução da relação a/c é conseguida pela redução da quantidade de água e não pela adição de mais cimento. A perda de fluidez do concreto causada pela redução na quantidade de água deve ser compensada pelo aumento da dosagem de superplastificantes. Uma relação água/cimento baixa tende a reduzir significativamente a porosidade inerente à pasta de cimento endurecida.

Os aditivos são substâncias que quando incorporadas adequadamente ao concreto modificam suas propriedades, conferindo ao mesmo características particulares. No caso dos CAD os aditivos fundamentais são os superplastificantes que são capazes de propiciar a obtenção conjunta de trabalhabilidade adequada com baixas relações a/c , são ditos redutores de água de alto alcance ou ainda fluidificantes.

Segundo ALMEIDA (1990), os aditivos superplastificantes reduzem a tensão superficial da água, diminuindo a coesão das moléculas da água, aumentando a sua capacidade de dispersão sobre uma superfície e o seu poder de penetração.

O consumo deste tipo de aditivo é função da trabalhabilidade requerida, devendo-se optar por um consumo mínimo pensando na redução dos custos do concreto. No presente trabalho, o nível máximo, para o volume em litros de superplastificante, indicado pelos

fornecedores, ficou em torno de 4% do consumo de cimento. Recomenda-se que a parcela de água do aditivo superplastificante seja subtraída da água utilizada. A quantidade de material sólido no superplastificante geralmente fica entre 25% a 30%.

No concreto usual, a ruptura à compressão se desenvolve dentro da argamassa ou ao longo da interface entre a argamassa e as partículas do agregado graúdo, denominada zona de transição. A zona de transição é conhecida por ser uma região fraca do concreto usual. Ela é composta de uma pasta de cimento hidratada porosa, contendo numerosos cristais de óxido de cálcio bem desenvolvidos (AİTCIN, 2000).

A ruptura do concreto desenvolve-se sempre na parte mais fraca de uma das três fases, a seguir:

- a) pasta de cimento hidratada;
- b) zona de transição entre o agregado e a pasta de cimento hidratada; e
- c) agregados.

Assim, com o objetivo de aumentar a resistência à compressão do concreto, deve-se tomar muito cuidado para reforçar essas três fases. Ou seja, a ruptura, especialmente à compressão, é um processo tipo elo mais fraco. Dessa forma, além do número, tamanho e forma dos poros, a sua distribuição espacial ou concentração local são um fator principal na ruptura.

Do ponto de vista dos materiais, o CAD não é mais do que um concreto com porosidade muito baixa. Essa porosidade muito baixa é conseguida principalmente pelo uso de muito menos água de mistura do que no concreto usual, de tal forma que as partículas de cimento e de material cimentício suplementar estejam muito mais próximas umas das outras do que nos traços do concreto usual. À medida que a porosidade da pasta diminui, a resistência do concreto aumenta, desde que os agregados, particularmente, os graúdos, sejam resistentes o bastante. Assim, a seleção e o proporcionamento dos ingredientes do CAD é uma questão muito mais crítica do que no caso do concreto usual (AİTCIN, 2000).

Durante a consolidação, as partículas do agregado graúdo, dependendo do seu tamanho, forma e textura superficial, impedem uma distribuição homogênea da água no concreto fresco. Por causa desse “efeito parede” localizado, alguma água tende a se acumular na

superfície das partículas do agregado graúdo (NEVILLE, 1995). Como resultado, a relação água/aglomerante localizada na pasta de cimento nas proximidades dos agregados graúdos, chamada zona de transição, torna-se substancialmente mais alta do que a alguma distância deles. Comparada com a pasta de cimento como um todo, a microestrutura da zona de transição é caracterizada pela presença de grandes poros cristalinos da hidratação. Esse fenômeno é responsável pelas heterogeneidades estruturais, que tem sérias implicações para a resistência do concreto (AÏTCIN, 2000).

No concreto usual, a zona de transição tem tipicamente de 0,05 a 0,1 mm de espessura e contém poros relativamente grandes e cristais dos produtos da hidratação também grandes. Em geral, a resistência do concreto aumenta com a idade enquanto as partículas não hidratadas de cimento continuam a formar produtos de hidratação, tendendo a reduzir o tamanho e o volume total de vazios, particularmente na zona de transição. Enquanto poros grande e microfissuras estiverem presentes na zona de transição, a resistência das partículas dos agregados não contribuem para a resistência do concreto, uma vez que existe pouca transferência de tensões entre a massa da pasta de cimento e o agregado.

A situação muda se o elo mais fraco do concreto, ou seja, a zona de transição, for de alguma forma reforçada. Com isso, sob esforços crescentes, ela não seria o primeiro componente a falhar. Nessa situação, a resistência e as propriedades do agregado tornam-se importantes na determinação do comportamento do concreto quando submetido a níveis crescentes de tensão. A redução da relação água/aglomerante e o uso da sílica ativa tendem a reduzir a espessura e a fraqueza da zona de transição (AÏTCIN, 2000).

Nos concretos de alto desempenho, a pasta hidratada de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes que, se o agregados, particularmente os graúdos, não forem suficientemente resistentes, eles podem tornar-se o elo fraco dentro do concreto. Estudos petrográficos podem ser úteis quando se usam agregados naturais porque dão uma indicação da resistência das diferentes partículas que que constituem o agregado. Outra abordagem é incluir esses agregados no concreto de alto desempenho e observar a superfície de ruptura sob compressão.

De forma sintética, o aumento da resistência é obtido principalmente pela redução drástica da porosidade da pasta de cimento hidratada. Essa redução de porosidade é obtida pela adição de mais cimento ao mesmo tempo em que se reduz a quantidade de água de mistura através do uso de superplastificantes e pela substituição, quando for factível e econômico, de uma parte do cimento por um volume igual de material cimentício suplementar. As adições minerais apresentam uma grande importância na redução da porosidade e do aumento de resistência da zona de transição.

A resistência da pasta hidratada de cimento pode ser melhorada dedicando-se maior atenção aos seguintes parâmetros (AÏTCIN, 2000):

- a) porosidade: um grande número de poros grandes ou vazios, especialmente quando concentrados em um local, reduz a resistência;
- b) tamanho do grão: em geral, a resistência de uma fase cristalina aumenta com a diminuição do grão; e
- c) heterogeneidade: com matérias multifase, as heterogeneidades são a origem das perdas de resistências.

Outras observações importantes:

- a) como alguns cimentos têm bom desempenho quanto à resistência final, mas um comportamento reológico muito ruim, ou vice-versa, a seleção do cimento merece uma atenção especial;
- b) a seleção do aditivo superplastificante também é muito importante, pois é indispensável que seja adotada a melhor combinação cimento/superplastificante; e
- c) também afetam a reologia do concreto as condições gerais da betoneira e de sua eficiência na mistura, particularmente quanto à ação de rolagem, à temperatura do CAD depois da mistura e a temperatura ambiente.

2.3 Materiais Componentes

Além dos quatro componentes básicos do concreto convencional, tanto o CAA como o CAD são concretos que necessitam, para sua composição, de aditivos e adições. Devido às características do CAA e do CAD, é exigido muito critério, tanto na escolha, como no

controle dos materiais e, sempre que possível, deve-se optar por aqueles de maior disponibilidade na região, como forma de reduzir os custos de produção. Entretanto, os critérios utilizados na seleção dos materiais para produção dos concretos convencionais não são suficientes para serem aplicados na produção do CAA e do CAD.

A seleção de materiais para a produção do CAA e do CAD é complexa, pois os cimentos e os agregados apresentam grandes variações nas suas composições e propriedades. Há também uma grande diversidade de aditivos químicos e adições, o que dificulta ainda mais a escolha dos materiais mais adequados.

Segundo AITCIN (2000), o sucesso na produção de um CAD de 100 MPa exige:

- a) um agregado muito resistente, limpo, áspero e cúbico;
- b) um cimento com desempenho notavelmente bom, tanto reologicamente como em termos de resistência; e
- c) um superplastificante que seja totalmente compatível com o cimento selecionado (AITCIN, 2000).

Ainda segundo AITCIN (2000), são as seguintes as regras práticas para seleção da matéria-prima necessária para produção do CAD:

- a) quanto mais alta for a resistência à compressão pretendida, menor deve ser o tamanho máximo do agregado graúdo, ou seja, para produção de concretos com resistência à compressão de 75 MPa, há necessidade de agregados graúdos com tamanho máximo entre 20 e 28 mm, enquanto, para produção de concretos de 100 MPa, há necessidade de agregados graúdos com tamanho máximo entre 10 e 20 mm, e, para produção de concretos de 125 MPa, há necessidade de agregados graúdos com tamanho máximo entre 10 e 14 mm;
- b) o módulo de finura para a produção de CAD deve, preferencialmente, encontrar-se no intervalo entre 2,70 e 3,00;
- c) o uso de materiais cimentícios suplementares, tais como escória de alto-forno, cinza volante e pozolanas naturais, não apenas reduz o custo de produção do concreto, mas também fornece respostas para o problema de perda de trabalhabilidade; e

- d) enquanto a sílica ativa não é usualmente necessária para resistências à compressão menores que 75 MPa, a maioria dos cimentos dela necessita para atingirem os 100 MPa.

A melhor forma de garantir a seleção da maioria dos materiais adequados para o CAD é por meio da realização de estudos preliminares em laboratório (AİTCIN, 2000).

Considerando todas as particularidades do CAD, que pode ser considerado como um material constituído de pasta de cimento hidratada, zonas de transição entre pasta e agregados e os agregados miúdo e graúdo, torna-se importante o completo entendimento da função de cada material constituinte na qualidade final do concreto.

2.3.1 Cimento

Apesar de não ser muito difícil obter um CAD classe I com a maioria dos cimentos disponíveis atualmente, alguns deles não podem definitivamente ser usados para produzir um CAD classe II. Poucos cimentos podem ser usados para produção de CAD classe IV ou V. Alguns cimentos têm bom desempenho quanto à resistência final, mas um comportamento reológico muito ruim ou vice-versa. Por esse motivo, a seleção do cimento Portland tem de ser feita cuidadosamente (AİTCIN, 2000).

Segundo PINTO JUNIOR (1992), não existem ou não foram publicados, critérios técnicos que permitam escolher rapidamente, com toda certeza e baixo custo, o melhor cimento para produção dos concretos de alta resistência. O problema é complexo, visto que nesta escolha intervêm critérios reológicos e critérios de resistência mecânica. Observa-se que a rigor qualquer tipo de cimento portland pode ser usado para se obter alta resistência, conforme indica DUCATTI (1993). A natureza do cimento influencia na demanda de água dos concretos admitindo-se uma determinada trabalhabilidade.

No caso do concreto de alto desempenho, o papel do cimento é fundamental. Apesar de não haver um só tipo de cimento que produza o CAD, não existem dados na literatura que citem que sua obtenção só é viável através de um tipo específico de cimento, ou que há um tipo mais adequado em detrimento de outros.

A qualidade do cimento depende da matéria-prima utilizada, das adições e do grau de finura atingido na moagem. Os cimentos são especificados de acordo com sua composição química, tipo de adições e propriedades físicas, como finura, expansibilidade tempo de pega, resistência à compressão, calor de hidratação, perda ao fogo e massa específica.

A hidratação do cimento Portland pode ser analisada, de acordo com CARVALHO (2002), como a soma das reações dos vários compostos individuais do cimento, que ocorrem simultaneamente. Com a introdução de água, os componentes do cimento começam a se hidratar, formando compostos que, em sua maioria, são silicatos de cálcio hidratado (CSH). Estes começam a formar uma rede microestrutural coesiva, se desenvolvendo com o aumento do número de hidratos.

Durante a hidratação, do ponto de vista da resistência, é importante que o cimento Portland desenvolva tanto quanto possível o silicato de cálcio hidratado, CSH, porque esse composto é o responsável pelo desenvolvimento da resistência do concreto.

As reações químicas que ocorrem na hidratação do cimento são muito complexas e são compreendidas apenas parcialmente. A notação química simplificada usual, reproduzida na tabela 2.2, é adotada para as fases do clínquer, adotando para CaO a letra C, para SiO₂ a letra S, para Al₂O₃ a letra A, para Fe₂O₃ a letra F e para H₂O a letra H.

Tabela 2.2 - Notação química simplificada usual das fases do cimento Portland

Fase do Cimento Portland	Notação Química Simplificada
3CaO . SiO₂	C ₃ S (silicato tricálcico)
2CaO . SiO₂	C ₂ S (silicato dicálcico)
3CaO . Al₂O₃	C ₃ A (aluminato tricálcico)
4CaO . Al₂O₃ . Fe₂O₃	C ₄ AF (ferro aluminato tetracálcico)

No processo de hidratação do cimento Portland, os principais produtos (fases sólidas principais) geralmente presentes na pasta são: Silicato de Cálcio Hidratado (C-S-H), a Portlandita Ca(OH)₂ (ou CH), e os Sulfoaluminatos.

A reação de hidratação do cimento é geralmente apresentada de forma simplificada (e unificada) como: cimento + H → CSH + CH + calor, onde: CSH representa os hidratos de silicato de cálcio hidratado e CH o hidróxido de cálcio ou Portlandita.

Entretanto, a reação de hidratação é uma composição de diversas reações, apresentadas a seguir: $C_3S + H \rightarrow CSH + CH + \text{calor}$ / $C_2S + H \rightarrow CSH + CH + \text{calor}$ / $C_3A + CSH_2 + H \rightarrow AFt + \text{calor}$ / $C_4AF + CSH_2 + H \rightarrow AFt + CH + FH_3 + \text{calor}$ / $C_3A + Aft + H \rightarrow AFm + CH + FH_3$ / $C_4AF + Aft + H \rightarrow AFm + CH + FH_3$, sendo AFt a etringita e AFm o monossulfato.

A estrutura do C-S-H, resultado da hidratação dos silicatos, de acordo com CARVALHO (2002), é pouco cristalina, formando um sólido poroso. Sua composição química é variável, e depende de fatores como a relação água/cimento, temperatura e idade de hidratação. Para a hidratação completa dos silicatos, a sua composição aproximada é $C_3S_2H_3$.

De acordo com CARVALHO (2002), a reação do C_3A com a água é imediata, ocorrendo rapidamente a formação de hidratos cristalinos como: C_3AH_6 , C_4AH_9 , C_2AH_8 . Ocorre ainda a liberação de uma grande quantidade de calor, e perda de trabalhabilidade da mistura tornando-a imprópria ao uso. Porém, para retardar esse último efeito, adiciona-se uma pequena quantidade de gipsita.

Em relação à durabilidade, segundo CARVALHO (2002), cimentos com menores quantidades de hidróxido de cálcio são mais resistentes a ambientes com águas ácidas e sulfáticas, portanto cimentos Portland com maiores teores de C_2S serão mais duráveis. A hidratação completa do C_3S e do C_2S exige respectivamente 24 e 21% de água, onde o βC_2S se hidrata a uma velocidade menor que o C_3S .

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), o limite máximo de aluminatos tricálcicos (C_3A), em geral, é de 8%. Ainda em relação à composição química, quanto maior o teor de C_3S e C_2S no cimento, melhor, uma vez que esses compostos contribuem para a resistência do concreto.

A hidratação do cimento cessa quando não existe mais a fase anidra ou quando a água não pode mais chegar às fases não hidratadas ou ainda quando não existe mais água disponível.

Em virtude do problema de compatibilidade cimento-aditivo, alguns cimentos podem ser rejeitados, devido à impossibilidade de manter a trabalhabilidade por um período

suficiente para o lançamento adequado do concreto. Para a seleção final do cimento mais adequado, além de suas propriedades mecânicas, outros três fatores importantes devem ser levados em consideração: sua finura, sua composição química e sua compatibilidade com os aditivos.

A natureza do cimento influencia a demanda de água dos concretos para a obtenção de uma dada trabalhabilidade. Em geral, os cimentos de alta resistência exigem mais água para atingir um certo abatimento do que os cimentos comuns.

Em termos de finura, quanto maior for a superfície específica em contato com a água, mais rapidamente ocorrerá a hidratação do cimento, aumentando-se sua resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. Por outro lado, quanto mais fino o cimento, maior a dosagem de superplastificante necessária para alcançar uma mesma trabalhabilidade, uma vez que a eficiência do aditivo é influenciada diretamente pela finura do cimento (AÏTCIN, 2000).

O ideal é que o cimento passe por alguns ajustes, levando em consideração a composição da mistura na combinação CAA e CAD, que se pretende produzir, conforme exemplificado a seguir.

A adsorção do aditivo superplastificante pelas partículas do cimento ocorre preferencialmente nos aluminatos, que são o aluminato tricálcico, C_3A , e o ferroaluminato tetracálcico, C_4AF . A quantidade desses compostos deve ser moderada para que ocorra uma adsorção mais uniforme.

Deve-se ter conhecimento também sobre o tipo de cimento a ser utilizado, no que diz respeito à quantidade de água e à trabalhabilidade da mistura, pois o controle no conteúdo de aluminato tricálcico e na granulometria do cimento são importantes para a determinação do seu comportamento e fluxo. Quanto menor for a quantidade de aluminato tricálcico, mais fácil será o seu controle e mais longo será o seu endurecimento. O teor de C_3A em massa deve ser inferior a 10% (EFNARC, 2002). Quantidade acima desse valor não é indicada para a produção do CAA, pois dificulta sua aplicação, em razão do aumento da velocidade de endurecimento, em prejuízo da fluidez (TUTIKIAN, 2004).

O CAA apresenta geralmente em sua composição uma grande quantidade de finos, o que gera um alto volume de pasta e reduzido volume de agregado graúdo.

No entanto, um grande volume de pasta necessita de uma grande quantidade de cimento, gerando assim alto custo e alto calor de hidratação no concreto. Para contornar tal situação, são utilizados fíleres e/ou pozolanas para substituir parte do cimento. No entanto, cimentos à base de belita, que é uma forma impura do C_2S , vêm sendo utilizados para reduzir a grande geração de calor produzida pela grande quantidade de cimento utilizada no CAA (CAVALCANTI, 2006).

Segundo NEVILLE (1997), os cimentos mais finos apresentam maior contribuição para o ganho de resistência, devido a uma maior velocidade de sua hidratação. Para a obtenção do CAA, o consumo de cimento deve estar entre 350 kg/m^3 e 550 kg/m^3 (LISBÔA, 2004). Segundo NEVILLE (1997), teores acima de 530 kg/m^3 podem levar a uma queda de resistência mecânica, em virtude da perda de aderência entre a pasta e o agregado, resultante da fissuração por tensões de retração.

Com relação à finura do cimento, observa-se que, quanto maior for sua superfície específica, melhor, pois é maior a quantidade de partículas em contato com a água, e menor a distância e maior a frequência de colisão entre elas. Por consequência, a tensão de escoamento é reduzida e a viscosidade da mistura é aumentada. Os finos são apropriados, pois aumentam a superfície específica e a coesão da mistura, apesar de aumentar também a necessidade de cuidados com relação ao calor de hidratação e à retração do concreto (TUTIKIAN, 2004).

Segundo AİTCIN (2000), quanto mais fino o cimento, mais rapidamente ocorre sua hidratação, aumentando sua resistência à compressão, principalmente nas primeiras idades. Entretanto, quanto mais fino o cimento, maior a dosagem de superplastificante necessária para alcançar uma mesma trabalhabilidade, uma vez que a eficiência do aditivo é influenciada diretamente pela finura do cimento.

Do ponto de vista prático, para produzir um CAD com os atuais cimentos Portland, pode ser dito que é frequentemente mais fácil chegar à resistência pretendida do que ter o controle da reologia (AÏTCIN, 2000).

2.3.2 Agregados

2.3.2.1 Generalidades

A seleção de agregados deve ser feita cuidadosamente porque, à medida que a resistência à compressão projetada aumenta, os agregados podem tornar-se o elo mais fraco, onde a ruptura será iniciada sob uma alta tensão. Comparado com o concreto usual, é necessário um controle mais rigoroso da qualidade do agregado com relação à granulometria e ao tamanho máximo, uma vez que uma consideração primária é manter a demanda de água tão baixa quanto possível. É óbvio que somente agregados miúdos e graúdos bem graduados podem ser usados.

Para produção do CAD, o agregado miúdo selecionado deve possuir um módulo de finura de 2,7 a 3,0. O uso de areia tão grossa é apoiado pelo fato de que todos os traços de alta resistência são bastante ricos em partículas finas, devido ao seu alto teor de cimento e de materiais cimentícios, de tal forma que não é necessário utilizar areia fina do ponto de vista da trabalhabilidade e da segregação. Além disso, o uso de areia grossa leva a pequeno decréscimo na quantidade de água de mistura necessária para uma dada trabalhabilidade, o que é vantajoso tanto do ponto de vista da resistência, como do ponto de vista econômico (AÏTCIN, 2000).

O tamanho dos agregados influencia a relação a/c dos concretos. Em geral, os materiais mais grossos necessitam de menos água devido à sua menor superfície específica. Isso proporciona uma trabalhabilidade com uma relação a/c menor. No CAD, com adição de sílica ativa, devido ao teor elevado de finos, é aconselhável a redução do consumo de areia e/ou a utilização de areia com módulo de finura maior.

Entretanto, para obtenção das propriedades de autoadensabilidade do CAA, segundo CAVALCANTI (2006), há necessidade de misturas com elevado volume de pasta e reduzido volume e dimensão máxima característica do agregado graúdo e reduzido módulo

de finura do agregado miúdo. Para o CAA, o ideal é utilizar agregado miúdo com módulo de finura inferior a 2,1. No CAA, a areia grossa pode levar o concreto à segregação, o que não pode acontecer.

Portanto, há um conflito em relação ao módulo de finura da areia, se o propósito for obter uma combinação de CAA e CAD, pois, para o CAA, quanto menor o módulo de finura, melhor; enquanto, para o CAD, o módulo de finura ideal do agregado miúdo deve estar entre 2,7 e 3,0, como já mencionado. Portanto, para a combinação CAA e CAD, o módulo de finura ideal do agregado miúdo deve estar entre 2,1 e 2,7.

Para que não ocorra segregação durante o lançamento do concreto e que ele passe por todos os obstáculos sem obstrução, a dimensão máxima do agregado graúdo não deve ultrapassar $2/3$ do espaçamento entre barras nem $3/4$ do cobrimento mínimo das armaduras pelo concreto, ou seja, essa dimensão deve estar geralmente entre 12,5 e 19 mm (TUTIKIAN, 2004).

Algumas recomendações para os agregados miúdo e graúdo para obtenção do CAA são apresentadas a seguir:

- a) o volume de agregado miúdo deve ser fixado em 40% do volume de argamassa (OKAMURA, 1997);
- b) para o agregado graúdo, a quantidade utilizada no concreto deve ser 50% do volume de sólidos (GOMES, 2002) e sua dimensão máxima deve estar entre 16 mm e 20 mm; e
- c) para o agregado miúdo, todas as areias podem ser utilizadas, contanto que isenta de agentes nocivos e impurezas (EFNARC, 2002).

Em geral, os CAD's devem apresentar as seguintes dosagens de agregados:

- agregados graúdos: de 1.000 a 1.150 kg/m³;
- agregados miúdos: de 420 a 750 kg/m³.

É importante salientar a necessidade de se fazer um controle de umidade dos agregados para a obtenção de um CAA com composição uniforme (EFNARC, 2002). Esse controle também é importante para garantir que a umidade não afete as propriedades mecânicas e a durabilidade do concreto.

Em geral, a resistência dos agregados deverá ser mais elevada do que a classe de resistência do concreto que se pretende obter, para que a tensão nominal de compressão aplicada no concreto não exceda a tensão real nos pontos de contato das partículas individuais do agregado na massa de concreto.

A escolha do agregado miúdo é determinada tanto pelo seu efeito na demanda de água, como pelo seu empacotamento físico. Com esse foco, quanto à forma, são preferíveis as partículas arredondadas e lisas, pois exigem menos água de amassamento.

Segundo LISBÔA (2004), antes do uso do agregado no concreto, é necessário determinar algumas características físicas, como a massa específica, absorção de água, massa unitária em estado solto, composição granulométrica (granulometria, dimensão máxima característica e módulo de finura), teor de material pulverulento e impurezas orgânicas.

Em relação à procedência dos agregados miúdos, tanto as areias naturais de rios, quanto as artificiais, obtidas por britamento de rocha, podem ser utilizadas. Entretanto, areias naturais de rio demandam menos água por possuírem partículas arredondadas e lisas, sendo, portanto, preferíveis.

AÏTCIN (2000) afirma que, geralmente, não existe vantagem maior em usar um tipo de areia no lugar de outro, desde que seja limpa e livre de impurezas orgânicas, argila e silte.

Os agregados, dentro do concreto, são tratados como materiais de enchimento, pois são inertes. Entretanto, os agregados exercem influência na trabalhabilidade das misturas, resistência, estabilidade dimensional e durabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A qualidade do agregado é de extrema importância, pois podem limitar a resistência mecânica do concreto endurecido, principalmente, dos concretos de alto-desempenho (CAD). Além disso, as características dos agregados podem ter grande influência sobre a durabilidade e o desempenho estrutural dos elementos moldados.

No caso do CAA, verifica-se que há necessidade de uma minimização na porcentagem do agregado graúdo utilizado, dando espaço ao uso de partículas finas, necessárias para se obter uma viscosidade adequada. O volume total de agregados, assim como a proporção entre os agregados graúdo e miúdo têm grande influência nas propriedades reológicas do concreto, sendo as características apresentadas por estes de grande importância (MELO, 2005).

Dentre as propriedades e características dos agregados, as de maior importância são, segundo MEHTA e MONTEIRO (1994):

- massa específica e massa unitária;
- absorção e umidade superficial;
- resistência à compressão, resistência à abrasão e módulo de deformação;
- sanidade;
- dimensão máxima e composição granulométrica;
- forma e textura superficial; e
- isenção de substâncias deletérias.

De modo geral, MENDES (2002) recomendam que os agregados apresentem as seguintes características:

- boa resistência à compressão;
- módulo de elasticidade maior ou igual ao da pasta de cimento;
- 100% britado e com mínimo de partículas alongadas e achatadas;
- granulometria que minimize o consumo de água e/ou a concentração de tensões;
- forma e textura superficial que favoreçam a aderência com a pasta;
- propriedades químicas adequadas para evitar deterioração, devido à composição do cimento ou ataque de agentes externos; e
- devem ser limpos e isentos de substâncias deletérias.

Em geral, o conhecimento da massa específica, da composição granulométrica e do teor de umidade é exigido para a dosagem dos concretos. Já a composição granulométrica, a forma e a textura das partículas têm influência nas propriedades do concreto no estado fresco, o que torna essas propriedades dos agregados importantes para o CAA (KLEIN, 2008).

A distribuição granulométrica do agregado é importante, pois um agregado contínuo, que apresenta uma distribuição uniforme de dimensão dos grãos, confere ao concreto maior trabalhabilidade. A continuidade granulométrica também é responsável por diminuir a quantidade de poros no interior do concreto endurecido, melhorando a resistência mecânica do produto final (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Os agregados com distribuição granulométrica descontínua podem produzir concretos com maior tendência à segregação. Podem também gerar elevação no consumo de cimento, redução da fluidez e formação de vazios entre partículas de agregados de maior dimensão (NEVILLE, 1997)

A forma da partícula diz respeito às características geométricas dos grãos, que segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), podem ser:

- arredondadas: partículas formadas por atrito, que tendem a perder os vértices e arestas;
- angulosas: partículas, em geral, equidimensionais, que possuem vértices e arestas bem definidos;
- lamelares ou achatadas: partículas cuja espessura é relativamente pequena em relação a outras duas dimensões;
- alongadas: partículas cujo comprimento é consideravelmente maior do que as outras duas dimensões.

A forma das partículas também foi estudada por SUGUIO (1980), que classificou o grau de arredondamento dos agregados, conforme ilustra a figura 2.1.

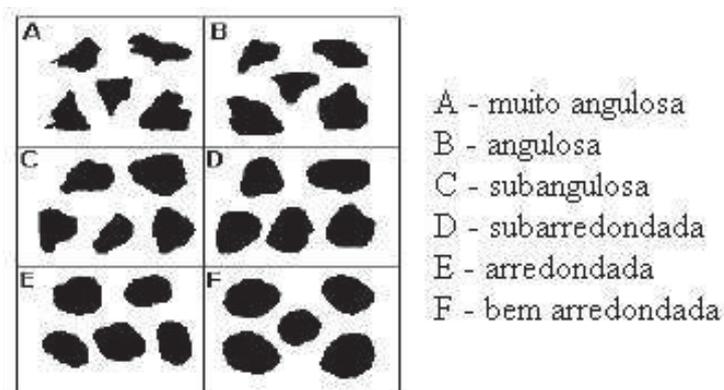


Figura 2.1 – Classificação do grau de arredondamento dos agregados (SUGUIO, 1980)

Quanto à origem os agregados podem ser classificados, segundo SBRIGHT NETO (2005), em naturais, britados, artificiais e reciclados. São chamados de agregados naturais àqueles encontrados na natureza já preparados para o uso sem outro tipo de beneficiamento que não seja a lavagem, sendo provenientes das rochas existentes na crosta terrestre que estão sujeitas a processos de intemperismo. Alguns exemplos de agregados naturais são areia de rio, areia de cava ou pedregulho.

As areias naturais, por terem sua forma mais arredondada e lisa, são as mais indicadas para CAA. Por possuírem essa forma, aumenta a fluidez da pasta para uma mesma quantidade de água. Segundo OKAMURA e OUCHI (2003), quanto maior o ângulo da partícula, maior será a resistência ao cisalhamento da argamassa, reduzindo a possibilidade de deformação do concreto. Dessa forma, há um conflito entre as características dos agregados para a obtenção de CAA e de CAD. Há necessidade, portanto, de maior critério de caracterização do agregado a ser usado nesse tipo de concreto.

A textura superficial é verificada pela análise da superfície do agregado, podendo ser esta lisa ou áspera, sendo a propriedade baseada em uma avaliação visual das partículas. A dureza, a granulação e a porosidade da rocha matriz, assim como a exposição da rocha ao atrito, influenciam diretamente na textura superficial dos agregados.

Em geral, partículas de textura áspera e de formas angulosas, lamelares e alongadas requerem mais pasta de cimento para produzir misturas trabalháveis, quando comparadas a partículas lisas e arredondadas (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A forma do agregado graúdo é também importante do ponto de vista reológico. Durante a britagem, partículas a grosso modo equidimensionais (também chamadas de cúbicas) devem ser geradas, mais do que partículas lamelares e alongadas. Essas últimas são fracas. Elas podem algumas vezes ser quebradas com os dedos e tendem a produzir misturas ásperas exigindo água ou superplastificante adicional para atingir a trabalhabilidade desejada (AÏTCIN, 2000).

Os agregados graúdos com forma angular e superfície áspera proporcionam maior aderência entre a pasta e o agregado, enquanto os arredondados melhoram o fluxo por

causa do baixo atrito interno entre as partículas. O coeficiente de forma do agregado graúdo deve ser próximo de 1, para diminuição dos vazios a serem preenchidos com argamassa entre as partículas (TUTIKIAN, 2004).

Partículas fluviais geralmente têm uma superfície lisa, devido à ação polidora das partículas de silte e de areia transportada pelo rio. A sua superfície não é sempre limpa. Elas podem estar cobertas por uma fina camada de argila ou silte colada fortemente à sua superfície. Esse filme fino resulta num aumento na demanda de água durante a mistura e numa redução significativa na aderência entre as partículas de cascalho e a pasta da argamassa no concreto endurecido, a qual provoca uma ruptura prematura (AÏTCIN, 2000).

Rochas duras e densas britadas, tais como o calcário, a dolomita e as rochas ígneas do tipo plutônico (granito, sienito, diorito, gabro e diabase), têm sido usadas com sucesso como agregado graúdo nas aplicações de CAD. Não está ainda estabelecido se agregados potencialmente reativos aos álcalis presentes no cimento podem ser usados em CAD. Por conseguinte, é melhor evitá-los (AÏTCIN, 2000).

A seleção do agregado graúdo deve ser feita depois de um exame cuidadoso da mineralogia e da petrografia, para assegurar que todas as partículas são resistentes o suficiente para evitar ruptura precoce no concreto de alta resistência (AÏTCIN, 2000).

No caso dos agregados miúdos, verifica-se que as areias naturais, provenientes dos leitos de rios ou depósitos eólicos apresentam-se mais lisas e arredondadas, devido à sua longa exposição aos agentes de intemperismo. Dessa forma, essas areias produzem concretos com boa trabalhabilidade. Já as areias provenientes da britagem são mais ásperas e lamelares quando comparadas as areia naturais, produzindo concretos mais secos e, desse modo, não sendo indicadas para o uso em CAA (MEHTA e MONTEIRO, 1994; ALMEIDA, 2005).

A resistência à compressão, à abrasão e o módulo de deformação do agregado são propriedades inter-relacionadas, fortemente influenciadas pela porosidade, que têm maior influência no concreto endurecido. Da mesma forma, a sanidade do agregado está relacionada com durabilidade do concreto, no estado endurecido, de modo que um

agregado instável apresenta mudanças em seu volume, induzidas pelo intemperismo, ciclos alternados de umedecimento e secagem ou congelamento e descongelamento, o que resulta na deterioração do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

Por fim, substâncias deletérias são aquelas que estão presentes em pequenas proporções nos agregados graúdos e miúdos, capazes de prejudicar a trabalhabilidade, a pega e endurecimento e as características de durabilidade do concreto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

2.3.2.2 Reação Álcali-Agregado (RAA)

A Reação Álcali-Agregado (RAA) pode ser definida como um termo geral utilizado para descrever a reação química que ocorre internamente em uma estrutura de concreto, envolvendo os hidróxidos alcalinos provenientes principalmente do cimento e alguns minerais reativos presentes no agregado utilizado. Como resultado da reação, são formados produtos que, na presença de umidade, são capazes de expandir, gerando fissurações, deslocamentos e podendo levar a um comprometimento das estruturas de concreto (HASPARYK, 2005).

A principal causa da instalação da RAA é a presença, no agregado, de minerais reativos que reagem com os álcalis do cimento. Entretanto, influências externas como a umidade e temperatura são condicionantes importantes do processo deletério.

O tempo necessário para notar indícios da RAA ou danos em uma estrutura pode ocorrer em questão de dias ou após vários anos e depende de vários fatores, destacando-se o tipo e proporcionamento dos agregados, o teor de álcalis do cimento, a composição do gel (produto da reação formado), a temperatura e a umidade, entre outros fatores (HASPARYK, 2005).

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), as expansões e fissurações devidas à RAA podem comprometer a resistência e a elasticidade de um concreto, afetando, por conseguinte, a sua durabilidade.

O processo químico de deterioração pela RAA no concreto pode ser classificado em função do tipo e da mineralogia do agregado reativo envolvido, de três formas: reação álcali-sílica (RAS), reação álcali-silicato (RASS) ou reação álcali-carbonato (RAC) (MIZUMOTO, 2009). A intensidade e velocidade das reações de expansão dependem da concentração e fase reativa no agregado (KIHARA, 1986).

A **reação álcali-sílica** (RAS) é o tipo de RAA mais conhecida e relatada no meio técnico, sendo a que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas. Entre as formas minerais mais comuns destacam-se: a opala ou sílica amorfa, a calcedônia, a cristobalita, a tridimita, os vidros naturais e artificiais e o quartzo microcristalino/criptocristalino e deformado (DIAMOND, 1975; KIHARA, 1986; HOBBS, 1988; KIHARA, 1993; RODRIGUES, 1994; ACI 221, 1998).

A reação só é provocada na condição de umidade, teor de álcalis na mistura e minerais reativos suficientes para ocasionar a reação (MIZUMOTO, 2009).

Segundo a NBR 15577-1:2008, a reação álcali-sílica é o tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do $\text{Ca}(\text{OH})_2$ (hidróxido de cálcio) originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo.

Os álcalis podem ser oriundos do cimento, dos agregados que contenham feldspatos alcalinos, ou de outras fontes externas, tais como soluções de sulfato de sódio, Na_2SO_4 , e cloreto de sódio, NaCl (MIZUMOTO, 2009). Os álcalis presentes no cimento, representados pelo Na_2O e K_2O , podem se apresentar na forma solúvel ou insolúvel (HASPARYK, 2005).

Já a **reação** do tipo **álcali-silicato** (RASS) geralmente se desenvolve de forma mais lenta, sendo pouco difundida e compreendida (POOLE, 1992). Segundo REGOURD (1988), esta reação possui o mesmo princípio da reação álcali-sílica. Entretanto, uma vez que os minerais reativos estão mais disseminados na matriz, ocorre mais lentamente. Os minerais envolvidos são alguns tipos de silicatos presentes em rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, xistos, gnaisses, granulitos,

quartzitos e hornfels) e ígneas (granitos). A reação álcali-sílica pode ocorrer simultaneamente com a reação álcali-silicato, prejudicando o diagnóstico da RAA.

A **reação** do tipo **álcali-carbonato (RAC)** envolve uma interação química entre os álcalis e as dolomitas presentes nos calcários, promovendo a formação da brucita ($Mg(OH)_2$), processo conhecido como “desdolomitização”, que gera fissurações e o enfraquecimento da zona de transição (BICZOK, 1972; GILLOT, 1975; PAULON, 1981; STIEVENARD-GIREAUD, 1987; BULLETIN 79, 1991; OZOL, 1994; TAYLOR, 1997).

Segundo KIHARA (1986), nesta reação não ocorre a formação de um gel, sendo o mecanismo de expansão decorrente da combinação de dois fenômenos: a desdolomitização, que desestrutura a textura do calcário e a ocorrência de argilominerais (ilita) que beneficiam a desagregação do agregado.

Observações sobre os principais fatores que interferem na velocidade e na intensidade da reação álcali-agregado, são a seguir apresentadas:

- quanto maiores o teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento no concreto, maiores serão as expansões;
- quanto mais desorganizada e instável é a estrutura do mineral presente no agregado, mais reativa será a fase;
- em ambientes com umidade relativa acima de 80 a 85%, ocorre um aumento na magnitude da reação;
- as estruturas localizadas em ambientes úmidos, tais como barragens, fundações de pontes e estruturas marinhas, estão mais sujeitas a este tipo de deterioração (MEHTA e MONTEIRO, 1994);
- na falta de água ou umidade, a RAA pode ser limitada, mesmo na presença de agregados reativos e álcalis;
- quanto maior a temperatura ambiente, mais rapidamente ocorre a reação; e
- a maioria das reações químicas são ativadas ou aceleradas por temperaturas elevadas (HASPARYK, 2005).

As manifestações mais comuns verificadas em estruturas de concreto atacadas são fissurações do tipo “mapa”, exsudação de gel na superfície do concreto, bordas ao redor dos agregados, preenchimento de poros com material branco ou vítreo, microfissuração e descoloração do concreto (HASPARYK, 2005).

O termo gel é definido como uma substância gelatinosa, resultante da coagulação de um líquido coloidal (MIZUMOTO, 2009). O seu processo de formação desenvolve-se em diferentes estágios e, em um deles, o gel deixa de ser gelatinoso e torna-se sólido. A designação química mais adequada para o gel no estado solidificado é dada pelo termo xerogel (MIZUMOTO, 2009).

Adicionalmente, em um estágio mais avançado, a fissuração produzida no concreto afetado pela RAA pode permitir o ingresso externo de água, por exemplo, comprometendo de forma significativa a estanqueidade da estrutura, além de comprometer as propriedades mecânicas e elásticas do concreto.

São as seguintes as medidas preventivas a serem adotadas com o objetivo de evitar a instalação da RAA (HASPARYK, 2005):

- a) estudo preliminar da rocha ou agregados a serem empregados na obra;
- b) caracterização química do cimento a ser empregado na obra;
- c) ensaios de laboratório sobre a reatividade da combinação cimento-agregado; e
- d) emprego de adições minerais.

São vários os ensaios de laboratório empregados para estudar a RAA. Dentre os principais voltados para a avaliação da rocha ou dos agregados encontra-se a análise petrográfica, que tem como objetivo identificar os minerais potencialmente reativos presentes, do ponto de vista da RAA. No estudo do cimento, é importante que seja verificado o teor de álcalis solúveis, o qual pode ser determinado através de sua análise química (HASPARYK, 2005).

Caso seja verificado, através da análise petrográfica, a presença de minerais potencialmente reativos, e esta reatividade seja comprovada através dos ensaios de reatividade, com expansões acima dos limites de norma, deverão ser tomadas medidas preventivas no que diz respeito à troca ou adequação dos materiais (HASPARYK, 2005).

A NBR-15577:2008 normaliza ensaios concernentes à reatividade álcali-agregado e está subdividida em seis partes.

A parte 1 da NBR 7389:2009 normatiza a análise petrográfica de agregado miúdo para concreto, enquanto sua parte 2 padroniza a análise petrográfica de agregado graúdo para concreto.

Para realização dos ensaios das partes 4 e 5 da norma NBR 15577:2008, as amostras de rocha devem ser britadas e pulverizadas, utilizando-se um britador, até a obtenção da distribuição granulométrica indicada. As amostras de areia devem ser analisadas como coletadas, desde que apresentem a granulometria indicada pela NBR 15577-1:2008.

A determinação da reatividade álcali-agregado pelo método acelerado, segundo a NBR 15577-4:2008, é indicada para avaliar a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, através do monitoramento das expansões dimensionais de barras de argamassa, utilizando-se no ensaio um cimento padrão, comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado. Geralmente, utiliza-se como cimento padrão o CP V-ARI.

De acordo com a norma NBR 15577-1:2008, quando o resultado do ensaio acelerado pela NBR 15577-4:2008 indicar expansão menor que 0,19% aos 30 dias (28 dias de cura em solução alcalina), o agregado é considerado potencialmente inócuo para uso em concreto. Expansão maior ou igual a 0,19% indica que o agregado é potencialmente reativo. No caso dos agregados potencialmente reativos, pode ser realizado o ensaio em prismas de concreto, conforme a NBR 15577-6:2008, para confirmação ou não da potencialidade reativa do agregado, prevalecendo o seu resultado sobre o resultado do ensaio acelerado ou adotar medidas de mitigação da expansão para evitar manifestações patológicas decorrentes da reação álcali-agregado.

As medidas de mitigação estão ligadas ao grau de reatividade do agregado e à intensidade da ação preventiva estabelecida pela análise de risco de ocorrência da reação álcali-agregado nas estruturas ou elementos estruturais de concreto.

A primeira opção seria a utilização de um outro tipo de agregado comprovadamente não reativo. Entretanto, quando a jazida da rocha reativa é a única disponível nas proximidades da obra, nem sempre é possível e viável economicamente esta opção de troca. Em relação ao cimento, deve-se utilizar um tipo contendo baixo teor de álcalis.

Mantendo-se o agregado reativo, deve-se então estudar outros tipos de cimento (Cimento Portland de Alto Forno - CP III ou Cimento Portland Pozolânico - CP IV), bem como o emprego de adições minerais/pozolânicas tais como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, o metacaulim, a cinza volante ou as pozolanas naturais. Estes cimentos e os teores das adições a serem empregados devem ser investigados em conjunto com o agregado reativo, novamente através de ensaios de reatividade em laboratório, com o objetivo de verificar a melhor opção na inibição ou redução das expansões causadas pela RAA. A tabela 2.3 apresenta as medidas de mitigação preconizadas pela NBR 15577:2008.

Tabela 2.3 – Medidas de mitigação

Intensidade da ação preventiva	Medidas de mitigação
Mínima	1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 3,0 kg/m ³ de Na ₂ O equivalente (*), ou 2) Utilizar cimentos CP II-E ou CP II-Z, conforme NBR 11578:1991 (corrigida 1997), ou CP III, conforme NBR 5735:1991, ou CP IV, conforme NBR 5736:1991 (corrigida 1999), ou 3) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade moderada
Moderada	1) Limitar o teor de álcalis do concreto a valores menores que 2,4 kg/m ³ Na ₂ O equivalente (*), ou 2) Utilizar cimento CP III, com no mínimo 60% de escória conforme NBR 5735:1991, ou 3) Utilizar cimento CP IV com no mínimo 30% de pozolana conforme NBR 5736:1991 (corrigida 1999), ou 4) Usar uma das medidas mitigadoras previstas na ação preventiva de intensidade forte
Forte	1) Utilizar materiais inibidores da reação, comprovando a mitigação da reatividade potencial pelo ensaio previsto na NBR 15577-5:2008, ou 2) Substituir o agregado em estudo.

(*). Aceita-se considerar o aporte de álcalis trazido ao concreto pelo cimento na ausência de ensaios de todos os componentes do concreto.

Fonte: NBR 15577:2008

A determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado, segundo a NBR 15577-5:2008, é indicada para avaliar a eficiência de cimentos com adições de pozolanas ou escórias de alto-forno em inibir a expansão de agregados classificados como potencialmente reativos pela

metodologia prescrita pela NBR 15577-4:2008. Para esse ensaio, os agregados podem ser analisados com o cimento CP II-Z-32, uma vez que se trata de um cimento Portland composto com pozolona.

Na ausência de análise de risco, recomenda-se a adoção de ação preventiva forte, o que significa aplicar a metodologia prescrita pela NBR 15577-5:2008, em misturas de agregado e cimentos com adições mitigadoras da expansão.

Os resultados dos ensaios realizados devem ser realizados, destacando-se os valores aos 14 dias de cura, em solução de NaOH 1N a 80°C.

Com relação à avaliação da mitigação da reação álcali-agregado pelo método acelerado NBR 15577-5:2008, a parte 1 da norma estabelece que a comprovação da mitigação da reação é obtida quando a expansão for menor que 0,10% aos 16 dias (14 dias de cura em solução alcalina). Mesmo que a expansão esteja dentro desse limite, não é possível fazer considerações a respeito das características de reatividade dos agregados, nem da potencial inibição do cimento, mas permite afirmar que as combinações especificamente ensaiadas apresentam características favoráveis ao emprego em obras de construção civil, com baixos riscos de manifestações patológicas referentes à reação álcali-sílica.

Para valores de expansão iguais ou superiores a 0,10%, são necessários novos ensaios de forma atender ao limite estabelecido, podendo-se optar por trocar o cimento empregado ou incorporar ou aumentar os teores de materiais inibidores da reação álcali-agregado (pozolona, escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim) ou ainda substituir o agregado. O cimento deve conter baixo teor de álcalis.

2.3.3 Adições

2.3.3.1 Generalidades

Os aditivos minerais, também conhecidos como adições minerais, são materiais finamente moídos incorporados ao concreto com a finalidade de se obter características específicas. Estes são geralmente utilizados em grandes quantidades, com a finalidade de reduzir os custos, melhorar a trabalhabilidade do concreto no estado fresco, podendo até

melhorar a sua resistência à fissuração térmica, à expansão álcali-agregado e ao ataque por sulfatos (CAVALCANTI, 2006).

A adição de finos proporciona melhoria em diversas propriedades, tanto no estado fresco, como no estado endurecido. Acredita-se que os finos atuam como pontos de nucleação, ou seja, quebram a inércia do sistema, fazendo com que as partículas de cimento sofram reação mais rápida com a água, ocasionando ganhos de resistência nas primeiras idades. Atuam, ainda, no aumento do empacotamento, fazendo com que haja um aumento na densidade da pasta, dificultando a penetração de agentes agressivos e melhorando a zona de transição (TUTIKIAN, 2004).

O uso de resíduos industriais como materiais finos, em pastas, argamassas e concretos, geralmente proporcionam uma melhoria das suas propriedades nos estados fresco e endurecido (CAVALCANTI, 2006).

Os principais benefícios alcançados com a utilização de adições minerais são: ambiental, quando a adição é um resíduo industrial, pois evita que o material seja lançado ao ambiente sem nenhuma finalidade benéfica; econômico, devido à substituição parcial do cimento, o que reduz o consumo de cimento, e conseqüentemente, o custo do m³ do concreto; e tecnológico, pela melhora das propriedades do concreto nos estados fresco e endurecido. Nas propriedades frescas, com relação à fluidez, quantidade de água e ausência de segregação e/ou exsudação. E nas propriedades do concreto no estado endurecido, pela melhora nas propriedades mecânicas, tais como: resistência, permeabilidade e durabilidade, provocada pelo aumento da quantidade de finos e do refinamento dos poros.

Dessa forma, o emprego destes produtos em uma dosagem de concreto visa uma melhoria das propriedades do concreto em geral, a saber:

- melhoria na trabalhabilidade: as adições, que são partículas muito finas, diminuem o tamanho e o volume de vazios;
- resistência à fissuração térmica: sabendo-se que o calor máximo de hidratação de um concreto ocorre cerca de uma semana após seu lançamento, essas partículas contribuem na estabilização da temperatura, diminuindo a elevação térmica;

- aumento da resistência mecânica; e
- melhoria no comportamento da microestrutura do concreto, preenchendo assim os poros de menor escala e aumentando a viscosidade, o que reduz a fricção entre os agregados, e conseqüentemente, aumenta a resistência à segregação e/ou exsudação.

Adições de materiais pozolânicos impõem ao concreto uma melhoria nas suas mais importantes características. Essa melhoria é conseguida através de sua atuação na microestrutura do concreto, por meio de dois efeitos:

- a) químico (efeito pozolânico): as partículas dos materiais pozolânicos, compostas por dióxido de silício amorfo com uma área superficial específica elevada, por meio da reação pozolânica, reagem com o hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , resultando em silicato de cálcio hidratado, CSH, que é um dos principais componentes responsáveis pela resistência do concreto endurecido; e
- b) físico (efeito microfíler): as partículas das pozolanas, por possuírem formato esférico e diâmetro médio cerca de cem vezes menores do que os grãos de cimento, também atuam como microfíler, fazendo um empacotamento dos grãos de cimento, reduzindo o espaço disponível para a água, preenchendo os poros do concreto e aumentando a coesão e a compacidade.

Com o uso de microssílicas, cinzas volantes ou outros materiais pozolânicos, o concreto passa a ter maior resistência à compressão, menor porosidade, maior resistência à abrasão e à corrosão química, maior adesão a outras superfícies de concreto e melhor aderência com o aço, dentre outras vantagens.

A reação química acontece principalmente na interface entre argamassa de cimento e o agregado graúdo, denominada zona de transição, que, conforme já mencionado, constitui a região mais fraca do concreto. Com o uso da microssílica, há uma maior aderência entre o agregado e a pasta, fortalecendo a zona de transição e podendo tornar o agregado a parte mais frágil do concreto. Com esse fortalecimento da zona de transição, agregados graúdos rompidos podem ser visíveis na superfície de ruptura à compressão nos corpos de prova de um CAD.

Atualmente, devido a diversos fatores (ecológicos, econômicos e técnicos), procura-se aumentar o consumo de adições minerais no concreto, tendo como principal fonte, de acordo com MEHTA e RAMACHANDRAN (1984), pozolanas provenientes de resíduos industriais, como a sílica ativa oriunda da indústria metalúrgica, a cinza volante, subproduto das usinas termoelétricas, a escória de alto forno moída, subproduto da fabricação do ferro gusa e as agrícolas, como a cinza de casca de arroz.

2.3.3.2 Classificação das Adições

As adições podem ser classificadas como predominantemente inertes (API) ou predominantemente reativas (APR), de acordo com a ação no concreto. As APR contribuem para a formação dos hidratos, como pozolanas naturais, cinza volante, cinza da casca de arroz, cinzas da queima do bagaço da cana de açúcar, sílica ativa e metacaulin. As API provocam uma ação física, proporcionando uma estrutura com maior compacidade. Alguns exemplos de fíleres são o calcário, o quartzo e o resíduo de serragem de mármore e granito (CAVALCANTI, 2006). Segundo a EFNARC (2002), os dois tipos de adições podem ser utilizados na produção do CAA.

De acordo com NEVILLE (1997), as pozolanas podem ter origem natural ou artificial. As naturais são aquelas que possuem atividade pozolânica no seu estado natural ou podem ser facilmente transformadas em pozolanas, por um processo de calcinação e moagem. As pozolanas artificiais, também denominadas de subprodutos industriais, podem ou não necessitar de um tratamento (secagem ou moagem complementar), para que venham a desenvolver atividade pozolânica (CARMO, 2006).

MEHTA (1987) afirma que nem sempre é fácil classificar uma pozolana natural, pois sendo um material natural, raramente apresenta apenas um constituinte reativo com o hidróxido de cálcio, e sua composição e propriedades variam bastante.

Existem adições minerais que desenvolvem somente a atividade pozolânica, enquanto outras desenvolvem somente a atividade cimentante (RILEM, 1988). Há, ainda, as que desenvolvem ambas atividades, ou seja, cimentante e pozolânica. As adições minerais podem ser classificadas quanto a sua atividade, em uso na produção do concreto, principalmente, em função da sua composição química e mineralógica, tais como:

- cimentantes:
 - escória granulada de alto-forno.
- cimentantes e pozolânicas:
 - cinza volante com alto teor de cálcio ($\text{CaO} > 10\%$).
- pozolanas comuns:
 - cinza volante de baixo teor de cálcio ($\text{CaO} < 10\%$); e
 - materiais naturais.
- altamente pozolânicas:
 - sílica ativa;
 - cinza de casca de arroz, produzida por combustão controlada; e
 - metacaulim.
- outras adições minerais:
 - escória granulada de alto-forno resfriada lentamente;
 - cinza de grelha;
 - escórias ácidas e
 - cinza de casca de arroz queimada em campo.

As altamente pozolânicas apresentam-se em forma de pó fino, constituído de esferas sólidas de diâmetro e superfície específica variáveis, dependendo do tipo e da qualidade de moagem. Suas partículas geralmente possuem diâmetros inferiores a 45 μm , podendo ser lamelares (CARMO, 2006).

Material pozolânico é definido como um material silicoso ou sílico-aluminoso que por si só possui pouca ou nenhuma propriedade cimentícea, mas que quando finamente dividido e na presença de umidade reage com o hidróxido de cálcio, a temperatura ambiente, formando compostos com propriedades cimentantes (NBR 12653:1992).

O material cimentante não necessita do hidróxido de cálcio para formar produtos cimentantes, porém, a quantidade destes compostos formados, como o CSH, é em geral insuficiente para aplicação desses materiais para fins estruturais e sua hidratação é normalmente lenta. Quando o material cimentante é usado como adição, em substituição de parte do cimento Portland, o hidróxido de cálcio e a gipsita presentes no cimento, aceleram

sua hidratação (KLEIN, 2008). Além desse efeito pozolânico, o efeito microfíler permite que as partículas de tamanho reduzido das adições minerais preencham os espaços vazios existentes entre as partículas do cimento.

As pozolanas de alta reatividade possuem partículas com elevada finura e podem apresentar efeito físico no concreto nas três formas, a seguir, descritas (CARMO, 2006):

- a) pelo aumento da densidade da mistura, devido ao preenchimento dos vazios decorrentes, principalmente, das minúsculas partículas destas pozolanas, normalmente, mais finas que as partículas de cimento;
- b) pelo grande número de pequenos cristais, ao invés de poucos cristais de grande tamanho, devido aos menores espaços disponíveis para os produtos de hidratação crescerem (o menor espaço ocorre pelo fato da pozolana agir como ponto de nucleação para os produtos de hidratação, resultando no refinamento da estrutura dos poros e dos produtos de hidratação do cimento); e
- c) pela densificação da zona de transição entre a pasta de cimento e o agregado, devido à interferência na movimentação das partículas de água livre, em relação aos sólidos da mistura (a alteração na movimentação provoca a eliminação ou a redução do acúmulo de água, que comumente fica retido sob o agregado).

Este último efeito ainda é acompanhado da diminuição do número de vazios entre as partículas de cimento e a superfície do agregado, também conhecido como efeito microfíler, e da redução da concentração de hidróxido de cálcio nessa região do concreto, por meio de ação química.

2.3.3.3 Sílica Ativa

A sílica ativa, também denominada microssílica, é um subproduto do processo de fabricação do silício metálico ou das ligas de ferro-silício.

Segundo VIEIRA et al. (1997), a adição da sílica ativa nos concretos de cimento Portland tem apresentado diversos benefícios às propriedades do concreto, tanto em relação

à sua reologia no estado fresco e, principalmente ao comportamento mecânico e de durabilidade no estado endurecido. A incorporação de sílica ativa promove uma diminuição da porosidade e torna a microestrutura do concreto mais densa e compacta, resultando em um material com desempenho superior ao concreto convencional, capaz de proteger o concreto contra os agentes agressivos. Além disso, em função de suas propriedades químicas e físicas, a sílica ativa é considerada uma excelente pozolana que, quando usada no concreto, além de atuar quimicamente também atua de forma física, através do efeito microfíler.

Além disto, de acordo com MENDES (2002), em função do tamanho extremamente reduzido de suas partículas, a sílica ativa reduz significativamente a exsudação interna da mistura, ao interferir na movimentação das partículas de água, reduzindo ou eliminando o acúmulo de água livre que fica retido sob os agregados além de preencher os vazios deixados pelas partículas de cimento próximas à superfície do agregado, contribuindo desta maneira para a diminuição da porosidade e da espessura da zona de transição (figura 2.2).

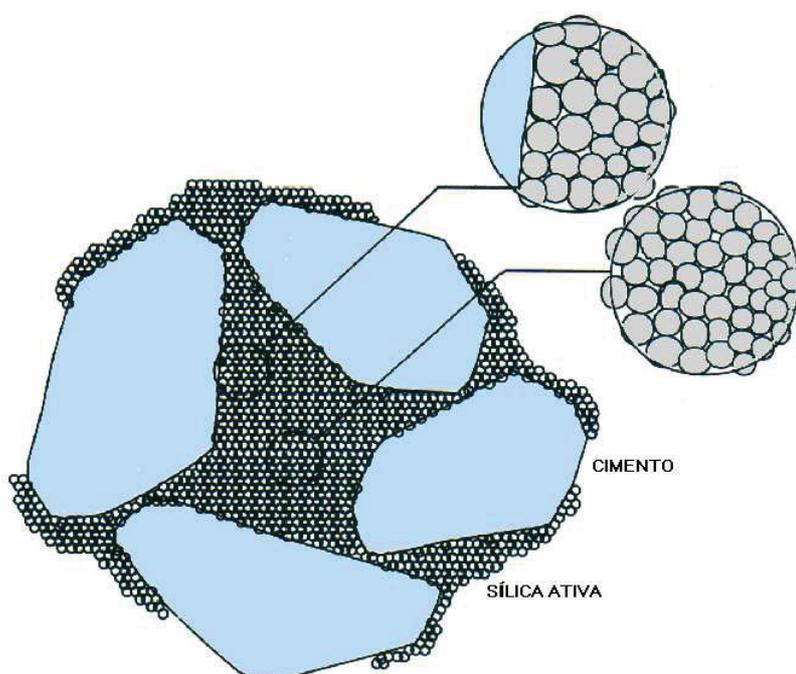


Figura 2.2 – Efeito microfíler da sílica ativa no concreto (adaptado de MENDES, 2002)

A sílica ativa, como afirma MENDES (2002), é um subproduto do processo de fabricação do silício metálico ou das ligas de ferro-silício. A produção dessas ligas se dá em

fornos elétricos de fusão, tipo arco-voltaico, onde ocorre a redução do quartzo a silício pelo carbono a temperaturas da ordem de 2000°C. A sílica ativa é coletada ao passar através de filtros especiais denominados filtros de manga, e contem na maioria das vezes, segundo VIEIRA et al. (1997), um teor de SiO₂ maior do que 80%.

As características da sílica ativa, como cor, distribuição granulométrica e composição química, dependem do tipo de liga produzida, tipo de forno, composição química e dosagem das matérias-primas. A sílica ativa é um pó fino cuja cor varia de cinza claro a cinza escuro. Como o SiO₂ é incolor, a cor da sílica ativa é determinada pelo teor de carbono e de óxido de ferro presentes (SUGAMOSTO, 2007).

Do ponto de vista físico, as partículas de sílica ativa são esféricas, extremamente pequenas, com diâmetro médio entre 0,1 µm e 0,2 µm, sendo 50 a 100 vezes menores que as do cimento. A sua massa específica real é geralmente 2,2 g/cm³, menor que a do cimento, que é de aproximadamente 3,1 g/cm³. A massa unitária na forma natural é da ordem de 250 a 300 kg/m³. A baixa massa unitária associada à pequena dimensão das partículas de sílica ativa faz com que o material apresente problemas de manuseio e transporte, encarecendo seu custo final (AİTCIN, 2000). Sua área específica, medida pela técnica de adsorção de nitrogênio, varia de 13.000 a 30.000m²/Kg, ficando a média em torno de 20.000m²/Kg, bastante superior à do cimento Portland – 350 a 600m²/Kg (ACI 234R-96, 2001 apud MENDES, 2002). Sua massa específica real é geralmente de 2,2g/cm³, menor que a do cimento, que é de aproximadamente 3,10g/cm³ (MALHOTRA, 1993; NEVILLE, 1997).

Do ponto de vista químico, a sílica ativa é composta principalmente de SiO₂, com pequenas quantidades de alumina, ferro, cálcio, álcalis, carbono, entre outros (AİTCIN, 2000).

A sílica ativa está disponível comercialmente em diversas formas. Todas as formas apresentam aspectos positivos e negativos que podem afetar o desempenho técnico, o manuseio, a eficiência e o teor de adição nos concretos (SUGAMOSTO, 2007).

As diversas formas comercializáveis de sílica ativa são descritas a seguir, com base em DAL MOLIN (1995) e ACI 234R-96 (2001):

- natural;
- densificada;
- forma de lama;
- pelotizada; e
- pré-misturada ao cimento.

A sílica ativa natural é composta por um pó extremamente fino, sem nenhum tratamento, coletado em filtros manga, após captação e filtragem. A sílica ativa possui a vantagem da facilidade de mistura e dispersão das partículas no concreto.

As partículas de sílica ativa densificada são compactadas, normalmente por ar comprimido, após a filtragem, tornando-se suficientemente densas para o transporte, pois ocupam um menor volume por peso (500 a 700 kg/m³). Além disto, o processo de compactação reduz significativamente a nuvem de pó, comum na captação da sílica na forma natural.

A sílica ativa sob forma de lama é pré-misturada com água, geralmente em teores de 40 a 60% da massa, resultando em uma massa específica aparente de 1.300 kg/m³ a 1.400 kg/m³. Dessa forma, elimina-se a formação da nuvem de pó, além de facilitar o bombeamento para o interior dos veículos de transporte. Possui como aspecto negativo a dificuldade de garantia da quantidade de água realmente empregada em relação aos sólidos, afetando a qualidade final da mistura, bem como o fato de se armazenar e transportar metade do volume em água.

A sílica ativa pelotizada é similar à sílica ativa densificada, porém é obtida com a adição de pequena quantidade de água, suficiente para produzir micropelotas aglomeradas com massa específica aparente em torno de 700 kg/m³. Entretanto, as pelotas formadas são muito duras para serem quebradas facilmente durante o processo de mistura do concreto, o que a torna muito pouco utilizada.

A sílica ativa pré-misturada com cimento possui de 6,5 a 8% de sílica ativa (natural, densificada ou pelotizada), em relação à massa de cimento. Possui, como vantagem, a facilidade de controle da dosagem e perfeita homogeneização dos materiais cimentantes.

2.3.3.4 Resíduo de Vidro Industrial

Segundo SHACHELFORD (2008) o vidro é um material cerâmico, sólido não-cristalino de óxido tradicional. Os silicatos, especialmente, têm custo moderado devido à abundância dos elementos Si e O na crosta terrestre. O vidro é um material frágil, porém não fraco. Ele tem grande resistência à ruptura, podendo mesmo ser utilizado em pisos, é duro e rígido, porém não tenaz não sendo apropriado para aplicações sujeitas a impactos. Pode-se calcular teoricamente a resistência de um material frágil, pois a força necessária para rompê-lo é a necessária para romper as ligações dos seus átomos.

O vidro possui uma estrutura atômica diferente dos sólidos cristalinos, que apresentam átomos empilhados e estruturas regulares e repetitivas. Por possuírem uma estrutura diferente, com átomos irregulares e não repetitivos, são classificados como sólidos não cristalinos, ou amorfos. O vidro é obtido por fusão, em torno de 1.250 °C, de dióxido de silício (SiO_2), de carbonato de sódio (Na_2CO_3) e de carbonato de cálcio (CaCO_3).

Segundo MAIA (2003), a palavra vidro refere-se aos sólidos amorfos, que ao se fundirem tornam-se líquidos viscosos e que ao serem resfriados se solidificam sem cristalizar, o autor define vidro como: “uma substância inorgânica numa condição contínua e análoga ao estado líquido daquela substância, a qual, porém como resultado de uma mudança reversível na viscosidade durante o resfriamento, atingiu um alto grau de viscosidade de modo a ser para todos os fins práticos rígido.”

Pode-se dizer que os vidros são substâncias inorgânicas e amorfas, provenientes do resfriamento de uma massa sílica em fusão (SICHERI, CARAM e SANTOS, 2007). De acordo com a ABIVIDRO (2007), a composição química do vidro é semelhante à de materiais que compõem a crosta terrestre, conforme tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Composição química do vidro comum

Óxido	% na crosta terrestre	% no vidro
SiO ₂ (sílica)	60	74
Al ₂ O ₃ (alumina)	15	2
Fe ₂ O ₃ (Óxido de Ferro)	7	0,1
CaO (cálcio)	5	9
MgO (magnésio)	3	2
Na ₂ O (sódio)	4	12
K ₂ O (potássio)	3	1

Fonte: ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO – ABIVIDRO. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br>>

Grande parte da manufatura rotineira do vidro, o SiO₂ está prontamente disponível em depósitos de areia com pureza adequada (SHACHELFORD, 2008). Essa característica permite a utilização em grande escala do vidro na indústria, implicando numa grande geração de resíduos. Novas pesquisas buscam desenvolver destinos viáveis a esses resíduos, tornando a manufatura do vidro mais sustentável. O significativo aumento dos resíduos destinados a aterros e lixões inspira a busca de soluções ecologicamente corretas e sustentáveis.

Segundo a ABIVIDRO (2007), apenas 45% dos vidros produzidos na própria indústria são reciclados, o que equivale a cerca de 1.395 mil t/ano. De acordo com os dados da empresa AMBIENTE BRASIL (2009), o país recicla apenas 14,2% dos vidros consumidos. Para ROSA (2007), o consumo per capita do vidro no Brasil é de 12 kg/hab/ano.

No contexto urbano da cidade de Manaus, com base na composição gravimétrica do lixo realizada por STROSKI (2002), a quantidade de vidro despejada no aterro é de 138,08 ton/semana oriundos de o lixo domiciliar e 18,63 ton/semana do distrito industrial de Manaus. As edificações apresentam em sua composição arquitetônica uma grande quantidade de vidro em fachadas, boxes para banheiros, portas, janelas, letreiros e paradas de ônibus.

Segundo o CONAMA (2002), o vidro é classificado como resíduo reciclável para outras destinações. Ele deverá ser reutilizado, reciclado ou encaminhado a áreas de

armazenamento temporário, sendo disposto de modo a permitir a sua utilização ou reciclagem futura.

O principal mercado para a sucata de vidro é formado pelas vidrarias, que compram o material de sucateiros na forma de cacos ou recebem o material diretamente em suas campanhas de reciclagem. Porém, a reciclagem de vidro tem vários fatores limitantes como impurezas, custos de transporte proibitivos e mistura de sucatas de cores diferentes que são difíceis de serem separadas.

Como exemplos da utilização de vidro em escala real, pode-se destacar o exemplo da Austrália que já utiliza o vidro moído proveniente do lixo em concretos para construção (CRENTSIL, K. S, BROWN, T, TAYLOR, 2001, AZEVEDO, BARBOSA NETO, 2005) e ainda do estado norte-americano de Nova York que já apresenta recomendações para o uso deste material em concretos.

O uso de vidro já foi estudado e atualmente existem países utilizando este material como agregado miúdo no concreto. Como exemplos das diversas pesquisas realizadas, destacam-se os estudos de POLLEY et al. (1998) e de SHAO et al. (2000). Os primeiros pesquisaram o uso de vidro reciclado como substituto do agregado miúdo (areia) no concreto. Os resultados dessa pesquisa indicaram que o vidro é um substituto satisfatório para agregados naturais finos em níveis de até 20% do agregado total em granulometrias variando entre 0,075 e 1,5 mm, com resistências à compressão compatíveis com concreto do mesmo traço sem adição de vidro. Já os segundos, pesquisaram o uso de sílica, vidro finamente moído e cinzas volantes, mas em substituição ao cimento adicionados em proporções de até 30% em peso com tamanho de partícula abaixo de 0,15 mm. Esses autores verificaram que o concreto produzido com a adição de vidro finamente moído (< 75µm) tinha suas propriedades mecânicas melhoradas em função das reações pozolânicas. Para faixas mais graúdas, o concreto produzido apresentava problemas de aumento de volume gerados pela reação álcali/sílica.

BABU e PRAKASH (1995) constataram que o vidro pode influenciar a qualidade do concreto por outros efeitos que não o pozolânico e o da reação álcali/sílica. Verificou-se que o benefício da adição do vidro estava relacionado ao preenchimento de vazios entre os

grãos do agregado fino (melhora do empacotamento das partículas). Já o efeito pozolânico aconteceria com vidros de granulometria fina ($< 75\mu\text{m}$) uma vez que as partículas finas favorecem uma rápida e benéfica reação pozolânica. Para vidros com granulometria graúda ($> 0,75\text{ mm}$), a reação álcali/sílica aconteceria preferencialmente.

Segundo DYER e DHIR (2001), sendo o vidro um material amorfo e contendo uma grande quantidade de silício e cálcio, torna o material, em teoria, pozolânico. Eles afirmam também que o elevado conteúdo de sódio e silício do vidro implica na possibilidade de que o concreto sofra uma reação álcali/sílica, o que faz com que o concreto se expanda durante a mesma.

MEYER et al. (1999) estudaram maneiras de usar resíduos de vidro quebrados como agregado em concreto. Nessa linha de pesquisa, o objetivo básico e prioritário era resolver os problemas causados pela reação álcali-sílica (RAS). De acordo com MEYER et al. (1999), o vidro tem influencia na expansão devido a reação álcali-sílica, uma vez que a RAS é um fenômeno claramente dependente da área superficial, sendo esperado que a expansão aumente monotonicamente com a finura do agregado. Contudo, existe um tamanho de agregado onde ocorrem as maiores expansões, devido às reações álcali agregado, chamado tamanho “péssimo”. Em geral, esse tamanho depende da composição e estrutura do vidro, entretanto, segundo os autores, para vidros sodo-cálcicos normais, esse tamanho “péssimo” é em torno da abertura das malhas das peneiras 1,2 mm (peneira #16) e 0,6 mm (peneira #30). Para agregados mais finos, outro processo que não depende da área superficial torna-se predominante e as expansões decrescem com elevadas finuras. Os autores não observaram quaisquer expansões quando o vidro utilizado foi moído em tamanhos menores que 0,30 mm (peneira 50), o que os levaram a conclusão de que o aumento das expansões da RAS crescem com a elevação da finura das partículas de vidro até certo ponto, a partir daí, essas expansões decrescem.

Para MEYER (1996) apud SHAO et al. (1998), partículas de vidro menores ou iguais a 300 μm , reduzem a expansão da RAS. Em suas pesquisas no Canadá, SHAO et al. (1998), utilizaram vidros moídos do tipo sodo-cálcicos, limitando-se apenas aos vidros provenientes de lâmpadas fluorescentes (vidros cálcicos), separados em três granulometrias: com 150 μm , 75 μm e 38 μm . Em seus ensaios, verificaram a resistência, a

atividade pozolânica e a RAS. Assim, obteve altas resistências, elevados índices de atividade pozolânica e redução das expansões da RAS, principalmente com o resíduo de tamanho igual a 75 μm . Além disso, os resíduos de 75 μm e 38 μm mostraram índices de atividades superiores aos da cinza volante.

SHI et al. (2005), analisaram a morfologia, finura e atividade pozolânica de pós de vidro obtidos por quatro tipos de processos. Dessa maneira, observaram que quanto menor é o tamanho das partículas maior é a atividade e que, temperaturas têm maior influência sobre a atividade pozolânica do pó de vidro do que nas cinzas volantes. Por conseguinte, quando os vidros são finamente divididos, reduzem as expansões provocadas por RAA. Estudos semelhantes aos relatados foram realizados em pastas de cimento por Karamberi e MOUTSATSOU (2005), que efetuaram a substituição de 25% do cimento por vidros sodocálcicos coloridos da região da Grécia, detectando reações do vidro com o cimento na produção de C-S-H e, para eles, os pós de vidro não ofereceram expansões devido à RAS.

Tendo em vista que, o vidro é um material feito com uma massa de sílica em fusão, pode-se verificar que, ao final de seu processo de produção, o vidro apresenta-se como um material composto de sílica amorfa. Sendo o resíduo de vidro classificado pela NBR 10004 (ABNT, 2004) como um resíduo de classe II B, tido como não perigoso e inerte, pode-se empregar este tipo de resíduo em matriz cimentícia, desde que esteja finamente moído, pois como agregado graúdo poderá desencadear reações álcalis-agregado (PAIVA, 2009).

Segundo PAIVA (2009), as adições minerais influenciam na resistência e porosidade da matriz cimentícia melhorando a resistência e as propriedades do concreto. O uso de adições minerais em concreto melhora o comportamento da matriz no estado fresco e endurecido, como densidade, resistência a compressão, exsudação, segregação e trabalhabilidade.

Através do ensaio da classificação e índice de atividade pozolânica baseados na NBR 5752/92, realizado por PAIVA (2009), o resíduo de vidro em argamassa de cimento Portland aos 28 dias de idade apresentou 104% de índice de atividade pozolânica ficando acima do mínimo estabelecido pela norma, que é de 75%.

A presença de sílica amorfa em sua composição faz do vidro um material com potencialidade para promoção de pozolanicidade, quando apresentar alto grau de finura. Deve-se tomar bastante cuidado na análise da reação álcali-agregado, em especial a reação álcali-sílica, uma vez que, a grande quantidade de sílica pode reagir com os álcalis do cimento gerando um gel que sofre expansão na presença de água, com danos ao concreto.

Em meio à realidade local e os dados anteriormente fornecidos, há de se justificar a utilização dos vidros como componente de uma matriz cimentícia pela disponibilidade do material, pois, como se mostrou, apenas cerca de 14% do vidro no Brasil é reciclado. Quando esse material se torna inutilizável, é apenas coletado e enviado ao aterro da cidade, prejudicando o processo de percolação do chorume e a decomposição de outros materiais, pois o vidro leva cerca de 2 mil a 1 milhão de anos para se decompor (BARDINI, 2007). Ao passo que, o material é essencialmente composto por sílica amorfa e outros componentes que podem vir a melhorar a durabilidade da matriz como adição mineral pelo seu potencial pozolânico.

2.3.3.5 Reação Pozolânica

Adicionando ao cimento um material pozolânico, cujos óxidos SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 estão presentes em estado amorfo ou com sua estrutura cristalina fraca, em presença de água e à temperatura ambiente, estes óxidos reagem com o hidróxido de cálcio (produzido pela hidratação dos silicatos do cimento Portland), formando compostos que possuem propriedades aglomerantes.

A reação pozolânica se desencadeia porque a sílica e a alumina são vulneráveis ao hidróxido de cálcio, devido à fraqueza e instabilidade de suas ligações estruturais no material original, como é o caso do vidro vulcânico ou das argilas calcinadas.

O hidróxido de cálcio, CH, necessário à reação pozolânica, é gerado juntamente com o silicato de cálcio hidratado, CSH, através das reações de hidratação do silicato tricálcico (C_3S) e do silicato dicálcico (C_2S), presentes no cimento Portland. Segundo MEHTA e MONTEIRO (1993), o CSH não tem composição fixa e é responsável pela resistência do

cimento, enquanto o CH influencia na durabilidade da pasta, principalmente sujeita a meios ácidos.

O hidróxido de cálcio, Ca(OH)_2 , é um composto solúvel em água, podendo esta evaporar da mistura, deixando vazios na pasta e aumentando a permeabilidade do concreto (KECK, 2001). Dessa forma, o efeito químico das adições minerais beneficia o concreto, uma vez que possibilita a diminuição das quantidades de Ca(OH)_2 livre, pois a sílica e a alumina presentes nas adições minerais reagem com este composto, fazendo com que se diminua sua quantidade, formando mais CSH pela reação pozolânica (ACI, 1994).

A reação pozolânica, segundo MEHTA (1987), ocorre de forma lenta, assim como a taxa de desenvolvimento de resistência e o calor de hidratação associado a essa reação. Por outro lado, a hidratação do C_3S do cimento Portland é rápida, e portanto a taxa de desenvolvimento da resistência e o calor de hidratação são altos. Nota-se ainda que a reação de hidratação do cimento produz hidróxido de cálcio, enquanto a reação pozolânica o consome (NETTO, 2006).

De acordo com SOUZA (2004), o clínquer e a pozolana apresentam processos de reação muito diferentes, cada um reagindo em diferentes estágios da hidratação. A reação pozolânica tem início entre 7 e 15 dias após a mistura, quando a hidratação do cimento se apresenta já em estado avançado. Assim, as reações do clínquer e da pozolana podem ser investigadas separadamente, podendo ser consideradas as influências mútuas dos dois processos.

Segundo MEHTA (1987), a diferença essencial entre a reação pozolânica e as reações que envolvem a hidratação do cimento Portland isoladamente não está na composição de seus produtos da hidratação, mas na taxa na qual eles são formados.

2.3.3.6 Benefícios dos Finos para o CAA

Com a necessidade do alto teor de finos para a produção do CAA, o uso de adições minerais é importante, tendo em vista os seguintes fatores (CAVALCANTI, 2006):

- contribui para a diminuição da dosagem do cimento;

- reduz a necessidade de água e o calor de hidratação e evita a presença de fissuras internas no concreto; e
- melhora o comportamento da microestrutura do concreto, preenchendo assim os poros de menor escala, aumentando a viscosidade, reduzindo a fricção entre os agregados, e conseqüentemente, aumentando a fluidez, a trabalhabilidade e a resistência à segregação e/ou exsudação, ou seja, melhorando de uma forma geral a reologia do concreto, no seu estado fresco.

Nas propriedades do concreto no estado endurecido, melhora as propriedades mecânicas, tais como: resistência, permeabilidade e durabilidade, em consequência do aumento da quantidade de finos e do refinamento dos poros (CAVALCANTI, 2006).

Segundo NUNES (2001), quanto maior a superfície específica dos finos, maior a viscosidade da mistura. No CAA, a dimensão das partículas das adições minerais utilizadas tem tido uma influência importante no alcance de suas propriedades. KHAYAT et al. (1999) afirma em seus estudos que finos com diâmetros médios da ordem de 80 μm acarretam melhorias na viscosidade e na coesão da mistura de CAA. Para ESPING (2003), a alta superfície específica e a elevada quantidade de fíleres e agregados de pequena granulometria são parâmetros essenciais para uma maior trabalhabilidade e um maior controle das propriedades do CAA (CAVALCANTI, 2006).

TRAGARDH (1999) apud CAVALCANTI (2006) verifica em seu trabalho que um fator importante que apresenta uma grande influência na microestrutura do CAA é a grande quantidade de finos com diâmetros médios $< 125 \mu\text{m}$. WESTERHOLM (2003), em seu trabalho, constata que os resultados obtidos para as propriedades do CAA, no estado fresco, para finos nos intervalos de 0 a 75 μm e de 75 a 125 μm são bastante similares. Segundo CAVALCANTI (2006), algumas misturas de CAA têm sido obtidas com um alto volume de materiais finos na ordem de 150 μm , geralmente provenientes de resíduos industriais, como escória de alto forno (BARTOS et al., 1999), pozolana natural, cinzas volantes e sílica ativa ou fíler de rochas como calcário (SAKATA et al., 1995) e de mármore e granito (LISBOA et al., 2004).

Entretanto, a dimensão adequada dos grãos dos finos para a produção do CAA varia de um autor para outro. GOMES (2002) os limita a 100 μm , enquanto OKAMURA (2003) a 90 μm , IZQUIERDO e EFNARC (2002) a 125 μm . Segundo CAVALCANTI (2006), essa definição deve ser analisada com bastante cuidado, já que afeta diretamente a relação a/f, ou seja, água em relação aos finos (cimento + adições), que é um parâmetro muito utilizado na dosagem do CAA. Nenhum autor indica diferenças entre as distintas frações desses finos, mas alguns recomendam que a relação água/fíler se encontre entre 0,9 e 1,1 (EFNARC, 2002).

2.3.3.7 Benefícios das Pozolanas nos Concretos

Os efeitos da adição de pozolanas nos concretos e argamassas são listados a seguir (WATANABE, 2008):

- aumento da coesão, eliminação da exsudação e melhoria da trabalhabilidade (essas propriedades são decorrentes da redução dos diâmetros capilares e do aumento de pontos de contato sólido-sólido);
- inibição da reação álcali-agregado (a pozolana reduz o teor de álcalis, prevenindo os efeitos da reação álcali-agregado, que é expansiva e pode provocar a fissuração generalizada no concreto);
- maior performance em resistência à abrasão/erosão (a ação da pozolona impede que o agregado graúdo se solte, quando a superfície de concreto estiver submetida à ação mecânica da abrasão e à ação hidráulica da erosão); e
- maior resistência a agentes agressivos (a pozolona proporciona baixíssima permeabilidade em ambientes de grande agressividade, ou seja, aumenta a resistência contra o ataque de cloretos, sulfatos, amônias, ácidos e outros).

Em geral, as adições minerais promovem redução da permeabilidade do concreto, com consequente aumento da durabilidade, e aumento da resistência mecânica a idades avançadas. Porém, o tipo de adição utilizada, o consumo de cimento, a porcentagem de substituição do cimento pela adição e a relação água/cimento têm grande influência sobre o papel desempenhado pelas adições minerais presentes nos concretos.

A adição de pozolanas, geralmente, se reflete em uma série de benefícios para o concreto, bem como outros não necessariamente relacionados à construção civil. Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996) apud CARMO (2006), esses benefícios podem ser divididos em três categorias, a seguir listadas:

- a) tecnológicos;
- b) econômicos; e
- c) ecológicos.

2.3.3.7.1 Benefícios Tecnológicos

A introdução de um material fino no concreto, tal como a cinza volante, tende a proporcionar um aumento da sua trabalhabilidade ou uma menor necessidade de água para o mesmo valor de abatimento. No caso do uso de pozolanas de alta reatividade, que apresentam grande área superficial, como, por exemplo, a sílica ativa, esse comportamento também ocorre, mesmo sendo utilizada em baixos teores. São também vantagens técnicas do uso de pozolanas no concreto: o aumento da durabilidade e a melhoria de suas propriedades mecânicas (CARMO, 2006).

2.3.3.7.2 Benefícios Econômicos

No concreto, o cimento Portland é, geralmente, o material com maior custo, e a utilização de pozolanas, via de regra, acarreta diminuições no seu consumo e no da energia elétrica utilizada para a sua produção. Assim sendo, a redução do uso do cimento resulta em economia para a produção do concreto. E ainda, grande parte das pozolanas utilizadas no concreto é derivada de resíduos industriais, fazendo com que o uso destes materiais necessite de pouco ou nenhum custo adicional para sua aplicação no concreto. A substituição do cimento Portland por pozolanas, segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), pode variar de 20% a 60%. Esse procedimento pode representar uma considerável economia de custo e de energia. No caso de pozolanas com alta reatividade, a adição tende a ocorrer em teores que se situam em torno de 10% (CARMO, 2006).

2.3.3.7.3 Benefícios Ecológicos

Normalmente, como já citado, grande parte das pozolanas provém de resíduos de processos industriais. Na maioria desses resíduos, constata-se a presença de elementos poluentes que podem provocar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana. Nesse contexto, as pesquisas contemplando a utilização destes materiais como pozolanas, acima de tudo, visam fornecer uma maneira de evitar agressão ao meio ambiente, uma vez que, geralmente, esses materiais são depositados em rios, campos e lagoas, quando não se dispõe de um uso para esses resíduos (CARMO, 2006). Há também um ganho ecológico com o cimento substituído, pois, para a produção de uma tonelada de clínquer, segundo MEHTA (1999) e MALHOTRA e MEHTA (1996), há a necessidade de 1,5 toneladas de calcário e consideráveis consumos de combustível, além de resultar na emissão de 1 tonelada de CO₂ na atmosfera, que contribui para o efeito estufa existente em nosso planeta.

2.3.3.8 Características das Pozolanas Altamente Reativas

Características físicas das pozolanas, como tamanho da partícula e a superfície específica, são alguns dos principais fatores que garantem a alta atividade pozolânica.

O material para ser classificado como pozolana de alta reatividade deve, segundo CARMO (2006), combinar dois fatores: uma estrutura amorfa e uma grande área específica. O tamanho, a forma e a textura das partículas das pozolanas altamente reativas provocam uma grande influência nas propriedades do concreto no estado fresco, no que diz respeito à demanda de água e à trabalhabilidade e, no estado endurecido, quanto às propriedades mecânicas como resistência e permeabilidade.

Uma característica física muito importante é a área específica das partículas. Na sílica ativa, a área específica, medida pela técnica de adsorção de nitrogênio pelo método denominado BET, fica entre 15.000 m²/kg e 25.000 m²/kg, com o valor médio em torno de 20.000 m²/kg, sendo deste modo, extremamente superior à obtida no cimento Portland, que fica na ordem de 800 m²/kg a 1.500 m²/kg (CARMO, 2006).

Quanto à distribuição dos grãos, AÏTCIN (1998) relata que na sílica ativa o diâmetro das partículas varia de 0,0001 mm a 0,002 mm, sendo, deste modo, em média, 5 vezes a 100 vezes menor que o tamanho médio das partículas de cimento.

Quanto ao diâmetro das partículas, a NBR 13956:1997 fixa o valor máximo de 10%, para o retido na peneira 0,045 mm. A elevada finura da sílica ativa faz com que o efeito microfíler seja uma das propriedades mais importantes deste material, visto que as partículas se introduzem facilmente entre os grãos de cimento, atuando como pontos de nucleação dos produtos de hidratação. Como consequência, tem-se a distribuição mais homogênea dos produtos de hidratação nos espaços disponíveis (CARMO, 2006). Como visto anteriormente, as características físicas, como tamanho da partícula e a superfície específica, são alguns dos principais fatores que podem garantir a alta atividade pozolânica.

Segundo MALHOTRA e MEHTA (1996), no caso de pozolanas de alta reatividade, as diferenças na composição química são pouco significativas, a menos que seja acompanhada de mudanças significativas na sua composição mineralógica. Contudo, ressalta-se a necessidade da pozolana ser constituída de certos elementos, em quantidades mínimas. A necessidade do estabelecimento de teores mínimos para este tipo de material é refletida pelas normas relacionadas ao assunto (CARMO, 2006).

Na sílica ativa, tem-se como principal característica, a grande quantidade de SiO₂ presente, que, invariavelmente, fica em patamares superiores a 80%, sendo que este teor está diretamente relacionado com a forma de produção existente. As indústrias que adotam o teor de silício na ordem de 75% produzem um rejeito com teores entre 85% e 90% de SiO₂ não cristalina, enquanto que nas indústrias que adotam um menor teor de silício (50%), o rejeito apresenta uma quantidade inferior de SiO₂ não cristalina, tornando-o menos reativo (CARMO, 2006). Segundo DAL MOLIN (1995), na Noruega, por exemplo, adota-se o teor mínimo de 85% de SiO₂ para que a pozolana seja utilizada em concretos. No Brasil, a NBR 13956:1997 também fixa o teor mínimo de 85% para o SiO₂ não cristalino.

Segundo CARMO (2006), as principais impurezas são os álcalis K_2O e Na_2O , onde o primeiro encontra-se em teores de 1% a 5%. Impurezas como CaO e MgO ocorrem em teores inferiores a 2%.

2.3.4 Aditivos Superplastificantes

2.3.4.1 Generalidades

Aditivos superplastificantes são aditivos feitos a base de polímeros sintetizados que dão ao concreto a característica de alta fluidez na mistura (HARTMANN, 2002). São aditivos conhecidos como redutores de água de alta eficiência, por serem capazes de reduzir o teor de água três a quatro vezes mais, para uma dada mistura, quando comparados aos aditivos plastificantes. São tensoativos de cadeia longa, massa molecular elevada e um grande número de grupos polares na cadeia do hidrocarboneto (MEHTA e MONTEIRO, 1994).

A adição adequada destes aditivos superplastificantes proporciona uma boa trabalhabilidade com uma relação água/aglomerante baixa, que são características essenciais para concretos de alto desempenho (MENDES, 2002).

A tabela 2.5 apresenta, segundo a NBR 11768:2011 – Aditivos químicos para concreto de cimento Portland, os tipos de aditivos e suas abreviações.

Tabela 2.5 - Tipos de aditivos e suas abreviações

Abreviação	Tipo	Abreviação	Tipo
P	Plastificante	SPR	Superplastificante Retardador
R	Retardador	SPA	Superplastificante Acelerador
A	Acelerador	-	Acelerador de Pega
PR	Plastificante Retardador	-	Estabilizadores
PA	Plastificante Acelerador	-	Impermeabilizante
IAR	Incorporador de Ar	-	Inibidor de Hidratação
SP	Superplastificante		

Fonte: NBR 11768:2011

Os aditivos superplastificantes, SP, podem ter propósitos específicos, bem como combinações, e apresentam as seguintes vantagens:

- melhoria da trabalhabilidade;
- diminuição da segregação;

- aumento da fluidez;
- menor exsudação;
- redução no consumo de cimento;
- menor porosidade;
- redução da permeabilidade;
- grande aderência à armadura; e
- aumento das resistências mecânicas.

Sem afetar a consistência, os aditivos superplastificantes permitem a redução no consumo de água de uma determinada mistura de concreto, com os seguintes benefícios:

- aumenta a trabalhabilidade, mantendo a mesma resistência;
- aumenta a resistência e a durabilidade, reduzindo a relação água/cimento e mantendo a mesma trabalhabilidade; ou
- reduz o custo ao reduzir simultaneamente o consumo de cimento e de água (mantendo a mesma relação água/cimento), mantendo uma mesma resistência e uma mesma trabalhabilidade.

O desenvolvimento histórico dos aditivos redutores de água é apresentado de forma reduzida na tabela 2.6.

Tabela 2.6 - Desenvolvimento histórico dos aditivos redutores de água

Geração	1ª Geração		2ª Geração		3ª Geração
Ano	1930	1970	1990	2000	
Compostos Químicos Principais	Ácidos lignossulfonados (LS) e ácidos carboxílicos hidroxilados	Sais de sulfonados de melamina e condensados de naftaleno e formaldeído (NS)	Polímeros Vinílicos	Superplastificantes à base de éter policarboxílico, também chamados de policarboxilatos ou poliacrilatos (PC)	
Capacidade de Redução de Água	10%	20%	30%	45%	

Fonte: TOKUDOME, sem data

Os aditivos superplastificantes podem ser agrupados em quatro categorias de acordo com sua composição química. Os Lignossulfonatos Modificadores (LS), que incorporam o ar e retardam a pega do cimento. Sendo conhecidos com aditivos de primeira geração são utilizados como redutores de água, onde em alguns casos são utilizados como superplastificantes.

Os superplastificantes à base de ácidos sulfônicos de naftaleno formaldeído e melamina formaldeído promovem a dispersão das partículas finas principalmente por meio de repulsão eletrostática, mas causam também a diminuição da tensão superficial do meio aquoso, e, por consequência, diminuição da viscosidade da pasta, podendo colaborar para a segregação. Naftaleno Sulfonato ou Naftaleno (NS), não incorporam ar e não interferem no tempo de pega de forma considerável no cimento. São conhecidos como aditivos de segunda geração, permitindo a redução de água em até $\frac{1}{4}$ da quantidade necessária para a mistura.

Os Sulfonatos ou Melaminas (MS) apresentam uma tendência a retardar a pega e incorporar uma pequena quantidade de ar no concreto. Também são conhecidos como aditivos de segunda geração e têm as mesmas propriedades de uso do Naftaleno Sulfonato ou Naftaleno.

Os aditivos mais utilizados para a produção de concreto autoadensável são a base de Policarboxilatos (PC), pois melhoram sensivelmente a dispersão das partículas de cimento, em comparação aos aditivos de segunda e primeira geração. O superplastificante de policarboxilatos constituído de polímeros de Éter Carboxílico com largas cadeias laterais realizam a dispersão das partículas do cimento com maior eficiência do que seus antecessores, isso ocorre porque sua cadeia é ramificada, aumentando, conseqüentemente, sua área de contato superficial.

Os aditivos superplastificantes são redutores de água indispensáveis para a obtenção de concretos especiais, como o CAA e o CAD. Os policarboxilatos são os mais eficientes e os mais recomendados, pois agem principalmente por meio de repulsão estérica, não tendo influência na diminuição da viscosidade da pasta.

Os superplastificantes à base de éter policarboxílico apresentam resultados superiores em relação aos outros redutores de água, pois possibilitam:

- redução de água de até 45% da água de amassamento;
- coesão do concreto, mantendo sua trabalhabilidade;
- emprego de uma relação a/c menor que 0,30;
- minimização da exsudação;
- efeito mínimo no tempo de pega do cimento;
- grande manutenção da plasticidade;

- compatibilidade com todas as bases químicas;
- aumento das resistências à compressão iniciais e finais;
- aumento da durabilidade estrutural; e
- produção de CAA com dosagens de aditivo relativamente baixas.

A ação de um superplastificante à base de éter policarboxílico é a seguinte:

- o aditivo envolve um sistema de partículas, carregando-o com cargas de mesmo sinal, enquanto reduz também a tensão superficial da água;
- por efeito da repulsão eletrostática, o superplastificante dispersa as partículas de cimento, fazendo com que se necessite de menos água para se atingir uma dada trabalhabilidade;
- o policarboxilato possui longas cadeias laterais que aumentam o espaço físico em um sistema de partículas de cimento, resultando em uma redução de água muito superior, devido ao chamado efeito estérico;
- a trabalhabilidade é mantida, mesmo com o início do processo de hidratação do cimento (quando há a perda do efeito de repulsão eletrostática), devido ao chamado efeito estérico.

A ação de um superplastificante anterior à 3ª geração é muito similar à dos policarboxilatos, exceto no que diz respeito ao efeito estérico. Como esse efeito não existe na atuação dos superplastificantes da 1ª e da 2ª geração, com o início do processo de hidratação do cimento, o efeito de dispersão eletrostática é minimizado, fazendo com que o concreto perca trabalhabilidade e necessite de adição de água para manter a mesma trabalhabilidade. O efeito estérico dos superplastificantes de última geração aumenta o espaço físico em um sistema de partículas de cimento, em função das longas cadeias laterais desses aditivos. Essa é a maior vantagem dos superplastificante à base de éter policarboxílico, em relação aos demais.

Os policarboxilatos, também conhecidos como poliacrilatos ou aditivos de 3ª geração, são capazes de promover um efeito bastante eficiente na repulsão dos grãos de cimento.

A repulsão eletrostática consiste na defloculação das partículas de cimento e liberação da água de amassamento aprisionada por essas partículas, podendo essa água ser usada para lubrificação. A defloculação ocorre quando os compostos do aditivo, que apresentam cargas negativas, são atraídos pelas partículas de cimento de carga positiva, passando todas as partículas de cimento a ter cargas negativas, vindo a se repelirem (MEHTA e AİTCIN, 1990; AİTCIN et. al., 1994).

O outro mecanismo de ação, por repulsão estérica, ocorre quando são utilizados aditivos superplastificantes à base de éteres de policarboxilatos. Nesse caso, a repulsão é decorrente do arranjo dos átomos, entre duas moléculas de superplastificante adsorvidas em dois grãos de cimento adjacentes (AİTCIN, 2000). O impedimento do entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas do aditivo impede a aproximação das partículas de cimento (KLEIN, 2008).

Segundo TORALLES-CARBONARI (1996), a adição tardia do superplastificante melhora tanto a trabalhabilidade como proporciona uma menor redução da fluidez com o tempo, quando comparado com casos de adição imediata do superplastificante. O tempo ótimo para a adição do superplastificante, para se obter a maior trabalhabilidade é de, aproximadamente, dois minutos a partir da adição da água ao cimento, que corresponde ao início do período de dormência da hidratação do cimento sem o aditivo.

O momento de colocação e a maneira como o aditivo é adicionado à mistura é fundamental para a sua eficiência, e também para a melhoria da consistência (MENDES, 2002). O superplastificante age mais efetivamente se for adicionado alguns minutos após a colocação da água de amassamento (CHICCHIO e PAOLINI, 1999). A adição de superplastificante, parcialmente ou totalmente, na água de amassamento reduz sua eficiência, possivelmente devido à absorção pelos agregados durante a mistura (GUTIERREZ e CÁNOVAS, 1996). O retardo da adição do superplastificante em um minuto após o contato do cimento com a água de amassamento leva a uma mistura com abatimento cerca de 100% superior ao da mistura cuja colocação foi imediata (MENDES, 2002). De acordo com UCHIKAWA et al. (1995), a melhora na fluidez da pasta, ocasionada pelo retardo da adição do superplastificante é causada pela redução significativa da quantidade de aditivo adsorvido pelo C₃A.

O desempenho dos aditivos superplastificantes depende de vários fatores, além de sua natureza e quantidade, tais como: tipo, finura e consumo de cimento, teor de C_3A , C_3S , SO_3 e álcalis (COLLEPARDI et al., 1999; ACI 212.3R-91), granulometria dos agregados, relação a/c, consistência, momento de colocação na mistura, processo de mistura, condições de cura, temperatura, entre outras (MENDES, 2002).

Dentre as características do cimento que mais afetam a compatibilidade cimento-aditivo destacam-se a finura e o teor de C_3A (MENDES, 2002). Cimentos de maior finura e com elevadas quantidades de C_3A apresentam redução na fluidez e rápida perda de trabalhabilidade (AÏTCIN et al., 1994; DAL MOLIN, 1995; GUTIERRES e CÁNOVAS, 1996; ACI 212.3R-91, 2001).

Todos os tipos de cimentos melhoram sua trabalhabilidade com a utilização do aditivo superplastificante, embora a eficiência seja diferente para cada tipo de cimento devido a finura dos grãos. Quanto menor for a finura, menor será o rendimento devido a diminuição da concentração específica das moléculas absorvidas na superfície dos grãos de cimento.

Quando ocorre rápida perda da fluidez do concreto no estado fresco, mesmo com o uso de aditivos superplastificantes, pode-se encontrar a origem do problema no valor inicial da consistência, no tipo e na quantidade do superplastificante empregado, no tipo e na quantidade do cimento, no tempo de adição do superplastificante, na umidade, na temperatura, no critério de mistura e/ou a na presença de outros aditivos na mistura (KLEIN, 2008).

No caso da temperatura abaixo de $22^{\circ}C$, o aumento de dosagem de superplastificantes pode atingir 30%. O aumento da temperatura, além dos $32^{\circ}C$, conduz ao aumento da demanda de água por parte do cimento, para manter a mesma consistência, provocando o deslocamento da água livre na mistura para as partículas de cimento e diminuindo a fluidez (MALHOTRA, 1981; RONCERO e GETTU 1998).

Pode-se tentar minimizar a perda da consistência pela adição de maiores dosagens de superplastificantes, desde que cuidados com a superdosagem sejam tomados, pois esta pode causar retardamento elevado de pega ou segregação. A adição dos superplastificantes em

diferentes intervalos de tempo e a adição do superplastificante imediatamente antes do lançamento do concreto, ou incluindo algum tipo de retardador na sua formulação, também pode auxiliar na redução da perda de fluidez com o tempo (RAMACHANDRAN, 1989; TORALLES-CARBONARI et. al., 2006). Tais procedimentos podem trazer problemas como: danos ao caminhão betoneira por transportar concretos com baixa relação água/cimento antes da adição do superplastificante e a adição descontínua ou atrasada do superplastificante pode causar variações na trabalhabilidade, dificultando o controle da consistência do concreto e do tempo de colocação (KLEIN, 2008).

Normalmente, a dosagem de superplastificantes utilizada em CAD varia entre 0,5 e 2,5% do teor de sólidos do aditivo em relação à massa de cimento, sendo que a parte sólida do aditivo é geralmente em torno de 40% da solução (MEHTA e AİTCIN, 1990; AİTCIN, 2000). Isso corresponde à faixa usualmente empregada de 1 a 4% de solução de aditivo (sólidos mais água), em relação à massa de cimento (MENDES, 2002). Como o aditivo se apresenta usualmente na forma de solução, a água nela presente deve ser considerada e descontada da água de amassamento.

Um aspecto importante da utilização de aditivos é a quantidade a ser adicionada aos concretos, argamassas e pastas. Sabe-se que a viscosidade da pasta de cimento diminui com o aumento da quantidade de superplastificante, o que ocorre até um determinado ponto, quando mesmo aumentando-se a dosagem do superplastificante, não há uma redução significativa na viscosidade. Esse teor ótimo de superplastificante é chamado ponto de saturação, que é quando se obtém a dispersão máxima das partículas de cimento. Doses maiores de aditivo podem causar efeitos negativos como atraso na pega, segregação e aumento do custo do concreto (AİTCIN et. al. 1994; RONCERO e GETTU, 1998).

O ponto de saturação varia de um cimento para outro quando usado o mesmo superplastificante e, da mesma forma, varia de um superplastificante para o outro quando usado o mesmo tipo de cimento. Portanto, para cada combinação cimento-superplastificante, há uma dosagem ótima de superplastificante (KLEIN, 2008).

Para que esses efeitos provocados pela adição do superplastificante sejam satisfatórios, deve ser feito um estudo prévio de compatibilidade e uma adequada caracterização dos materiais empregados (RONCERO, 2002).

A caracterização do aditivo superplastificante é importante antes de sua aplicação em concreto. Os superplastificantes interagem com o C_3A , que é o primeiro componente do cimento a hidratar-se, e sua reação é controlada pelo sulfato de cálcio, produto adicionado ao clínquer para controlar o tempo de pega do cimento. Certa quantidade de aditivo é necessária para que, com reduzida relação água-cimento, a mistura adquira a trabalhabilidade desejada. No entanto, é imprescindível que o superplastificante não seja totalmente fixado pelo C_3A . Se a fixação ocorrer é porque os íons sulfatos não foram liberados a tempo de reagirem com o C_3A (NEVILLE, 1997).

Um importante passo para a obtenção da dosagem do CAA está na determinação da dosagem do superplastificante, em relação à massa de cimento (p/c). Alguns estudos recomendam a sua determinação em pastas a fim de se determinar a dosagem ótima de saturação do superplastificante a ser utilizada no concreto, ou seja, o teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez, pois, acima do qual alguns aspectos negativos podem ocorrer, tais como: segregação e/ou exsudação, fluidez insuficiente para a obtenção do CAA, perda de trabalhabilidade, dentre outros (CAVALCANTI, 2006).

2.3.4.2 Compatibilidade Cimento-Adição-Aditivo

Em geral, a quantidade de superplastificante a ser incluída numa mistura de concreto é determinada experimentalmente por intermédio de ensaios em pastas (cimento, água e superplastificante), realizados com o objetivo de determinar a quantidade de superplastificante responsável pela obtenção de uma fluidez máxima da pasta para uma dada relação água/aglomerante. A variável, neste caso, é a relação superplastificante/cimento, que pode ser determinada por meio de ensaios simples e práticos, como os do cone de Marsh e do miniabatimento de Kantro (CAMÕES, 2005).

Contudo, quando se pretende incluir elevadas percentagens de adições minerais, a ação de dispersão e defloculação induzida pelo superplastificante não atua apenas nas partículas

de cimento, mas também nas adições minerais. Portanto, a dosagem de superplastificante deve ser estabelecida em função da quantidade de aglomerante (cimento + adições).

Nesse contexto, CAMÕES (2005) elaborou um programa experimental com o objetivo de confirmar a atuação dos superplastificantes também nas adições minerais. Nesse programa, foram produzidas várias pastas constituídas por cimento, diferentes dosagens de superplastificante, com quantidades distintas de substituição de cimento por cinzas volantes ou fíler calcário, mas mantendo constante a relação água/aglomerante. Essas pastas foram submetidas ao ensaio do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro. O efeito do tipo de superplastificante foi também avaliado, recorrendo à utilização de dois tipos diferentes: um, à base de copolímeros de última geração, e o outro, à base de naftaleno sulfonado.

CAMÕES (2005), pelo programa experimental realizado, concluiu que os pontos de saturação dos superplastificante nas misturas produzidas puderam ser determinados tanto pelos gráficos elaborados com os resultados dos ensaios do funil de Marsh, como os dos ensaios do minicone de Kantro. Comparando os resultados, CAMÕES (2005) verificou que, em ambos, o ponto de saturação é coincidente. No entanto, os resultados obtidos com o funil de Marsh pareceram ser mais consistentes e mais fáceis de interpretar.

Esse programa experimental também confirmou que a inclusão de adições afetou o comportamento reológico das pastas e que a dosagem ótima de superplastificante deve ser determinada considerando a sua presença.

Além disso, a perda de fluidez ao longo do tempo das pastas diminuiu substancialmente com a presença de adições minerais (cinzas volantes ou fíler calcário). Quanto maior foi a quantidade de cimento substituído por cinzas volantes ou fíler calcário, menor foi a perda de fluidez ao longo do tempo verificada.

SOUSA FILHO (2012) estudou os pontos de saturação de aditivos superplastificantes em concretos e pastas e concluiu que as divergências entre os resultados dos ensaios de fluidez em pastas e em concretos podem ter origem na ausência de adição mineral nas pastas ensaiadas, enquanto os concretos foram produzidos com seu emprego. Torna-se importante determinar os pontos de saturação do aditivo, por meio de elaboração de

gráficos de dosagens do superplastificante versus espalhamentos, obtidos através de repetidos ensaios de fluidez (*slump flow*) realizados com os concretos, produzidos com o mesmo traço, mas com diferentes dosagens de aditivo, uma vez que podem ocorrer divergências entre os resultados desses ensaios com os realizados com as pastas (SOUSA FILHO, 2012).

2.3.5. Água

A quantidade de água a ser utilizada em pastas, argamassas ou concretos é definida a partir da relação *a/c*. Quanto maior a quantidade de água no concreto, menor é a tensão limite de escoamento, aumentando sua deformabilidade e diminuindo a viscosidade da mistura. Um elevado teor de água pode também provocar segregação. Para garantir a grande fluidez do CAA, sem afetar negativamente as suas propriedades, parte da água pode ser substituída pelo aditivo superplastificante (CAVALCANTI, 2006).

A qualidade da água de amassamento utilizada é de fundamental importância para a produção de concretos de adequado desempenho, pois a presença de impurezas pode ser responsável por efeitos negativos na resistência mecânica do concreto, por causar manchas na superfície deste material ou até mesmo provocar corrosão das armaduras (KLEIN, 2008).

Dessa forma, a água de amassamento não deve conter matéria orgânica indesejável nem substâncias inorgânicas em teores excessivos. Em geral, diz-se que a água de amassamento deve ser boa para beber, mesmo sabendo-se que, em muitos casos, algumas águas não adequadas para beber podem ser utilizadas de forma satisfatória para o preparo de concretos, desde que apresentem pH entre 6,0 e 8,0, sem serem salobras (NEVILLE, 1997).

Água potável não é sinônimo de água adequada para a produção de concreto, pois, em algumas regiões áridas, essa água pode ser salobra, contendo um teor muito alto de cloretos. Raramente, a água potável contém teores de sais inorgânicos acima de 2.000 ppm (0,2% em peso). Geralmente, esse valor fica abaixo de 1.000 ppm (METHA e MONTEIRO, 1994), sendo essa água adequada para a produção de concreto. Águas ligeiramente ácidas, com pH 6,0, apesar de inadequadas para o consumo, podem ser utilizadas para a produção de concreto (SUGAMOSTO, 2007).

A água destinada ao amassamento do concreto será aquela isenta de teores prejudiciais de substâncias estranhas, tais como óleos, ácidos, sais, matéria orgânica e outras que possam interferir nas reações de hidratação do cimento e afetar a coloração final do concreto (SUGAMOSTO, 2007).

De acordo com a norma NBR 12655:1996 a água destinada ao amassamento do concreto deve ser guardada em caixas estanques e tampadas, de modo a evitar a contaminação por substâncias estranhas.

Na água de abastecimento público, água tratada, os sais de cálcio e magnésio aparecem na ordem de 400 ppm (0,04%), e, por serem pouco solúveis, não apresentam problema ao concreto (KLOSS, 1996).

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados os materiais, a produção, a caracterização e os métodos aplicados nesta pesquisa.

3.1 Materiais

Para todos os traços de concreto produzidos nesta pesquisa, o tipo de cimento utilizado foi o Portland composto com pozolana, CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus.

A água proveniente de poços e reservatórios da UFAM foi utilizada na produção de todos os concretos desta pesquisa. Suas características atendem às recomendações da NBR 6118:2007 e da NBR 15900-3:2009.

Os demais materiais componentes utilizados foram:

- a) o agregado miúdo utilizado foi a areia proveniente do rio Manacapuru, no município de Manacapuru, fornecida pela empresa Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda;
- b) o agregado graúdo utilizado foi proveniente da região de Moura, no município de Barcelos, no estado do Amazonas, fornecido pela empresa Ita Mineração;
- c) as adições minerais utilizadas foram o resíduo de vidro obtido na indústria da empresa Vidro Rios Ltda., situada no distrito industrial de Manaus, e o Silmix, sílica ativa em pó, produzida pela Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda.; e
- d) o aditivo superplastificante utilizado foi o MC-PowerFlow 1102, produzido pela MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda..

Para produção de CAD e CAA simultaneamente, utilizou-se o traço adotado por SOUSA FILHO (2012), com consumo de cimento por metro cúbico de 486 kg/m³ e materiais componentes nas seguintes proporções: 1,000 (cimento) : 0,086 (adição) : 1,486 (areia) : 2,165 (brita) : 0,282 (água). O uso desse traço justifica-se pelos materiais empregados na presente pesquisa, que fazem parte do mesmo lote de fabricação dos

materiais utilizados por SOUSA FILHO (2012). Além disso, o referido pesquisador obteve com êxito concretos autoadensáveis e de alto desempenho utilizando esse traço.

As quantidades dos materiais componentes empregados na produção dos concretos são apresentadas na tabela 3.1. Os concretos denominados de referência foram produzidos com adição de sílica ativa, enquanto nos RVM foi utilizado o resíduo de vidro moído como adição mineral.

Tabela 3.1 - Quadro da quantidades de materiais componentes dos concretos

Discriminação dos Materiais Empregados	Consumos (kg/m ³ de concreto)	
	Concreto Referência	Concreto RVM
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	485,03	486,00
Adição Mineral (sílica ativa ou RVM)	41,71	41,80
Areia: Rio Manacapuru	720,75	722,20
Brita: Ita Mineração	1.050,09	1.052,19
Água	136,78	137,05

3.2 Métodos

3.2.1 Métodos dos Ensaios de Caracterização dos Agregados

Os métodos dos ensaios realizados nesta pesquisa para caracterização dos agregados miúdos e graúdos encontram-se nas tabelas 3.2 e 3.3, respectivamente.

Tabela 3.2 - Métodos dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos

Ensaio	Método de ensaio
Massa específica	NBR NM 52:2009
Massa unitária	NBR NM 45:2006
Teor de material pulverulento	NBR NM 46:2003
Impurezas orgânicas	NBR NM 49:2001
Composição granulométrica	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	NBR NM 248:2003
Diâmetro máximo	NBR NM 248:2003
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	NBR 7218:2010

Tabela 3.3 - Métodos dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos

Ensaio	Método de ensaio
Massa específica	NBR NM 53:2009
Massa unitária	NBR NM 45:2006
Absorção de água	NBR NM 53:2009
Composição granulométrica	NBR NM 248:2003
Módulo de finura	NBR NM 248:2003
Diâmetro máximo	NBR NM 248:2003

3.2.2 Métodos de Coleta, Preparo e Caracterização das Adições Minerais

São apresentados, a seguir, os métodos empregados para coleta, preparo e realização de ensaios de caracterização das adições minerais.

a) Coleta do Resíduo de Vidro Industrial

O resíduo de vidro proveniente do processo de desbastamento do vidro foi utilizado nesta pesquisa como adição mineral. Esse material foi coletado na indústria da empresa Vidro Rios Ltda., situada no polo industrial de Manaus.

A máquina usada para corte e polimento do vidro da referida empresa é mostrada na figura 3.1(a). No processo de desbastamento do vidro, a utilização da água é essencial. Durante o corte e polimento de placas de vidro do tipo soda e cal, o pó gerado é despejado, juntamente com a água utilizada no processo, em depósitos de sedimentação. Os referidos depósitos são conhecidos como câmaras d'água. Semanalmente, é removido todo o resíduo sedimentado nas câmaras d'água, figura 3.1(b). Esse material coletado é então depositado em aterros controlados da cidade de Manaus.

Segundo PAIVA (2009), cerca de 250 kg/mês de pó de vidro são removidos das câmaras d'água da empresa Vidro Rios Ltda., sendo que essa empresa vem trabalhando com cerca de 30% de sua capacidade. Devido à possibilidade viável de reaproveitar esse tipo de resíduo oriundo do polimento e corte de placas planas de vidro, do tipo soda e cal, optou-se por utilizá-lo como material fino no concreto autoadensável e de alto desempenho. Entretanto, há a necessidade de se reduzir ainda mais o tamanho das partículas desse material, obtendo dimensões iguais ou inferiores às partículas do cimento Portland, tendo em vista a finalidade de sua aplicação em concretos.

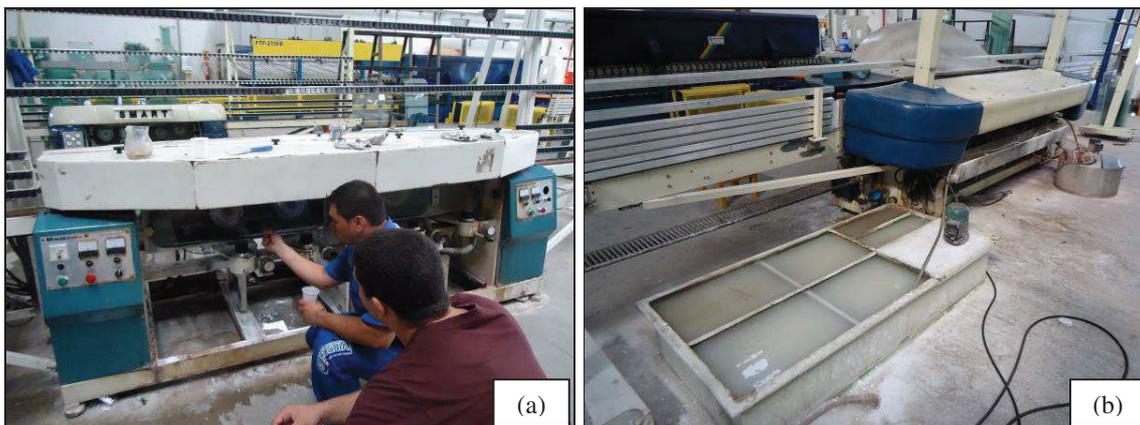


Figura 3.1 – (a) Equipamento de desbastamento da empresa Vidro Rios Ltda. e (b) câmaras d'água em série

b) Preparo do Resíduo de Vidro Moído - RVM

O resíduo de vidro coletado, após secagem, foi submetido à máquina extrusora do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas, com a finalidade de eliminar os torrões formados, conforme figura 3.2(a). Após o processo de extrusão, utilizou-se uma peneira com abertura entre as malhas de 0,60mm (peneira #30), figura 3.2(b), para separar o material a ser moído no moinho de bolas do Laboratório de Pavimentação da Universidade Federal do Amazonas.

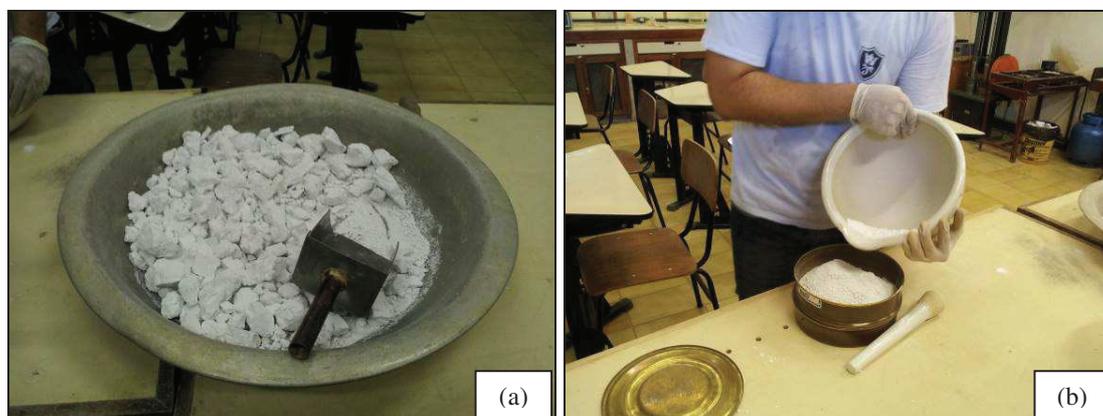


Figura 3.2 – (a) Resíduo de vidro antes da extrusão e (b) peneiramento do resíduo após extrusão

Após separar o material passante na peneira #30, iniciou-se o processo de moagem no moinho de bolas, de acordo com a figura 3.3. Foram utilizadas três tipos diferentes de esferas de porcelana, com dimensões de 15, 30 e 50mm. O moinho operou com rotação em torno de 150 rpm.

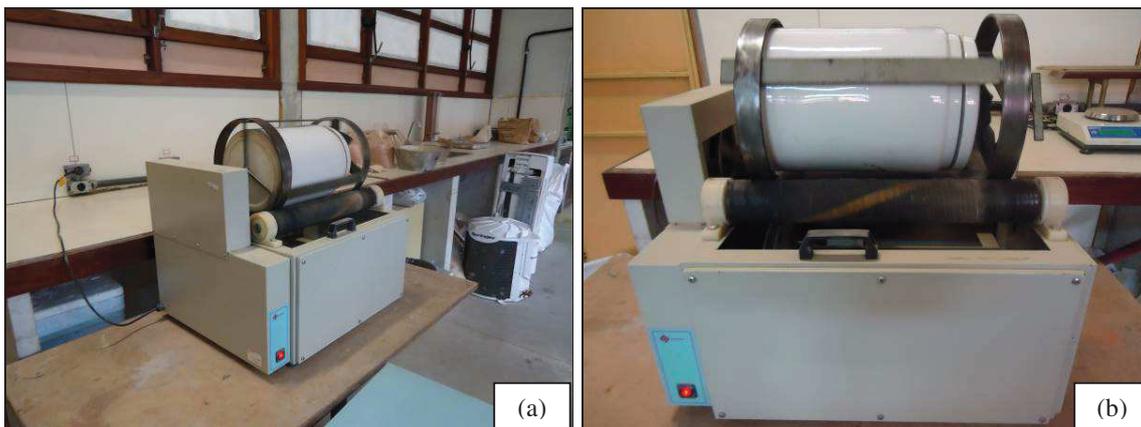


Figura 3.3 – (a) e (b) Moagem do resíduo de vidro no moinho de bolas

O material foi disposto no jarro de moagem de modo a cobrir ligeiramente as bolas. A figura 3.4 apresenta a forma de disposição do produto no moinho.

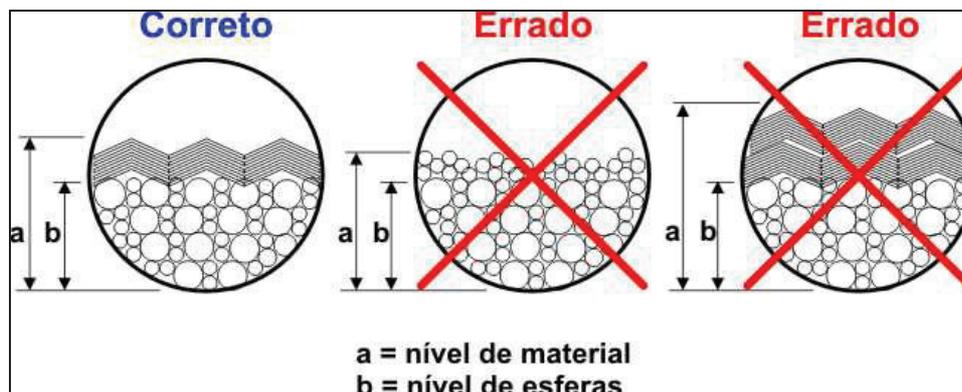


Figura 3.4 – Forma correta de colocação do material no moinho de bolas (Fonte: MENEGON, 1996)

Nesta pesquisa, durante o processo de moagem, as esferas de porcelana ocuparam metade do volume do jarro de moagem, e os espaços entre elas foram preenchidos com 2100g de resíduo de vidro. A figura 3.5 mostra as esferas, o jarro de moagem e o resíduo de vidro utilizados.

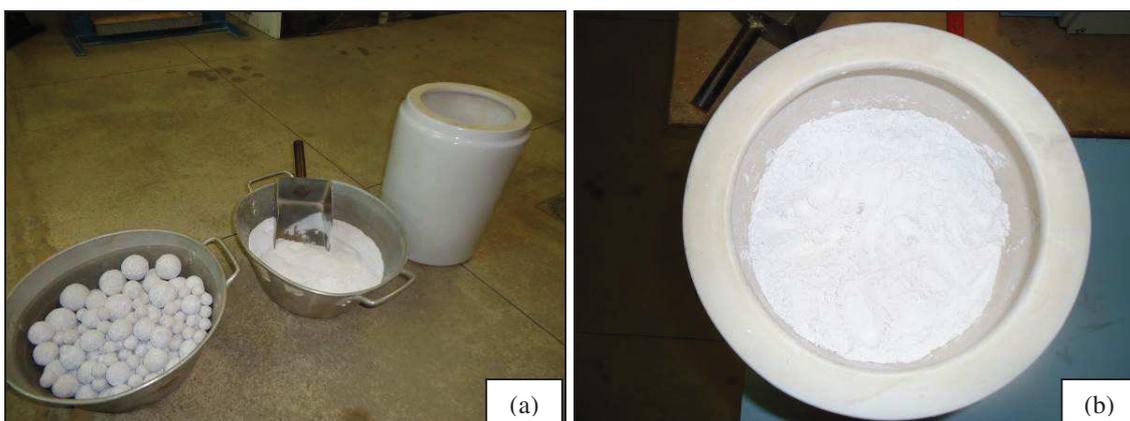


Figura 3.5 – (a) Esferas de porcelana, jarro de moagem e (b) resíduo de vidro em processo de moagem

A moagem foi realizada em períodos de 1, 2, 4, 8, 16, 24 e 32 horas. Em cada um desses períodos, foram retiradas amostras para análise da curva granulométrica, a fim de descobrir o tempo com melhor rendimento de moagem do material. Esse procedimento adotado nesta pesquisa foi denominado como estudo de moagem do resíduo de vidro. Após o processo de moagem, no tempo de melhor rendimento, o resíduo de vidro passou a ser denominado como resíduo de vidro moído - RVM.

c) Ensaio de Granulometria por Difração a Laser

As curvas granulométricas para as adições minerais foram obtidas através da granulometria por difração a laser, que consiste na medição das distribuições do tamanho das partículas através da variação angular da intensidade de luz difundida, à medida que um feixe de laser interage com partículas dispersas de uma amostra.

A adição mineral em meio dispersante circulou no aparelho a uma frequência de 2500 rpm. Com isso, foram obtidas, através de um *software* do próprio equipamento, as curvas granulométricas, informando também o diâmetro médio das partículas (D_{50}) e os diâmetros D_{10} e D_{90} do material passante.

O equipamento utilizado para a obtenção das curvas granulométricas das adições minerais foi o granulômetro a laser - MasterSizer 2000 - do Laboratório de Estruturas da COPPE/UFRJ, como apresenta a figura 3.6.



Figuras 3.6 – Granulômetro por difração laser - Malvern MasterSizer 2000

d) Ensaio de Determinação da Composição Química

As análises dos compostos inorgânicos foram realizadas em um espectrômetro de fluorescência de raio X, marca PANalytical e modelo Epsilon3-XL, do Laboratório de Físico-Química da UFAM (figura 3.7).



Figuras 3.7 – Espectrômetro de fluorescência de raio X, PANalytical, modelo Epsilon3-XL

Parte-se do princípio fundamental de que todo elemento possui uma única estrutura atômica, o que permite dizer que, também, só possuirá um pico no seu espectro de raios X. Assim, através da excitação de uma fonte de raios X, é possível fazer a análise química da amostra.

O raio incidente do equipamento excita o elétron que está em uma camada inferior, causando a retirada do elétron e ao mesmo tempo criando um espaço vazio, onde um elétron de uma camada exterior preenche o local, e a diferença entre as energias das

camadas exteriores e superiores podem ser emitidas na forma de raios X. A energia de raios emitidos da amostra é medida por um espectrômetro de energia dispersiva. Com isso, diferentes energias entre as camadas de onde foram emitidos os raios permitem mensurar a composição dos elementos na amostra.

e) Ensaio de Perda ao Fogo

Foi realizado também o ensaio de perda ao fogo como forma de complementar a composição química. Para a determinação da quantidade de perda ao fogo, foi pesado cerca de $1,00 \pm 0,0001$ g e adicionado a um cadinho de porcelana, levado a uma mufla à temperatura de 950 ± 50 °C. Esse ensaio determina a massa perdida quando a amostra atinge uma temperatura de 950 ± 50 °C, para tanto, foi empregada uma mufla com uma taxa de aquecimento de 10 °C/min.

Após a retirada do material da mufla, a amostra foi colocada em um dessecador para esfriar sem ganhar umidade. Dessa forma, foi possível calcular a porcentagem de perda ao fogo.

f) Ensaio de Determinação da Massa Específica

Para determinação da massa específica foi utilizado o Picnômetro a gás Hélio – AccuPyc 1340 Micrometrics do Laboratório de Estruturas – LabEst da COPPE/UFRJ, que permite, através da injeção de gás Hélio em uma câmara com a amostra, calcular o volume através da variação de pressão.

Para realização desse ensaio é necessário ter o material em condição seca para que o aparelho interprete os dados corretamente. Após a pesagem do material seco em uma balança com 0,0001g de precisão, insere-se o mesmo na câmara do picnômetro para determinação do seu volume e posterior cálculo da massa específica pelo próprio *software* do equipamento. A figura 3.8 mostra o aparelho utilizado para a realização desse ensaio.



Figuras 3.8 – Picnômetro a gás hélio – AccuPyc 1340 - Micromeritics

g) Ensaio de Determinação da Atividade Pozolânica

A atividade pozolânica foi determinada pelo método Chapelle modificado (NBR 15895, 2010).

Nesse ensaio, de acordo com SANTOS (2006), a pozolanicidade de um material é determinada pela quantidade de cal fixada pela pozolana, por meio da comparação de uma mistura de pozolana com óxido de cálcio, e outra sem pozolana. As misturas são mantidas à ebulição (90°C), durante 16 horas, em equipamento padronizado para o ensaio e, em seguida, determinada quantidade de óxido de cálcio que não reagiu. O resultado é expresso em mg de óxido de cálcio por grama e, quanto maior consumo de óxido de cálcio, maior a pozolanicidade do material.

O ensaio de Chapelle modificado foi realizado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT.

h) Ensaio de Determinação da Reatividade Álcali-Agregado

A reatividade álcali-agregado foi determinada pelo método preconizado pela NBR 15577-4:2008. Ele é indicado para avaliar a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio, através da monitorização das expansões dimensionais de barras de argamassa, utilizando-se no ensaio um cimento padrão comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado.

O ensaio de determinação da reatividade álcali-agregado pelo método acelerado (NBR 15577-4:2008) foi realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP. Foram enviadas para realização desse ensaio amostras de resíduo de vidro moído – RVM e de resíduo não moído.

A tabela 3.4 apresenta a composição dos materiais utilizados para a preparação de três barras de argamassa segundo a NBR 15577-4:2008. Como as amostras eram finas e não atenderam a granulometria recomendada pela norma, foi necessário alterar o traço para cada tipo de amostra. Para o RVM, foi utilizado o traço 1:2,25:0,97 (cimento : agregado : água) e, para o resíduo de vidro não moído, o traço usado foi 1:2,25:0,89 (cimento : agregado : água).

Tabela 3.4 – Composição dos materiais para ensaio de determinação da reatividade álcali-agregado

Abertura nominal das peneiras (mm)	Massa (g)	
Agregado	4,8 – 2,4	99,0
	2,4 – 1,2	247,5
	1,2 – 0,6	247,5
	0,6 – 0,3	247,5
	0,3 – 0,15	148,5
Cimento	440,0	
Água destilada (a/c = 0,47)	206,8	

Fonte: NBR 15577-4:2008

i) Ensaio de Determinação da Mitigação da Reatividade Álcali-Agregado

A NBR 15577-5:2008 é indicada para avaliar a eficiência de cimentos com adições de pozolanas ou escórias de alto-forno em inibir a expansão de agregados classificados como potencialmente reativos. A comprovação da mitigação da reação é obtida quando a expansão das barras de argamassa for menor que 0,10% aos 16 dias (14 dias de cura em solução alcalina). Para valores de expansão iguais ou superiores a 0,10%, são necessários novos ensaios de forma a atender ao limite estabelecido, podendo optar por trocar o cimento empregado ou incorporar ou aumentar os teores de materiais inibidores da reação álcali-agregado.

Neste trabalho, apenas o resíduo de vidro moído - RVM foi analisado quanto à mitigação da reatividade álcali-agregado pelo método acelerado. Esse resíduo foi

combinado com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus. Esse ensaio foi realizado pela Associação Brasileira de Cimento Portland – ABCP.

j) Ensaio de Microscopia Óptica

No estudo da microscopia utilizou-se o estereoscópio LEICA EZ4 da UFAM, como mostra a figura 3.9. Esse equipamento oferece ampliações de até 56x com boa qualidade.



Figuras 3.9 – Estereoscópio LEICA EZ4

3.2.3 Métodos dos Ensaios de Caracterização do Cimento

a) Ensaio de Granulometria por Difração a Laser, Composição Química, Perda ao Fogo e Determinação de Massa Específica

Para a caracterização granulométrica do cimento CP II-Z-32 – Nassau, determinação da composição química, perda ao fogo e massa específica, foram seguidas, respectivamente, as mesmas metodologias usadas para as adições minerais, conforme os itens “c”, “d”, “e” e “f” da seção 3.2.2.

3.2.4 Método de Ensaio para Determinação da Dosagem Ótima do Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow-1102 em Pastas e em Concretos

a) Métodos dos Ensaios em Pastas

Os ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro foram utilizados para determinar o ponto de saturação do aditivo superplastificante e para avaliar sua

compatibilidade com o cimento CP II-Z-32 – Nassau e com adições minerais adotadas neste trabalho. Esses ensaios foram realizados também para determinação da dosagem ótima do aditivo superplastificante sem adições minerais. O ponto de saturação indicou a dosagem ótima do superplastificante, a partir da qual não se verificam ganhos relevantes de fluidez.

Os equipamentos usados nos ensaios de funil de Marsh e miniabatimento de Kantro são mostrados, respectivamente, nas figuras 3.10(a) e 3.10(b).

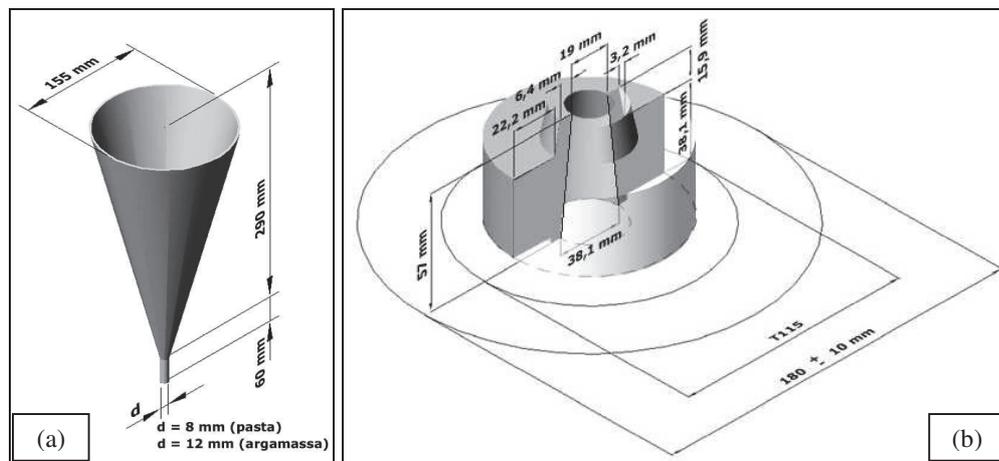


Figura 3.10 – (a) Funil de Marsh e (b) minicone de Kantro (Fonte: CAVALCANTI, 2006)

A fluidez e a viscosidade das pastas produzidas com diferentes dosagens do aditivo superplastificantes foram avaliadas pelos seguintes parâmetros:

- a) tempo (s) necessário para o escoamento de 500 ml pelo ensaio do funil de Marsh; e
- b) espalhamento (mm) da pasta pelo ensaio do miniabatimento de Kantro.

Através dos gráficos traçados com os resultados dos ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro realizados com pastas, foi possível descobrir os respectivos pontos de saturação do superplastificante com a adição de sílica ativa em pó Silmix, com a adição de RVM e sem adição mineral.

Foram preparadas pastas com os seguintes materiais componentes:

- cimento, silmix (sílica ativa em pó), aditivo superplastificante e água;

- cimento, RVM, aditivo superplastificante e água; e
- cimento, aditivo superplastificante e água.

A quantidade de cimento foi prefixada em 2.581 g e a de água em 726,25 g, mantendo-se, dessa forma, constante a relação água/cimento em 0,282. A quantidade de adição mineral (Sílica Ativa ou RVM) empregada nas pastas foi mantida constante em 223,16 g, e sua dosagem em 0,086, ou seja, a mesma proporção utilizada para a produção dos concretos. Para o aditivo superplastificante, foram adotados teores variados desse material.

Uma vez que o comportamento reológico das pastas depende do tipo, sequência e tempo de amassamento, esses aspectos foram mantidos constantes ao longo de todo o programa experimental. Para produção das pastas, foi utilizado o misturador planetário do Laboratório de Dosagens da UFAM, figura 3.11(a), dotado de duas velocidades, uma lenta, com 60 rpm, e outra rápida, com 120 rpm. A seguinte sequência de mistura foi adotada: primeiro, durante 2 minutos, à velocidade lenta, foi misturado o cimento e a adição mineral, quando houver, com 4/5 da água e metade da dosagem prevista de superplastificante, e, em seguida, foi acrescentado o restante da água e do superplastificante, sendo a pasta misturada por mais 3 minutos, à velocidade rápida, conforme ilustra a figura 3.11(b). A quantidade de água presente no superplastificante foi devidamente tida em consideração no cálculo da composição das pastas.

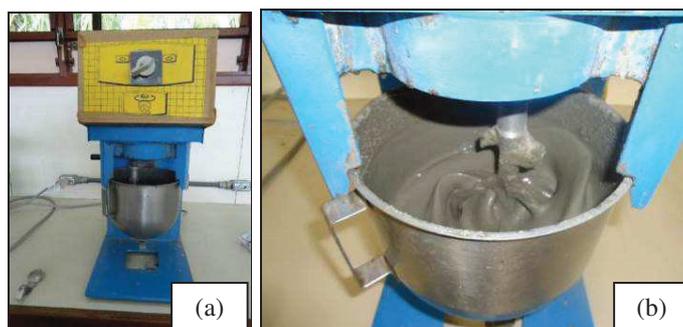


Figura 3.11 – (a) Misturador planetário e (b) preparo das pastas

Após a mistura, as pastas passaram pela peneira ABNT 2,4 mm ,figura 3.12(a), segundo a NBR 7682:1983, relativa à calda de cimento para injeção e determinação do índice de fluidez, e foram acondicionadas em bacias plásticas por 60 minutos, figura 3.12(b), antes da realização dos ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro.



Figura 3.12 – (a) Peneiramento das pastas e (b) descanso por 60 minutos

O ensaio do funil de Marsh, ilustrado pelas figuras 3.13(a) e (b), consiste em preencher o funil com 1.250 ml de pasta e, em seguida, registrar o tempo necessário para o escoamento de 500 ml. Quanto menor tempo de escoamento, maior a fluidez das pastas.



Figura 3.13 – (a) e (b) Ensaio do funil de Marsh

No ensaio do miniabatimento de Kantro, o molde em tronco-cônico foi preenchido completamente com a pasta a ensaiar, figura 3.14(a). Após erguer o molde, conforme figura 3.14 (b), foi medido o espalhamento da pasta, figura 3.14(c), em dois diâmetros aproximadamente perpendiculares. O resultado deste ensaio é a média dos espalhamentos medidos. Quanto maior o espalhamento, maior a fluidez das pastas.

A verificação da habilidade de espalhamento da pasta pode ser também verificada aproveitando o mesmo ensaio do miniabatimento de Kantro e mensurando o tempo que a pasta leva para atingir um diâmetro de 11,5 cm, denominado T_{115} . Na presente pesquisa, o ensaio do T_{115} foi adaptado, em função desse tempo atingir valores muito baixos, menores

que 0,5 s, dificultando o registro dos resultados. Essa adaptação consistiu em relacionar o espalhamento de cada pasta com o tempo, registrando o espraçamento pela média aritmética de duas medidas perpendiculares, quando transcorrido 1 minuto do início do ensaio e mantendo-se o registro do espalhamento médio máximo. Esse ensaio também foi realizado para todas as pastas produzidas. As pastas com maior diferença entre o espalhamento médio máximo e espalhamento médio atingido com 1 minuto do início do ensaio foram consideradas mais viscosas e, conseqüentemente, as melhores.



Figura 3.14 – (a) Preenchimento do minicone de Kanro com a pasta a ensaiar

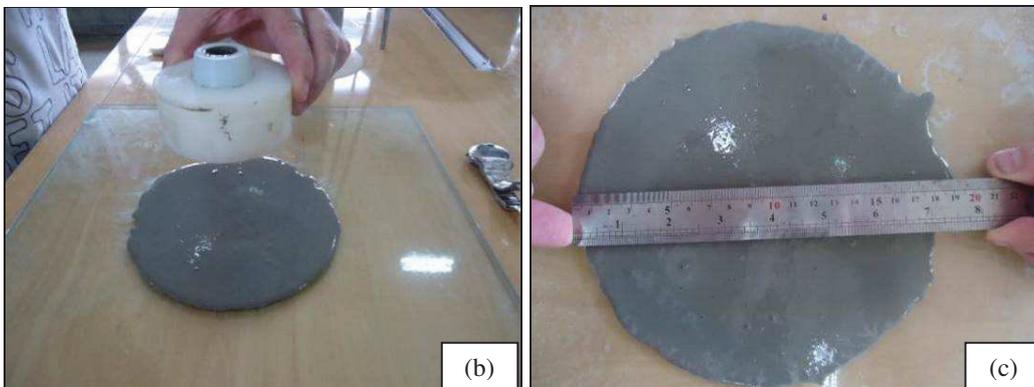


Figura 3.14 – (b) Ergue-se o minicone de Kanro e (c) mede-se o espalhamento da pasta

Os gráficos dos tempos de escoamento determinados pelos ensaios do funil de Marsh versus as relações aditivo/cimento em peso e os gráficos dos espalhamentos determinados pelos ensaios do miniabatimento de Kanro versus as mesmas relações foram utilizados para definir os pontos de saturação do superplastificante para cada uma das adições minerais ensaiadas. Do mesmo modo, foi definido o ponto de saturação do superplastificante nas pastas sem adições minerais.

Os pontos de saturação, assim determinados, indicaram as relações aditivo/cimento, para as quais um incremento na dosagem do superplastificante não provocava nenhuma melhora significativa na fluidez da pasta, ou seja, indicaram as dosagens ótimas do superplastificante para as pastas com adições minerais e sem adições minerais.

b) Métodos de Ensaios em Concretos

O ponto de saturação do aditivo superplastificante também foi verificado em concretos. Foram confeccionados concretos com adição de sílica ativa em pó Silmix, denominados concretos de referência, e com adição do RVM.

Os resultados de fluidez e viscosidade foram reavaliados em concretos frescos, por meio da determinação das seguintes variáveis dependentes:

- a) espalhamento (mm) do concreto fresco obtido pelo ensaio *slump flow test*, com o qual foi possível determinar a respectiva classificação do concreto, segundo sua fluidez, conforme a NBR 15823-1:2010; e
- b) tempo (s) do concreto fresco obtido pelo ensaio do tempo de escoamento (T_{500}), com o qual foi possível determinar a respectiva classificação do concreto, segundo sua viscosidade, conforme a NBR 15823-1:2010.

Para confecção dos traços de referência, foram selecionados os materiais componentes apresentados na tabela 3.5. Os concretos REF-1 e REF-2 foram produzidos, respectivamente, com uma relação entre a massa da parte sólida do aditivo superplastificante e a do cimento (sp/c) em 1,0% e 1,10% e com uma relação entre a massa do aditivo superplastificante (parte líquida + sólida) e a do cimento (p/c) em 3,33% e 3,67%. O concreto REF-3 foi produzido com uma relação sp/c em 1,20% e com uma relação p/c em 4,0%. Já o concreto REF-4 foi produzido com uma relação sp/c em 1,4% e com uma relação p/c em 4,67%.

Tabela 3.5 - Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços de referência

Discriminação dos Materiais Empregados	Consumos (kg/m ³ de concreto)			
	REF-1	REF-2	REF-3	REF-4
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	485,03	485,03	485,03	485,03
Adição mineral: Silmix – sílica ativa em pó	41,71	41,71	41,71	41,71
Areia: Rio Manacapuru	720,75	720,75	720,75	720,75
Brita: Ita Mineração	1.050,09	1.050,09	1.050,09	1.050,09
Água (*)	a=136,78	a=136,78	a=136,78	a=136,78
Aditivo SP: MC-PowerFlow 1102 (**)	p=16,18	p=17,84	p=19,44	p=22,70

(*) a = peso total (considerando a parte líquida do SP)

(**) p = peso total do SP (partes sólida e líquida)

Para confecção dos traços com adição de RVM, foram selecionados os materiais componentes apresentados na tabela 3.6. Os concretos RVM-1, RVM-2 e RVM-3 foram produzidos, respectivamente, com uma relação sp/c em 0,50%, 0,70% e 1,0% e com uma relação p/c em 1,67%, 2,33% e 3,33%. O concreto RVM-4 foi produzido com uma relação sp/c em 1,20% e com uma relação p/c em 4,0%. Já o concreto RVM-5 foi produzido com uma relação sp/c em 1,40% e com uma relação p/c em 4,67%.

Tabela 3.6 - Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços com RVM

Discriminação dos Materiais Empregados	Consumos (kg/m ³ de concreto)				
	RVM-1	RVM-2	RVM-3	RVM-4	RVM-5
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	486	486	486	486	486
Adição mineral: RVM	41,80	41,80	41,80	41,80	41,80
Areia: Rio Manacapuru	722,20	722,20	722,20	722,20	722,20
Brita: Ita Mineração	1.052,19	1.052,19	1.052,19	1.052,19	1.052,19
Água (*)	a=137,05	a=137,05	a=137,05	a=137,05	a=137,05
Aditivo SP: MC-PowerFlow 1102 (**)	p=8,12	p=11,32	p=16,18	p=19,44	p=22,70

(*) a = peso total (considerando a parte líquida do SP)

(**) p = peso total do SP (partes sólida e líquida)

De acordo com a ficha técnica do fabricante, 70% do peso total do aditivo superplastificante é água. Como todos os traços desta pesquisa foram produzidos na mesma relação a/c, a quantidade de água presente no superplastificante foi devidamente tida em consideração no cálculo da composição dos concretos.

Os gráficos dos tempos de escoamento determinados pelos ensaios de T₅₀₀ versus as relações aditivo/cimento em peso e os gráficos dos espalhamentos determinados pelos ensaios do *slump flow test* versus as mesmas relações foram utilizados para definir os pontos de saturação do superplastificante para cada uma das adições minerais ensaiadas em concreto.

Os pontos de saturação, assim determinados, indicaram as relações aditivo/cimento, para as quais um incremento na dosagem do superplastificante não provocava nenhuma melhora significativa na fluidez do concreto, ou seja, indicaram as dosagens ótimas do superplastificante para cada uma das adições minerais empregadas no concreto.

3.2.5 Métodos dos Ensaios de Caracterização dos Concretos nos Estados Fresco e Endurecido

a) Caracterização dos Concretos no Estado Fresco

A classificação, o controle e a aceitação dos concretos no estado fresco, quanto ao resultado dos ensaios, seguiram os requisitos estabelecidos pela parte 1 da NBR 15823:2010. No anexo A da NBR 15823:2010, existe um guia para o estabelecimento de requisitos do CAA, no estado fresco, em função de sua aplicação.

Os ensaios com os concretos frescos foram realizados segundo as normas apresentadas na tabela 3.7.

Tabela 3.7 – Normas empregadas na realização dos ensaios com os concretos frescos

Ensaio	Norma
Ensaio de <i>Slump Flow</i> (SF)	NBR 15823-2:2010
Ensaio T ₅₀₀ (VS)	NBR 15823-2:2010
Método da caixa L (PL)	NBR 15823-4:2010
Método do funil V (VF)	NBR 15823-5:2010
Método da Coluna de Segregação (SR)	NBR 15823-6:2010

I. Ensaio *Slump Flow Test* e T₅₀₀

As figuras 3.15(a) e 3.15(b) apresentam, respectivamente, os equipamentos utilizados nos ensaios de *Slump Flow* e T₅₀₀ e o ensaio de *Slump Flow* realizado em concreto com adição de RVM.

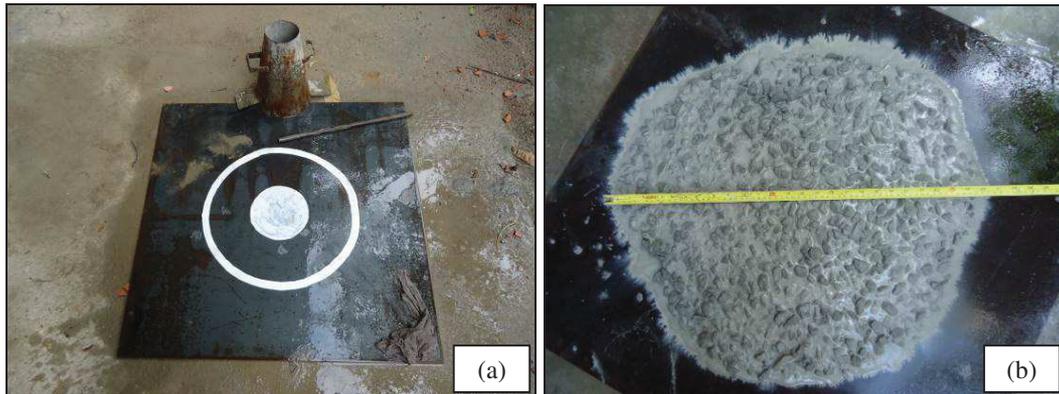


Figura 3.15 – (a) Chapa de base com o círculo de 500 mm de diâmetro para auxiliar no ensaio T_{500} e (b) ensaio de *Slump Flow* realizado com adição de RVM

II. Ensaio da Caixa L, da Coluna de Segregação e do Funil V

As figuras 3.16(a), (b) e (c) apresentam, respectivamente, os equipamentos utilizados para os ensaios da caixa L, da coluna de segregação e do funil V.

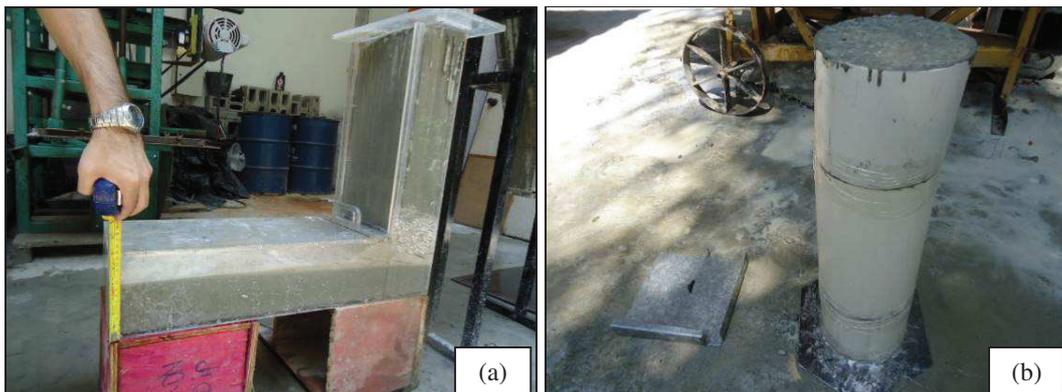


Figura 3.16 – (a) Ensaio da caixa L e (b) ensaio de coluna de segregação



Figura 3.16 – (c) Ensaio do funil V

b) Caracterização do Concretos no Estado Endurecido

Os ensaios com os concretos endurecidos foram realizados segundo as normas apresentadas na tabela 3.8.

Tabela 3.8 – Normas empregadas na realização dos ensaios com os concretos endurecidos

Ensaio	Norma
Resistências à Compressão Axial	NBR 5739:2007
Resistências à Tração por Compressão Diametral	NBR 7222:2011
Módulos Estáticos de Elasticidade à Compressão	NBR 8522:2008
Determinação da Absorção de Água por Imersão	NBR 9778:1987

Os concretos endurecidos foram ensaiados para observação das seguintes variáveis dependentes:

- resistências à compressão axial (MPa), nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias;
- resistências à tração por compressão diametral (MPa), na idade de 28 dias;
- módulos estáticos de elasticidade à compressão (GPa), na idade de 28 e 90 dias; e
- determinação da absorção de água por imersão, na idade de 90 dias.

A caracterização dos concretos no estado endurecido foi realizada na empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda., situada em Manaus. A prensa hidráulica utilizada foi a EMIC, modelo PC200CS e capacidade de 200 Ton. A figura 3.17 apresenta o referido equipamento.



Figuras 3.17 - Prensa hidráulica da empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda.

Microfotografias da superfície interna de corpos de prova seccionados, na idade de 90 dias, foram realizadas utilizando o estereoscópio LEICA EZ4 da UFAM, conforme apresentado na figura 3.18. Dessa forma, foi possível comparar a superfície interna dos concretos produzidos com adição de sílica ativa e de RVM.



Figuras 3.18 – Microscopia óptica da superfície interna dos corpos de prova

4 RESULTADOS E ANÁLISES

Neste capítulo são apresentados os resultados, bem como suas análises, tanto dos materiais empregados nesta pesquisa quanto dos concretos produzidos com estes.

4.1 Resultados e Análises dos Ensaio de Caracterização dos Materiais

Nos próximos itens são apresentados e discutidos os resultados obtidos nos ensaios de caracterização dos materiais utilizados para a produção do concreto da presente pesquisa.

4.1.1 Agregado Miúdo

Os resultados dos ensaios de caracterização física do agregado miúdo são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado miúdo

Ensaio	Unidade	Resultados 1AM	Limites da norma
Massa específica	(kg/dm ³)	2,626	-
Massa unitária	(kg/dm ³)	1,618	-
Teor de material pulverulento	(%)	0,180	3,00 e 5,00
Impurezas orgânicas	(ppm)	aprox. 300	300
Módulo de finura	-	2,272	-
Diâmetro máximo	(mm)	2,400	-
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	(%)	0,690	1,50

O agregado miúdo apresentou módulo de finura aproximadamente 2,3, ou seja, abaixo do intervalo entre 2,7 e 3,0, recomendado por AÏTCIN (2000) para obtenção de concretos com alta resistência. Entretanto, observa-se que o módulo de finura obtido é mais favorável à produção do CAA, uma vez que o valor obtido aproxima-se mais do intervalo recomendado para obtenção do CAA (< 2,10) do que do intervalo recomendado para obtenção do CAD (2,70 a 3,00), conforme comentários apresentados na revisão da literatura sobre o agregado miúdo.

Na determinação do teor de impurezas orgânicas, pelo ensaio colorimétrico, de acordo com a NBR NM 49:2001, percebeu-se que a coloração do material ensaiado apresentou intensidade de cor muito próxima à da solução padrão, indicando que o teor de impurezas orgânicas é limítrofe, em relação à referida norma.

Para os casos com coloração mais intensa que a padrão, a NBR NM 49:2001 recomenda a realização de ensaio da qualidade da areia. Essa providência não foi necessária para este experimento, considerando que a coloração obtida com a areia apresentou intensidade de cor próxima dos limites determinados da referida norma, conforme figura 4.1.



Figura 4.1 - Ensaio colorimétrico do agregado miúdo, à direita

As areias utilizadas como agregado miúdo em concretos produzidos no estado do Amazonas, geralmente, apresentam elevado teor de impurezas orgânicas e baixo módulo de finura. Segundo PERDIZ (2009), as areias oriundas de leitos de rio sofrem a influência do material orgânico proveniente da floresta alagada, em função do sistema anual de vazante e cheia dos rios. Dessa forma, as areias utilizadas em Manaus normalmente não estão de acordo com o limite imposto pela NBR NM 49:2001 e são usadas indiscriminadamente sem a realização do ensaio da qualidade da areia.

A curva granulométrica do agregado miúdo é apresentada na figura 4.2.

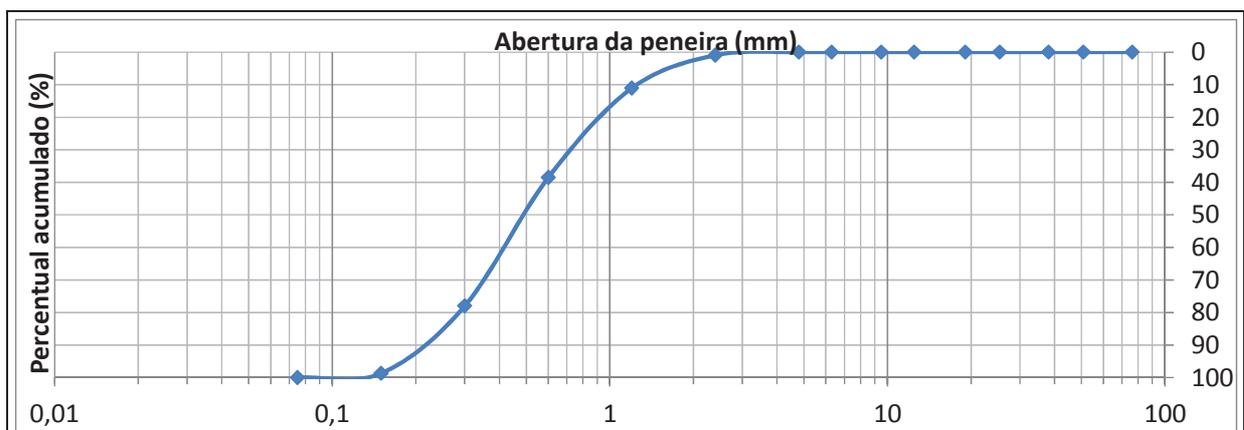


Figura 4.2 - Curva granulométrica do agregado miúdo

A curva granulométrica mostra que o agregado miúdo é bem graduado, sem deficiências ou excessos de qualquer fração, possibilitando, assim, o emprego de maior quantidade desse material em um determinado volume de concreto, dando origem a uma mistura mais densa, com maior estabilidade volumétrica e mais resistente. Segundo MEHTA (1996), com o melhor empacotamento dos grãos, as partículas menores preenchem os espaços existentes entre as partículas maiores, diminuindo a quantidade de vazios na mistura.

4.1.2 Agregado Graúdo

Os resultados dos ensaios de caracterização física do agregado graúdo são apresentados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Resultados dos ensaios de caracterização física do agregado graúdo

Ensaio	Unidade	Resultados 1AG	Limites da norma
Massa específica	(kg/dm ³)	2,667	-
Massa unitária	(kg/dm ³)	1,519	-
Absorção de água	(%)	0,40	-
Módulo de finura	-	6,913	-
Diâmetro máximo	(mm)	19,00	-

A curva granulométrica do agregado graúdo é apresentada na figura 4.3.

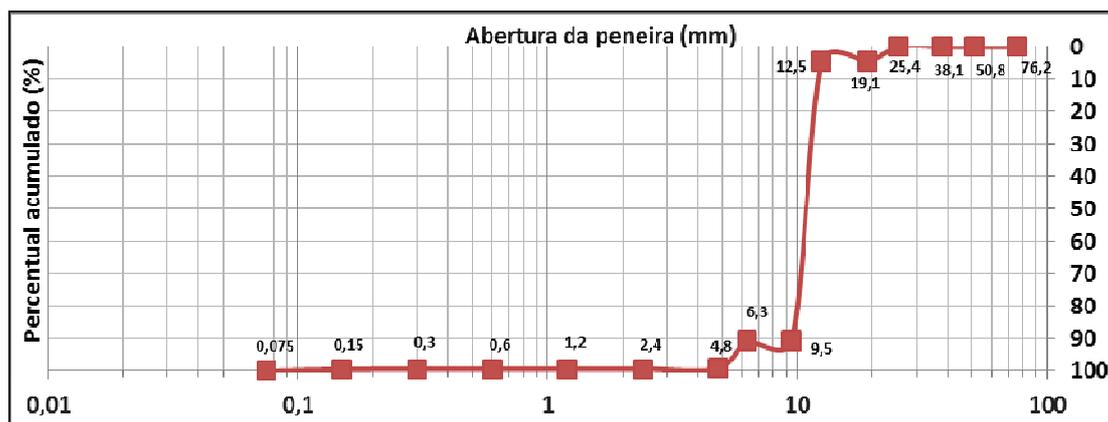


Figura 4.3 - Curva granulométrica do agregado graúdo

Para GJORV (1994), a dimensão máxima mais adequada para CAD está entre 10 e 14 mm. MEHTA e MONTEIRO (1994) e DAL MOLIN (1995) apontam resultados satisfatórios com D_{max} de 19 mm. Já AÏTCIN e NEVILLE (1995) relataram a possibilidade

de utilização de agregados de D_{\max} acima de 20 mm na produção de CAD, na faixa de resistência de 60 a 100 MPa, contudo afirmam ser muito difícil produzir concretos com resistências acima de 100 MPa usando agregados maiores que 25 mm. DE LARRARD e BELLOC (1992) concluíram, com base em estudos experimentais, que a utilização de agregados graúdos com D_{\max} entre 20 e 25 mm levam a concretos com melhor desempenho e economia se comparados com agregados de D_{\max} de 10 a 12 mm. Neste trabalho, o agregado graúdo apresentou D_{\max} de 19 mm, sendo, então, compatível para a produção de concreto de alto desempenho.

A curva granulométrica mostra que o agregado graúdo é mal graduado, já que na peneira de abertura 12,5 mm o percentual retido acumulado foi da ordem de 5% e na peneira de abertura 9,5 mm foi de 91%. Dessa forma, foram constatadas deficiências de frações desse material que poderiam originar misturas pouco densas e menos resistentes. Além disso, segundo MENDES (2002), a distribuição granulométrica afeta diretamente a quantidade de água necessária à obtenção da relação água/cimento desejada e, conseqüentemente, influencia na trabalhabilidade do concreto.

O estado do Amazonas possui problemas de abastecimento de agregado graúdo causado pela inexistência de jazidas de rochas em condições de exploração no entorno de sua capital, não havendo, assim, outra alternativa viável senão a utilização do agregado proveniente da região de Moura, no município de Barcelos/AM, nesta pesquisa. Por esse mesmo motivo, a empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A. utilizou o agregado proveniente da região de Moura para a construção da ponte que liga Manaus ao município de Iranduba/AM, a qual possui 3.595 m de comprimento.

4.1.3 Adições Minerais

4.1.3.1 Resíduo de Vidro Moído - RVM

a) Granulometria (Estudo de Moagem)

As distribuições granulométricas das amostras de resíduo de vidro não moído e moído nos períodos de 1, 2, 4, 8, 16, 24 e 32 horas são apresentadas na figura 4.4. As curvas

permitem observar a distribuição dos grãos do resíduo, bem como, o perfil das curvas após as moagens realizadas em períodos diferentes. A tabela 4.3 apresenta o diâmetro dos grãos de resíduo de vidro para 10%, 50% e 90% nos diferentes tempos de moagem.

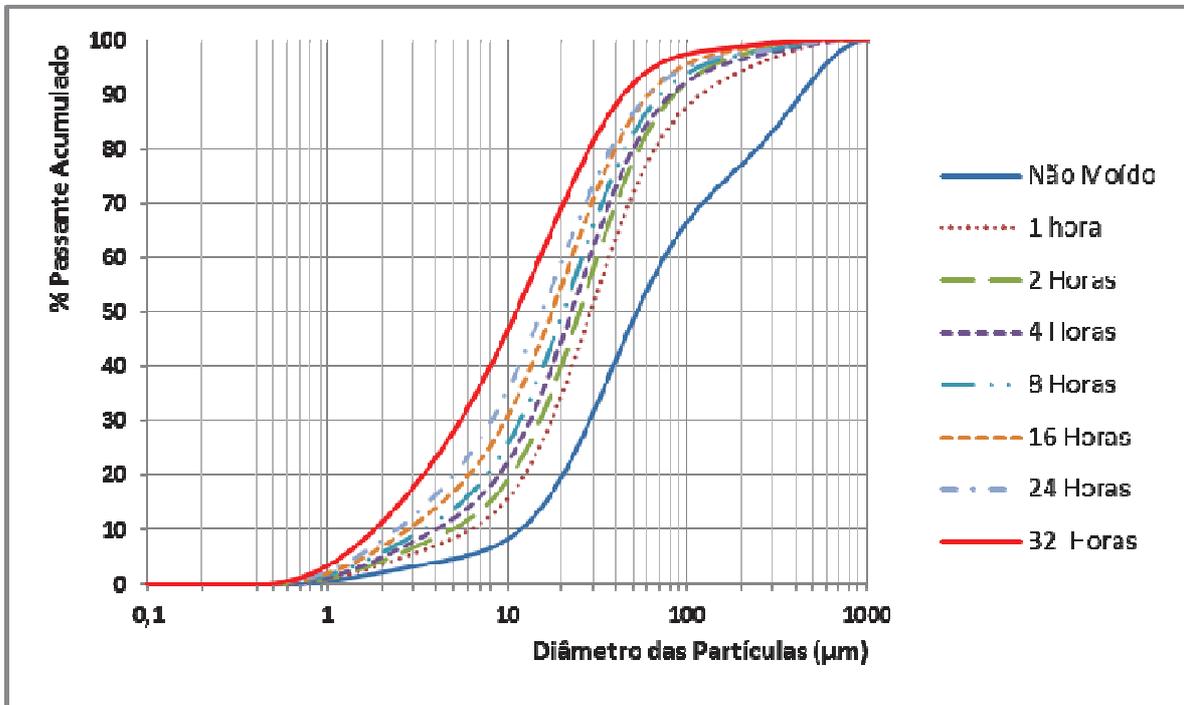


Figura 4.4 - Curvas granulométricas das amostras de resíduo de vidro não moído e moído por 1, 2, 4, 8, 16, 24 e 32 horas em moinho de bolas

Tabela 4.3 - Diâmetro dos grãos de resíduo de vidro para 10%, 50% e 90% nos diferentes tempos de moagem

Tempos de Moagem do Resíduo de Vidro	Diâmetro das Partículas (μm)		
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
Resíduo não moído	11,848	52,256	429,779
1 horas	6,227	28,881	118,115
2 horas	4,892	25,068	84,349
4 horas	3,968	22,625	81,085
8 horas	3,388	20,339	71,016
16 horas	2,777	17,638	60,870
24 horas	2,420	15,493	60,358
32 horas	1,819	11,146	43,984

A tabela 4.4 apresenta o rendimento parcial e acumulado da moagem do resíduo de vidro em moinho de bolas nos diferentes tempos de moagem. Através dos rendimentos de moagem é possível analisar quais os tempos em que o resíduo sofreu maior cominuição, ou fragmentação, de suas partículas.

Tabela 4.4 - Rendimento parcial e acumulado da moagem do resíduo de vidro em moinho de bolas nos diferentes tempos de moagem

Tempos de Moagem do Resíduo de Vidro	Diâmetro das Partículas (μm)		
	D ₅₀	Rendimento Parcial	Rendimento Acumulado
Resíduo não moído	52,256	-	-
1 horas	28,881	44,7%	44,7%
2 horas	25,068	13,2%	52,0%
4 horas	22,625	9,7%	56,7%
8 horas	20,339	10,1%	61,1%
16 horas	17,638	13,3%	66,2%
24 horas	15,493	12,2%	70,4%
32 horas	11,146	28,1%	78,7%

As análises relativa ao estudo de moagem do resíduo de vidro são, a seguir, relacionadas:

- a) a curva para o vidro não moído apresentou-se de forma irregular, enquanto para os demais observou-se uma forma mais suave, resultando em uma distribuição granulométrica mais homogênea após o processo de moagem;
- b) o resíduo de vidro não moído apresentou aproximadamente 35% dos seus grãos com diâmetro superior a 100 μm e cerca de 40% com diâmetro maior que 75 μm ;
- c) o resíduo de vidro não moído apresentou um diâmetro médio (D₅₀) de 52,3 μm e um D₁₀ e D₉₀, respectivamente, de 11,8 μm e 429,8 μm ;
- d) o tamanho das partículas com 1 hora de moagem reduziu expressivamente, diminuindo de 35% para cerca de 12% e de 40% para aproximadamente 18%, o tamanho das partículas maiores que 100 μm e 75 μm , respectivamente;
- e) nos demais tempos de moagem, 80% do resíduo já se encontrava com partículas menores que 75 μm ;
- f) a partir da oitava hora de moagem, 90% do resíduo se encontrava com partículas menores que 75 μm ;

- g) o tempo de 32 horas apresentou apenas 10% das partículas com diâmetro superior a 45 μ m, satisfazendo, então, a exigências físicas preconizada pela NBR 12653:1992, que determina o máximo de 34% das partículas com diâmetro superior a 45 μ m;
- h) o D₅₀, após a primeira hora de moagem, passou de 52 para 29 μ m, alcançando um rendimento parcial aproximadamente de 45%;
- i) os maiores rendimentos de moagem do resíduo foram obtidos nas primeiras horas do processo, diminuindo cada vez mais nas horas seguintes;
- j) nos tempos de moagem de 2, 4 e 8 horas, observou-se que suas curvas granulométricas encontram-se bem próximas, o que significa um rendimento de moagem pouco significativo entre esses tempos; e
- k) o D₅₀, após 32 horas de moagem, passou de 52 para 11 μ m, alcançando um rendimento acumulado aproximadamente de 79%.

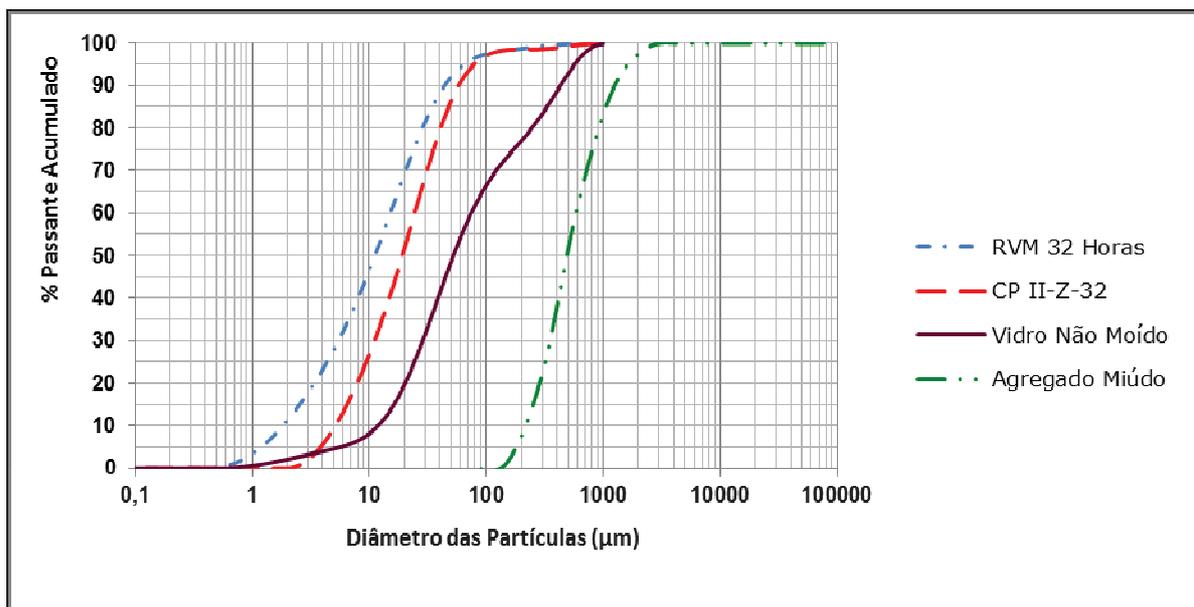


Figura 4.5 - Curvas granulométricas do RVM, do CP II-Z-32, do resíduo de vidro não moído e do agregado miúdo

Ao comparar a curva granulométrica do resíduo de vidro moído (RVM) por 32 horas com a do cimento Portland, é possível observar que o resíduo de vidro finamente moído possui partículas com tamanhos menores que as partículas do CP II-Z-32, como mostra a figura 4.5, o que pode contribuir para o empacotamento da mistura, proporcionando um

efeito fíler pelo RVM. Dessa forma, o tempo de 32 horas de moagem do resíduo foi adotado como o de melhor rendimento no moinho de bolas.

b) Composição Química e Perda ao Fogo

De acordo com a análise dos componentes inorgânicos realizada na amostra de RVM por 32 horas, tabela 4.5, não foi constatado a presença de Na₂O. Entretanto, os vidros fabricados na indústria da empresa Vidro Rios Ltda. são do tipo soda e cal. Com isso, foi possível concluir que o espectrômetro de fluorescência a raio X, marca PANalytical, modelo Epsilon-XL, não é capaz de detectar compostos a base de sódio.

Tabela 4.5 - Resultados de composição química e de perda ao fogo do RVM

Amostra: RVM - 32 Horas	
SiO ₂	73,49%
CaO	16,10%
SO ₃	2,45%
P ₂ O ₅	1,69%
Al ₂ O ₃	1,44%
Sc ₂ O ₃	0,62%
Fe ₂ O ₃	0,37%
K ₂ O	0,16%
SrO	0,01%
Perda ao fogo (PF)	3,66%
TOTAL	100%

As análises relativa à composição química e à perda ao fogo do resíduo de vidro são, a seguir, relacionadas:

- na composição química do RVM, observou-se a presença de 73,5% de SiO₂, confirmando a predominância de silício na amostra, o que torna esse material potencialmente pozolânico;
- os óxidos CaO, SO₃, P₂O₅ e Al₂O₃ representam cerca de 22% da amostra, sendo que, desse percentual, o CaO apresenta-se com 16,1%, valendo ainda ressaltar que a composição química desse resíduo pode variar em função do tipo de vidro de origem, da matéria prima utilizada e do processo de fabricação;
- a amostra de RVM apresentou um total de 75,3% dos óxidos de SiO₂, Fe₂O₃ e Al₂O₃, considerando o valor de perda ao fogo nos cálculos dos referidos óxidos da

composição química, quando o teor de perda ao fogo não é considerado no cálculo, essa soma aumenta para 78,16%;

- d) os critérios de classificação química da NBR 12653:1992 estabelecem que a soma destes óxidos deve ser igual ou superior a 70%, ficando, então, a amostra de RVM dentro do parâmetro considerado em norma;
- e) quanto à perda ao fogo, o percentual encontrado foi de 3,66%, ficando dentro do intervalo prescrito pela NBR 12653:1992, que determina um percentual máximo de 10%; e
- f) quanto à presença de SO₃, o percentual máximo permitido é 4%, porém, na composição química só foi detectado 2,45%.

c) Índice de Atividade Pozolânica, Massa Específica, Reatividade Álcali-Agregado e Mitigação da Reatividade Álcali-Agregado

A tabela 4.6 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica, índice de atividade pozolânica, reatividade álcali-agregado e mitigação da reatividade álcali-agregado realizados com resíduo de vidro não moído e com resíduo de vidro moído por 32 horas. Os ensaios realizados com amostra de resíduo de vidro não moído tinham como objetivo uma análise comparativa com os resultados dos mesmos ensaios desenvolvidos com resíduo de vidro moído por 32 horas. Salienta-se, então, que o resíduo de vidro não moído não foi utilizado nesta pesquisa como adição mineral.

Tabela 4.6 – Resultados dos ensaios de caracterização do RVM

Adição mineral	Massa específica (g/dm ³)	Atividade Pozolânica (mg Ca(OH) ₂ /g de amostra)	Reação álcali-agregado e mitigação	
			RAA	Mitigação
Resíduo de vidro não moído	-	733	*	-
RVM – 32 horas	2,45	828	0,21%	0,14%

(*) As três barras moldadas com o resíduo de vidro não moído quebraram devido à elevada expansão

A atividade pozolânica à (90 ± 5)°C, do resíduo de vidro não moído, foi de 733 mg Ca(OH)₂ por grama de amostra e a do RVM foi de 828 mg Ca(OH)₂ por grama de amostra. Dessa forma, após o processo de moagem do resíduo de vidro, houve um ganho aproximado de 13% de atividade pozolânica em relação ao resíduo de vidro não moído.

A figura 4.6 apresenta os resultados da reatividade álcali-agregado para o resíduo de vidro não moído e para o resíduo de vidro moído (RVM). Nesse ensaio foi utilizado o cimento padrão comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado.

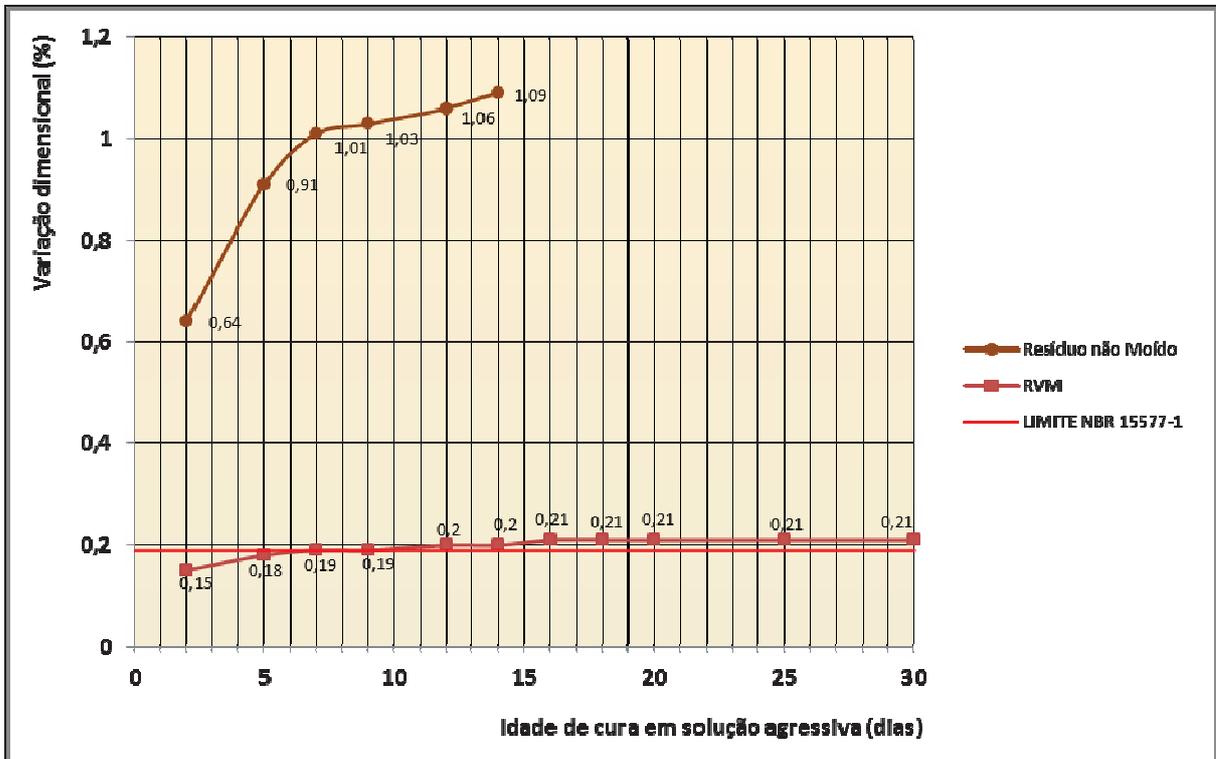


Figura 4.6 – Resultados da reatividade álcali-agregado em resíduo de vidro não moído e em RVM

A figura 4.7 apresenta os resultados da mitigação da reatividade álcali-agregado para o resíduo de vidro moído (RVM). Nesse ensaio foi utilizado o cimento CP II-Z-32, fabricado no polo industrial de Manaus.

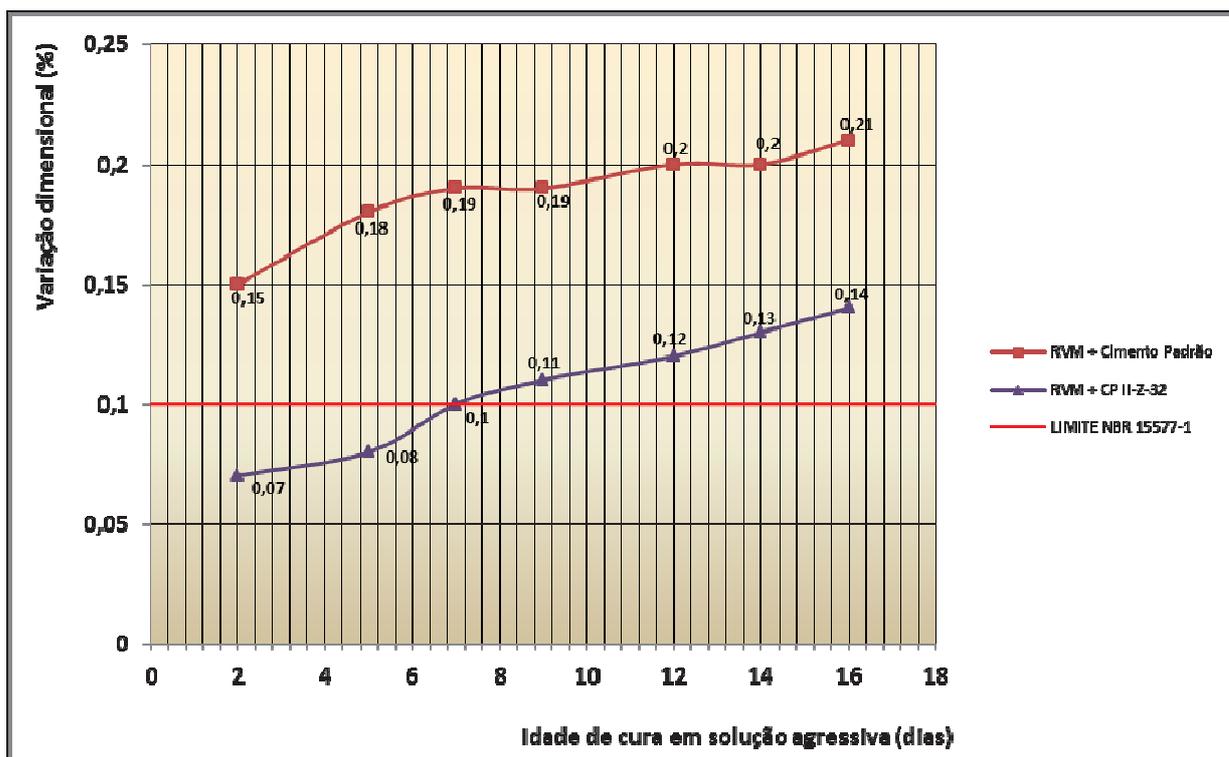


Figura 4.7 – Resultados da mitigação da reatividade álcali-agregado em RVM utilizando o cimento CP II-Z-32

O resultado do ensaio da reação álcali-agregado para o RVM indicou expansão maior que 0,19% aos 30 dias (28 dias de cura em solução alcalina), sendo considerado esse material potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento. Deve-se observar que as barras moldadas com o resíduo de vidro não moído, durante o ensaio de reação álcali-agregado, quebraram devido a sua elevada expansão, comprovando que esse material é altamente reativo frente aos álcalis do cimento. Entretanto, foi possível constatar uma expressiva diminuição da reatividade álcali-agregado, aproximadamente de 80%, após o processo de moagem do resíduo, ficando muito próximo do limite estabelecido pela norma.

Com relação à avaliação da mitigação da reação álcali-agregado pelo método acelerado, a NBR 15577-5 estabelece que a comprovação da mitigação da reação é obtida quando a expansão apresenta-se menor que 0,10% aos 16 dias (14 dias de cura em solução alcalina), o que não ocorreu na combinação de RVM com cimento CP II-Z-32. Entretanto, foi possível constatar uma razoável diminuição da reatividade álcali-agregado do RVM, aproximadamente 33%, com a utilização do cimento CP II-Z-32. Assim, torna-se necessário novos ensaios de forma atender ao limite estabelecido, podendo-se optar por

trocar o cimento empregado ou incorporar teores de sílica ativa ou metacaulim ou diminuir ainda mais a granulometria desse material.

4.1.3.2 Sílica Ativa em Pó - Silmix

a) Granulometria e Microscopia Óptica

As distribuições granulométricas da sílica ativa em pó – Silmix, do resíduo de vidro não moído, do resíduo de vidro moído por 32 horas (RVM), do cimento CP II-Z-32 e do agregado miúdo são apresentadas na figura 4.8.

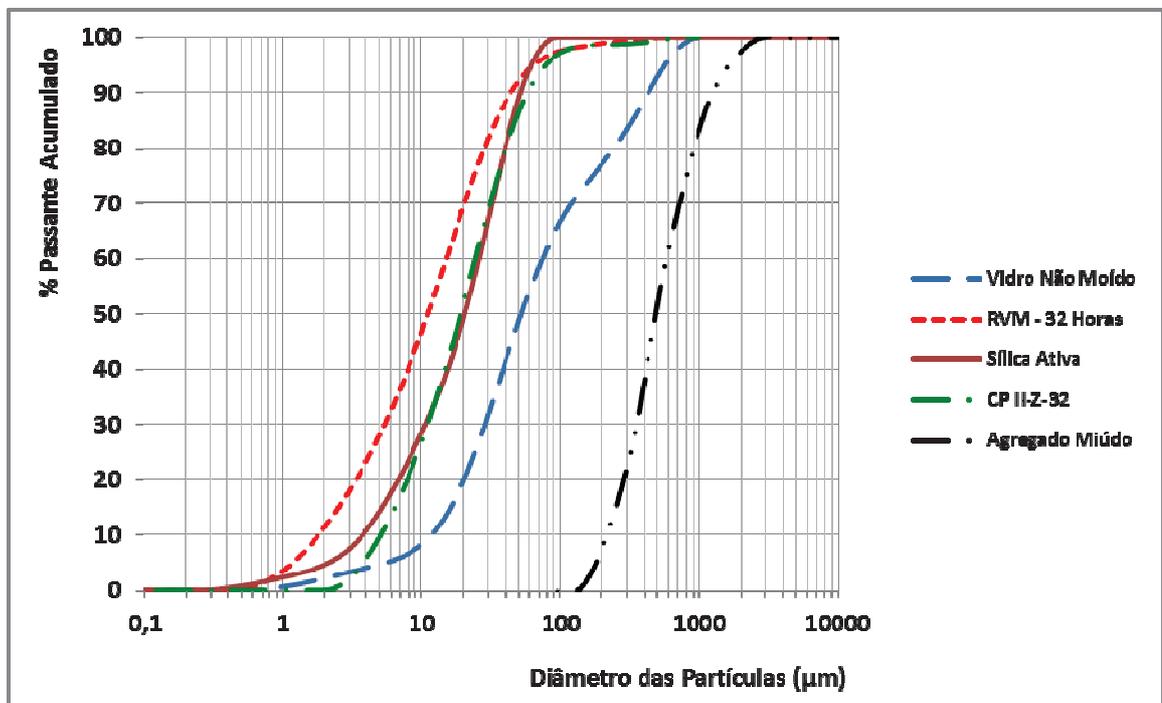


Figura 4.8 - Curvas granulométricas do resíduo de vidro não moído, do RVM-32 horas, da sílica ativa, do CP II-Z-32 e do agregado miúdo

A sílica ativa em pó apresentou um diâmetro médio (D_{50}) de $20,5\mu\text{m}$ e um D_{10} e D_{90} , respectivamente, de $3,78\mu\text{m}$ e $51,65\mu\text{m}$. Dessa forma, foi possível constatar que a sílica ativa encontrava-se aglomerada no momento da análise granulométrica, pois a ficha técnica do produto informa que esse material é composto por partículas extremamente pequenas, com diâmetro médio entre $0,1$ e $0,2\mu\text{m}$. Mesmo assim, o resultado da análise

granulométrica se torna pertinente, já que no momento da produção dos concretos a sílica ativa também se apresentou com grãos aglomerados.

A figura 4.9 apresenta microfotografias realizadas com amostras de sílica ativa em pó e com RVM no estereoscópio LEICA EZ4. A figura 4.9(a) ilustra, visualmente, como as partículas de sílica ativa se encontram aglomeradas. Dessa forma, a sílica ativa aparenta ser composta por grãos de dimensões maiores, quando comparada com o resíduo de vidro moído por 32 horas, figura 4.9(b).

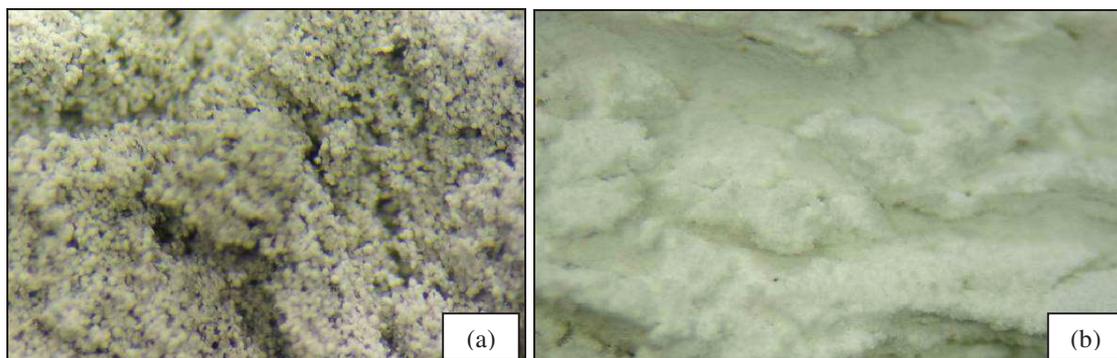


Figura 4.9 – (a) Microfotografias realizadas em amostras de sílica ativa e (b) RVM no estereoscópio LEICA EZ4 – ampliação 20x

b) Composição Química e Perda ao Fogo

A composição química realizada na amostra de sílica ativa em pó – Silmix é apresentada na tabela 4.7. Constatou-se uma grande quantidade de dióxido de silício presente em sua composição, na ordem de 96% da amostra. Além disso, observou-se um baixo percentual de perda ao fogo, aproximadamente 85% inferior ao valor obtido para o RVM.

Tabela 4.7 – Resultados de composição química e de perda ao fogo da Sílica Ativa em Pó - Silmix

Amostra: Sílica Ativa em Pó - Silmix	
SiO ₂	96,16%
K ₂ O	1,12%
CaO	0,93%
MgO	0,46%
P ₂ O ₅	0,42%
Cl	0,17%
Fe ₂ O ₃	0,15%
Ag ₂ O	0,03%
MnO	0,03%
Perda ao fogo (PF)	0,53%
TOTAL	100%

c) Índice de Atividade Pozolânica e Massa Específica

A tabela 4.8 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica e índice de atividade pozolânica realizados com sílica ativa em pó - Silmix.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios de caracterização da sílica ativa em pó - Silmix

Adição mineral	Massa específica (g/dm ³)	Atividade Pozolânica (mg Ca(OH) ₂ /g de amostra)
Sílica ativa em pó - Silmix	2,20	1.522

A sílica ativa apresentou uma atividade pozolânica bem superior à apresentada pelo RVM, da ordem de 83,8%. A superioridade em termos de atividade pozolânica da sílica ativa em pó pode ser atribuída à grande quantidade de dióxido de silício presente em sua composição, cerca de 96% da amostra, e à reduzida perda ao fogo, enquanto o RVM apresenta 73% de SiO₂.

4.1.4 Cimento CP II-Z-32

a) Granulometria

O cimento Portland CP II-Z-32 utilizado nesta pesquisa apresentou tamanho médio de partículas (D₅₀) na ordem de 19µm e D₉₀ e D₁₀, respectivamente, 58µm e 5µm, conforme tabela 4.9.

Tabela 4.9 – Diâmetro dos grãos do cimento CP II-Z-32 e do RVM para 10%, 50% e 90%

Materiais	Diâmetro das Partículas (µm)		
	D ₁₀	D ₅₀	D ₉₀
CP II-Z-32	5,112	19,149	58,041
RVM – 32 horas	1,819	11,146	43,984

A figura 4.10 apresenta as curvas granulométricas do cimento e do resíduo de vidro moído por 32 horas.

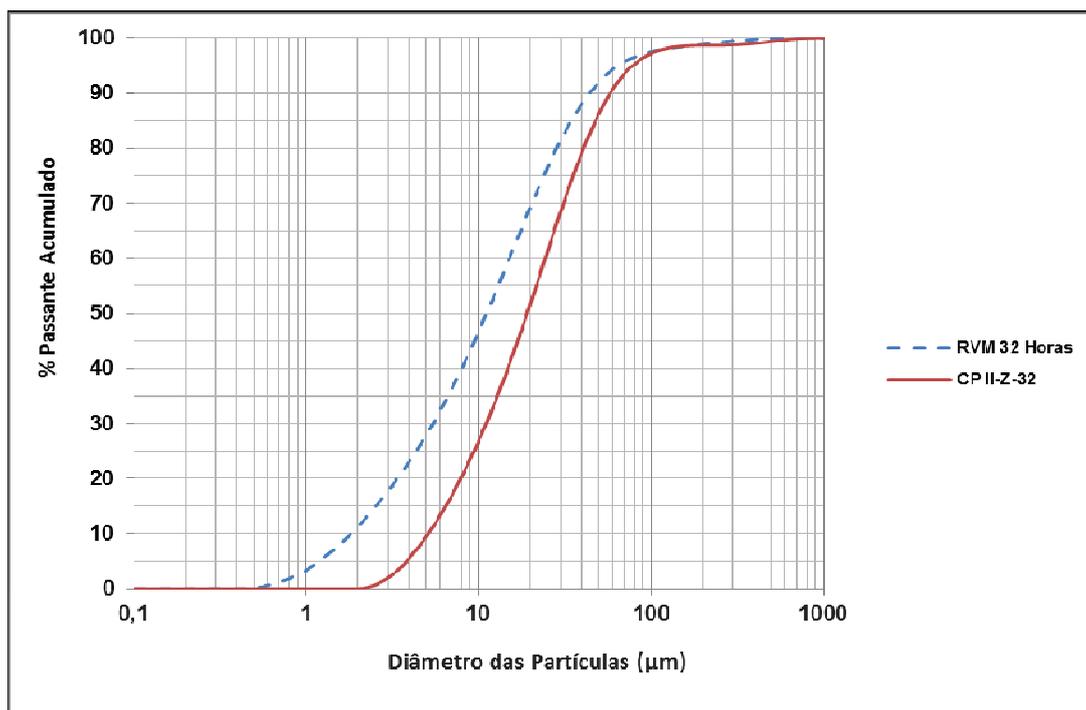


Figura 4.10 - Curva granulométrica do RVM e do cimento CP II-Z-32

b) Composição Química, Perda ao Fogo e Massa Específica

A tabela 4.10 apresenta os resultados dos ensaios de massa específica, composição química e perda ao fogo do cimento.

Tabela 4.10 - Resultados de composição química e perda ao fogo do CP II-Z-32

Amostra: Cimento CP II-Z-32	
Massa Específica (g/cm³)	3,1142
Composição Química	
CaO	59,58%
SiO ₂	20,96%
Al ₂ O ₃	6,45%
SO ₃	4,30%
Fe ₂ O ₃	3,79%
K ₂ O	0,72%
TiO ₂	0,27%
BaO	0,16%
SrO	0,05%
ZrO ₂	0,05%
CuO	0,01%
Perda ao fogo (PF)	3,67%
TOTAL	100%

Como já mencionado, o espectrômetro de fluorescência a raio X utilizado neste trabalho não foi capaz de detectar compostos a base de sódio, não sendo possível, portanto, obter o teor de Na_2O presente no cimento.

Segundo ABCP (2002), a composição dos cimentos compostos com pozolana é formada por 94 – 76% de clínquer e gesso, 6 – 14% de material pozolânico e 0 – 10% de material carbonático. De acordo com a composição química do CP II-Z-32 utilizado neste trabalho, constatou-se a presença de SiO_2 na ordem de 21%. Dessa forma, pode-se afirmar que esse material cumpriu as exigências de composição químicas típicas de cimentos compostos com pozolana. É importante salientar que o clínquer também possui SiO_2 em sua composição, justificando seu percentual (21%) superior à faixa 6 – 14% preconizada pela NBR 11578:1991.

A massa específica encontrada foi $3,1142 \text{ g/cm}^3$, estando esse valor dentro do estabelecido para o cimento Portland. Nesta pesquisa, adotou-se o valor de $3,11 \text{ g/cm}^3$ para a massa específica do CP II-Z-32.

4.1.5 Dosagem Ótima do Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow 1102 em Pastas e em Concretos

Para análise dos pontos de saturação do aditivo superplastificante, foram elaborados os gráficos, a seguir apresentados, que comparam os resultados dos ensaios de *slump flow* e T_{500} , obtidos com os concretos produzidos com a adição de sílica ativa e RVM, com os resultados dos ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro, obtidos com as pastas confeccionadas com adição de sílica ativa, RVM e sem nenhuma adição mineral. Para isso, pastas e concretos foram produzidos em diferentes dosagens de aditivo superplastificante.

4.1.5.1 Ponto de Saturação do Aditivo Superplastificante em Pastas

No gráfico da figura 4.11, são representados os resultados dos ensaios do funil de Marsh realizados com pastas confeccionadas com sílica ativa em pó Silmix, com RVM e sem adição mineral.

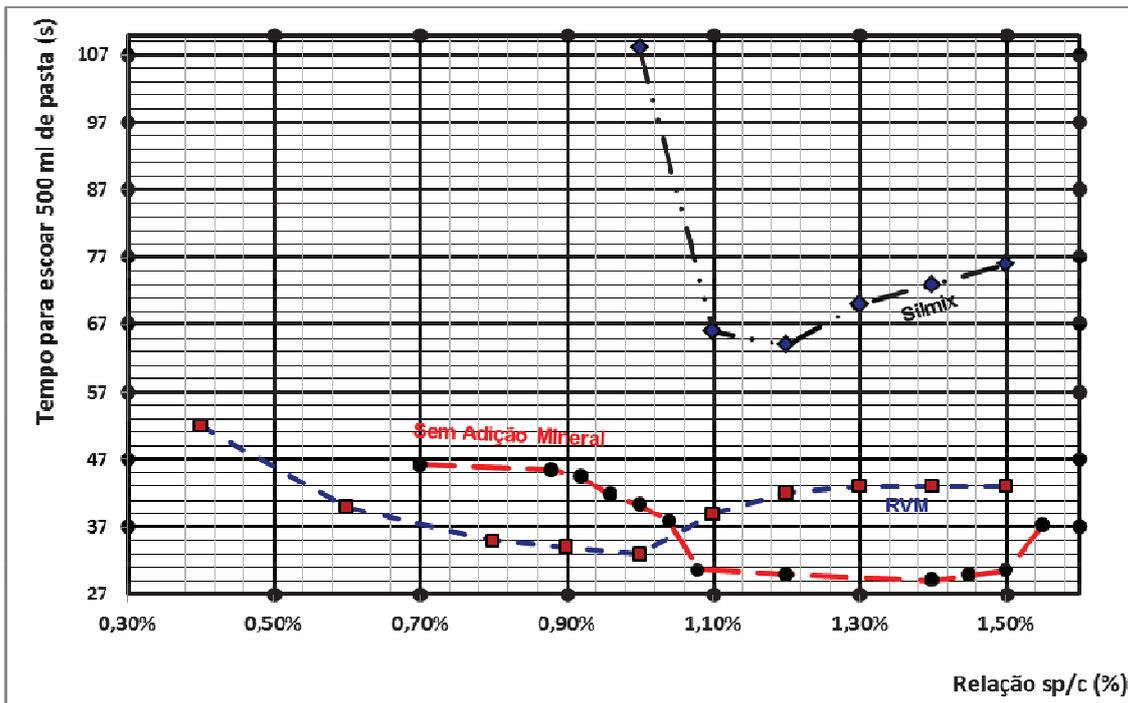


Figura 4.11 – Gráfico dos ensaios de funil de Marsh (ensaio em pasta)

No gráfico da figura 4.12, são representados os resultados dos ensaios do Miniabatimento de Kantro realizados com as pastas confeccionadas com sílica ativa em pó Silmix, com RVM e sem adição mineral. É importante observar que nesse ensaio foram obtidos os diâmetros alcançados após 1 minuto de espriamento e os diâmetros máximos de abertura das pastas.

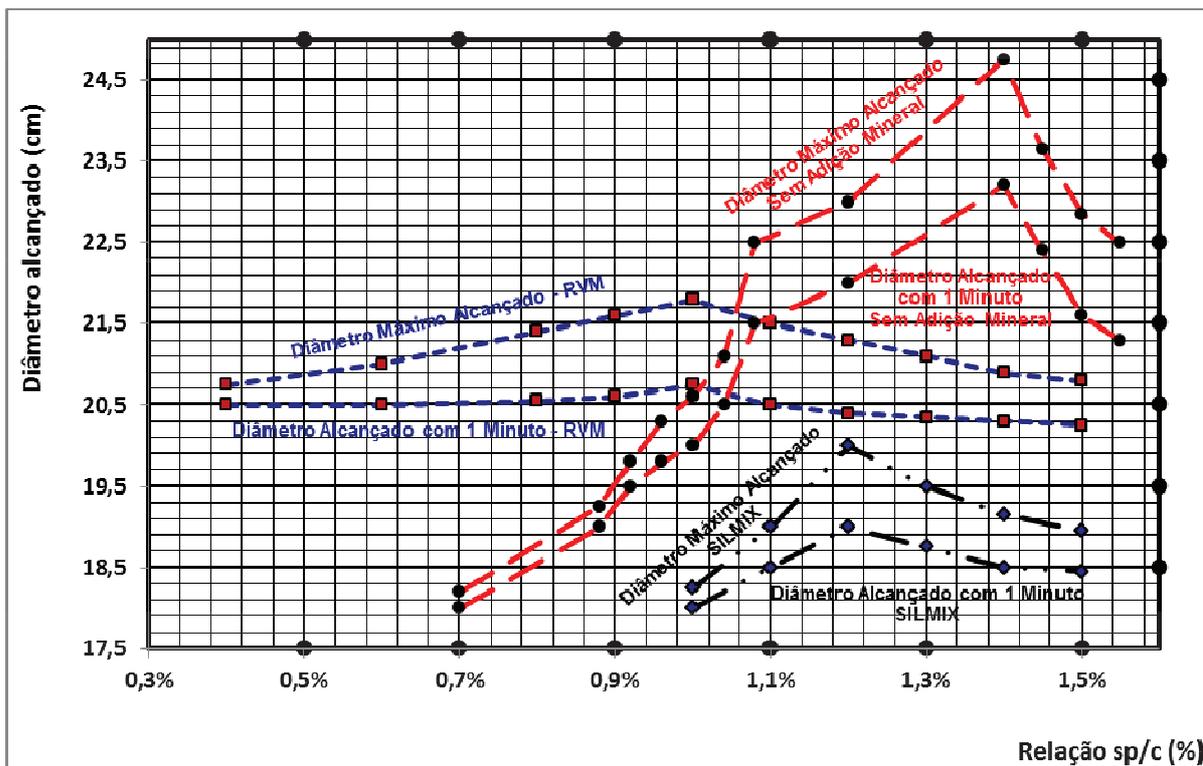


Figura 4.12 – Gráfico dos ensaios de miniabatimento de Kantro (ensaio em pasta)

Pode-se observar, pelos gráficos das figuras 4.11 e 4.12, que o ponto de saturação do aditivo MC-PowerFlow 1102, sem adição mineral, encontra-se na relação sp/c de 1,40% (p/c de 4,67%), tanto pela curva que interliga os resultados dos ensaios do funil de Marsh, quanto pela curva que une os resultados do ensaio de Miniabatimento de Kantro. Em ambas as curvas, observa-se que há uma mudança do sinal do coeficiente angular entre o segmento de reta que antecede a relação sp/c de 1,40% (p/c de 4,67%) e o segmento de reta seguinte, caracterizando ser este o ponto de saturação do MC-PowerFlow 1102, ou seja, o ponto que define sua dosagem ótima.

Portanto, os resultados de ambos os ensaios de fluidez sem adição mineral, realizados com as pastas produzidas com o superplastificante MC-PowerFlow 1102, são coincidentes e correspondem à relação p/c de 4,67%.

Pode-se observar ainda, pelos gráficos das figuras 4.11 e 4.12, que o ponto de saturação do aditivo MC-PowerFlow 1102, com adição de sílica ativa em pó Silmix, encontra-se na relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%), tanto pela curva que interliga os resultados dos ensaios do funil de Marsh, quanto pela curva que une os resultados do ensaio

de Miniabatimento de Kantro. Portanto, os resultados de ambos os ensaios de fluidez com adição de sílica ativa em pó Silmix, realizados com as pastas produzidas com o superplastificante MC-PowerFlow 1102, são coincidentes e correspondem à relação p/c de 4,0%.

Observa-se também, pelos gráficos das figuras 4.11 e 4.12, que o ponto de saturação do aditivo MC-PowerFlow 1102, com adição de RVM, encontra-se na relação sp/c de 1,0% (p/c de 3,33%), tanto pela curva que interliga os resultados dos ensaios do funil de Marsh, quanto pela curva que une os resultados do ensaio de Miniabatimento de Kantro. Portanto, os resultados de ambos os ensaios de fluidez com adição de RVM, realizados com as pastas produzidas com o superplastificante MC-PowerFlow 1102, são coincidentes e correspondem à relação p/c de 3,33%.

É importante notar que a maior diferença entre o espalhamento máximo e espalhamento atingido com 1 minuto do início do ensaio foi obtida nas dosagens ótimas dos três tipos de pasta. Ou seja, as pastas na dosagem ótima se tornam mais viscosas do que em outras dosagens. Consequentemente, o ponto de saturação das pastas é considerado a melhor dosagem de superplastificante para se obter um concreto autoadensável livre de segregação.

As figuras 4.13 a 4.15 apresentam a medição do espalhamento durante o ensaio do miniabatimento de Kantro para pasta com adição de sílica ativa em pó Silmix, para pasta com RVM e para pasta sem adições minerais.

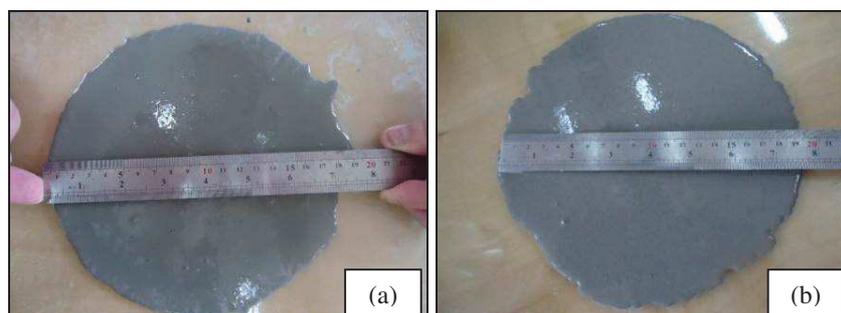
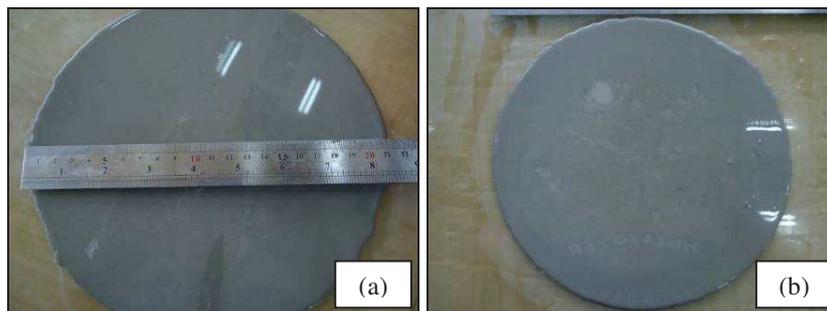
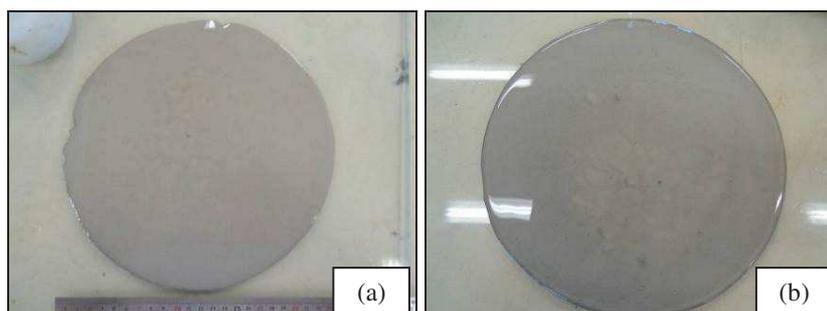


Figura 4.13 - (a) e (b) Ensaios do miniabatimento de Kantro em pastas produzidas com adição de sílica ativa em pó - Silmix



Figuras 4.14 - (a) e (b) Ensaios do miniabatimento de Kantro em pastas produzidas com adição de RVM



Figuras 4.15 - (a) e (b) Ensaios do miniabatimento de Kantro em pastas produzidas sem adição mineral

4.1.5.2 Ponto de Saturação do Aditivo Superplastificante em Concretos

No gráfico da figura 4.16, são representados os resultados dos ensaios de *slump flow* realizados com concretos produzidos com adição de RVM e com sílica ativa em pó Silmix. Esses resultados também são apresentados através das tabelas 4.11 e 4.12.

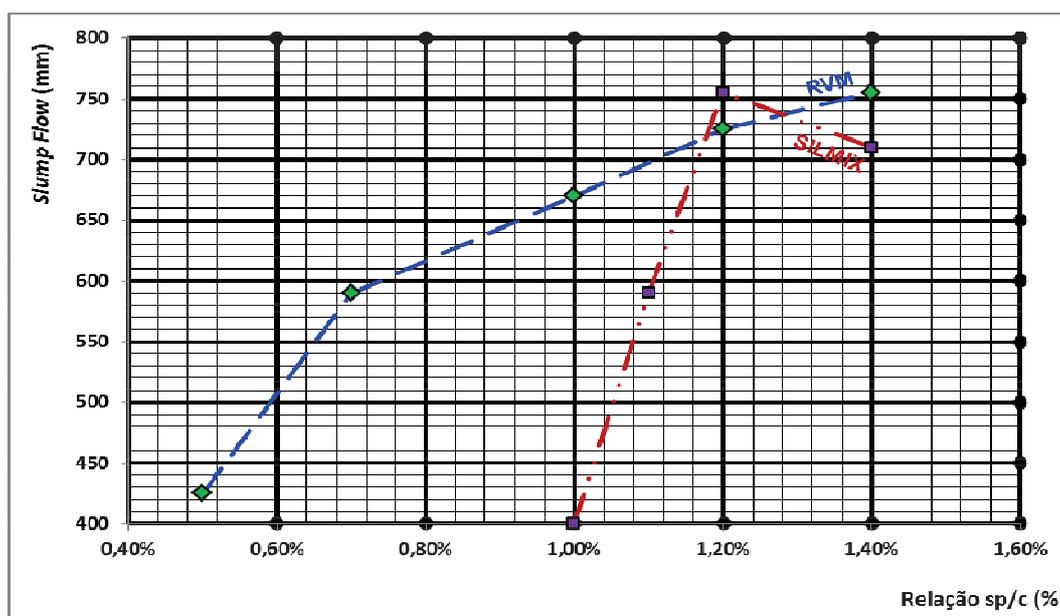


Figura 4.16 – Gráfico dos ensaios de *slump flow* em concretos produzidos com adição de RVM e sílica ativa em pó - Silmix

No gráfico da figura 4.17, são representados os resultados dos ensaios de T_{500} realizados com concretos produzidos com adição de RVM e com sílica ativa em pó Silmix. Esses resultados também são apresentados através das tabelas 4.11 e 4.12.

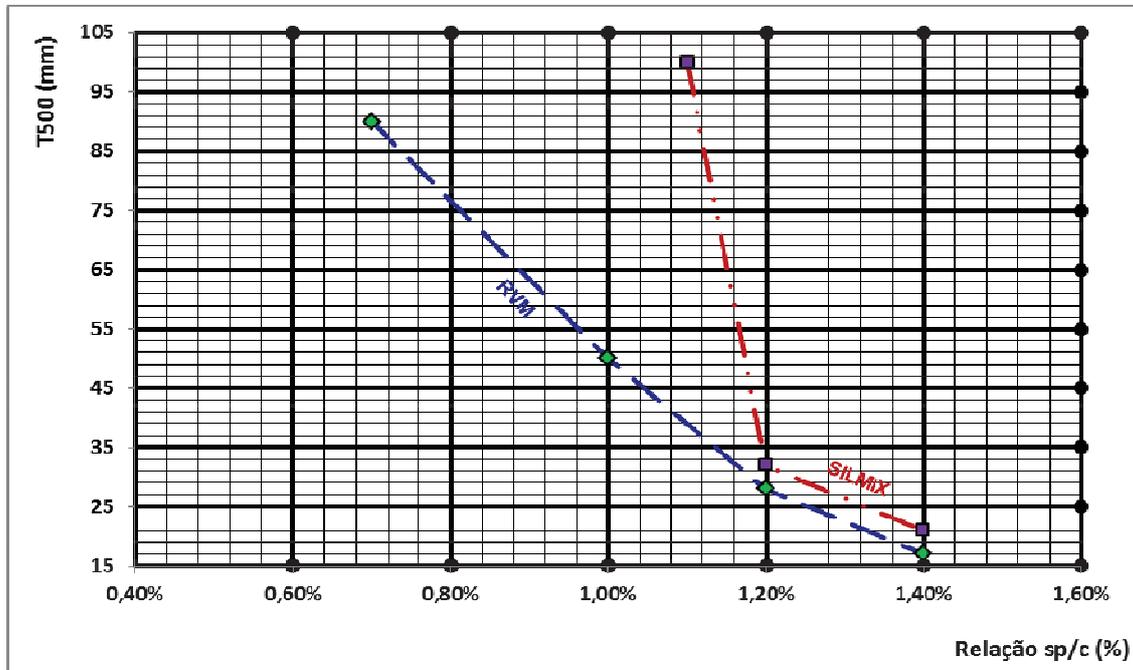


Figura 4.17 – Gráfico dos ensaios de T_{500} em concretos produzidos com adição de RVM e sílica ativa em pó - Silmix

Tabela 4.11 - Resultados dos ensaios de *slump-flow* e T_{500} em concretos com adição de sílica ativa

Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	REF-1 1,0% sp/c	REF-2 1,1% sp/c	REF-3 1,2% sp/c	REF-4 1,4% sp/c
<i>Slump-flow Test</i> (mm)	400,00	590,00	755,00	710
Classificação <i>Slump-flow Test</i> (NBR 15823/2010)	*	SF1	SF3	SF2
T_{500} Test (s)	**	100,00	32,00	20
Classificação T_{500} Test (NBR 15823/2010)	**	VS2	VS2	VS2

(*) Não foi possível classificar o concreto pelo *slump-flow* pois não atingiu o diâmetro mínimo de 550mm

(**) Não foi possível realizar o T_{500} Test devido à baixa fluidez do concreto nesse teor de superplastificante

Tabela 4.12 - Resultados dos ensaios de *slump-flow* e T_{500} em concretos com adição de RVM

Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	RVM-1 0,5% sp/c	RVM-2 0,7% sp/c	RVM-3 1,0% sp/c	RVM-4 1,2% sp/c	RVM-5 1,4% sp/c
<i>Slump-flow Test</i> (mm)	425,00	590,00	670,00	725,00	755,00
Classificação <i>Slump-flow Test</i> (NBR 15823/2010)	*	SF1	SF2	SF2	SF3
T_{500} Test (s)	**	90,00	50,00	28,00	17,00
Classificação T_{500} Test (NBR 15823/2010)	**	VS2	VS2	VS2	VS2

(*) Não foi possível classificar o concreto pelo *slump-flow* pois não atingiu o diâmetro mínimo de 550mm

(**) Não foi possível realizar o T_{500} Test devido à baixa fluidez do concreto nesse teor de superplastificante

Pode-se observar, pelo gráfico da figura 4.16, que o ponto de saturação do aditivo MC-PowerFlow 1102, no concreto com adição de sílica ativa, encontra-se na relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%). Nessa curva, observa-se que há uma mudança do sinal do coeficiente angular entre o segmento de reta que antecede a relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%) e o segmento de reta seguinte, caracterizando ser este o ponto de saturação do MC-PowerFlow 1102, ou seja, o ponto que define sua dosagem ótima.

Pelo gráfico da figura 4.17, entretanto, o ponto de saturação encontra-se na relação sp/c de 1,40% (p/c de 4,67%). Nessa curva, não houve uma mudança do sinal do coeficiente angular entre o segmento de reta que antecede a relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%) e o segmento de reta seguinte, não caracterizando ser este o ponto de saturação do MC-PowerFlow 1102, ou seja, esse não é o ponto que define sua dosagem ótima.

Apesar do resultado obtido no ensaio de T_{500} para concretos com adição de sílica ativa, considerou-se a dosagem ótima como sendo a relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%). Os motivos para isso foram: 1) nos ensaios realizados em pasta, as dosagens ótimas encontraram-se na relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%), sendo confirmado esse resultado no ensaio de *slump flow*; e 2) considerou-se também a questão da economia de superplastificante ao decidir que dosagem ótima seria a relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,00%) e não a relação sp/c de 1,40% (p/c de 4,67%).

Observa-se também, pelos gráficos das figuras 4.16 e 4.17, que o ponto de saturação do aditivo MC-PowerFlow 1102, no concreto com adição de RVM, encontra-se na relação sp/c de 1,40% (p/c de 4,67%). Em ambas as curvas, não foi detectada uma mudança do sinal do coeficiente angular entre segmentos de reta. Constatou-se, dessa forma, uma divergência de resultados entre os ensaios realizados em pasta e em concreto. Assim, o ponto de saturação considerado, nesta pesquisa, para as adições de RVM, foi a relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%). Os motivos para isso foram: 1) preferiu-se adotar um valor mediano entre os resultados obtidos em pasta e em concreto; 2) esse é o mesmo valor adotado como ponto de saturação das adições de sílica ativa, possibilitando, assim, comparações mais conclusivas nos ensaios de concreto fresco; e 3) considerou-se também a questão da economia de superplastificante

ao decidir que dosagem ótima seria a relação sp/c de 1,20% (p/c de 4,0%) para as adições de RVM e não a relação sp/c de 1,4% (p/c de 4,67%).

As figuras 4.18 a 4.20 ilustram as medições realizadas durante os ensaios de *slump flow*.

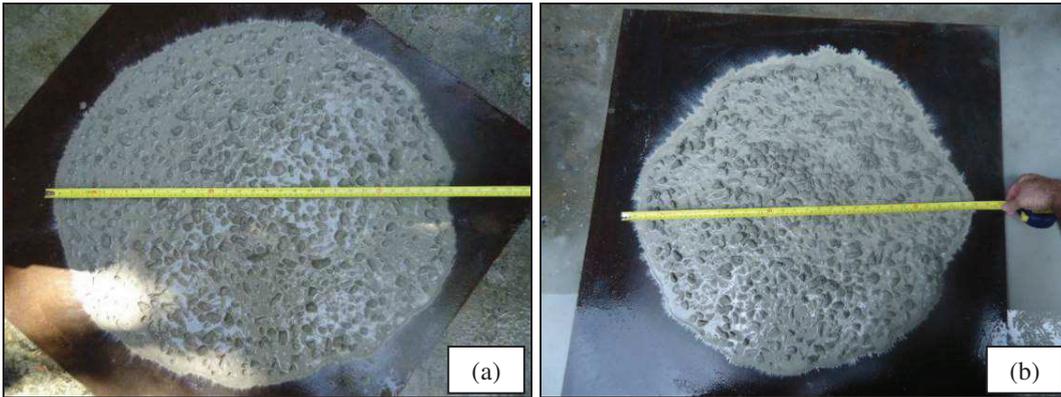
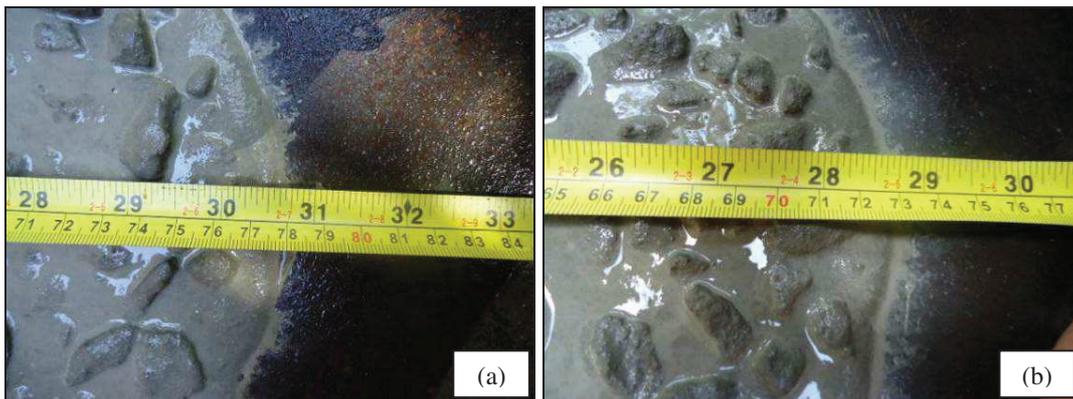
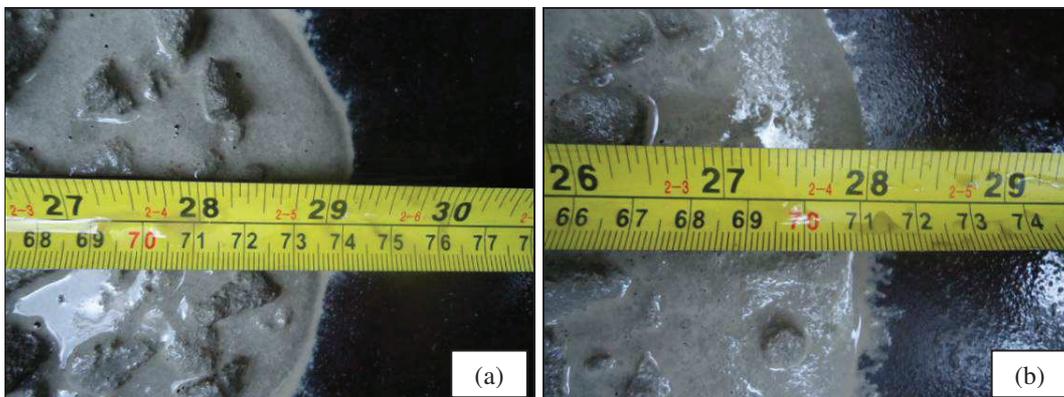


Figura 4.18 – (a) Ensaio de *slump flow* realizado em concreto com adição de sílica ativa e (b) com adição de RVM na dosagem sp/c do superplastificante MC-PowerFlow 1102 em 1,20%



Figuras 4.19 - (a) e (b) Medida de diâmetros perpendiculares entre si no ensaio de *slump flow* realizado em concreto com adição de sílica ativa na dosagem sp/c do superplastificante MC-PowerFlow 1102 em 1,20%



Figuras 4.20 - (a) e (b) Medida de diâmetros perpendiculares entre si no ensaio de *slump flow* realizado em concreto com adição de RVM na dosagem sp/c do superplastificante MC-PowerFlow 1102 em 1,20%

4.1.5.3 Considerações

As observações relativa aos pontos de saturação do aditivo superplastificante em concretos e em pastas, com e sem o emprego de adição mineral, são, a seguir, relacionadas:

- a) os ensaios de fluidez (*slump flow*) nos concretos com adição de sílica ativa apontaram o mesmo ponto de saturação indicado pelos ensaios de fluidez em pasta (funil de Marsh e Miniabatimento de Kantro) para essa mesma adição mineral;
- b) o ponto de saturação do aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, com adição de RVM, em pasta, resultou na relação sp/c em 1,0% e, em concreto, na relação sp/c em 1,40%, sendo, então, adotado um valor mediano entre essas relações (sp/c em 1,20%);
- c) o ponto de saturação do aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 nas pastas sem adição mineral resultou em uma relação sp/c em 1,40%, sendo maior que os valores obtidos nas pastas com adição mineral;
- d) encontram-se divergências de resultados nos ensaios realizados em pasta e em concreto quando se utilizou o RVM como adição mineral;
- e) enfatiza-se a importância de determinar os pontos de saturação dos aditivos superplastificantes, por meio de elaboração de gráficos de dosagens sp/c ou p/c versus espalhamentos, obtidos através de repetidos ensaios de fluidez (*slump flow*) realizados com os concretos, produzidos com o mesmo traço, mas com diferentes dosagens de aditivos, uma vez que podem ocorrer divergências entre os resultados desses ensaios com os realizados com as pastas; e
- f) se tal providência não tivesse sido adotada, o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, nos concretos com adição de RVM, teria sido dosado na relação p/c de 3,33% do peso do cimento, que foi a dosagem ótima obtida em pasta, e, conseqüentemente, os concretos produzidos teriam apresentado menor fluidez e menores espalhamentos nos ensaios *slump flow* e nas demais avaliações desta pesquisa.

4.2 Resultados e Análises da Caracterização dos Concretos

4.2.1 Concretos no Estado Fresco

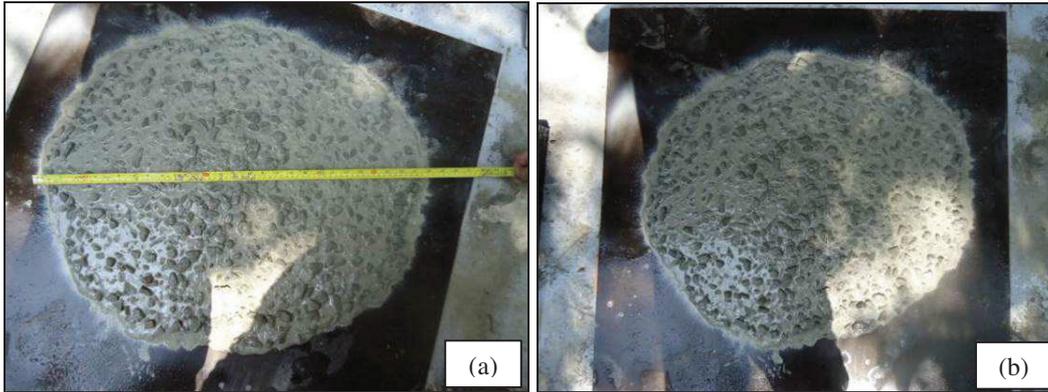
Os concretos de referência e os concretos com adição de RVM foram produzidos levando em consideração os respectivos pontos de saturação determinados pelos ensaios com as pastas e com os concretos, conforme comentado no item 4.1.5. A tabela 4.13 apresenta os resultados obtidos para os concretos no estado fresco e suas classificações, conforme preconiza a NBR 15823-1:2010, inclusive os resultados obtidos por SOUSA FILHO (2012), que produziu um traço REF-4.

Tabela 4.13 - Resultados dos ensaios de caracterização em concretos no estado fresco

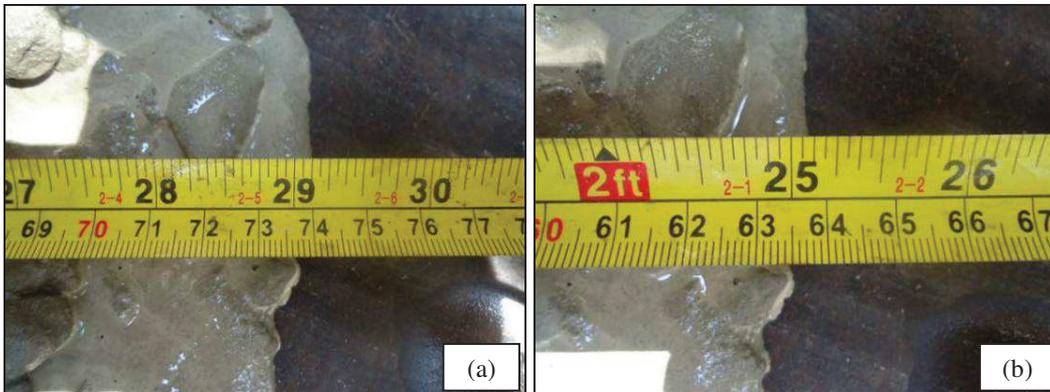
Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	REF-3	RVM-4	REF-4 (SOUSA FILHO, 2012)
Adição mineral: Sílica Silmix	X	-	X
Adição mineral: Resíduo de Vidro Moído - RVM	-	X	-
<i>Slump-flow Test</i> (mm)	740,00	685,00	710,00
Classificação <i>Slump-flow Test</i> (NBR 15823/2010)	SF2	SF2	SF2
T_{500} Test (s)	32,00	55,00	21,00
Classificação T_{500} Test (NBR 15823/2010)	VS2	VS2	VS2
Caixa L - HP	0,86	0,68	-
Classificação Caixa L (NBR 15823/2010)	PL2	*	-
Funil V (s)	70,00	328,00	-
Classificação Funil V (NBR 15823/2010)	*	*	-
Coluna de Segregação - SR (%)	1,57%	0,64%	-
Classificação Coluna de Segregação (NBR 15823/2010)	SR2	SR2	-

(*) Não foi possível classificar conforme os critérios estabelecidos pela NBR 15823-1:2010

As figuras 4.21 a 4.23 ilustram alguns detalhes dos ensaios de *slump flow*, T_{500} e caixa L.



Figuras 4.21 - Ensaios de (a) *slump flow* e (b) T_{500} realizados em concreto com adição de RVM na dosagem ótima do superplastificante MC-PowerFlow 1102 (relação sp/c em 1,20%)



Figuras 4.22 - (a) e (b) Medida de diâmetros perpendiculares entre si no ensaio de *slump flow* realizado em concreto com adição de RVM na dosagem ótima do superplastificante MC-PowerFlow 1102 (relação sp/c em 1,20%)



Figuras 4.23 - (a) e (b) Ensaio da caixa L realizado em concreto com adição de RVM na dosagem ótima do superplastificante MC-PowerFlow 1102 (relação sp/c em 1,20%)

As observações relativa aos resultados dos ensaios em concreto fresco, com adição de sílica ativa e RVM, são, a seguir, relacionadas:

- a) os ensaios de fluidez e escoamento (*slump flow*) apontaram uma maior fluidez para o concreto com adição de sílica ativa, mesmo assim, ambos são classificados, conforme NBR 15823-1:2010, em SF2, possuindo espalhamento entre 660 e 750 mm;
- b) a classificação SF2, segundo a NBR 15823-1:2010, considera como adequado o uso desses concretos para a maioria das aplicações correntes, como paredes, vigas, pilares e outras;
- c) os ensaios de T_{500} apontam uma viscosidade plástica aparente mais baixa para aqueles concretos com adição de sílica ativa, enquanto que o CAA com adição de RVM mostrou se mover de forma lenta e progressiva por um tempo mais prolongado, apesar disso, ambos são classificados, conforme NBR 15823-1:2010, como VS2, apresentando tempo de espalhamento decorridos do início do ensaio até a cobertura completa da marca circular com diâmetro de 500 mm da placa base superiores a 2 segundos;
- d) a classificação VS2, segundo a NBR 15823-1:2010, considera como adequado o uso desses concretos para a maioria das aplicações correntes, como paredes, vigas, pilares e outras, além de apresentar menor efeito tixotrópico que acarreta menor pressão sobre as formas e menor resistência à segregação;
- e) os ensaios com a caixa L apontam uma melhor habilidade passante e uma melhor capacidade de fluir sem perder sua uniformidade ou causar bloqueio, através de espaços confinados e descontinuidades geométricas, para os concretos com adição de sílica ativa, que apresentou uma relação $H2/H1$ superior a 0,80, sendo então classificado como PL2 pela referida norma;
- f) a relação $H2/H1$, obtida no concreto com adição de RVM, foi inferior a 0,80, não sendo possível sua classificação conforme a NBR 15823-1:2010;
- g) os ensaios de funil V também apontam uma viscosidade plástica aparente mais baixa para os concretos de referência, enquanto que o CAA com adição de RVM mostrou se mover de forma lenta e progressiva por um tempo bem mais prolongado;

- h) os tempos de escoamento apresentados no ensaio de funil V, tanto para o concreto de referência como para o concreto com RVM, não se enquadraram nos intervalos estabelecidos pela NBR 15823-1:2010, não sendo possível classificá-los;
- i) o ensaio de funil V permite observar uma diferença de 258 segundos, ou seja, maior que 4 minutos, entre o tempo de escoamento do concreto de referência e o do CAA com adição de RVM;
- j) os ensaios de coluna de segregação apontam que os CAA com adição de RVM são mais homogêneos que os concretos de referência, apesar disso, ambos são classificados, conforme NBR 15823-1:2010, como SR2, apresentando percentual de segregação inferior a 15%;
- k) o CAA com adição de RVM, como visto nos ensaios anteriores, apresentou-se com menor fluidez e maior viscosidade, sendo, por isso, mais homogêneo que o concreto de referência;
- l) os ensaios realizados em concreto fresco mostraram que, na relação de 1,2% de sp/c (4,0% de p/c), o concreto de referência apresentou características superiores às apresentadas pelo CAA com adição de RVM;
- m) os resultados dos ensaios confirmaram que a dosagem ótima para concretos produzidos com adição de RVM é a relação de 1,4% de sp/c (4,67% de p/c) e não a relação de 1,2% de sp/c (4,0% de p/c); e
- n) os ensaios em pasta realizados com a finalidade de obter a dosagem ótima de superplastificante para aplicação em concretos não se mostraram confiáveis, devendo, portanto, os ensaios de fluidez realizados em pastas ser sempre confirmados em concretos, por meio do ensaio *slump flow*.

4.2.2 Concretos no Estado Endurecido

4.2.2.1 Avaliação da Resistência Mecânica

Os concretos de referência e os concretos com adição de RVM foram caracterizados no seu estado endurecido, como apresentam as tabelas 4.14 e 4.15. Esses ensaios foram

realizados nos pontos de saturação determinados pelos ensaios com as pastas e com os concretos, conforme comentado no item 4.1.5. Os resultados obtidos por SOUSA FILHO (2012) também são apresentados na tabela 4.14. É importante mencionar que os concretos REF-3A e REF-3B são repetições do traço REF-3 e os concretos RVM-4A e RVM-4B são repetições do traço RVM-4. A figura 4.24 apresenta os gráficos Tensão de Ruptura à Compressão Axial versus Idade dos concretos de referência e dos concretos com adição de RVM.

Tabela 4.14 - Resultados dos ensaios de caracterização dos concretos de referência no estado endurecido

Ensaio/Idade	REF-3A		REF-3B		REF-4 (SOUSA FILHO, 2012)	
	Média (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Desvio Padrão
Compressão axial (MPa): 3 dias	45,22	5,60	52,71	1,03	47,53	1,36
Compressão axial (MPa): 7 dias	63,75	1,07	62,83	2,39	59,87	3,19
Compressão axial (MPa): 28 dias	76,44	2,60	77,35	6,65	78,90	4,97
Compressão axial (MPa): 90 dias	87,85	4,56	88,82	3,87	87,53	4,81
Compressão diametral (MPa): 28 dias	5,58	0,25	5,60	0,49	5,65	0,27
Módulo de elasticidade (GPa): 28 dias	37,86	5,26	34,90	4,93	41,30	2,92
Módulo de elasticidade (GPa): 90 dias	39,11	3,84	39,43	2,20	39,53	2,74

Tabela 4.15 - Resultados dos ensaios de caracterização dos concretos com RVM no estado endurecido

Ensaio/Idade	RVM-4A		RVM-4B	
	Média (MPa)	Desvio Padrão	Média (MPa)	Desvio Padrão
Compressão axial (MPa): 3 dias	42,14	5,50	50,52	3,47
Compressão axial (MPa): 7 dias	48,85	4,27	55,71	2,64
Compressão axial (MPa): 28 dias	60,06	2,97	63,40	1,98
Compressão axial (MPa): 90 dias	66,50	1,84	66,91	5,14
Compressão diametral (MPa): 28 dias	4,82	0,26	5,33	0,22
Módulo de elasticidade (GPa): 28 dias	41,00	0,19	39,50	1,38
Módulo de elasticidade (GPa): 90 dias	42,40	1,14	40,25	0,23

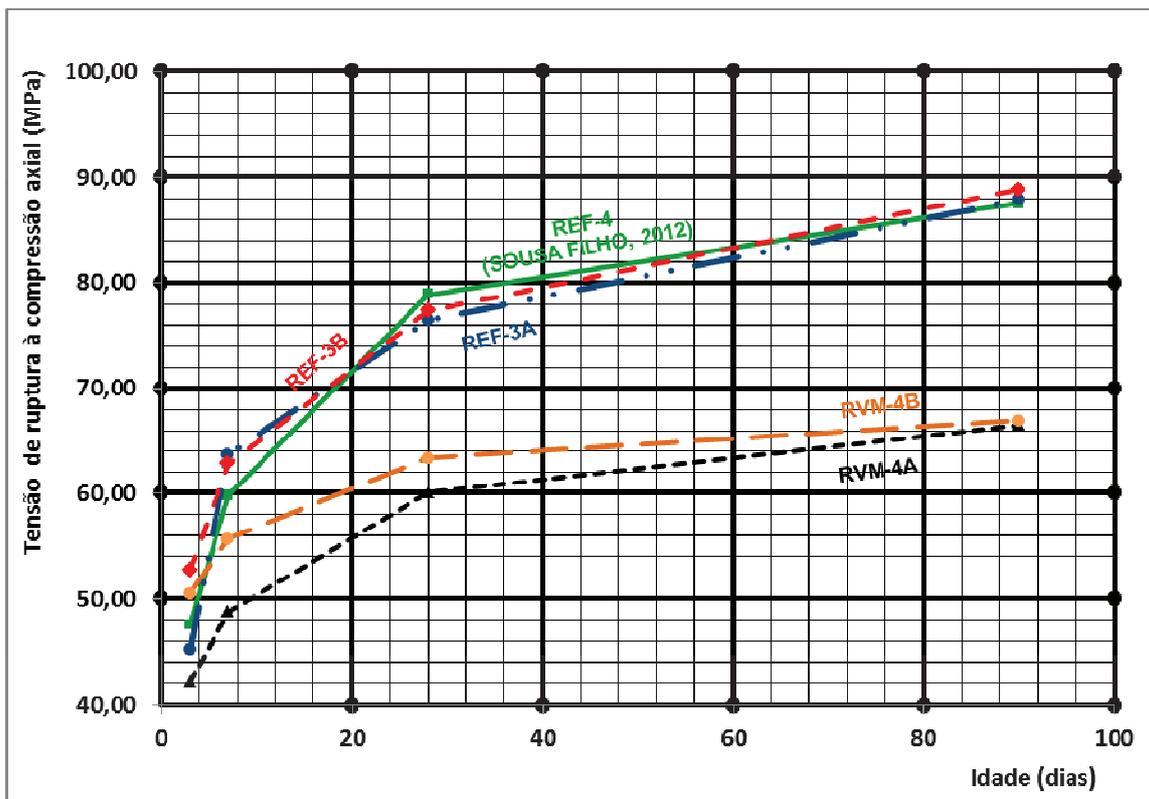


Figura 4.24 – Gráfico dos resultados dos ensaios de compressão axial nos concretos de referência e nos concretos produzidos com adição de RVM

A figura 4.25(a) apresenta detalhes da realização do ensaio do módulo estático de elasticidade à compressão, enquanto a 4.25(b) do ensaio de resistência à compressão axial.



Figuras 4.25 – (a) Ensaio do módulo estático de elasticidade à compressão e (b) de resistência à compressão axial

As observações relativa aos resultados dos ensaios em concreto no estado endurecido, com adição de sílica ativa e RVM, são, a seguir, relacionadas:

- a) os ensaios de resistência à compressão axial apontam que os concretos de referência e os concretos com adição de RVM obtiveram resistência superior a 55 MPa na idade de 28 dias, podendo, assim, ser considerado como concreto de alta resistência, segundo a NBR 8953:2009;
- b) os CAD com adição de RVM podem ser classificados como classe I, na idade de 28 dias, conforme sugere AITCIN (2000), pois atingiram uma resistência entre 50 e 75 MPa;
- c) os CAD de referência podem ser classificados como classe II, na idade de 28 dias, conforme sugere AITCIN (2000), pois atingiram uma resistência entre 75 e 100 MPa;
- d) os CAD com adição de RVM atingiram resistência próxima de 67 MPa aos 90 dias, enquanto os CAD de referência atingiram resistência próxima a 88 MPa na mesma idade;
- e) os CAD com RVM apresentaram uma resistência aproximadamente 24% menor que os concreto de referência aos 90 dias, e 20% menor aos 28 dias;
- f) a diferença apresentada em relação à resistência a compressão axial, aos 90 dias, pelos dois tipos de concretos produzidos pode ser justificada pela alta reatividade pozolânica da sílica ativa, que, conforme item 4.1.3.2.1, foi de 1.522 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$, enquanto o RVM apresentou uma reatividade de 828 mg $\text{Ca(OH)}_2/\text{g}$;
- g) o REF-3A e o REF-3B não apresentaram diferenças significativas de resistência quando comparados com REF-4, produzido com a relação de superplastificante de 1,4% de sp/c por SOUSA FILHO (2012), já que a relação a/c foi idêntica para todos os traços;

- h) os módulos estáticos de elasticidade à compressão dos concretos, tanto para os de referência como para os concretos com adição de RVM, mantiveram-se com valores próximos;
- i) os módulos estáticos de elasticidade não cresceram na mesma proporção que os da resistência à compressão, conforme previu GOMES et al. (1996), além disso, verificou-se que nem sempre os concretos de maior resistência são os que apresentam maior módulo de elasticidade;
- j) os percentuais dos valores de compressão diametral em relação aos valores de compressão axial, aos 28 dias, para os concretos de referência, ficaram aproximadamente em 7,0%;
- k) os percentuais dos valores de compressão diametral em relação aos valores de compressão axial, aos 28 dias, para os concretos com adição de RVM, ficaram aproximadamente em 8,0%; e
- l) a resistência à tração por compressão diametral aumenta para os concretos de alto desempenho, mas, segundo ZHOU et al. (1995), a razão entre a resistência à tração e à compressão é apenas da ordem de 5% nos CAD, o que não foi constatado neste trabalho, tanto para os concretos com adição de sílica ativa como para concretos com adição de RVM.

4.2.2.2 Avaliação Física (Absorção de Água por Imersão)

A tabela 4.16 apresenta os resultados do ensaio de determinação da absorção de água por imersão dos concretos no estado endurecido na idade de 90 dias.

Tabela 4.16 – Determinação da absorção de água por imersão dos concretos endurecidos na idade de 90 dias

Concreto	Média (%)	Desvio Padrão
REF	1,90	0,18
RVM	2,09	0,08

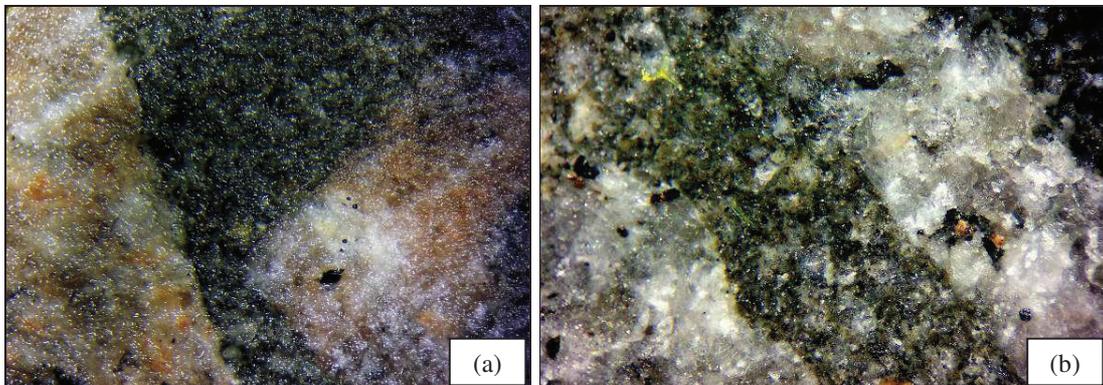
A baixa absorção de água por imersão dos concretos no estado endurecido pode ser atribuída à diminuição da porosidade, indicando que tanto o RVM como a sílica ativa em

pó preencheram os interstícios formados pelos agregados mais grosseiros e fecharam os poros, diminuindo os vazios.

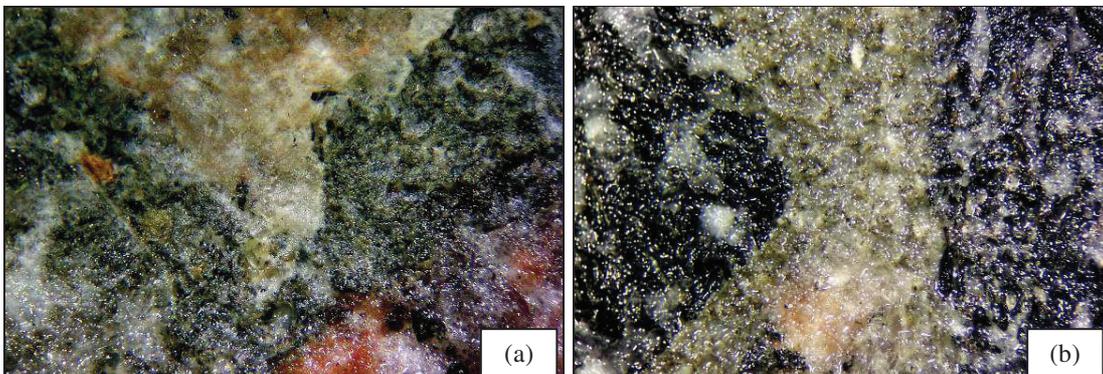
4.2.2.3 Microscopia Óptica

a) Concreto de Referência – REF

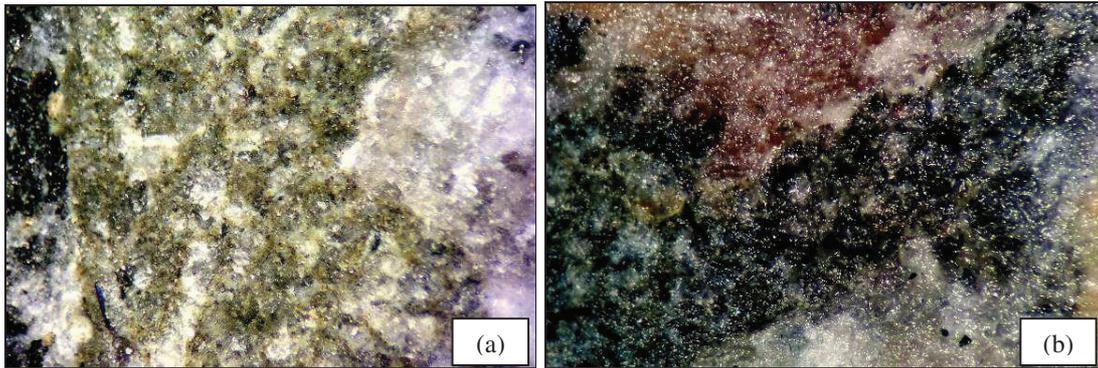
As figuras 4.26 a 4.29 apresentam as microfotografias realizadas nos concretos de referência, com adição de sílica ativa em pó – Silmix, na idade de 90 dias. Constataram-se densas zonas de transição, e não foram visíveis poros nesse concreto.



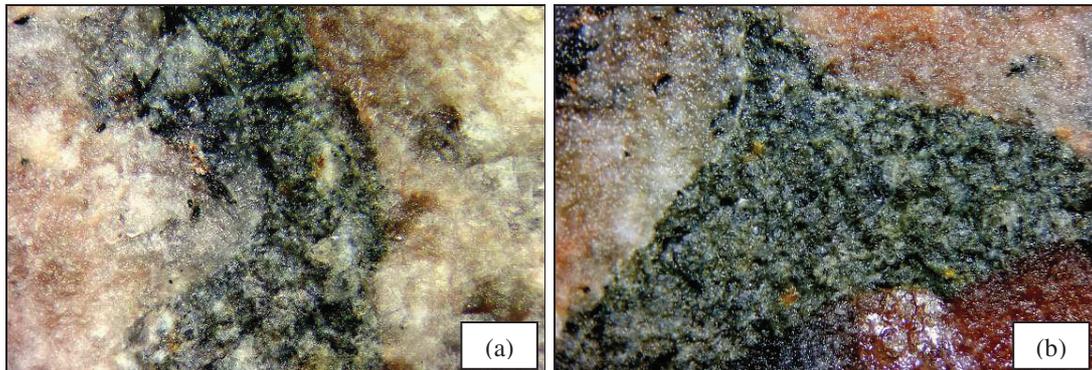
Figuras 4.26 – (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (13x à esq. e 20x à dir.): densa zona de transição



Figuras 4.27 - (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (16x à esq. e 20x à dir.): densa zona de transição



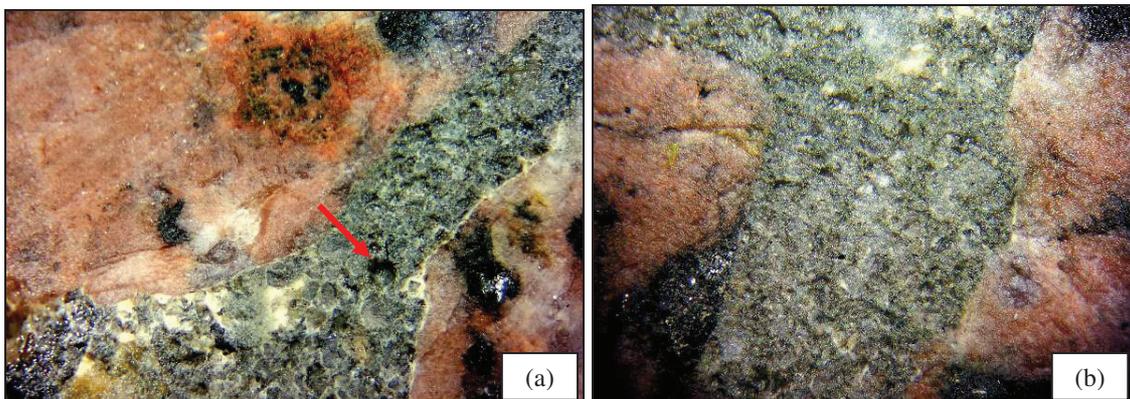
Figuras 4.28 - (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (25x à esq. e 32x à dir.): densa zona de transição



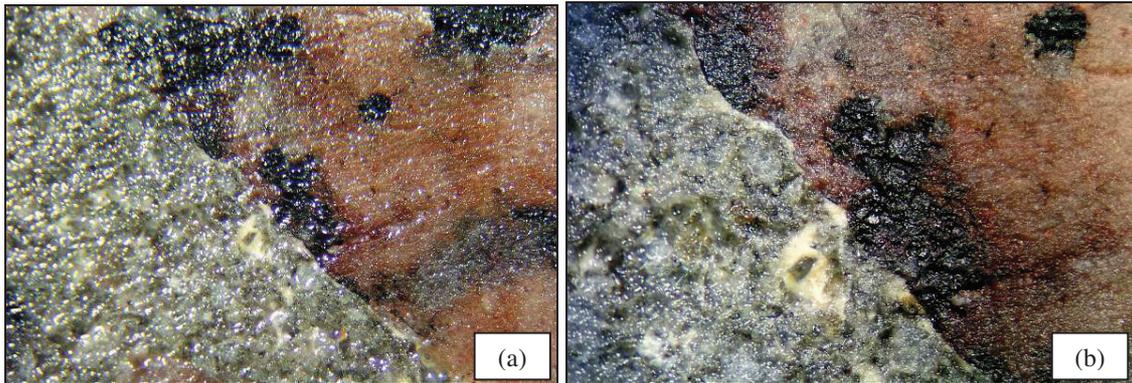
Figuras 4.29 - (a) e (b) Microfotografia REF – 90 dias (20x à esq. e 16x à dir.): sem poros

b) Concreto com Adição de RVM

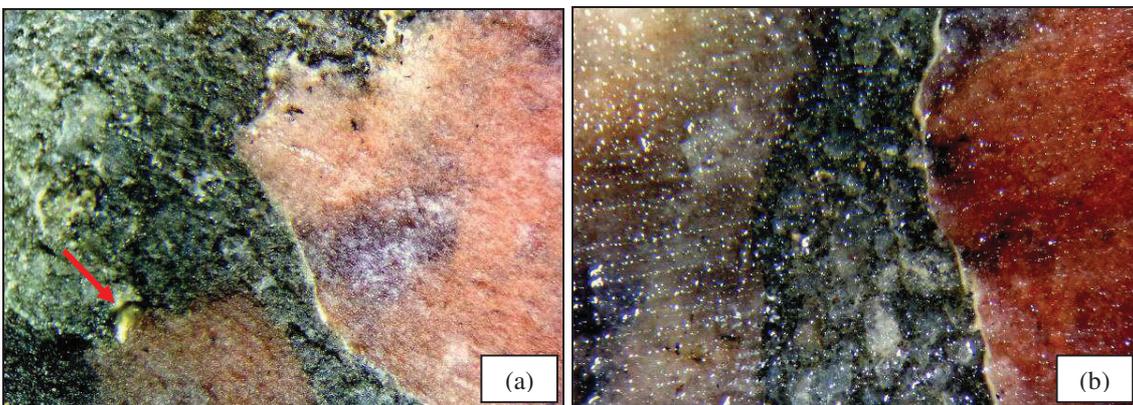
As figuras 4.30 a 4.34 apresentam as microfotografias realizadas nos concretos com adição de RVM na idade de 90 dias. Constataram-se densas zonas de transição, porém, foram percebidos alguns poros nesse concreto, diferentemente dos concretos de referência – REF.



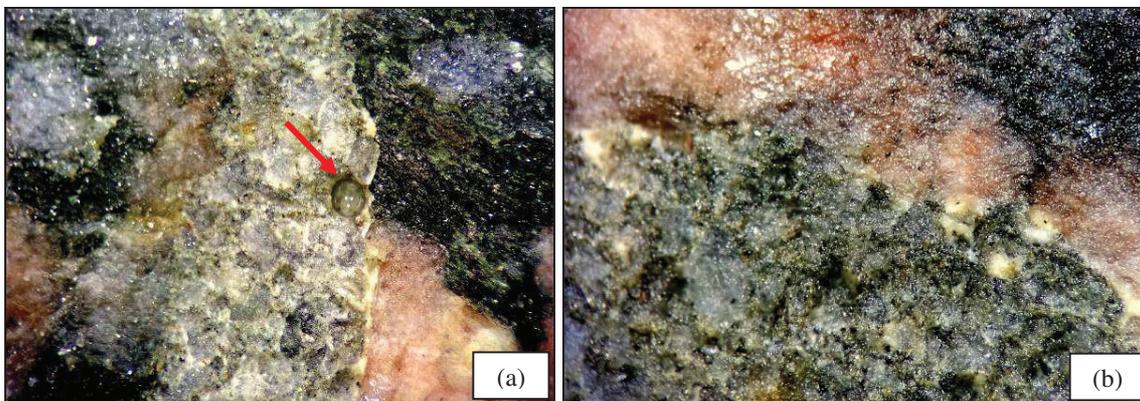
Figuras 4.30 - Microfotografia RVM – 90 dias (13x à esq. e 13x à dir.): (a) identificação de poro e (b) densa zona de transição



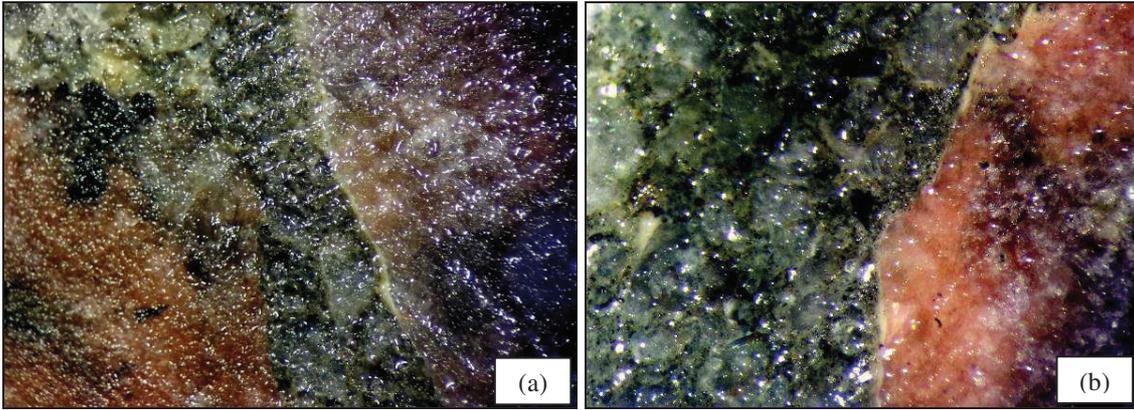
Figuras 4.31 - (a) e (b) Microfotografia RVM – 90 dias (13x à esq. e 25x à dir.): densa zona de transição



Figuras 4.32 - Microfotografia RVM – 90 dias (16x à esq. e 16x à dir.): (a) identificação de poro e (b) densa zona de transição



Figuras 4.33 - Microfotografia RVM – 90 dias (25x à esq. e 25x à dir.): (a) identificação de poro e (b) densa zona de transição



Figuras 4.34 - (a) e (b) Microfotografia RVM – 90 dias (25x à esq. e 32x à dir.): densa zona de transição

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste capítulo, são apresentadas as avaliações, as conclusões e as sugestões para futuras pesquisas.

5.1 Conclusão

Com o traço adotado na produção dos concretos desta pesquisa, tendo um consumo de cimento de 486 kg/m³, foram obtidos resultados satisfatórios na produção de concretos que apresentaram características de autoadensável e de alto desempenho simultaneamente.

Os resultados obtidos neste trabalho apontam como uma alternativa viável, do ponto de vista técnico e ambiental, a utilização do RVM como adição mineral em CAA e em CAD simultaneamente. Além disso, os resultados mostram que o RVM apresenta características que o torna um material de moderada reatividade pozolânica, muito embora esta atividade tenha valor abaixo daquele obtido para a sílica ativa em pó da Silmix.

O resíduo de vidro industrial apresentou-se como um material potencialmente reativo frente aos álcalis do cimento. Mesmo após sua moagem em moinho de bolas e mitigação através da combinação com cimento CP II-Z-32, esse resíduo mostrou-se reativo. Entretanto, essa reatividade apresentou valores muito próximos aos limites estabelecidos em norma, indicando que, para um tempo de moagem maior, o resíduo poderá se tornar inócuo em relação a reatividade álcali-agregado.

O aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 deve ser empregado na dosagem p/c de 4,67% do peso do cimento quando a adição mineral for o RVM. Já para os concretos com adições de sílica ativa em pó Silmix, a dosagem ótima a ser empregada é a relação p/c de 4,0% do peso do cimento.

Observou-se uma boa evolução da resistência à compressão axial, entre 28 e 90 dias, para os concretos com RVM, chegando a uma resistência próxima a 67 MPa aos 90 dias. Já os concretos com sílica ativa alcançaram uma resistência próxima a 88 MPa aos 90 dias. Ambos os concretos foram considerados de alta resistência, segundo a NBR 8953:2009, pois alcançaram resistências superiores a 55 MPa aos 28 dias.

Segundo a classificação adotada por AITCIN (2000), tomando como referência a resistência à compressão axial obtida aos 28 dias, pode-se classificar o CAD com adição de sílica ativa, obtido nesta pesquisa, na classe II, conforme apresentado na tabela 2.1. Já o concreto com RVM, foi classificado na classe I, pois sua resistência apresentou-se entre 50 e 75 MPa.

Como foram obtidos com sucesso concretos autoadensáveis e de alto desempenho produzidos com adição de Resíduo de Vidro Moído – RVM, os resultados desta pesquisa são satisfatórios.

5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas

Como o produto final desta pesquisa visa a obtenção de concretos, com qualidades e resistências que lhe permitam ser classificados como autoadensáveis e de alto desempenho, com emprego de materiais componentes da região metropolitana de Manaus, recomenda-se, como sugestão ensaios que possam avaliar a durabilidade deles, por meio de estudos de penetração de íons cloretos, carbonatação, porosidade e permeabilidade, e uma análise dos custos dos concretos para confirmar a viabilidade destes em obras de construção civil nas proximidades de Manaus.

Outras sugestões para pesquisas futuras são:

- a) produzir concretos com resíduos de vidro moído com granulometria ainda menor que a empregada nesta pesquisa, avaliando, ainda, a atividade pozolânica e reatividade álcali-agregado do resíduo de vidro ultrafino;
- b) realizar novos ensaios de reatividade álcali-agregado com o RVM de forma a atender o limite estabelecido em norma, podendo-se optar por substituir parcialmente o cimento empregado por teores de sílica ativa ou metacaulim, ou ainda diminuir mais a granulometria do resíduo de vidro industrial;
- c) produzir concretos com outros materiais componentes, como por exemplo, sílica da cinza da casca de arroz como adição ou ainda outros tipos de vidro, como os sódio-cálcico;

- d) produzir concretos com outros aditivos minerais em conjunto para obter melhores resultados na matriz cimentícia;
- e) estudar, por meio de um método de dosagem experimental, como o método de empacotamento, outros traços para melhorar os resultados, principalmente, com relação à resistência à compressão; e
- f) verificar o problema da retração em concretos com adições de resíduo de vidro moído.

REFERÊNCIAS

- ACKER, P. *The shrinkage of concrete: physical origins, parameters of influence, analysis by type of structure and by mode of placement*. RILEM GMC, 1995.
- ACKER, P.; ULM, F. J. *Creep and shrinkage of concrete: physical origins and practical measurements*. Nuclear Engineering and Design, 203, 2001.
- AÏTCIN, P. C. **Concreto de alto desempenho**. São Paulo, Pini, 2000.
- AÏTCIN, P. C. *High-performance concrete*. Québec, Université de Sherbrooke, 1998.
- AÏTCIN, P. C.; JOLICOEUR, C.; MACGREGOR, J. G. *Superplasticizers: how they work and why they occasionally don't*. *Concrete International*, 1994.
- AÏTCIN, P. C.; NEVILLE, A. M. **120 MPa sem mistério**. Revista Técnica, São Paulo, v. 3, n. 19, p. 29-33, nov/dez. 1995.
- AÏTCIN, P. C.; NEVILLE, A. M.; ACKER, P. *Integrated view of shrinkage deformation*. *Concrete International*, 1997.
- AKERS, S. A. S.; PARTL, M. *Hygral and thermal expansion/shrinkage properties of asbestos-free fibre cement*. Cement & Concrete Composites, 1990.
- ALENCAR, R.; BATTAGIN, I.; CUPERTINO, M. A. **A norma brasileira de concreto autoadensável**. Revista Concreto. Ano XXXVIII, n. 59, pp. 58–64. São Paulo, IBRACON, 2010.
- ALMEIDA, I. R. **A influência da microssílica e do superplastificante na durabilidade dos concretos**. Rio de Janeiro, In: Seminário – O concreto: A utilização da sílica ativa em sua composição, 1996.
- ALMEIDA, I. R. **Concretos dosados em central, com areia 100% artificial**. São Paulo, In: Anais do II SUFFIB – Seminário – O uso da fração fina da britagem, 2005.
- AMERICAN CONCRETE INSTITUTE. COMMITTEE 212. ACI 212.3R-91. *Chemical admixtures for concrete*. ACI Manual of Concrete Practice 2001. Detroit, American Concrete Institute, 2001.
- _____. COMMITTEE 221. ACI 221.1R-98. *State-of-the-art: report on alkali-aggregate reactivity*. Farmington Hills, Michigan, American Concrete Institute, 1998.
- _____. COMMITTEE 234. ACI 234R-96. *Guide for the use of silica fume in concrete. Manual of Concrete Practice 2001*. Detroit, American Concrete Institute, 2001.

AMARAL FILHO, E. M. **Concreto de alta resistência**. Revista Concreto. Ano II, n. 4, pp. 40–49. São Paulo, IBRACON, 1992.

ANGULO, S. C. **Variabilidade de Agregados Graúdos de Resíduos de Construção e Demolição Reciclados**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil), Escola Politécnica da USP, Universidade de São Paulo, 2000.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **Guia Básico de utilização do Cimento Portland**. 7 ed. São Paulo, 2002. 28p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

_____. **NBR 5733: Cimento Portland de alta resistência inicial**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

_____. **NBR 5735: Cimento Portland de alto-forno**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

_____. **NBR 5736: Cimento Portland pozolânico**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1999.

_____. **NBR 5738: Concreto – Procedimento para moldagem e cura de corpos-de-prova**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

_____. **NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

_____. **NBR 5752: Materiais pozolânicos – determinação de atividade pozolânica com cimento Portland – índice de atividade pozolânica com cimento**. Rio de Janeiro, 1992.

_____. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto - Procedimento**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2007.

_____. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR 7218: Agregados - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 7389-1: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 1: Agregado miúdo**. Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR 7389-2: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto – Parte 2: Agregado graúdo.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR 7222: Concreto e argamassa - Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2011.

_____. **NBR 7682: Calda de cimento para injeção – Determinação do índice de fluidez.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1983.

_____. **NBR 7809: Agregado graúdo - Determinação do índice de forma pelo método do paquímetro - Método de ensaio.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

_____. **NBR 8522: Concreto - Determinação do módulo estático de elasticidade à compressão.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

_____. **NBR 8490: Argamassas endurecidas para alvenaria estruturas – retração por secagem (cancelada em 18/11/2010).** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1984.

_____. **NBR 8953: Concreto para fins estruturais – Classificação pela massa específica, classe de resistência e consistência.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR 9778: Argamassa e concreto endurecidos – Determinação da absorção de água por imersão – Índice de vazios e massa específica.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1987.

_____. **NBR 10004: Resíduos sólidos – classificação.** Rio de Janeiro, 2004.

_____. **NBR 11578: Cimento Portland composto - Especificação.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1991.

_____. **NBR 12653: Materiais pozolânicos: especificações.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1992.

_____. **NBR 12654: Controle tecnológico de materiais componentes do concreto - Procedimento.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2000.

_____. **NBR 12655: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle e recebimento - Procedimento.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

_____. **NBR 13957: Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Métodos de ensaio.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1997.

_____. **NBR 15577-1: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

_____. **NBR 15577-2: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

_____. **NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

_____. **NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

_____. **NBR 15577-6: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2008.

_____. **NBR 15823-1: Concreto autoadensável - Parte 1: Classificação, controle e aceitação no estado fresco.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 15823-2: Concreto autoadensável - Parte 2: Determinação do espalhamento e do tempo de escoamento - Método do cone de Abrams.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 15823-4: Concreto autoadensável - Parte 4: Determinação da habilidade passante – Método da caixa L.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 15823-5: Concreto autoadensável - Parte 5: Determinação da viscosidade – Método do funil V.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 15823-6: Concreto autoadensável - Parte 6: Determinação da resistência à segregação – Método da coluna de segregação.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 15895: Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2010.

_____. **NBR 15900-3: Água para amassamento do concreto - Parte 3: Avaliação preliminar.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR NM 17: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2004.

_____. **NBR NM 23: Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

_____. **NBR NM 26: Agregados – Amostragem.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR NM 27: Agregados - Redução da amostra de campo para ensaios de laboratório.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

_____. **NBR NM 30: Agregado miúdo - Determinação da absorção de água.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

_____. **NBR NM-33: Concreto - Amostragem de concreto fresco.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.

_____. **NBR NM 45: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2006.

_____. **NBR NM 46: Agregados - Determinação do material fino que passa através da peneira 75 um, por lavagem.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

_____. **NBR NM 49: Agregado miúdo - Determinação de impurezas orgânicas.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2001.

_____. **NBR NM 52: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR NM 53: Agregado graúdo - Determinação da massa específica, massa específica aparente e absorção de água.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2009.

_____. **NBR NM 67: Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.

_____. **NBR NM 248: Agregado - Determinação da composição granulométrica.** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.

ASSOCIAÇÃO TÉCNICA BRASILEIRA DAS INDÚSTRIAS AUTOMÁTICAS DE VIDRO - ABIVIDRO. Disponível em: <<http://www.abividro.org.br>>. Acesso em: dez. 2007.

ASTM – AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS. **ASTM C-157 – 91 – Standard test method for length change of hardened hydraulic-cement mortar and concrete** . In: Annual Book of ASTM, 1991.

BABU, K. G, PRAKASH, P.V. **Cement and Concrete Research**. 25, 6. 1995.

BANFILL, P. F. G. **The rheology of fresh cement and concrete – a review**. In: 11th International Cement Chemistry Congress. Durban, 2003.

BARDINI, I. S. e MARCHIORO, T. B.. **Um estudo exploratório de uso de vidro reciclado como agregado de concreto**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação). Universidade do Sul de Santa Catarina. Santa Catarina, Tubarão, SC, Brasil, 2007.

BARTOS, P. J. M. **Measurement of key properties of fresh self-compacting concrete**. In: CEN/STAR PNR Workshop. Paris, 2000.

BARTOS, P. J. M.; GRAUERS, M. **Self-Compacting Concrete**. *Concrete*, v.33, n. 4, 1999.

BARTOS, P. J. M.; SONEBI M.; ZHU W.; GIBBS J.; TAMIMI A.. **Properties of Hardened Concrete**. Final report. University of Paisley. Scotland, United Kingdom. 2000.

BAZANT, Z. P.; KIM, J. K. **Improved prediction model for time-dependent deformations of concrete: Part 3 - Creep at drying**. *Materials and Structures*, 25, RILEM, 1992.

BAZANT, Z. P.; KIM, J. K.; PANULA, L. **Improved prediction model for time dependent deformations of concrete: Part 1 - Shrinkage**. *Materials and Structures*, RILEM, 1991.

BENTZ, D. P. GARBOCZI, E. J. **Simulation studies of the effects of mineral admixtures on the cement paste-aggregate interfacial zone**. *ACI Materials Journal*, v. 88, n. 5, 1991.

BIANCHINI, M. **Análise da influência dos teores de sílica ativa na produção de concretos de alta resistência em central dosadora de concreto**. Dissertação de mestrado. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2010.

BICZOK, I. **Corrosion y proteccion del hormigon**. Bilbao/España, Ediciones Urmo, 1972.

BISSCHOP, J.; VAN MIER, J. G. M. **Drying shrinkage microcracking in cement-based materials**. *HERON*, 47(3), 2002.

BOUHAMOU, N ; BELAS, N ; ATTAR, A.; ACHOUR, B ; EBROUKI. *Properties of Self-Consolidating Concrete Produced Using Local Algerian Materials*. In Journal of Construction in Developing Countries, Algeria, 2011.

BULLETIN 79 - *Alkali-Aggregate reaction in concrete dams – eview and recomendations*. Paris, CIGB/ICOLD, 1991.

CAMÕES, A. **Influência da presença de adições no comportamento do concreto fresco em composições com incorporação de superplastificantes**. Guimarães, Portugal, Universidade do Minho, 2005.

CARBONARI, B. T. *A synthetic approach for the experimental optimization of high strength concrete*. 4th International Symposium on Utilization of High-Strength – High Performance Concrete. Paris, França, 1996.

CARMO, J. B. M. **Análise comparativa do desempenho de concretos compostos com sílica ativa e metacaulim face à resistência mecânica e à viabilidade econômica**. Dissertação de mestrado. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2006.

CAVALCANTI, D. **Contribuição ao estudo de propriedades do concreto autoadensável visando sua aplicação em elementos estruturais**. Dissertação de mestrado. Maceió, Universidade Federal de Alagoas, 2006.

CEMPRE, **Consórcio Empresarial para a Reciclagem**, www.cempre.org.br, Internet em 05/12/2013.

CHAWLA, K. K. *Composite materials*. New York, Springer-Verlag, 1987.

CHERN, J. C.; YOUNG, C. H. *Compressive creep and shrinkage of steel fibre reinforced concrete*. The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete, 11(4), 1989.

CHEYREZY, M.; BEHLOUL, M. *Creep and shrinkage of ultra-high performance concrete*. In: ULM, F. J.; BAZANT, Z. P. ; WITTMANN, F. H. , editor. *Proceedings of the Sixth International Conference Mechanics of Concrete and Other Quasi-Brittle Materials*. Elsevier, Cambridge, 2001.

CICINELLI, G. C. **Álcali agregado: reação perigosa**. Disponível em: <<http://www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125/artigo59011-5.asp>>. Acesso em: 28 dez. 2008.

CIMENTO ITAMBÉ. **Concreto bóia?** Disponível em: <<http://www.cimentoitambe.com.br/massa-cinzenta/concreto-boia>>. Acesso em: 20 fev. 2012.

COLLEPARDI, S. et. Al. *Mechanisms of actions of different superplasticizers for high-performance concrete*. In: *International Conference on High-Performance Concrete and*

Performance and Quality of Concrete Structures, Gramado. Proceedins, Gramado, Rio Grande do Sul, 1999.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução nº 307, de 5 de julho de 2002**. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/port/conama/res/res02/res30702.html>. Acesso em: jun. 2010.

CORDEIRO, G. C., **Utilização de Cinzas Ultrafinas do Bagaço de Cana-de-Açúcar e da Casca de Arroz como Aditivos Minerais em Concreto**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2006.

CRENTSIL, K. S; BROWN, T.; TAYLOR, A. *Recycled glass as sand replacement in premix concrete*, Ed. Eco-Recycled Australia and CSIRO. 2001.

DACZKO, J. A. CONSTANTINER, D. *Rheodynamic concrete*. Ibracon: 43º Congresso Brasileiro do Concreto. 2001.

DAL MOLIN, D. C. C. **Adições minerais para concreto estrutural. Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização**. Edição G. C. Isaia. São Paulo, Ibracon, 2005.

DAL MOLIN, D. C. C. **Contribuição ao estudo das propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com e sem adição de microssílica**. Tese de doutorado. São Paulo, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 1995.

DAL MOLIN, D. C.; VIEIRA F. M. P.; WOLF, J. **Concreto de Alta resistência**. São Paulo, ABCP, 1997.

DE LARRARD, F.; MALIER, Y. *Engineering properties of very high performance concrete*. In: MALIER, Y. (ed). *High performance concrete – from material to structure*. London, E & FN Spon, p. 85-114, 1992.

DIAMOND, S. *A review of alkali-silica reaction and expansion mechanisms – 1: alkalis in cements and in concrete pore solutions*. *Cement and Concrete Research*, v. 5, 1975.

DIAMOND, S. **ASR: Another look at mechanisms**. In: *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*, 8., 1989, Kyoto. *Proceedings*.. Kyoto: Edited by K. Okada, S. Nishibayashi e M. Kawamura, 1989.

DINIZ, J. Z. **Alto desempenho alta resistência**. São Paulo, ABCP, 1997.

DOLAR-MANTUANI, L. M. M. *Undulatory extinction in quartz used for identifying alkali aggregate reactivities rocks*. In: OBERHOLSTER, R. E. (Ed.). *Proceedings of the 5. International Conference on Alkali Reaction in Concrete*. Cape Town: [s.n.], 1981.

DUNCAN, M. A. G.; GILLOTT, J. E.; SWENSON, E. G. *Alkali-aggregate reaction in Nova Scotia II: field and petrographic studies*. *Cement and Concrete Research*, v. 3, n. 2, 1973.

DYER, T. D.; DHIR, R.; MATER, J. in Civil Eng. ASCE 13, 6 (2001) 412.

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

EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. *Specificacion and guidelinex for self-compacting concrete*. EFNARC, 2002.

EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONSTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. *Specificacion and guidelinex for self-compacting concrete*. EFNARC, 2005.

FOLLIARD, K. J.; THOMAS, M.D.A.; KURTIS, K.E. *Report No.FHWA-RD-03-047: Research, Development, and Technology: Guidelines for the use of lithium to mitigate or prevent alkali-silica reaction (ASR)*. Turner-Fairbank Highway Research Center, FHWA - Federal Highway Administration, 2003.

FOURNIER, B; BÉRUBÉ, M. A.; THOMAS, M. D. A.; FOLLIARD, K. J. *Mitigation of the effect pf alkali-silica reaction in concrete structures and recent advances in concrete materials and testing*. IV.HPC – International ACI/CANMET CONFERENCE on Quality of concrete structures and recent advances in concrete materials and testing, 2005, Olinda. *Proceedings...* São Paulo, ACI / IBRACON, 2005.

FURNAS, Equipe de; Laboratório de Concreto. **Concretos massa, estrutural, projetado e compactado com rolo - Ensaios e propriedades**. São Paulo, Walton Pacelli de Andrade/PINI, 1997.

GETTU, R. AGULLÓ, L. *Estado del arte del hormigón autocompactable y su caracterización*. Informe C4745/1. Departamento de engenharia de construção E.T.S. de engenheiros de caminhos, canais e portos. Universidade Politécnica da Catalunha. Barcelona, 2003.

GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo, Atlas, 2010.

GILLOTT, J. E. *Alkali-aggregate reactions in concrete*. *Engineering Geology*, v. 9, 1975.

GJORV, O. E. *High Strength Concrete*. In: V. M. MALHOTRA (ed.). *Advances in Concrete technology* – CAMMET, 2nd. edition. Ottawa. Proceeding... Ottawa, Canada, 1994. p. 19-82.

GLASSER, F. P. *Chemistry of the alkali-aggregate reaction*. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London, Blackie / New York, Van Nostrand Reinhold, 1992.

GOMES, P. C. C.; SHEATA, L. C. D.; ALMEIDA, I. R. **Resistência à tração e módulo de elasticidade de concretos de alta resistência.** In: International Congress on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures, 1996, Florianópolis, Proceeding... Florianópolis, SC, Jun. 1996. p. 27-38.

GOMES, P. C. C. *Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.* Tese de doutorado. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

GOULART NETO, A. A.; GALLETI, A. A. B.; TORTORELLO, F. I.; HASPARYK, N. P. A.; GÓZ, R. S.; BITTENCOURT, R. M.; PACELLI, W. A. **Metodologia para verificação da influência da RAA em estruturas de concreto no campo e no laboratório.** In: Congresso Brasileiro do Concreto (REIBRAC), 40., 1998, Rio de Janeiro. Anais.. Rio de Janeiro, IBRACON, 1998.

GUTIÉRREZ, P. A.; CÁNOVAS, M. F. *High-performance concrete: requirements for constituent materials and mix proportioning.* ACI Materials Journal. Detroit, v. 93, n. 3, 1996.

HARTMANN, C. T. *Avaliação de aditivos superplastificantes base policarboxilatos destinado a concretos de cimento Portland.* Dissertação de mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002.

HASPARYK N. P. **Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado.** Tese de doutorado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.

HASPARYK, N. P. **Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa.** Dissertação de mestrado. Goiânia, Universidade Federal de Goiás, 1999.

HASPARYK, N. P.; GONÇALVES, I. N.; VEIGA, F. N. **Reação álcali-agregado: a utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos.** In: Congresso Ibero-americano de Patologia das Construções, 4., Congresso de Controle de Qualidade, 4., 1997, Porto Alegre. Anais.. Porto Alegre, UFRGS.CPGEC, 1997.

HETÉNYI, M. *Handbook of experimental stress analysis.* USA, John Wiley and Sons, 1950.

HOBBS, D. W. *Alkali-silica reaction in concrete.* London, Thomas Telford, 1988.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. *Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste.* *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1995.

ILLSTON, J. M. *The components of strain in concrete under sustained compressive stress.* *Magazine of Concrete Research*, 17(50), 1965a.

- ILLSTON, J. M. *The creep of concrete under uniaxial tension*. *Magazine of Concrete Research*, 17(51), 1965b.
- JIANG, L. LIN, B. CAI, Y. *Studies on hydration in high-volume fly ash concrete binders*. *ACI Materials Journal*, v. 96, n. 6, 1999.
- JOHNSTON, C. D.; GAMBLE, V. M.; MALHOTRA, V. M.; COLLEPARDI, M.; CORRADI, M. *Effects of superplasticizers on properties of fresh and hardened concrete. Superplasticizers in Concrete*. Washington DC, 1979
- KARAMBERI, A; MOUTSATSOU, A.. “*Participation of coloured glass cullet in cementitious materials*”. *Cement and Concrete Research*, v. 27, n. 2, p. 319-327, feb. 2005.
- KECK, R. H. *Improving concrete durability with cementitious materials. Concrete International*. 2001.
- KHAYAT, K. H. *Workability, testing, and performance of self-consolidating*. *ACI Materials Journal*, v. 94, n. 4, 1999.
- KHAYAT, K.H; HU, C.; MONTY, H. *Stability of self-consolidating concrete, advantages, and potencial applications*. Edição: A. Skarendhal; Petersson. In:INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 1st,1999, Stockholm. Proceedings... France: RILEM Publications, 1999, p.143-152.
- KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos**. In: Simpósio Nacional de Agregados, 1., 1986, São Paulo. Anais.. São Paulo, Escola Politécnica da USP, 1986.
- KIHARA, Y. **Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros**. In: Congresso Brasileiro de Cimento, 3., 1993, São Paulo. Anais.. São Paulo, ABCP, 1993.
- KLEIN, N. S. **Influência da substituição da areia natural pela areia de britagem no comportamento do concreto auto-adensável**. Dissertação de mestrado. Londrina, Universidade Estadual de Londrina, 2008.
- KLOSS, C. L. **Materiais para construção civil**. CEFET-PR, 1996.
- KOVLER, K. *Testing system for determining the mechanical behaviour of early age concrete under restrained and free uniaxial shrinkage*. *Materials and Structures*, 27, 1994.
- KUPERMAN, S. C.; SALLES, F. M.; PÍNFAARI, J. C.; CARNEIRO, E. F. **A CESP e a detecção da reação álcali-agregado**. In: Seminário Nacional de Grandes Barragens, 26., 2005. Anais.. Goiânia: CBDB, 2005.
- LIMA, S. P. **Estudo da Produção e Aplicação em Pastas Cimentícias de Sílica Gel Provenientes das Cinzas da Casca do Arroz**. Dissertação de Mestrado. Manaus, Universidade Federal do Amazonas, 2009.

LISBÔA, E. M. **Obtenção do concreto autoadensável utilizando o resíduo de serragem de mármore e granito e estudo de propriedades mecânicas.** Dissertação de mestrado. Maceió, Universidade Federal de Alagoas, 2004.

MAIA, S. B. **O vidro e sua fabricação.** 1. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2003. 211 p.

MAILVAGANAM, N. P. *Admixture compatibility in special concretes.* In: *International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, 2nd, Gramado, Proceedings... Gramado, Rio Grande do Sul, 1999.

MALHOTRA, V. M. *Fly ash, slag, silica fume, and rice-husk Ash in Concrete: A Review.* *Concrete Internacional*, 1993.

MALHOTRA, V. M. *Innovative applications of superplasticizers for producing high-performance concrete.* Trabalho 131. 19 p. In: Congresso Brasileiro do Concreto – REIBRAC/IBRACON, 40., Rio de Janeiro, 1998.

MALHOTRA, V. M. *Innovative applications of superplasticizers in concrete – A review.* In: *Mario Collepardi Symposium on Advances in Concrete Science and Technology*, 1981.

MALHOTRA, V. M.; MEHTA, P. K. *Pozzolanic and cementitious materials.* *Advances in Concrete Technology*, v. 1, Gordon and Breach Publishers, 1996.

MALVAR, L. J.; CLINE, G. D.; BURKE, D. F.; ROLLINGS, R.; SHERMAN, T. W.; GREENE, J. L. *Alkali-silica reaction mitigation: state of the art and recommendations.* *ACI Materials Journal*, v. 99, n. 5, p. 480-489, 2002.

MEHTA, P. K. *Concrete technology for sustainable development.* *Concrete Internacional*. v. 21, n. 11, 1999.

MEHTA, P. K. *Natural pozzolan.* In: *Supplementary Cementing Materials*. Ottawa, 1987.

MEHTA, P. K. *Pozzolanic and cementitious by-products in concrete – another look.* In: *International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, 1989.

MEHTA, P. K.; AÏTCIN, P. C. *Microstructural basis of selection of materials and mix proportions for high-strength concrete.* In: *High-Strength Concrete – Second International Symposium*. ACI, 1990.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concrete: structure, properties, and materials.* New Jersey, Prentice-Hall, 1993.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, PINI, 1994.

- MEHTA, P. K. **High-performance concrete technology for the future**. In: *International Congress on High-performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, 1996.
- MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de filer calcário**. Dissertação de mestrado. Florianópolis, Universidade Federal de Santa Catarina, 2005.
- MENDES, S. **Estudo experimental de concreto de alto desempenho utilizando agregados graúdos disponíveis na região metropolitana de Curitiba**. Dissertação de mestrado. Curitiba, Universidade Federal do Paraná, 2002.
- MEYER, C.; XI, Y.; MATER, J. in *Civil Eng. ASCE* 11, 2 (1999) 89.
- MINDESS S.; YOUNG F. J. **Concrete**. Englewood Cliffs, New Jersey, Prentice-Hall, 1981.
- MIZUMOTO, C. **Investigação da reação álcali-agregado (raa) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**. Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho / Campus de Ilha Solteira, 2009.
- MUSSE, C. L. B. **Avaliação das potencialidades da cinza de lodo de esgoto da ete. goiânia como adição mineral na produção de argamassa de cimento portland**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Goiás, 2007.
- NETTO, R. M. **Materiais pozolânicos**. Artigo técnico. Belo Horizonte, Universidade Federal de Minas Gerais, 2006.
- NEVILLE, A. M. **Creep of concrete: plain, reinforced and prestressed**. Amsterdam, North-Hoalnd Publ., 1970.
- NEVILLE, A. M. **Chloride attack of reinforced concrete: an overview**. *Materials and Structures*, 28, 1995.
- NEVILLE, A. M. **Properties of concrete**. London, Pitman, 1975.
- NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. São Paulo, Pini, 1997.
- NUNES, S. C. B. **Betão auto-compactável: tecnologia e propriedades**. Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil, Porto, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2001.
- OKAMURA, H. OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 1, N° 1. Abril, 2003. pp. 5-15.
- OKAMURA, H. OZAWA, K. OUCHI, M. **Self-compacting concrete**. *Structural Concrete*, N° 1. Março, 2000. pp. 3-17.

- OKAMURA, H. *Self-compacting high-performance concrete*. *Concrete Internacional*, 1997.
- OZOL, M. A. *Alkali-carbonate rock reaction*. In: KLIEGER, P.; LAMOND J. F. *ASTM/STP 169C: Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. Philadelphia, ASTM, 1994.
- PAIVA, Otávio. **Resíduo industrial de vidro moído em argamassa de cimento Portland**. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Amazonas, Manaus -AM: 2009.
- PAULON, V. A. **Reações álcali-agregado em concreto**. Dissertação de mestrado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Escola Politécnica, 1981.
- PERDIZ, R. **Avaliação da utilização do granito da região de Moura do município de Barcelos como agregado graúdo em concreto**. Dissertação de mestrado. Manaus, Universidade Federal do Amazonas, 2009.
- POLLEY, C; CRAMER, S. M; DE LA CRUZ, R. V; MATER, J. *Civil Engineering*. ASCE 10, 1998.
- POOLE, A. B. *Introduction to alkali-aggregate reaction in concrete*. In: SWAMY, R. N. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Glasgow/London, Blackie/New York, Van Nostrand Reinhold, 1992.
- QUEBAUD, M. R. et al. **Influência do Teor em Agregados Provenientes da Reciclagem de Materiais de Demolição (Agregados Reciclados) na Permeabilidade do Concreto**. In: Congresso Brasileiro do Concreto, 1999, Salvador.
- RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J.; SHIHUA, Z. *Control of slump loss in superplasticized concrete*. *Materials and Structures*, n. 22, 1989.
- RAMACHANDRAN, V. S.; MALHOTRA, V. M.; JOLICOEUR, S.; SPIRATOS, N. *Superplasticizers: Properties and Applications in Concrete*. Canadá, CANMET, 1998.
- RAVERDY, M., BRIVOT, F., PAILLÈRE, A. M., BRON, R., 1980, “*Appréciation de l’activité pouzzolanique de constituents secondaires*”. In: 7e Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris, France, v. 3, pp. 36-41.
- RAVINA, D.; SHALON, R. *Plastic shrinkage cracking*. *ACI Journal*, Title n. 65-22, 1968.
- REGOURD, M. *Alteration interne des bétons – la reaction alcalis-granulats: La durabilité dès structures beton en béton*. Paris, Travaux, 1988.

- RELATORIO FINAL. **Panorama brasileiro e relato técnico do simpósio sobre reatividade álcali-agregado em estruturas de concreto.** Goiânia, CBGB/ FURNAS, 1999.
- REZENDE, L. S. **Concreto auto-adensável com adição de pó de mármore.** Artigo técnico. São Cristóvão, Universidade Federal de Sergipe, 2009.
- RILEM TECHNICAL COMMITTEE. *Final report of RILEM TC 188-CSC ‘casting of self-compacting concrete’.* Materials and Structures. Maio, 2006.
- RILEM TECHNICAL REPORTS. *Final report: siliceous by-products for use in concrete.* Materials and Structures, v. 21, n. 121, 1988.
- RILEM. RILEM TC 107 CSP. *Measurement of time-dependent strains of concrete.* RILEM, 1997.
- RODRIGUES, E. P. **Parâmetros texturais de deformação em “granitóides” e sua relação com a reação álcali-agregado: aplicação ao concreto da Barragem de Pedro Beicht.** Tese de doutorado. São Paulo, Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 1994.
- RONCERO, J. *Effect of superplasticizers on the behavior of concrete in the fresh and hardened states: Implications for high performance concretes.* Tese de doutorado. Escola Técnica Superior D’Enginyers de Camins, Universitat Politècnica de Catalunya, Catalunya, 2002.
- RONCERO, J.; GETTU, R. *Aditivos superfluidificantes para hormigones de altas prestaciones.* In: IV Simposio ANFAH – *Especialidades Químicas para la Construcción, Madrid*, 1998.
- ROSA, S. E. S.; COSENSA, J. P.; BARROSO, D. V. Considerações sobre a indústria do vidro no Brasil. BNDS Setorial, Rio de Janeiro, n. 26, 2007, p. 101-138.
- SAKATA K.; AYANO T.; OGAWA A.. *Mixture Proportioning for Highly-Flowable Concrete Incorporating Limestone Powder. Proceedings...* Fifth International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete. ACI Proceedings. Milwaukee, Wisconsin. 1995.
- SAKATA, N.; MARUYAMA, K.; MINAMI, M. *Basic Properties and Effects of Welan Gun on Self-Consolidating Concrete.* In: International Rilem Conference on Production Methods and Workability of Concrete. P. J. M. Bartos, D. L. Marrs and D. J. Cleand (editores), E & fn Spon, 1996.
- SANTIS, B. R. **Agregado Leve de Argila Calcinada para Uso em Concreto Estrutural: Viabilidade da Cerâmica Vermelha do Estado de São Paulo.** Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012.

SANTOS, S. **Produção e Avaliação do uso de pozolana com baixo teor de carbono obtida da cinza de casca de arroz residual para concreto de alto desempenho.** Tese (Doutorado). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006, 267p.

SBRIGHI NETO, C. **Agregados para concreto.** Concreto: Ensino, Pesquisa e Realização. Edição G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2005. pp. 323-343.

SELLEVOLD, E.J.; NILSEN, T. *Condensed silica fume in concrete.* In: MALHOTRA, V. M. *Supplementary cementing materials for concrete.* Ottawa, Canada, CANMET, 1987.

SENSALE, G. R. B. **Estudo comparativo entre as propriedades mecânicas dos concretos de alta resistência com cinza de casca de arroz.** Tese de doutorado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000.

SHACKELFORD, James F. **Introdução à Ciência dos Materiais Para Engenheiros.** Trad. DanielVieira. 6.ed. São Paulo: Pearson, 2008.

SHAO, Y.; LEFORT, T.; MORAS, S.; RODRIGUES, D. *Cement and Concrete Research.* 30, 2000.

SHAO, Y. LEFORT, T. MORAS, S. RODRIGUEZ, D. “*Studies on concrete containing ground waste glass*”. *Cement and Concrete Research*, v. 30, n. 1, p. 91-100, jan. 2000.

SHI, C.; WU, Y.; RIEFLER, C.; WANG, H. “*Characteristics and pozzolanic reactivity of glass powders*”. *Cement and Concrete Research*, v. 35, n. 5, p. 987-993, may 2005.

SICHERI, E. P.; CARAM, R.; SANTOS, J. C. P. **Vidros na construção civil. Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia de Materiais.** ed. G. C. Isaia. São Paulo: IBRACON, 2007. v. 1. p. 654-691.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana.** São Paulo, Pini, 1995.

SOUSA FILHO, L. M. **Concreto autoadensável e de alto desempenho produzidos com fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus.** Dissertação de mestrado, Manaus, Universidade Federal do Amazonas, 2012.

SOUZA, R. C. **Efeito da adição de cinza de casca de arroz no comportamento de compósitos cimentícios reforçados por polpa de bambu.** Tese de doutorado, Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2004.

STANTON, T. E. *Expansion of concrete though reaction between cement and aggregate.* *American Society of Civil Engineer.* New York, v. 66, n. 10, 1940.

STARK, D.; MORGAN, B.; OKAMOTO, P.; DIAMOND, S. *SHRP-C-343: Eliminating or minimizing alkali-silica reactivity.* Washington, DC, Strategic Highway Research Program, 1993.

STIEVENARD-GIREAUD, D. *Etude de la réaction alcalis-silice dans les bétons*. Paris: LCPC, 1987. 104p.

STIEVENARD-GIREAUD, D. *Etude de la réaction alcalis-silice dans les bétons*. Paris, LCPC, 1987.

SUGAMOSTO, R. **Comparativo entre concretos produzidos com sílica ativa em pó e sílica ativa em forma de lama**. Curitiba, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2007.

SUGUIO, K. **Rochas sedimentares – propriedades, gênese, importância econômica**. Ed. Edgard Blücher Ltda. São Paulo, 1980.

T. D. Dyer, R. Dhir, J. Mater. in Civil Eng. ASCE 13, 6 (2001) 412.

TANDE, S. N. & MOHITE, P. B. *Applications of Self Compacting Concrete*. 32nd Conference on OUR WORLD IN CONCRETE & STRUCTURES: 28 - 29 August Singapore, 2007.

TAYLOR, H. F. W. *Cement chemistry*. London, Thomas Telford, 1997.

TENÓRIO, J. L. **Avaliação de Propriedades do Concreto Produzido com Agregados Reciclados de Resíduos de Construção e Demolição Visando Aplicações Estruturais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2007.

THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M. *Chemical aging and the colloidal structure of the C-S-H gel: implications for creep and shrinkage*. In: ULM, F. J.; BAZANT, Z. P.; WITTMANN, F. H. (ed.), *Creep, shrinkage and durability mechanics of concrete and other quasi-brittle materials. Proceedings of The Sixth International Conference*. Maryland, Cambridge, 2001.

TOMOSAWA, F.; TAMURA, K.; ABE, M. *Influence of water content of concrete on alkali-aggregate reaction*. In: *International Conference on Alkali-Aggregate Reaction (ICAAR)*, 8., 1989, Kyoto. *Proceedings*.. Kyoto: Edited by K. Okada, S. Nishibayashi e M. Kawamura, 1989.

TORALLES-CARBONARI, B. M. *Estúdio paramétrico de variables y componentes relativos a la dosificación de hormigón de altas prestaciones*. Tese de doutorado. Universitat Politècnica de Catalunya, 1996.

TORALLES-CARBONARI, B. M.; MOREIRA, E.; CARBONARI, G.; BETIOLI, A. M. **Consumo de pasta em diferentes esqueletos granulares para concreto de alto desempenho**. In: IV Encontro tecnológico de engenharia civil e arquitetura. Maringá, UEM, 2003.

- TORALLES-CARBONARI, B. M.; WEILLER, G. C. B.; UWAI, M. S.; KLEIN, N. S. **Efeito combinado de aditivos plastificantes e superplastificantes na busca pela redução da perda de fluidez com o tempo em pastas de cimento.** In: 16^a *Reunión Técnica – Asociación Argentina de Tecnología del Hormigón*. Prof. Agrim. Antonino Bonforte. Mendoza, Argentina, 2006.
- TRAGARDH, J. **Microstructural features and related properties of self compacting.** Edição: A. Skarendhal; Petersson. In: *International Rilem Symposium on Self-Compacting Concrete*, 1st, 1999, Stockholm. Proceedings... France, RILEM Publications, 1999.
- TUTIKIAN, B. F. **Método para dosagem de concretos autoadensáveis.** Dissertação de mestrado. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2004.
- TUTIKIAN, B.F.; DAL MOLIN, D.C.. **Concreto Auto-adensável.** 1 ed. São Paulo: PINI, 2008, pg.140.
- UCHIKAWA, H.; SAWAKI, D.; HANERAHA, S. *Influence of kind and addition timing of organic admixture on the composition structure and property of fresh cement paste.* Cement and Concrete Research, v. 25, n. 2, 1995.
- VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S. *Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions.* Cement and Concrete Research, v. 7, n. 6, 1977.
- VANDEWALLE, L. *Concrete creep and shrinkage at cyclic ambient conditions.* Cement & Concrete Composites, 2000.
- VIERA, F. P.; KULAKOWSKI, M. P.; DAL MOLIN, D. **Estudos de durabilidade em concretos e argamassas com adição de sílica ativa.** IN: Workshop Durabilidade das Construções, 1^o, São Leopoldo, 1997.
- VISVESVARAYA, H. C.; MULLICK, A. K.; GEORGE SAMUEL, S. K.; SINHA, S. K.; WASON, R. C. *Alkali reactivity of granitic rock aggregates.* In: *International Congress on The Chemistry of Cement*, 8., 1986, Rio de Janeiro, *Proceedings*.. Rio de Janeiro, 1986.
- WATANABE, P. S. **Concretos especiais – propriedades, materiais e aplicações.** Relatório final de pesquisa. São Cristóvão, Universidade Estadual Paulista, 2008.
- WESTERHOLM, M.; LAGERBLAD, B. *Influence of fines from crushed aggregate on micro-mortar rheology.* Edição: O. Wallevik and I. Nielsson. In: INTERNATIONAL RILEM SYMPOSIUM ON SELF-COMPACTING CONCRETE, 3st, 2003, Reykjavik. Proceedings... France: RILEM Publications, p.165-173, 2003.
- YAMAMOTO, Y.; KOBAYASHI, M. *Use of mineral fines in high strength concrete – water requirement and strength.* Concrete International, 1982.

YE, G. *Experimental study & numerical simulation of the development of the microstructure and permeability of cementitious materials*. PhD Thesis. Delft, Delft University of Technology, 2003.

ZHOU, F. P.; BARR, B. I. G.; LYDON, F. D. *Fracture properties of high strength concrete with varying silica fume content and aggregates*. Cement e Concrete Research, v. 25, n. 3, p. 543-552. 1995.