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

CONCRETO AUTOADENSÁVEL E DE ALTO DESEMPENHO PRODUZIDO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE MANAUS

LUCIANO MOREIRA DE SOUSA FILHO

MANAUS
2012

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

LUCIANO MOREIRA DE SOUSA FILHO

CONCRETO AUTOADENSÁVEL E DE ALTO DESEMPENHO PRODUZIDO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE MANAUS

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
2012

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

Sousa Filho, Luciano Moreira de

S725c Concreto autoadensável e de alto desempenho produzido com fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus / Luciano Moreira de Sousa Filho. - Manaus: UFAM, 2012.
248 f.; il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) — Universidade Federal do Amazonas, 2012.
Orientador: Prof. Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos

1. Concreto - Aditivos 2. Concreto autoadensável 3. Materiais de construção 4. Resistência de materiais I. Vasconcelos, Raimundo Pereira de (Orient.) II. Universidade Federal do Amazonas III. Título

CDU 691.322(811.3)(043.3)

LUCIANO MOREIRA DE SOUSA FILHO

CONCRETO AUTOADENSÁVEL E DE ALTO DESEMPENHO PRODUZIDO COM FIBRAS DE POLIPROPILENO E MATERIAIS DISPONÍVEIS NA REGIÃO METROPOLITANA DE MANAUS

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

Aprovado em 12 de novembro de 2012

BANCA EXAMINADORA

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

Profª. Drª. VIRGÍNIA MANSANARES GIACON, Membro.
Universidade Federal do Amazonas

Prof. Dr. JOÃO DE ALMEIDA MELO FILHO, Membro.
Universidade Federal do Amazonas

Profª. Drª. REILA VARGAS VELASCO, Membro.
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Dedico este trabalho ao meu Pai Luciano Moreira de Sousa,
a minha Mãe Ana Maria Miranda Moreira de Sousa,
a minha Esposa Hera Fernandes Soares Moreira de Sousa,
aos meus Filhos Liana, Luciano, Márcio, Pedro e Arthur,
aos meus Irmãos e Irmãs e a todos que contribuíram
para o seu desenvolvimento.

Agradecimentos

Aos professores Dr. Raimundo Pereira de Vasconcelos, Dr. João de Almeida Melo Filho, Dr. Francisco dos Santos Rocha e Dr.ª Virginia Mansanares Giacon, pela imensa atenção e grande dedicação. Ao Prof. Dr. Nilton de Souza Campelo, pelo valoroso incentivo. Ao Coordenador do Mestrado Prof. Dr. Raimundo Kennedy Vieira pelo importante apoio.

Aos funcionários do Laboratórios de Materiais, pela imensa ajuda prestada em todas as atividades desenvolvidas ao longo desta pesquisa, em especial os engenheiros civis 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, que me acompanharam e me incentivaram nessa longa caminhada.

Às empresas que muito contribuíram, fornecendo materiais e apoio técnico, em especial a Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A, a MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., a Konkrex Engenharia de Concreto Ltda. e a Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda..

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

Sumário

Agradecimentos ..... **vi**
Lista de Figuras ..... **xi**
Lista de Tabelas ..... **xvii**
Lista de Símbolos ..... **xxi**
Lista de Abreviaturas ..... **xxiv**
Resumo ..... **xxvi**
Abstract ..... **xxvii**

1. INTRODUÇÃO **1**
1.1 Contextualização 1
1.2 Relevância da Pesquisa 3
1.3 Objetivos e Limites da Pesquisa 6

2. REVISÃO DA LITERATURA **9**
2.1 Concreto Autoadensável 9
2.1.1 Ensaios do CAA no Estado Fresco 13
2.2 Concreto de Alto Desempenho 14
2.3 Materiais Componentes 21
2.3.1 Cimento 23
2.3.2 Agregados 26
2.3.2.1 Generalidades 26
2.3.2.2 Seleção do Agregado para Evitar a Reação Álcali-Agregado (RAA) 32
2.3.3 Adições 37
2.3.3.1 Generalidades 37
2.3.3.2 Classificação das Adições 39
2.3.3.3 Sílica Ativa 41
2.3.3.4 Reação Pozolânica 43
2.3.3.5 Benefícios dos Finos e das Pozolanas 45
2.3.4 Aditivos Superplastificantes 47
2.3.4.1 Generalidades 47
2.3.4.2 Compatibilidade Cimento-Adição-Aditivo 54
2.3.5 Fibras 55
2.3.5.1 Generalidades 55
2.3.5.2 Características das Fibras 57
2.3.5.3 Benefícios das Fibras no Controle da Abrasão, Exsudação e Fissuração por Retração do Concreto 60
2.3.6 Água 74

3. PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS **76**
3.1 Programa Experimental 76
3.2 Materiais 77
3.3 Produção dos Concretos 81

3.3.1 Traços Produzidos na Avaliação nº 2 90
3.3.1.1 Traços T-1 90
3.3.2 Traços Produzidos na Avaliação nº 3 90
3.3.2.1 Traços T-2 90
3.3.2.2 Traços T-3, T-4, T-5A e T-5B 91
3.3.3 Traços Produzidos na Avaliação nº 4 92
3.3.3.1 Traços PCF e PSF 92
3.3.4 Traços Produzidos na Avaliação nº 5 93
3.3.4.1 Traços MC1102-A a MC1102-M e SIKA3535-A a SIKA3535-H 93
3.4 Confecção das Placas e Procedimento de Coleta dos Resultados da Avaliação nº 4 94
3.4.1 Confecção das Placas 94
3.4.2 Procedimento de Coleta dos Resultados 95
3.5 Caracterização dos Concretos 96
3.5.1 Caracterização dos Concretos Frescos 96
3.5.1.1 Ensaio de *Slump Flow* (SF) 96
3.5.1.2 Ensaio T_{500} (VS) 97
3.5.2 Caracterização dos Concretos Endurecidos 97
3.6 Métodos 98
3.6.1 Métodos de Ensaios dos Agregados 99
3.6.2 Métodos de Ensaios das Adições Minerais 99
3.6.3 Métodos de Ensaios dos Aditivos Superplastificantes 100
3.6.3.1 Métodos de Preparo e Ensaio das Pastas 102

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES 105
4.1 Resultados e Discussões da Avaliação nº 1 105
4.1.1 Seleção do Agregado Miúdo 105
4.1.1.1 Amostras 1AM, 2AM e 3AM 105
4.1.2 Seleção do Agregado Miúdo 110
4.1.2.1 Amostras 1AG, 2AG e 3AG 110
4.1.3 Seleção da Adição Mineral 113
4.1.3.1 Análise dos Resultados e Seleção das Adições Minerais 115
4.1.4 Seleção do Aditivo Superplastificante 115
4.1.4.1 Análise dos Resultados e Seleção dos Aditivos Superplastificantes 117
4.2 Resultados e Discussões da Avaliação nº 2 120
4.3 Resultados e Discussões da Avaliação nº 3 133
4.4 Resultados e Discussões da Avaliação nº 4 152
4.5 Resultados e Discussões da Avaliação nº 5 158
4.5.1 Estudo Comparativo dos Pontos de Saturação dos Aditivos Superplastificantes em Concretos e Pastas 165
4.5.1.1 Resultados dos Ensaios Realizados com Pastas e Concretos Produzidos com o Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow 1102 166
4.5.1.2 Resultados dos Ensaios Realizados com Pastas e Concretos Produzidos com o Aditivo Superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB 167

4.5.1.3 Comentários sobre os Pontos de Saturação dos Aditivos Superplastificantes em Concretos e Pastas 168

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 171
5.1 Conclusões 171
5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas 173

REFERÊNCIAS 174

APÊNDICE: ILUSTRAÇÕES E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DA AVALIAÇÃO Nº 1 191
1 Cimento 192
2 Agregado Miúdo 194
2.1 Análise Petrográfica 194
2.1.1 Amostra nº 120.565 195
2.1.2 Amostra nº 120.566 196
2.1.3 Amostra nº 120.567 197
2.1.4 Amostra nº 120.568 198
2.1.5 Amostra nº 125.639 199
2.1.6 Amostra nº 125.640 200
2.1.7 Considerações Finais 201
2.2 Determinação da Reatividade Álcali-Agregado pelo Método Acelerado, segundo NBR 15577-4:2009 201
2.2.1 Amostras 204
2.2.2 Resultados 205
2.2.3 Considerações Finais 206
2.3 Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado de Reatividade Álcali-Agregado, segundo NBR 15577-5:2008 206
2.3.1 Amostras 207
2.3.2 Resultados 208
2.3.3 Considerações Finais 210
3 Agregado Graúdo 212
3.1 Análise Petrográfica 212
3.1.1 Amostra nº 127.354 213
3.1.2 Amostra nº 127.353 214
3.1.3 Amostra nº 127.356 215
3.1.4 Considerações Finais 216
3.2 Determinação da Reatividade Álcali-Agregado pelo Método Acelerado, segundo NBR 15577-4:2009 216
3.2.1 Amostras 217
3.2.2 Resultados 218
3.2.3 Considerações Finais 221
3.3 Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado de Reatividade Álcali-Agregado, segundo NBR 15577-5:2008 222
3.3.1 Amostras 222

3.3.2 Resultados 223
3.3.3 Considerações Finais 227
4 Adições Minerais 230
4.1 Ficha Técnica da Sílica Ativa em Pó Silmix 230
4.2 Ficha Técnica da Sílica Ativa em Suspensão Centrilit Fume S 232
4.3 Ficha Técnica do Xypex Admix C-500 NF 234
5 Aditivos Superplastificantes 237
5.1 Fichas Técnicas dos Aditivos Superplastificantes 237
5.1.1 Ficha Técnica do Aditivo Superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB 237
5.1.2 Fichas Técnicas dos Aditivos Superplastificantes MC-PowerFlow 1159 e MC-PowerFlow 1160 241
5.1.3 Ficha Técnica do Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow 1102 243
5.2 Resultado dos Ensaios com os Aditivos Superplastificantes 244
5.2.1 Resultado dos Ensaios com o Sika ViscoCrete 3535 CB 244
5.2.2 Resultado dos Ensaios com o MC-PowerFlow 1159 245
5.2.3 Resultado dos Ensaios com o MC-PowerFlow 1160 246
5.2.4 Resultado dos Ensaios com o MC-PowerFlow 1102 247
5.2.5 Resumo dos Resultados dos Ensaios e dos Pontos de Saturação 248

Lista de Figuras

INTRODUÇÃO

Figura 1.1 – Cais flutuante do terminal hidroviário do município de Novo Airão, no estado do Amazonas 3

REVISÃO DA LITERATURA

Figura 2.1 – O entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas do aditivo impede a aproximação das partículas de cimento 51
Figura 2.2 – Classificação das fibras segundo a BISFA 55
Figura 2.3 – Gráfico tensão x deformação para concretos com e sem fibras 56
Figura 2.4 – Fibrilas finas em forma retangular 58
Figura 2.5 – Monofilamentos cilíndricos finos 58
Figura 2.6 – Energia absorvida x fator de forma (L/D) 59
Figura 2.7 – Concreto com fissuras por retração por secagem do compósito endurecido 67
Figura 2.8 – Concreto com fibras de polipropileno: redução das fissuras 67
Figura 2.9 – Processo de fissura por assentamento plástico 69
Figura 2.10 – Exsudação em concretos sem adição de fibras e mecanismos das fibras de polipropileno no controle da exsudação 69
Figura 2.11 – Gráfico tensão x deformação para concretos com e sem fibras 70
Figura 2.12 – Modelo de crescimento da fissura no compósito com fibras 71
Figura 2.13 – Nível de volume crítico de fibras 72

PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa 76
Figura 3.2 – Formato da embalagem hidrossolúvel de 0,6 Kg 82
Figura 3.3 – Área de produção de concretos da Universidade Federal do Amazonas – UFAM 85
Figura 3.4 – Área de produção de concretos da Universidade Federal do Amazonas – UFAM 85
Figura 3.5 – Formas e placa produzida com o traço PSF 94
Figura 3.6 – Formas e placa produzida com o traço PSF 94
Figura 3.7 – Placas de concreto com e sem fibra de polipropileno 94
Figura 3.8 – Placas de concreto com e sem fibra de polipropileno 94
Figura 3.9 – Visualização das fissuras por meio do umedecimento das placas 95
Figura 3.10 – Visualização das fissuras por meio do umedecimento das placas 95
Figura 3.11 – Cone de Abrams 99
Figura 3.12 – Prensa hidráulica da empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda., onde foram realizados os ensaios de caracterização dos concretos no estado endurecido 98
Figura 3.13 – Prensa hidráulica da empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda., onde foram realizados os ensaios de caracterização dos concretos no estado endurecido 98
Figura 3.14 – Microscópio ótico *Motic Images Plus 2.0 ML* 98
Figura 3.15 – Funil de Marsh 100

Figura 3.16 – Minicone de Kantro 101
Figura 3.17 – Misturador planetário e preparo das pastas 102
Figura 3.18 – Misturador planetário e preparo das pastas 102
Figura 3.19 – Peneiramento das pastas e descanso por 60 minutos 102
Figura 3.20 – Peneiramento das pastas e descanso por 60 minutos 102
Figura 3.21 – Ensaio do funil de Marsh 103
Figura 3.22 – Ensaio do funil de Marsh 103
Figura 3.23 – Ensaio do miniabatimento 104

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 4.1 – Curvas granulométricas das amostras 1AM, 2AM e 3AM 106
Figura 4.2 – Ensaio colorimétrico das amostras 2AM e 1AM 107
Figura 4.3 – Curvas granulométricas das amostras 1AG, 2AG e 3AG 111
Figura 4.4 – Gráfico dos resultados dos ensaios do funil de Marsh 115
Figura 4.5 – Gráfico dos resultados dos ensaios do miniabatimento de Kantro 116
Figura 4.6 – Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159 e MC-PowerFlow 1160, respectivamente 116
Figura 4.7 – Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159 e MC-PowerFlow 1160, respectivamente 116
Figura 4.8 – Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB 117
Figura 4.9 – Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB 117
Figura 4.10 – Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 117
Figura 4.11 – Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 117
Figura 4.12 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1A 121
Figura 4.13 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1A 121
Figura 4.14 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1B 121
Figura 4.15 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1B 121
Figura 4.16 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1C 121
Figura 4.17 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1C 121
Figura 4.18 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1D 121
Figura 4.19 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1D 121
Figura 4.20 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1G 122
Figura 4.21 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1G 122
Figura 4.22 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1G 122
Figura 4.23 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1G 122
Figura 4.24 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1 122

Figura 4.25 – Gráficos da média dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1 123
Figura 4.26 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do traço T-1D (90 dias) 123
Figura 4.27 – Ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do traço T-1A (28 dias): ruptura através do agregado graúdo (fase mais fraca do compósito) 124
Figura 4.28 – Ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do traço T-1A (28 dias): ruptura através do agregado graúdo (fase mais fraca do compósito) 124
Figura 4.29 – Micrografias T-1A – 90 dias (6,7x): zona de transição e poro 124
Figura 4.30 – Micrografias T-1A – 90 dias (6,7x): zona de transição e poro 124
Figura 4.31 – Microfotografias T-1A – 90 dias (45x à esq. e 30x à dir.): poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno ao concreto e zona de transição compacta 125
Figura 4.32 – Microfotografias T-1A – 90 dias (45x à esq. e 30x à dir.): poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno ao concreto e zona de transição compacta 125
Figura 4.33 – Microfotografias T-1B – 90 dias (6,7x à esq. e 25x à dir.): zona de transição compacta 125
Figura 4.34 – Microfotografias T-1B – 90 dias (6,7x à esq. e 25x à dir.): zona de transição compacta 125
Figura 4.35 – Microfotografias T-1C – 28 dias (6,7x à esq. e 20x à dir.): poro e zona de transição compacta 125
Figura 4.36 – Microfotografias T-1C – 28 dias (6,7x à esq. e 20x à dir.): poro e zona de transição compacta 125
Figura 4.37 – Microfotografias T-1C – 28 dias (30x à esq. e 45x à dir.): fibras de polipropileno 125
Figura 4.38 – Microfotografias T-1C – 28 dias (30x à esq. e 45x à dir.): fibras de polipropileno 125
Figura 4.39 – Microfotografias T-1C – 90 dias (10x à esq. e 25x à dir.): agregados graúdos e miúdos 126
Figura 4.40 – Microfotografias T-1C – 90 dias (10x à esq. e 25x à dir.): agregados graúdos e miúdos 126
Figura 4.41 – Microfotografias T-1E – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.) densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo 126
Figura 4.42 – Microfotografias T-1E – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.) densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo 126
Figura 4.43 – Microfotografias T-1F – 90 dias (6,7x à esq. e 30x à dir.): densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo 126
Figura 4.44 – Microfotografias T-1F – 90 dias (6,7x à esq. e 30x à dir.): densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo 126
Figura 4.45 – Microfotografias T-1F – 90 dias (45x à esq. e 45x à dir.): densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo 126
Figura 4.46 – Microfotografias T-1F – 90 dias (45x à esq. e 45x à dir.): densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo 126

Figura 4.47 – Microfotografias T-1G – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.): densa zona de transição e coloração variada do agregado graúdo 127
Figura 4.48 – Microfotografias T-1G – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.): densa zona de transição e coloração variada do agregado graúdo 127
Figura 4.49 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-2C 135
Figura 4.50 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-2C 135
Figura 4.51 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-2F 135
Figura 4.52 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-2F 135
Figura 4.53 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-3 135
Figura 4.54 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-3 135
Figura 4.55 – Ensaio do abatimento do tronco de cone com o traço T-5A 136
Figura 4.56 – Ensaio do abatimento do tronco de cone com o traço T-5A 136
Figura 4.57 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-2 136
Figura 4.58 – Gráfico da média dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-2 137
Figura 4.59 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e de determinação do módulo estático e elasticidade à compressão do traço T-2C (90 dias) 137
Figura 4.60 – Microfotografias T-2A – 90 dias (6,7x à esq. e 20x à dir.): densa zona de transição 138
Figura 4.61 – Microfotografias T-2A – 90 dias (6,7x à esq. e 20x à dir.): densa zona de transição 138
Figura 4.62 – Microfotografias T-2B – 90 dias (30x à esq. e 15x à dir.): zona de transição compacta, sem poros 138
Figura 4.63 – Microfotografias T-2B – 90 dias (30x à esq. e 15x à dir.): zona de transição compacta, sem poros 138
Figura 4.64 – Microfotografias T-2D – 90 dias (6,7x): sem poros visíveis, considerando menor quantidade de ar incorporado, em função da ausência de fibra de polipropileno nos concretos T-2 139
Figura 4.65 – Microfotografias T-2D – 90 dias (6,7x): sem poros visíveis, considerando menor quantidade de ar incorporado, em função da ausência de fibra de polipropileno nos concretos T-2 139
Figura 4.66 – Microfotografias T-2F – 28 dias (6,7x à esq. e 15x à dir.): densas zonas de transição 139
Figura 4.67 – Microfotografias T-2F – 28 dias (6,7x à esq. e 15x à dir.): densas zonas de transição 139
Figura 4.68 – Microfotografias T-2F – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.): agregados graúdos e miúdos 139
Figura 4.69 – Microfotografias T-2F – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.): agregados graúdos e miúdos 139
Figura 4.70 – Microfotografias T-3 – 90 dias (6,7x à esq. e 30x à dir.): densas zonas de transição 140
Figura 4.71 – Microfotografias T-3 – 90 dias (6,7x à esq. e 30x à dir.): densas zonas de transição 140
Figura 4.72 – Microfotografias T-4 – 90 dias (25x à esq. e 45x à dir.): fibras de polipropileno visíveis 140

Figura 4.73 – Microfotografias T-4 – 90 dias (25x à esq. e 45x à dir.): fibras de polipropileno visíveis 140
Figura 4.74 – Microfotografias T-5B – 90 dias (6,7x à esq. e 6,7x à dir.): poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno nos traços T-5 140
Figura 4.75 – Microfotografias T-5B – 90 dias (6,7x à esq. e 6,7x à dir.): poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno nos traços T-5 140
Figura 4.76 – Microfotografias T-5B – 90 dias (45x à esq. e 45x à dir.): poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno nos traços T-5 140
Figura 4.77 – Microfotografias T-5B – 90 dias (45x à esq. e 45x à dir.): poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno nos traços T-5 140
Figura 4.78 – Gráficos das médias dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1, T-2, T-3, T-4 e T-5 141
Figura 4.79 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1F, T-2D, T-3 e T-5B 142
Figura 4.80 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1A, T-1B, T-1C, T-2A, T-2B, T-2C, T-4 e T-5A 143
Figura 4.81 – Gráfico da evolução com a idade das tensões de ruptura à compressão axial dos concretos T-1D, T-2C e RGS-026, produzido por Mendes (2002), com granito da região metropolitana de Curitiba 145
Figura 4.82 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PCF 153
Figura 4.83 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PCF 153
Figura 4.84 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PCF 153
Figura 4.85 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PCF 153
Figura 4.86 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PSF 153
Figura 4.87 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PSF 153
Figura 4.88 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PSF 153
Figura 4.89 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PSF 153
Figura 4.90 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços PCF e PSF 154
Figura 4.91 – Estado de fissuração na placa produzida com concreto sem fibras (PSF) com 12 horas 155
Figura 4.92 – Detalhe da abertura de uma fissura 155
Figura 4.93 – Estado de fissuração na placa produzida com concreto sem fibras (PSF) com 90 dias 155
Figura 4.94 – Detalhe da abertura de uma fissura 155
Figura 4.95 – Placa produzida com concreto com fibra (PCF), sem fissuras visíveis, na idade de 12 horas 155
Figura 4.96 – Placa produzida com concreto com fibras (PCF), sem fissuras visíveis, com idade de 90 dias 155
Figura 4.97 – Maior quantidade de ar incorporado no concreto do traço PCF (placa com fibra) 156
Figura 4.98 – Placa de concreto sem fibra (PSF), mostrando menor quantidade de ar incorporado em relação à placa de concreto com fibra (PCF) 156

Figura 4.99 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-D 160
Figura 4.100 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-D 160
Figura 4.101 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-E 160
Figura 4.102 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-E 160
Figura 4.103 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-G 161
Figura 4.104 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-G 161
Figura 4.105 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-J 161
Figura 4.106 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-J 161
Figura 4.107 – Ensaio do *slump flow test* com o traço SIKA3535-F 161
Figura 4.108 – Ensaio do *slump flow test* com o traço SIKA3535-F 161
Figura 4.109 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços MC1102 162
Figura 4.110 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços SIKA3535 162
Figura 4.111 – Gráficos das médias dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços MC1102 e SIKA3535 163
Figura 4.112 – Corpos de prova com diferentes colorações em sua superfície 164
Figura 4.113 – Gráfico dos ensaios de fluidez de pastas e concretos produzidos com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 166
Figura 4.114 – Gráfico dos ensaios de fluidez de pastas e concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB 167

APÊNDICE

Figura 1 – Cimentos disponíveis para venda em Manaus: o primeiro nacional e os demais importados 193
Figura 2 – Cimentos disponíveis para venda em Manaus: o primeiro nacional e os demais importados 193
Figura 3 – Cimentos disponíveis para venda em Manaus: o primeiro nacional e os demais importados 193
Figura 4 – Areia do rio Manacapuru, selecionada para utilização nesta pesquisa (amostra 1AM) 211
Figura 5 – Brita da região de Moura, no município de Barcelos, fornecida pela empresa Britamazon/Capital, uma das selecionadas para utilização nesta pesquisa (amostra 1AG) 228
Figura 6 – Sílica ativa em pó, Silmix 233
Figura 7 – Sílica ativa em suspensão, Centrilit Fume S 233
Figura 8 – Aditivo SP, MC-PowerFlow 1160 240

Lista de Tabelas

REVISÃO DA LITERATURA

Tabela 2.1 – Classes de CAD 15
Tabela 2.2 – Notação química simplificada usual das fases do cimento Portland 23
Tabela 2.3 – Partes da NBR 15577:2008 sobre ensaios concernentes à reatividade álcali-agregado 34
Tabela 2.4 – Medidas de mitigação 35
Tabela 2.5 – Tipos de aditivos e suas abreviações 48
Tabela 2.6 – Desenvolvimento histórico dos aditivos redutores de água 49
Tabela 2.7 – Características mecânicas das fibras, segundo a Maccaferri (S/D) 58
Tabela 2.8 – Propriedades físicas de fibras de monofilamentos cilíndricos de polipropileno fabricadas pela Maccaferri do Brasil Ltda. 58
Tabela 2.9 – Quantidades médias de fibras no concreto e propriedades mecânicas das fibras mais usadas 60

PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 3.1 – Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos das avaliações 2, 3 e 4 com Silmix 84
Tabela 3.2 – Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos das avaliações 2, 3 e 4 com Centrilit Fume S 84
Tabela 3.3 – Pesos em kg/m³ da adição mineral e da dedução na quantidade de água de amassamento, nas avaliações 2, 3 e 4 com Centrilit Fume S 84
Tabela 3.4 – Teores e quantidades dos aditivos SP das avaliações 2, 3 e 4 com Silmix 85
Tabela 3.5 – Teores e quantidades dos aditivos SP das avaliações 2, 3 e 4 com Centrilit Fume S 85
Tabela 3.6 – Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos dos traços MC1102-A a MC1102-L com Xypex Admix C-500 NF 88
Tabela 3.7 – Teores e quantidades dos aditivos SP empregados nos traços MC1102-A a MC1102-L 88
Tabela 3.8 – Pesos em kg/m³ dos materiais do concreto do traço MC1102-M com Xypex Admix C-500 NF 89
Tabela 3.9 – Teores e quantidades do aditivo SP empregado no traço MC1102-M 89
Tabela 3.10 – Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos dos traços SIKA3535-A a SIKA3535-H com Xypex Admix C-500 NF 89
Tabela 3.11 – Teores e quantidades dos aditivos SP empregados nos traços SIKA3535-A a SIKA3535-H 89
Tabela 3.12 – Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços T-1 90
Tabela 3.13 – Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços T-2 91
Tabela 3.14 – Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços T-3, T-4, T-5A e T-5B 92
Tabela 3.15 – Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços PCF (T-1C) e PSF (T-2C) 92

Tabela 3.16 – Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços MC1102-A a MC1102-M e SIKA3535-A a SIKA3535-H 93
Tabela 3.17 – Teores e quantidades dos aditivos SP empregados nos traços MC1102-A a MC1102-L e SIKA3535-A a SIKA3535-H 93
Tabela 3.18 – Normas empregadas na realização dos ensaios com os concretos endurecidos 97
Tabela 3.19 – Métodos dos ensaios de caracterização dos agregados miúdos 99
Tabela 3.20 – Métodos dos ensaios de caracterização dos agregados graúdos 99

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 4.1 – Ensaios de caracterização física das amostras 1AM, 2AM e 3AM 105
Tabela 4.2 – Composição granulométrica das amostras 1AM, 2AM e 3AM 106
Tabela 4.3 – Ensaios de caracterização física das amostras 1AG, 2AG e 3AG 110
Tabela 4.4 – Composição granulométrica das amostras 1AG, 2AG e 3AG 111
Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de caracterização das adições minerais 113
Tabela 4.6 – Resumo dos resultados dos ensaios do funil de Marsh 117
Tabela 4.7 – Resumo dos resultados dos ensaios do miniabatimento de Kantro 118
Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-1: média e desvio padrão 120
Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-1 120
Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-2: média e desvio padrão 133
Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-2 134
Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-3, T-4 e T-5: média e desvio padrão 134
Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-3, T-4 e T-5 134
Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios realizados com os traços PCF e PSF: média e desvio padrão 152
Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios realizados com os traços PCF e PSF 152
Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios realizados com os traços MC1102: média e desvio padrão 159
Tabela 4.17 – Resultados dos ensaios realizados com os traços MC1102 159
Tabela 4.18 – Resultados dos ensaios realizados com os traços SIKA3535: média e desvio padrão 159
Tabela 4.19 – Resultados dos ensaios realizados com os traços SIKA3535 160

APÊNDICE

Tabela 1 – Caracterização físico-mecânica da amostra nº 143.515 192
Tabela 2 – Caracterização físico-mecânica da amostra nº 143.516 192
Tabela 3 – Caracterização química da amostra nº 143.515 193
Tabela 4 – Caracterização química da amostra nº 143.516 193
Tabela 5 – Síntese das características gerais da areia da amostra nº 120.565 195
Tabela 6 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 120.565 195
Tabela 7 – Síntese das características gerais da areia da amostra nº 120.566 196
Tabela 8 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 120.566 196

Tabela 9 – Síntese das características gerais da areia da amostra nº 120.567 197
Tabela 10 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 120.567 197
Tabela 11 – Síntese das características gerais da areia da amostra nº 120.568 198
Tabela 12 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 120.568 198
Tabela 13 – Síntese das características gerais da areia da amostra nº 125.639 199
Tabela 14 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 125.639 199
Tabela 15 – Síntese das características gerais da areia da amostra nº 125.640 200
Tabela 16 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 125.640 200
Tabela 17 – Composição da argamassa prescrita pela NBR 15577-5:2008 202
Tabela 18 – Propriedades exigidas pela NBR 15577-4:2009 para o cimento 203
Tabela 19 – Medidas de mitigação 204
Tabela 20 – Identificação das amostras 204
Tabela 21 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 58.957, datado de 27/11/2009 205
Tabela 22 – Identificação das amostras 207
Tabela 23 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 55.189, datado de 20/07/2009 208
Tabela 24 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 58.517, datado de 29/06/2009 209
Tabela 25 – Síntese das características petrográficas da rocha da amostra nº 127.354 213
Tabela 26 – Síntese das características petrográficas da rocha da amostra nº 127.353 214
Tabela 27 – Síntese das características petrográficas da rocha da amostra nº 127.356 215
Tabela 28 – Composição da argamassa prescrita pela NBR 15577-5:2008 216
Tabela 29 – Identificação das amostras 217
Tabela 30 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 50.635, datado de 03/07/2008 218
Tabela 31 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 59.875, datado de 20/01/2010 219
Tabela 32 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 58.957, datado de 27/11/2009 220
Tabela 33 – Identificação das amostras 222
Tabela 34 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 55.189, datado de 20/07/2009 223

Tabela 35 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 55.189, datado de 20/07/2009 224
Tabela 36 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 59.875, datado de 20/01/2010 225
Tabela 37 – Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 58.517, datado de 29/06/2009 226
Tabela 38 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB 244
Tabela 39 – Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB 244
Tabela 40 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159 ... 245
Tabela 41 – Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159 245
Tabela 42 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1160 ... 246
Tabela 43 – Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1160 246
Tabela 44 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 ... 247
Tabela 45 – Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 247
Tabela 46 – Resumo dos resultados dos ensaios do funil de Marsh 248
Tabela 47 – Resumo dos resultados dos ensaios do miniabatimento de Kantro 248

Lista de Símbolos

%	Percentagem
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
ø	Diâmetro
<	Menor
±	Mais ou menos
Σ	Somatório
≤	Menor ou igual
≥	Maior ou igual
a	Massa da água de amassamento
A	Al_2O_3 (óxido de alumínio)
a/c	Relação água/cimento
Al_2O_3	Óxido de alumínio
c	Massa de cimento
C	Carbono total (na composição química da sílica ativa)
C	CaO (óxido de cálcio livre)
C_2S	Silicato Dicálcico
C_3A	Aluminato Tricálcico
C_3S	Silicato Tricálcico
C_4AF	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
Ec	Módulo estático de elasticidade à compressão
F	Fe_2O_3 (óxido de ferro)
f/c	Relação fíler/cimento
f_c	Resistência à compressão axial
f_{ck}	Resistência característica à compressão axial
Fe_2O_3	Óxido de ferro
f_{tD}	Resistência à tração na compressão diametral
g	Grama
g/cm^3	Gramas por centímetro cúbico
g/dm^3	Gramas por decímetro cúbico

g/ml	Grama por mililitro
GPa	Giga Pascal
h	Hora
h:mim	Hora:minuto
H	H_2O (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_2O	Água
HP	Razão de bloqueio no ensaio da Caixa L (H_2/H_1)
K_2O	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_2O_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_2O	Óxido de Sódio
Na_2SO_4	Sulfato de sódio
NaCl	Cloreto de sódio
NaOH	Hidróxido de sódio
°	Graus
°C	Graus centígrados
P_2O_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 (óxido de silício)
SF	Classe de espalhamento (*slump flow*)
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-*slump*
T_{500}	Tempo para o concreto alcançar um diâmetro de 500 mm no ensaio de espalhamento
tf	Tonelada força
TiO_2	Óxido de titânio
T_{L20}	Tempo para o concreto percorrer 20cm na parte horizontal da Caixa L
T_{L40}	Tempo para o concreto percorrer 40cm na parte horizontal da Caixa L
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 mícron
$\bar{Y}$	Média

Lista de Abreviaturas

ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ACGIH	*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*
ACI	*American Concrete Institute*
AM	Estado do Amazonas
API	Adição predominantemente reativa
APR	Adição predominantemente inerte
ASTM	*American Society for Testing and Materials*
BEC	Batalhão de Engenharia e Cosntrução
BISFA	*International Bureau Of Standardization Of Man-Made Fibres*
CAA	Concreto autoadensável
CAD	Concreto de alto desempenho
CAR	Concreto de alta resistência
CAS	*Chemical Abstract Service Registry Number*
CEB-FIB	*Comité Euro-International du Béton - Fédération Internationale du Béton*
CP II-E	Cimento Portland composto com escória
CP II-F	Cimento Portland composto com fíler
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	*European Federation of National Trade Associations*
EN	*European Norma*
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	*Occupational Safety e Health Administration*
PA	Estado do Pará
PC	Policarboxilato
PEL	*Permissible Exposure Limits*

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	*International Union of Testing and Research*
RR	Estado de Roraima
RS	Resultado do ensaio do tubo U (razão de segregação)
SCC	*Self-compacting concrete*
SF	Resultado do ensaio de *slump flow*
SIKA3535	Aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB
SP	Superplastificante
SR	Resultado do ensaio da coluna de segregação
SSS	Saturado superfície seca
TLV	*Thershold Limit Value*
TO	Resultado do ensaio Orimet
TWA	*Time Weighted Average*
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 da alta resistência, possui menor 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. O concreto desenvolvido pela presente pesquisa destina-se à fabricação de cais flutuantes para os terminais hidroviários da região amazônica. O concreto autoadensável facilita a fabricação dos seus esbeltos costados e das suas demais peças estruturais, uma vez que geralmente possuem formas complexas, pequenas dimensões e armaduras densas. O concreto de alto desempenho possui maior capacidade de resistir a choque de troncos e de embarcações. As fibras de polipropileno reduzem a abertura das fissuras provocadas pela retração plástica, contribuindo para o bloqueio à entrada de agentes agressivos e para o aumento da impermeabilidade do concreto, que são qualidades importantes, considerando que grande parte da estrutura de um cais flutuante sempre fica submersa. Entretanto, outras obras de construção civil nas proximidades de Manaus também podem ser beneficiadas com os resultados desta pesquisa, pois a maioria dos materiais componentes empregados é proveniente de sua região. Os agregados disponíveis na região metropolitana de Manaus para produção de concretos possuem características próprias e diferentes dos existentes em qualquer outra região do Brasil, necessitando, portanto, de estudo direcionado e atenção especial. Seguindo um programa experimental rigoroso, os materiais componentes foram caracterizados e selecionados; ensaios do funil de Marsh e do minicone de Kantro foram realizados com pastas produzidas com os aditivos superplastificantes e o cimento utilizados nesta pesquisa, para verificação de compatibilidade e determinação da dosagem ótima desses aditivos; a dosagem ideal de fibras de polipropileno também foi determinada; concretos foram produzidos e caracterizados nos estados fresco e endurecido; avaliações foram realizadas e conclusões foram obtidas. Para caracterização dos concretos no estado fresco, foram realizados ensaios de *slump flow* e T_{500}, enquanto, para caracterização no estado endurecido, foram realizados ensaios de compressão axial, tração por compressão diametral e determinação dos módulos estáticos de elasticidade à compressão. Como os concretos produzidos obtiveram todas as qualidades necessárias para o emprego na fabricação de cais flutuantes, os resultados desta pesquisa foram considerados satisfatórios.

Palavras-chave: concreto de alto desempenho; concreto autoadensável; cais flutuante; materiais; resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral; módulo estático de elasticidade à compressão.

Abstract

The high performance concrete, apart from high strength, has less permeability and more durability. The self-compacting concrete reduces the need for consolidation and facilitates spreading and slender pieces of concrete. The combination of concrete on one allows the junction of the qualities of both. The concrete developed by this research is for the manufacture of floating wharfs for waterway terminals in the Amazon region. The self-compacting concrete facilitates the manufacturing of their slender broadsides and their other structural parts, since they generally have complex shapes and small dense armors. The high performance concrete has greater ability to withstand shock of tree trunks and ships. The polypropylene fibers reduce the opening of cracks caused by plastic shrinkage, contributing to blocking the entry of aggressive agents and to increase the impermeability of concrete, which are important qualities, whereas much of the structure of a floating wharf is always submerged. However, other construction works near Manaus also may benefit from the results of this research, because most of the material components used is from your region. The aggregates available in the metropolitan region of Manaus for the production of concrete and have characteristics different from those in any other region of Brazil, requiring, therefore, directed study and attention. Following a rigorous experimental program; the component materials were characterized and selected; Marsh funnel test and minicone of Kantro were performed with paste produced with superplasticizers additives and cement used in this research, for compatibility checking and determining the optimal dosage of these additives; the optimal dosage of the polypropylene fiber was also determined; concretes were produced and characterized in fresh and hardened state; evaluations were carried and conclusions were obtained. For characterization of concrete in the fresh state, tests were performed slump flow and T_{500}, while for characterization in the hardened state, tensile tests were performed by axial compression strength; tensile strength by diametrical compression and determination of static modules of elasticity in compression. As the concrete produced had all the qualities needed for employment in the manufacturing of floating wharfs, the results of this research were considered satisfactory.

Keywords: high performance concrete; self-compacting concrete; floating wharfs; materials; axial compression strength; tensile strength by diametrical compression; static modules of elasticity in compression.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Durante a primeira Guerra Mundial, o presidente dos EUA aprovou a construção de 24 navios em concreto armado. Devido à escassez do aço, projetistas utilizaram a patente de um inventor norueguês que substituía o aço do casco por concreto. Após quase 30 anos de avanços tecnológicos, na segunda Guerra Mundial, os Estados Unidos lançaram uma frota de navios em concreto armado, mais leves e mais resistentes que seus predecessores. A partir disso, a aplicação do concreto armado se expandiu em embarcações, plataformas marítimas, faróis, portos e casas flutuantes (CIMENTO ITAMBÉ, 2012).

Partindo dessa aplicação histórica do concreto em estruturas marítimas e flutuantes, foi idealizado para esta pesquisa o desenvolvimento de um concreto para emprego na fabricação de cais flutuantes para os terminais hidroviários da região amazônica. O concreto autoadensável facilita a fabricação dos seus esbeltos costados e das suas demais peças estruturais, uma vez que geralmente possuem formas complexas, pequenas dimensões e armaduras densas. O concreto de alto desempenho possui maior capacidade de resistir a choque de troncos e de embarcações. As fibras de polipropileno reduzem a abertura das fissuras provocadas pela retração plástica, contribuindo para o bloqueio à entrada de agentes agressivos e para o aumento da impermeabilidade do concreto, que são qualidades importantes, considerando que grande parte da estrutura de um cais flutuante sempre fica submersa. Diante do exposto, o concreto autoadensável e de alto desempenho com fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus foi idealizado para ser o produto desta pesquisa, focando principalmente a obtenção de um material que oferecesse além da melhor qualidade, maior resistência e durabilidade, e, portanto, mais adequado à fabricação dos cais flutuantes, comuns na região amazônica.

O concreto de alto desempenho possui alta resistência, menor permeabilidade, maior durabilidade e menores prazos de execução. O concreto autoadensável não necessita operações de adensamento, gera excelente acabamento em concreto aparente e permite a concretagem de peças com pequenas dimensões e armaduras densas. O concreto autoadensável também aumenta a produtividade e a rapidez da execução da obra e facilita o

bombeamento a grandes distâncias. A combinação desses concretos em um só permite a junção de suas propriedades.

Entre as diversas vantagens dos cais flutuantes construídos com os concretos autoadensável e de alto desempenho pesquisados, podem ser citadas as seguintes:

a) possuir a vida útil superior à dos atuais cais flutuantes, fabricados em chapa e perfis metálicos, ou seja, possuir maior durabilidade;
b) possibilitar a fabricação em concreto armado de placas delgadas e perfis complexos, comuns em costados, convés, fundo e vigas mestras de cais flutuantes;
c) absorver choques de embarcações e de troncos trazidos pelas correntezas;
d) possuir elevada impermeabilidade, elevada resistência à abrasão e alta resistência à compressão, mesmo sob a ação de agentes agressivos; e
e) necessitar de menores prazos de execução, inferiores aos atualmente empregados pelos estaleiros da região de Manaus na fabricação de cais flutuantes.

Nesta pesquisa, foi produzido um concreto autoadensável (CAA) e de alto desempenho (CAD) com fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus. O concreto desenvolvido pela presente pesquisa destina-se à fabricação de cais flutuantes para os terminais hidroviários da região amazônica, como o cais flutuante do terminal hidroviário do município de Novo Airão, no estado do Amazonas, que é apresentado na figura 1.1.

Entretanto, outras obras de construção civil nas proximidades de Manaus também poderão ser beneficiadas com os resultados desta pesquisa, uma vez que somente materiais disponíveis em sua região metropolitana foram empregados.

Nesta pesquisa, foram analisadas também as vantagens, as desvantagens e as limitações de cada um dos materiais componentes do concreto, como, por exemplo, a potencial reatividade da maioria dos agregados provenientes de jazidas próximas da capital amazonense. A mitigação da reação álcali-agregado pelo potencial de inibição do cimento Portland utilizado, o CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus, também foi abordada, assim como outras propriedades dos ingredientes empregados nos concretos.



Figura 1.1 – Cais flutuante do terminal hidroviário do município de Novo Airão, no estado do Amazonas

1.2 Relevância da Pesquisa

O principal meio de transporte utilizado pelas comunidades existentes nas margens dos rios amazônicos é o aquaviário, pois não existem estradas. Os aeródromos existentes no interior da floresta amazônica são precários. Os rios amazônicos representam, portanto, as rodovias dessa isolada região do nosso país.

A população ribeirinha na região amazônica depende dos rios para transportes de passageiros e mantimentos, abastecimento de víveres e escoamento de sua produção agrícola. No entanto, atualmente, enfrenta um alto grau de precariedade nos acessos fluviais dos municípios, muitas vezes utilizando de barrancos nas margens dos rios para descarga de materiais e transbordo de passageiros.

É grande a necessidade de uma infraestrutura que possibilite melhores condições ao transporte hidroviário, pois dele dependem o desenvolvimento regional e a sobrevivência de seus habitantes. Os terminais hidroviários e as hidrovias estão também relacionados às palavras desenvolvimento, riqueza, turismo, sobrevivência, transporte, integração, proteção, defesa, ocupação, soberania e meio ambiente, entre outras não menos relevantes.

A construção desses novos terminais hidroviários contribui também para a defesa da Amazônia. A ocupação dessa importante região do território brasileiro, somente possível mediante a utilização de suas hidrovias e a existência de eficientes terminais hidroviários, também visa à garantia da soberania nacional.

Os projetos dos portos fluviais amazônicos, além da necessidade de possuir solução para operação em locais com elevada variação de nível d'água, entre os períodos de cheia e vazante, devem focar também a obtenção de mínimo impacto ambiental. A característica mais relevante dos rios amazônicos, além da rica diversidade biológica, é a elevada variação do nível d'água entre os períodos de vazante e cheia, que pode chegar a mais de 15 metros, inviabilizando projetos convencionais para os seus terminais hidroviários e obrigando aos projetistas a utilização de soluções diferentes das adotadas para a maioria dos portos da costa marítima brasileira. Nesse aspecto, por acompanhar a variação do nível d'água e não oferecer obstáculos à descarga fluvial, que poderiam resultar em assoreamentos ou outras transformações no relevo da margem e do leito do rio, o cais flutuante tem apresentado grande vantagem, em relação aos demais projetos portuários fluviais na Amazônia.

Há uma grande dificuldade de localização de literatura técnica sobre os projetos desses terminais hidroviários, sujeitos a elevada variação de nível d'água, em função da originalidade desse tema, talvez, porque esse assunto somente passou a despertar interesse, depois de 2005, quando o montante dos investimentos na construção de novos terminais hidroviários na Amazônia passou a possuir valor significativo.

As hidrovias e os terminais fluviais integram e colaboram para o abastecimento dos municípios e países da região do Amazonas de forma sustentável, descartando a necessidade de desmatamentos para a construção de estradas e ferrovias. Portanto, o transporte aquaviário é também fundamental para a preservação da floresta amazônica.

Os atuais cais flutuantes utilizados nos rios da região Norte do Brasil são fabricados com emprego de chapas e perfis metálicos e possuem, em média, pouco tempo de vida útil. O cais flutuante do município de Coari, no estado do Amazonas, por exemplo, teve de ser substituído, após aproximadamente 30 anos de sua fabricação e instalação.

Espera-se que os cais flutuantes fabricados com emprego do concreto desenvolvido por esta pesquisa passem a possuir vida útil mais longa e custo de fabricação menor, em relação aos dos atuais cais existentes nos terminais hidroviários da Amazônia.

Como são inúmeras as vantagens que a combinação CAA e CAD pode oferecer, é muito provável que os projetos de cais flutuantes mudem definitivamente. Portanto, a presente pesquisa pode representar o primeiro passo de um grande avanço tecnológico que poderá mudar o curso da história dos terminais hidroviários da região Norte do Brasil. Entretanto, outras pesquisas ainda deverão ser realizadas, para complementar os resultados obtidos por esta pesquisa, como as que abordem os temas durabilidade e custo.

Além desses aspectos, em dois anos, o mercado da construção civil em Manaus apresentou um crescimento de mais de 80%, segundo dados da Secretaria de Emprego e Renda do Estado do Amazonas, tornando o concreto desta pesquisa também importante para esse destino (WWW.PORTALAMAZONIA.GLOBO.COM, 2010).

O estudo dos agregados disponíveis é tão importante quanto o estudo da viabilidade técnica de produção de CAD e CAA reforçados com fibra de polipropileno. Os agregados disponíveis na região Norte para produção de concreto possuem características próprias e diferentes dos existentes em qualquer outra região do Brasil, necessitando, portanto, de estudo direcionado e atenção especial.

Não se tem conhecimento sobre a realização de qualquer pesquisa que tenha como objetivo obter concreto autoadensável e de alto desempenho com emprego de fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus, o que comprova o ineditismo desta pesquisa.

A contribuição desta pesquisa poderá ser considerada muito significativa na ampliação do conhecimento sobre os concretos autoadensáveis e de alto desempenho, com adição de fibras de polipropileno. Esta pesquisa poderá ainda contribuir para a obtenção de concretos com maior fluidez, coesão, estabilidade, resistência à ação de intempéries, durabilidade, resistência à abrasão, impermeabilidade, resistência à compressão e à tração e módulo estático de elasticidade à compressão, com emprego apenas de materiais disponíveis na

região metropolitana de Manaus. A ampliação desse conhecimento poderá resultar na sua aplicação prática, em obras de construção civil da região Norte.

Os resultados obtidos poderão ser utilizados pelos construtores amazonenses, na ampliação de seu conhecimento sobre as propriedades dos agregados disponíveis na região metropolitana de Manaus e sobre os demais materiais componentes que podem ser fornecidos nessa região, como o cimento fabricado no polo industrial de Manaus, as adições e os aditivos superplastificantes.

Os construtores dessa região poderão aproveitar os conhecimentos gerados por esta pesquisa para obter melhor qualidade e maior durabilidade para as obras de construção civil, beneficiando assim a população local. Portanto, esta pesquisa possui também grande relevância social.

As peculiaridades dos materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus tornam o objetivo desta pesquisa muito interessante para os construtores amazonenses, uma vez que a mesma oferece uma opção adicional de concreto que combina as qualidades do CAA às do CAD, utilizando ingredientes locais em sua composição.

1.3 Objetivos e Limites da Pesquisa

O objetivo geral desta pesquisa é estudar a viabilidade técnica da produção de concreto de alto desempenho e autoadensável reforçado com fibra de polipropileno para a fabricação de cais flutuantes de terminais hidroviários da Amazônia.

Como o concreto pesquisado destina-se à fabricação desses cais flutuantes e como os mesmos estão sujeitos a ação de agentes agressivos e a choques de troncos trazidos pelas correntezas e de embarcações, decidiu-se optar por um concreto de alto desempenho que viesse a ter boas propriedades como durabilidade, impermeabilidade e resistência à abrasão, à compressão e à tração na flexão.

As peças estruturais dos cais flutuantes são principalmente costados, fundo e convés. Suas formas variam entre placas, vigas, colunas e tirantes. Em função da esbeltez das peças

estruturais de um cais flutuante, decidiu-se optar também por um concreto autoadensável, por possuir maior capacidade de perfeito preenchimento das fôrmas.

Decidiu-se, ainda, pelo emprego de baixo teor de fibras de polipropileno para o controle da fissuração provocada pela retração autógena do concreto. Apesar de não contribuírem para o aumento da resistência mecânica, as fibras curtas de polipropileno reduzem a área de fissuras associadas à retração. Elas também influenciam no comportamento reológico do concreto, reduzindo a trabalhabilidade. Portanto, diferentes dosagens de fibra de polipropileno foram empregadas nos traços produzidos com objetivo de escolher a mais adequada.

Como os cais flutuantes deverão ser fabricados em estaleiros da região metropolitana de Manaus, adotou-se o emprego de materiais produzidos ou fornecidos nas proximidades dessa cidade, com a finalidade de reduzir os custos de transporte.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

a) selecionar, entre os agregados disponíveis comercialmente na região, os mais adequados à obtenção do objetivo geral da pesquisa e caracterizá-los fisicamente;
b) realizar estudos de compatibilização entre os aditivos superplastificantes utilizados na pesquisa e o cimento Portland composto com pozolana CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus;
c) selecionar, entre os aditivos superplastificantes disponíveis para a pesquisa, duas opções mais adequadas à obtenção do objetivo geral da pesquisa;
d) produzir e caracterizar o concreto com materiais disponíveis comercialmente na região nas condições do objetivo geral desta pesquisa; e
e) produzir duas placas de concreto confeccionadas com o mesmo traço (com e sem adição de fibras de polipropileno), comparando-as e avaliando-as quanto ao estado de fissuração por retração, com as mesmas condições de cura e idades.

Os resultados desta pesquisa serão também de grande valia para as obras de construção civil da região metropolitana de Manaus, pois permitirão a ampliação do conhecimento sobre a qualidade dos agregados disponíveis nessa região, assim como sobre a possibilidade de produção de CAA e CAD com esses materiais.

Como o produto resultante desta pesquisa é um concreto autoadensável e de alto desempenho com fibras de polipropileno e materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus, a formulação do problema pesquisado pode ser realizada por meio da seguinte indagação:

Quais os valores máximos de resistência à compressão axial, resistência à tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão e quais as qualidades no estado fresco que podem ser obtidas por concretos autoadensáveis e de alto desempenho reforçados com fibras curtas de polipropileno e produzidos com emprego de materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus?

Além desse questionamento principal, outros também foram focados, como:

Qual o comportamento de concretos reforçados com fibras de polipropileno com a finalidade de uso em cais flutuantes?

Qual a potencialidade de utilização de materiais disponíveis na região de Manaus na produção de CAD e CAA?

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Concreto Autoadensável

O concreto autoadensável é capaz de fluir, autoadensar pelo peso próprio, preencher a fôrma e passar por embutidos (armaduras, dutos e insertos), enquanto mantém sua homogeneidade (ausência de segregação) nas etapas de mistura, transporte, lançamento e acabamento (NBR 15823, 2010).

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 fôrmas, aproveitando somente o seu peso próprio, reduzindo a dependência de vibração mecânica, ruído e custo de execução. O CAA possui também menor tempo disponível para o lançamento, em relação ao concreto convencional.

O CAA ainda reduz a necessidade de espalhamento e operações de acabamento superficial; facilita a concretagem de peças com fôrmas 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.

Entretanto, 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.

Um concreto para ser autoadensável deve possuir:

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

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.

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, de preferência inferior a 2,1. 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.

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. 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 as 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-carbono. A cinza volante é um bom material inorgânico com propriedades pozolânicas que pode ser acrescentado ao CAA para melhorar suas propriedades. A sílica ativa é capaz de promover uma melhoria das condições reológicas do concreto, bem como uma melhora na durabilidade e em suas propriedades químicas e mecânicas (LISBÔA, 2004). A escória granulada de alto forno é um material latente hidráulico granular fino, que pode ser

adicionado ao concreto para melhorar suas propriedades reológicas. O fíler de vidro moído é geralmente obtido através da moagem de vidro reciclado, em partículas menores que 0,1 mm e área de superfície específica maior que 2.500 cm^2/g, onde partículas maiores podem causar reação álcali-sílica (GOMES, 2002).

Os finos podem ser pozolânicos, como cinza da casca de arroz, sílica ativa, metacaulim, escória de alto forno e outros, ou não pozolânicos, como cerâmica moída, fíler calcário e outros, desde que tenham área superficial maior do que o componente que está sendo substituído. Se forem pozolânicos, podem substituir o cimento em massa, uma vez que reagem com o $Ca(OH)_2$ resultante da hidratação do cimento, que é um composto frágil e facilmente lixiviável, aumentando, dessa forma, a durabilidade do concreto (TUTIKIAN, 2004). Se não forem pozolânicos, podem substituir apenas o agregado miúdo, uma vez que ambos são inertes e, portanto, atuam somente como material de enchimento. Como os componentes finos são responsáveis pela coesão do CAA, sua área superficial deve ser maior que a dos materiais substituídos. A *European Federation of Specialist Contruction Chemicals and Concrete Systems* - EFNARC (2002) define como finos somente as partículas menores que 0,125 mm, incluindo as dos agregados. Além de responsáveis pela resistência à segregação da mistura, os finos desempenham um papel importante para a durabilidade do concreto, tanto física quanto quimicamente. Como as partículas são de tamanho pequeno, elas realizam um efeito de fíler, pois fecham poros e melhoram a zona de transição, que é o local onde os agentes agressivos penetrariam no concreto e onde provavelmente romperiam o material no seu limite de carga.

Para a obtenção de CAA de alta resistência, é comum a utilização da combinação de cimento com cinza volante ou de cimento com fíler calcário, acrescido de um percentual de sílica ativa. Cimentos contendo mais de 10% de C_3A podem causar problemas de baixa trabalhabilidade. O consumo típico de cimento por metro cúbico de concreto costuma estar entre 350 e 450 kg/m^3. Um consumo de cimento superior a 500 kg/m^3 poderá ser perigoso, pois aumenta a retração. O uso de menos de 350 kg/m^3 só poderá ser satisfatório com a inclusão de outro material cimentício, como cinza volante, pozolanas ou outros. Uma quantia mínima de finos, presentes nos materiais cimentícios e na própria areia, deve ser estabelecida para evitar a segregação (LISBÔA, 2004).

Em relação às características geométricas dos agregados, os agregados graúdos 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 graúdo 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 graúdo, 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).

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).

O nível de fluidez do CAA é governado, principalmente, pela dosagem de superplastificante, mas uma grande quantidade do mesmo pode conduzir ao risco de segregação e bloqueio. A tendência de segregação e bloqueio pode ser controlada pelo uso de uma quantia suficiente de finos (< 0,125 mm) ou um aditivo controlador do nível de viscosidade. 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, que são citados no item 2.1.1 (LISBÔA, 2004).

Os aditivos superplastificantes podem ser divididos em quatro grupos:

a) lignossulfonatos ou lignossulfonatos modificados (LS);
b) sais sulfonados de policondensado de naftaleno e formaldeído, usualmente denominados de naftaleno sulfonato ou apenas naftaleno (NS);

c) sais sulfonatos de policondensado de melamina e formaldeído, usualmente denominados de melamina sulfonato ou apenas melamina (NS); e
d) policarboxilatos (PC).

O tempo, durante o qual o CAA mantém suas propriedades reológicas, é muito importante, no sentido de serem obtidos bons resultados durante o processo de aplicação do mesmo. Esse tempo pode ser ajustado por meio da escolha correta do superplastificante ou do uso combinado de aditivos retardadores. Cada aditivo tem seu efeito, em função do tempo, portanto, eles podem ser usados de acordo com o tipo de cimento e a cronometragem do transporte e do lançamento. A trabalhabilidade do CAA pode ser caracterizada pelas propriedades de capacidade de preenchimento, capacidade de passagem por obstáculos e resistência à segregação. Uma mistura de concreto só pode ser classificada como CAA, se todas as exigências, provenientes de resultados de ensaios, para essas três características, forem totalmente atendidas (LISBÔA, 2004).

2.1.1 Ensaios do CAA no Estado Fresco

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 a 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 T_{500} (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).

Segundo Aïtcin (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 Aïtcin (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 desses concretos.

A NBR 8953:2009 classifica os concretos com resistências 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.

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 m^3 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 CAD, uma vez que sua alta resistência permite reduzir o volume das peças estruturais. Estudos realizados em obras apontam reduções no custo da estrutura na ordem de 15% (BIANCHINI, 2010).

Em suma, são as seguintes as principais características do CAD:

a) são concretos de alta resistência e durabilidade;

b) possuem menor porosidade, maior impermeabilidade e maior coesão, devido ao emprego de adições, como sílica ativa ou metacaulim; e
c) são facilmente aplicados, devido à utilização de aditivos superplastificantes.

As adições exercem influência sobre as propriedades do concreto, de tal forma que durante a reação 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.

Os fíleres, como cinzas volantes, escórias de alto-forno, pozolanas naturais, sílica ativa, calcário, sílica da cinza de casca de arroz e outros, preenchem os vazios da zona de transição entre o aglomerante e o agregado, proporcionando uma estrutura mais compacta.

Para uma mesma relação água/cimento e um mesmo consumo de cimento, um concreto, dentro das condições básicas de concreto impermeável, com adição de sílica ativa ou metacaulim na ordem de 5 a 12% do peso do cimento, passa a possuir uma impermeabilidade 10 a 20 vezes superior, aumentando a vida útil das estruturas, mesmo em ambientes extremamente agressivos.

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.

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 fôrmas podem ser liberadas rapidamente, aumentando a produtividade. O CAD pode ainda permitir a redução nominal das seções das peças.

As estruturas em concreto eram, até pouco tempo atrás, projetadas com f_{ck} de 40 MPa, no máximo. Com o surgimento das adições e dos aditivos especiais, atualmente, é possível se obter resistências acima de 100 MPa.

Entre as vantagens do uso de concretos de alto desempenho, 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, consequentemente, menor o gasto com fôrmas e armaduras;
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.

As adições, por possuírem partículas muito pequenas, conferem ao concreto baixa segregação e exsudação. Permitem ainda que o concreto seja aplicado em estruturas esbeltas, muito armadas ou de difícil acesso, como é o caso das paredes delgadas dos cascos de um cais flutuante.

As pequenas partículas das adições também elevam substancialmente a relação a/c (água/cimento). 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 pela utilização de superplastificantes. Uma relação água/cimento baixa tende a reduzir significativamente a porosidade inerente à pasta de cimento endurecida.

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 (AÏTCIN, 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.

No CAD, como a pasta de cimento hidratada e a zona de transição possuem alta resistência, a ruptura geralmente ocorre na fase agregado.

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

a) porosidade (poros, quando concentrados em um local, reduzem a resistência do concreto);
b) tamanho do grão dos produtos de hidratação (a resistência do concreto aumenta, com a diminuição do tamanho do grão); e
c) heterogeneidades (materiais multifase aumentam as heterogeneidades que dão origem às perdas de resistência).

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 menor quantidade de água de mistura do que no concreto usual (uma vez que, no CAD, a relação a/c é menor que 0,40), 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 (AÏTCIN, 2000).

Os principais fatores que afetam a porosidade da fase do cimento hidratado são a relação do volume de água disponível, do volume da fase do silicato não hidratado e da quantidade de ar incorporado durante a mistura (AÏTCIN, 2000). Portanto, para reduzir a porosidade de uma pasta de cimento hidratada, é necessário reduzir, tanto quanto possível, a quantidade de ar incorporado e a relação água/cimento na pasta fresca de cimento.

Para diminuir o tamanho dos grãos dos produtos de hidratação também deve-se diminuir a relação água/aglomerante, uma vez que baixos valores dessa relação favorece a formação dos produtos internos caracterizados por uma textura fina. O CSH (silicato de cálcio hidratado) de tais produtos internos parece uma fase vítrea altamente compacta quando observado num microscópio eletrônico de varredura (AÏTCIN, 2000).

Como são consideradas como heterogeneidades microestruturais, as bolhas de ar incorporado devem ser eliminadas por meio de uma consolidação adequada, apesar do que uma pequena quantidade de ar (2 a 3%) é muito conveniente no lançamento e no acabamento do CAD. A tendência natural das partículas do cimento de flocularem de modo folgado também deve ser eliminada. Nesse sentido, os aditivos superplastificantes, necessários para redução da relação água/aglomerante, desempenham um papel-chave para melhorar a dispersão das partículas de cimento nas pastas recém-misturadas.

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. Portanto, quando o concreto é submetido a uma dada tensão, as fissuras começam a se desenvolver na zona de transição. Com o concreto usual (relação água/aglomerante de 0,5 a 0,7), as tensões de tração induzidas pelas deformações na retração térmica e na secagem são grandes o bastante para causar microfissuramento na zona de transição, mesmo antes de submeter-se o concreto a qualquer carga externa, impedindo o concreto de comportar-se como um verdadeiro material composto. Nessa situação, a resistência das partículas do agregado não desempenha parte alguma na determinação da resistência do concreto, uma vez que existe pouca transferência efetiva de tensões entre a massa da pasta de cimento e o agregado.

Quando a zona de transição é reforçada, de tal forma que, sob tensão crescente, ela não é o primeiro componente a falhar, a resistência e as propriedades elásticas do agregado tornam-se importantes na determinação do comportamento do concreto. A redução da relação água/aglomerante e o uso da sílica ativa tendem a reduzir a espessura e a fraqueza da zona de transição. No CAD, a pasta hidratada de cimento e a zona de transição podem ser tão resistentes que, se os agregados, particularmente os graúdos, não forem suficientemente resistentes, eles podem se tornar o elo mais fraco dentro do concreto (AÏTCIN, 2000).

Rochas contendo planos de clivagem fracos ou partículas que sofreram severamente a ação das intempéries devem ser evitadas. Estudos geológicos e petrográficos detalhados podem ajudar na busca de um agregado resistente.

A reologia dos traços de baixa relação água/aglomerante pode ser governada pelos seguintes fatores:

a) otimização da granulometria e da forma dos agregados;
b) otimização da granulometria das partículas cimentícias; e
c) otimização do material cimentício suplementar.

Outras observações:

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.

Um CAA que também seja um CAD possui, em relação ao concreto convencional, maior trabalhabilidade, maior habilidade de preenchimento, maior habilidade passante; maior resistência à segregação, maior resistência à ação de intempéries, maior durabilidade, maior resistência à compressão e à tração e maior módulo estático de elasticidade à compressão. A combinação CAA e CAD, produzida com materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus, possuindo ainda fibras de polipropileno em sua composição para redução da fissuração provocada pela retração plástica do concreto, tem grande potencial de utilização na fabricação de cais flutuantes fluviais destinados aos terminais hidroviários de pequeno porte da região Norte do Brasil.

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 Aïtcin (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 (AÏTCIN, 2000).

Ainda segundo Aïtcin (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) a granulometria da areia deve crescer proporcionalmente à resistência à compressão e ao consumo de cimento, sendo preferível um módulo de finura 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 (AÏTCIN, 2000).

2.3.1 Cimento

Apesar de não ser muito difícil obter um CAD classe I (definido na tabela 2.1) 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 (AÏTCIN, 2000).

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.

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 SiO_2 a letra S, para Al_2O_3 a letra A, para Fe_2O_3 a letra F e para H_2O a letra H.

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

Fase do Cimento Portland	Notação Química Simplificada
$3CaO . SiO_2$	C_3S (silicato tricálcico)
$2CaO . SiO_2$	C_2S (silicato dicálcico)
$3CaO . Al_2O_3$	C_3A (aluminato tricálcico)
$4CaO . Al_2O_3 . Fe_2O_3$	C_4AF (ferro aluminato tetracálcico)

A hidratação do cimento para, 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 destes 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).

Segundo Mehta e Monteiro (2008), 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, maior é a resistência do concreto

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/m³ e 550 kg/m³ (LISBÔA, 2004). Segundo Neville (1997), teores acima de 530 kg/m³ 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).

O cimento Portland composto, CP II, por ser o tipo de cimento mais utilizado, ser facilmente encontrado no Brasil, e sua composição se encontrar dentro do especificado pela *European Federation of Specialist Contruction Chemicals and Concrete Systems* - EFNARC, em relação ao teor de C_3A (inferior a 10%), se apresenta como o mais indicado para a utilização em concretos autoadensáveis (CAVALCANTI, 2006).

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

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, 2008). 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.

Dentre as propriedades e características dos agregados, as de maior importância são, segundo Mehta e Monteiro (2008):

- 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) recomenda 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.

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).

A forma da partícula diz respeito às características geométricas dos grãos, que segundo Mehta e Monteiro (2008), 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 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, 2008).

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).

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, 2008).

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, 2008).

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).

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.

A escolha do agregado miúdo é determinada tanto pelo seu efeito na demanda de água, como pelo seu empacotamento físico. Em relação à procedência dos agregados miúdos, tanto as areias naturais de rios ou depósitos eólicos, quanto as artificiais, obtidas por britamento de rocha, podem ser utilizadas. Entretanto, essas areias naturais demandam menos água de amassamento e produzem concretos com boa trabalhabilidade, por possuírem partículas arredondadas e lisas, devido à sua longa exposição aos agentes de intemperismo, sendo, portanto, preferíveis. 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).

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.

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, 2008). 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 resistência dos agregados deve 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.

Segundo Aïtcin (2000), a seleção de agregados, para produção de CAD, 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 é 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.

Em geral, os CAD 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.

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 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).

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, uma vez que os materiais mais grossos necessitam de menos água, devido à sua menor superfície específica.

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.

2.3.2.2 Seleção do Agregado para Evitar a 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).

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 (2008), 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 é mais comum do que a reação álcali-silicato e álcali-carbonato, sendo universalmente considerada como a reação entre os íons alcalinos presentes na solução dos poros do concreto e a sílica amorfa presente nos agregados.

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, 2008);
- 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).

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 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. A NBR-15577:2008 normaliza ensaios concernentes à reatividade álcali-agregado e está subdividida em seis partes, conforme observado na tabela 2.3.

Tabela 2.3 - Partes da NBR 15577:2008 sobre ensaios concernentes à reatividade álcali-agregado

NBR 15577-1:2008 - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto
NBR 15577-2:2008 - Parte 2: Coleta, preparação e periodicidade de ensaios de amostras de agregados para concreto
NBR 15577-3:2008 - Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto
NBR 15577-4:2008 - Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado
NBR 15577-5:2008 - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado
NBR 15577-6:2008 - Parte 6: Determinação da expansão em prismas de 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 tabela 2.4 exemplifica as medidas de mitigação, em função da intensidade da ação preventiva.

Tabela 2.4 – 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/m³ de Na_2O 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/m³ Na_2O 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 15777:2008

Na eventual 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.

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 – Nassau, uma vez que se trata de um cimento Portland composto com pozolana.

Os resultados dos ensaios realizados devem ser analisados, 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 (pozolana, escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim) ou ainda substituir o agregado. O cimento deve conter baixo teor de álcalis.

A primeira opção é 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.

Se for mantido o agregado reativo, deve-se estudar cimentos inibidores da RAA, bem como o emprego de adições minerais, tais como a sílica ativa, a cinza de casca de arroz, o metacaulim, a cinza volante ou as pozolanas naturais. Os cimentos e os teores das adições a serem empregados devem ser investigados em conjunto com o agregado reativo, por meio de ensaios de reatividade em laboratório, com o objetivo de verificar a melhor opção para a inibição ou a redução das expansões causadas pela RAA (HASPARYK, 2005).

2.3.3 Adições

2.3.3.1 Generalidades

Os aditivos minerais, também conhecidos como adições minerais, são materiais finamente moídos, que são incorporados ao concreto com a finalidade de se obter características específicas. A sílica ativa e a cinza volante, por exemplo, são empregadas normalmente com teores entre de 8 e 12% e entre 20 e 60% do peso do cimento, respectivamente. As adições minerais são utilizadas 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. É comum o uso de resíduos industriais como materiais finos, em pastas, argamassas e concretos (CAVALCANTI, 2006). 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 de finos, fazendo com que haja um aumento na densidade da pasta, dificultando a penetração de agentes agressivos e melhorando a zona de transição (TUTIKIAN, 2004).

Adições minerais 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, 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 necessitam de um simples processo de calcinação e moagem para se transformarem em pozolanas. As pozolanas artificiais são subprodutos industriais. Podem ou não necessitar de um tratamento (secagem ou moagem complementar), para que venham a desenvolver atividade pozolânica (CARMO, 2006).

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 (CaO >10%).
- pozolanas comuns:
  - cinza volante de baixo teor de cálcio (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).

Segundo Klein (2008), o 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 hidróxidó 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 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 ou microssílica, subproduto do processo de fabricação do silício metálico ou das ligas de ferro silício, por ser a adição altamente pozolânica mais utilizada e ser o tipo de adição mineral utilizado por esta pesquisa, é aqui abordada com atenção especial.

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 SiO_2 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 (AÏTCIN, 2000).

Do ponto de vista químico, a sílica ativa é composta principalmente de SiO_2, com pequenas quantidades de alumina, ferro, cálcio, álcalis, carbono, entre outros (AÏTCIN, 2000).

A introdução de aditivos químicos e de adições minerais no concreto provoca várias alterações de características, tanto no estado fresco, quanto no estado endurecido. Para fabricação do CAD, têm sido empregadas sílica ativa, cinzas volantes, pozolanas naturais, cinzas de casca de arroz e metacaulim, em dosagens que variam de 8% a 12% da massa do cimento (WATANABE, 2008).

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) apud Mendes (2002):

- 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 a metade da tonelagem 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 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 (NETTO, 2006).

A principal reação pozolânica envolve a formação de silicato de cálcio hidratado (CSH), similar ao produzido pela hidratação dos silicatos de cálcios do cimento Portland, como o C_3S. As reações podem ser descritas como:

- $C_3S + H_2O \rightarrow CSH + CH$ (hidratação do cimento Portland)
- $CH + S + H_2O \rightarrow CSH$ (reação pozolânica)

  onde: $C = CaO$, $S = SiO_2$, $H = H_2O$

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 Neville (1975) e Mehta e Monteiro (2008), 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.

2.3.3.5 Benefícios dos Finos e das Pozolanas

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 (como os finos melhoram a trabalhabilidade do concreto, há menor necessidade de água de amassamento);
- reduz o calor de hidratação (como os finos substituem em parte o cimento, há menor calor de hidratação), evitando 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 consequentemente, 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, os finos melhoram propriedades, como: resistência mecânica, 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 μm. 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, Iziquierdo 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 a/f se encontre entre 0,9 e 1,1 (EFNARC, 2002).

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);
- maior performance em resistência à abrasão/erosão (a ação da pozolana 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 pozolana proporciona baixíssima permeabilidade em ambientes de grande agressividade, ou seja, aumenta a resistência contra o ataque de cloretos, sulfatos, amônias, ácidos e outros).

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.

Além disso, 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: esses benefícios já foram aqui mencionados;
b) econômicos: a utilização de pozolanas, via de regra, acarreta na diminuição do consumo de cimento e no de energia elétrica para a sua produção, enquanto a maior parte das pozolanas é derivada de resíduos industriais e necessita de pouco ou nenhum custo adicional (a substituição do cimento Portland por pozolanas, segundo Malhotra e Mehta (1996), pode variar entre 20% a 60%, enquanto as pozolanas com alta reatividade são empregadas com teores em torno de 10%); e
c) ecológicos: os resíduos industriais com elementos poluentes, que podem provocar sérios danos ao meio ambiente e à saúde humana, quando não são reutilizados como pozolanas, são depositados em rios, campos e lagoas (além disso, 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 CO_2 na atmosfera, que contribui para o efeito estufa existente em nosso planeta).

2.3.4 Aditivos Superplastificantes

2.3.4.1 Generalidades

Os superplastificantes 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, 2008).

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 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.

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 aos redutores de água anteriores, pois possibilitam:

- redução de água de até 45% da água de amassamento;
- coesão do concreto, mantendo sua trabalhabilidade;
- redução da água de amassamento;
- 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 (esse efeito advém do fato de cada átomo dentro de uma molécula ocupa uma determinada quantidade de espaço); e
- 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 efeito estérico.

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, resultante da ação de todos os superplastificantes, independentemente de sua geração, 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 AÏTCIN, 1990; AÏTCIN et. al., 1994).

Os policarboxilatos, também conhecidos como poliacrilatos ou aditivos de 3ª geração, são capazes de promover um efeito mais eficiente na repulsão dos grãos de cimento em relação aos aditivos superplastificantes da 1ª e da 2ª geração.

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, conforme demonstra a figura 2.1. Essa é a maior vantagem dos superplastificante à base de éter policarboxílico, em relação aos demais.

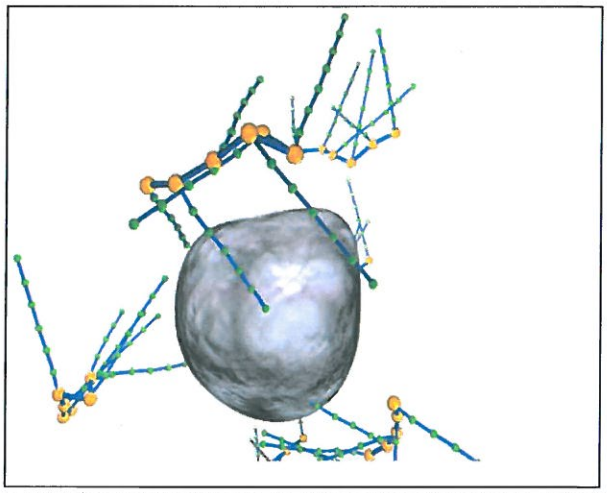


Figura 2.1 – O entrelaçamento das cadeias laterais de diferentes moléculas do aditivo impede a aproximação das partículas de cimento (Fonte: TOKUDOME, sem data)

Além da repulsão eletrostática o outro mecanismo de ação de um superplastificante, por repulsão estérica, ocorre somente quando são utilizados aditivos 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 (AÏTCIN, 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 apud HSU et al., 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 C_3A.

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).

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 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 na presença de outros aditivos na mistura (KLEIN, 2008).

No caso da temperatura abaixo de 22°C, o aumento de dosagem de superplastificantes pode atingir 30% de sua dosagem com a temperatura superior a esse valor. O aumento da temperatura, além dos 32°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).

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.

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 determinação experimental da dosagem do superplastificante, em relação à massa de cimento (p/c), deve ser realizada por intermédio de ensaios em pastas (cimento, água e superplastificante), com o objetivo de obter a fluidez máxima da pasta para uma dada relação água/aglomerante. Alguns estudos recomendam a sua determinação em pastas e/ou argamassas e concretos, nesta sequência, a fim de se determinar a dosagem ótima de saturação do superplastificante a ser utilizada, ou seja, o teor máximo de aditivo capaz de promover aumento da fluidez (CAVALCANTI, 2006).

Doses maiores de aditivo podem causar efeitos negativos como atraso na pega, segregação e aumento do custo do concreto (AÏTCIN et. al. 1994; RONCERO e GETTU, 1998). 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 AÏTCIN, 1990; AÏTCIN,

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.

2.3.4.2 Compatibilidade Cimento-Adição-Aditivo

Nos ensaios em pastas (cimento, água e superplastificante) com objetivo de determinar a dosagem ótima de um superplastificante, para uma dada relação água/aglomerante, a variável 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 miniabatimento 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.

2.3.5 Fibras

2.3.5.1 Generalidades

As fibras podem ser naturais e artificiais. As naturais são as fibras encontradas prontas na natureza, enquanto as artificiais são produzidas pelo homem, utilizando materiais da natureza. As fibras sintéticas fazem parte do grupo de fibras artificiais orgânicas, porém, oriundas de produtos químicos.

A figura 2.2 apresenta a classificação, segundo a *Bureau International pour la Standardisation des Fibres Artificielles* - BISFA, adotada pelo Manual Técnico da Maccaferri do Brasil Ltda. (sem data).

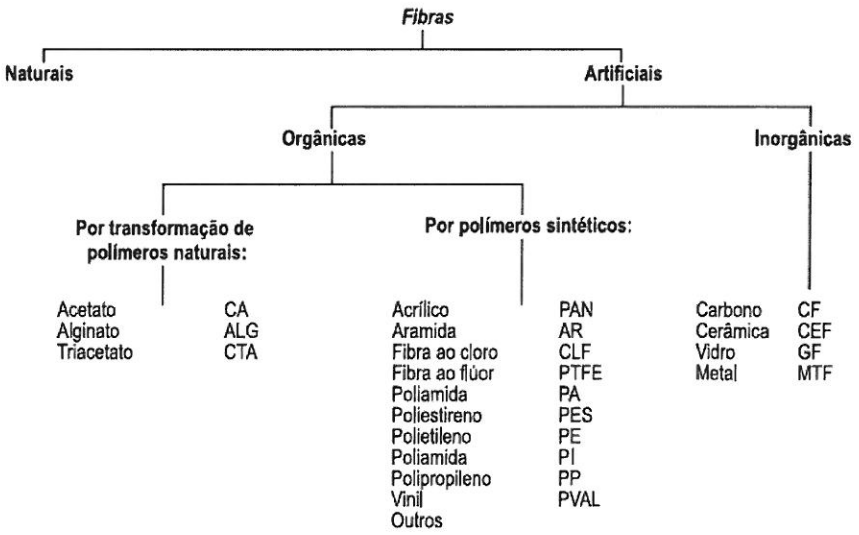


Figura 2.2 - Classificação das fibras segundo a BISFA (S/D)
(Fonte: MANUAL TÉCNICO DA MACCAFERRI DO BRASIL LTDA., sem data)

Mindess (1994) observa que o papel das fibras descontínuas e distribuídas aleatoriamente é o de atravessar as fissuras, que se formam no concreto, seja quando sob a ação de cargas externas ou quando sujeito a mudanças na temperatura ou na umidade do meio ambiente. As fibras provocam uma certa ductilidade após a fissuração. Se as fibras forem suficientemente resistentes, bem aderidas à matriz cimentícia e em bastante quantidade, elas ajudam a manter pequena a abertura das fissuras. Permitem concreto reforçado com fibras (CFR) resistir a tensões de tração bem elevadas, com uma grande capacidade de deformação no estágio pós-fissuração. Embora as fibras possam de fato produzir melhorias no comportamento do concreto, devemos ser realistas quanto ao que realmente podemos esperar das fibras, principalmente se a quantidade de fibras for pequena (menos de 1% em volume), como é o caso geral.

Mindess (1994) ainda afirma que as fibras, por si só, têm pouco efeito nas propriedades mecânicas estáticas, particularmente quando se adiciona pouca quantidade de fibras, como geralmente ocorre. A resistência à compressão não aumenta mais que 25%, mesmo com grande volume de fibras de aço (≥ 2% em volume), conforme figura 2.3.

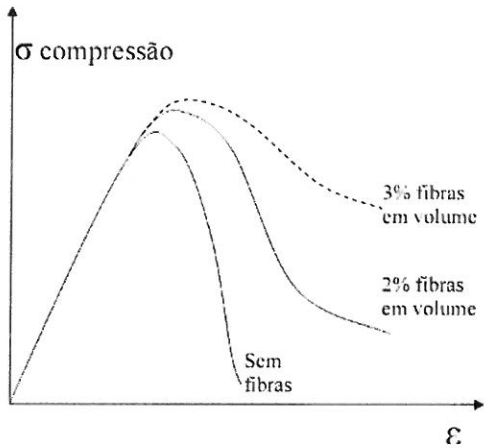


Figura 2.3 – Gráfico tensão x deformação para concretos com e sem fibras
(Fonte: MINDESS, 1994)

Fibras de polipropileno e fibras de carbono em grandes volumes, chegam a reduzir um pouco a resistência do concreto, porque as fibras tendem a aumentar o volume de ar incorporado ao concreto durante a mistura (MINDESS, 1994).

De um modo geral, as fibras (MINDESS, 1994):

- não afetam muito a resistência à tração axial, embora, para grandes volumes de fibra, possa haver um aumento da resistência à tração de até 6%;
- têm um grande efeito na resistência à tração na flexão (há relatos de aumento de mais que 100% na resistência, para elevados teores de fibra);
- têm pouco efeito na resistência à torção ou na resistência ao cisalhamento;
- têm pouca influência na resistência à abrasão;
- são muito eficientes na melhoria das propriedades dinâmicas do concreto;
- aumentam a resistência à fadiga do concreto; e
- melhoram as propriedades do concreto sob a ação de cargas de impacto.

Existem, no entanto, outros modos, provavelmente mais baratos, de aumentar a resistência do concreto. A real contribuição das fibras é de aumentar a ductilidade do concreto. A ductilidade é definida em função da área sob a curva tensão x deformação, em qualquer tipo de carregamento (MINDESS, 1994).

Ainda segundo Mindess (1994), é praticamente impossível eliminar a fissuração no concreto, em especial a fissuração devida à retração. Essa fissuração é uma característica inerente à matriz cimentícia, que é fraca na tração e que tem pouca capacidade de deformação na tração. O papel das fibras é de reduzir a abertura das fissuras, por meio da ligação entre as duas bordas das fissuras. As fibras não reduzem a quantidade total das fissuras, e, sim, a abertura das fissuras é que fica reduzida. As fibras, realmente, são bastante efetivas nessa aplicação.

2.3.5.2 Características das Fibras

Atualmente, existe uma vasta gama de fibras destinadas ao reforço do concreto, classificadas em função da matéria-prima com a qual são produzidas:

a) metálicas: aços carbono, suas ligas e alumínio;
b) naturais: amianto (asbesto), celulose e carbono; e
c) sintéticas: nylon, polipropileno e outras.

Na tabela 2.7, são apresentadas as características mecânicas de algumas fibras.

Tabela 2.7 - Características mecânicas das fibras, segundo a Maccaferri (S/D)

FIBRAS	Diâmetro (μm)	Densidade (10^3kg/m^3)	Módulo Elasticidade (KN/mm^2)	Resistência à Tração (KN/mm^2)	Alongamento na Ruptura (%)
Aço	5 – 500	7,84	200	0,5 – 2	0,5 – 3,5
Vidro	9 – 15	2,60	70 – 80	2 – 4	2 – 3,5
Amianto	0,02 – 0,04	3,00	180	3,30	2 – 3
Polipropileno	20 – 200	0,90	5 – 7	0,5 – 0,75	8
Nylon	-	1,10	4	0,90	13 – 15
Polietileno	-	0,95	0,30	0,0007	10
Carbono	9	1.90	230	2,60	1
Kevlar	10	1,45	65 – 133	3,60	2,1 – 4
Acrílico	18	1,18	14 – 19,5	0,4 – 1	3
Celulose	-	1,2	10	0,3 – 0,5	-
Sisal	10 – 50	1 – 50	-	0,8	3,0
Fibra de Madeira	-	1,5	71	0,90	-

(Fonte: MANUAL TÉCNICO DA MACCAFERRI DO BRASIL LTDA., sem data)

As fibras de polipropileno são fabricadas em forma de fibrilas retangulares ou de monofilamentos cilíndricos, conforme ilustram as figuras 2.4 e 2.5.



Figura 2.4 - Fibrilas finas em forma retangular
(Fonte: PCA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, sem data)



Figura 2.5 - Monofilamentos cilíndricos finos
(Fonte: PCA PORTLAND CEMENT ASSOCIATION, sem data)

As propriedades físicas de três tipos diferentes de fibras de monofilamentos cilíndricos de polipropileno fabricadas pela Maccaferri do Brasil Ltda. são apresentadas na tabela 2.8.

Tabela 2.8 - Propriedades físicas de fibras de monofilamentos cilíndricos de polipropileno fabricadas pela Maccaferri do Brasil Ltda.

Propriedade Física	Unidade	Valor / Tipo		
		FibroMac® 6	**FibroMac® 12**	**FibroMac® 24**
Diâmetro	μm	18	18	18
Seção	-	Circular	Circular	Circular
Comprimento	mm	6	12	24
Alongamento	%	80	80	80
Peso Específico	g/cm^3	0,91	0,91	0,91

(Fonte: MANUAL TÉCNICO DA MACCAFERRI DO BRASIL LTDA., sem data)

Segundo o manual técnico da Maccaferri do Brasil Ltda. (sem data), no que se refere à influência da geometria das fibras, como a forma e as dimensões longitudinais e transversais, no comportamento do concreto reforçado com fibras (CRF) e do concreto reforçado com fibras de aço (CRFA), ainda que outras características sejam importantes, a relação entre o comprimento (L) e o diâmetro equivalente (D), denominado fator de forma ou relação de esbeltez, é considerado o elemento mais importante, pois, do seu valor, dependem a ductilidade e a tenacidade do concreto reforçado com fibras, conforme ilustra a figura 2.6.

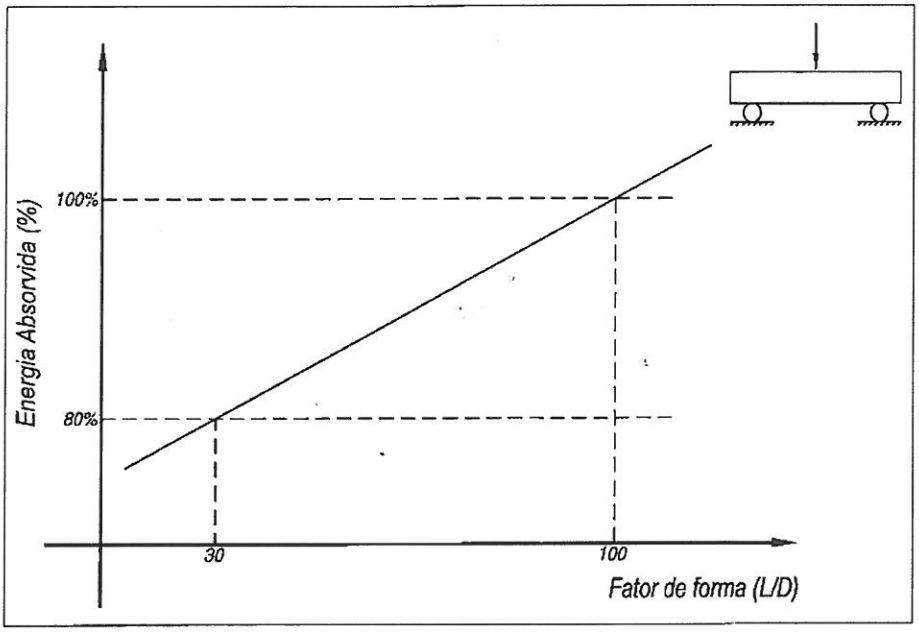


Figura 2.6 – Energia absorvida x fator de forma (L/D)
(Fonte: MANUAL TÉCNICO DA MACCAFERRI DO BRASIL LTDA., sem data)

O comprimento das fibras tem uma relação direta com o desempenho do compósito, pois, quanto menor for a sua dimensão de comprimento, maior é a possibilidade de seu arrancamento. Para uma análise completa, há a necessidade de se verificar também o seu diâmetro, pois depende dele também a capacidade da fibra desenvolver resistência às cargas nelas solicitadas (DOBBIN JUNIOR e ROCHA, 2011).

As quantidades médias de fibras no concreto e as propriedades mecânicas das fibras mais usadas, segundo Mindess (1994) são apresentadas na tabela 2.9.

Tabela 2.9 – Quantidades médias de fibras no concreto e propriedades mecânicas das fibras mais usadas

Tipo de Fibra	Dimensões das Fibras	Densidade Relativa	Volume de Fibras (%)	Teor de Fibras (kg/m³)	Número de Fibras por m³ de Concreto ($\times 10^6$)	Comprimento das Fibras por m³ de Concreto	Resistência a Tração (MPa)	Módulo de Elasticidade (GPa)	Alongamento Último (%)
Aço	L = 50 mm ø = 0,5 mm	7,85	1%	80	1	50 km	1000	205	30%
PP	L = 25 mm ø= 0,018 mm	0,9	0,1%	0,9	157	4 000 km	140 a 700	3,5 a 4,8	15%
Carbono	L = 6 mm ø= 0,018 mm	1,70	3%	48	19.600	118 000 km	2500 a 3000	380	0,5 a 0,7%

(Fonte: MINDESS, 1994)

2.3.5.3 Benefícios das Fibras no Controle da Abrasão, Exsudação e Fissuração por Retração do Concreto

A seguir, é descrito o problema da retração em concreto, bem como o emprego das fibras para a redução da fissuração por ela causada e no combate à abrasão pelo controle de exsudação.

Numa acepção superficial, a retração pode ser descrita como uma contração do compósito cimentício devida à perda de água. Embora ocorra tridimensionalmente no material, a retração é frequentemente expressa como deformação linear, pois os efeitos da retração são maiores quanto maior a dimensão e é comum que componentes construtivos tenham uma dimensão que predomina sobre as demais (SALES, 2006).

Sabe-se, no entanto, que a retração em misturas à base de cimento é, principalmente, um conjunto de efeitos do complexo sistema de secagem, podendo ser secagem exógena, quando há perda de água para o meio externo, e secagem endógena, quanto por adsorção da água para formação de produtos de hidratação do cimento (SALES, 2006).

Formas de retração originárias de ações térmicas, hídricas e químicas podem ser identificadas.

As ações térmicas podem ser devidas a variações de temperatura oriundas de mudanças climáticas, de processos industriais ou do calor produzido na massa pela hidratação do cimento. Essa última somente tem efeitos relevantes em elementos de espessura

significativa, nos quais a taxa de geração de calor de hidratação é maior que a taxa de difusão através do material, para posterior dissipação para o meio externo.

As formas de retração de origem hídrica, ou retração por secagem, estão associadas ao fato de serem os compósitos cimentícios porosos. As deformações resultantes não são uniformes, originando tensões que podem levar a fissuração, principalmente em idades mais precoces, quando o material cimentício ainda não desenvolveu resistência mecânica suficiente para suportar essas solicitações. Seus efeitos mecânicos são frequentemente consideráveis, podendo predominar sobre ações estritamente mecânicas.

Entre as ações químicas, inclui-se a reação da pasta de cimento hidratada com o dióxido de carbono do ar, na presença de umidade, que causa a retração por carbonatação (SALES, 2006).

Existem, ainda, outros critérios que podem ser usados para classificar os tipos de retração a que um compósito cimentício pode estar sujeito.

Quanto ao estado físico da mistura, pode-se identificar a retração plástica e a retração do compósito endurecido.

Quanto às condições de contorno do elemento, a retração pode ser classificada em livre, quando, numa situação idealizada, não haveria restrição à variação volumétrica, ou restringida, quando há impedimento a essa movimentação por vínculos com outros elementos adjacentes ou atrito com a superfície sobre a qual está sobreposto. A consideração da restrição depende da escala adotada para observação do fenômeno, pois a presença de agregados ou fibras rígidas na mistura cimentícia pode ser tomada como uma restrição à movimentação da pasta (SALES, 2006).

Aitcin et al. (1997) identificaram cinco tipos de retração:

a) retração plástica;
b) retração por secagem do compósito endurecido;
c) retração autógena ou por autodessecação;
d) retração térmica; e
e) retração por carbonatação.

Quando alguns ou todos esses tipos de retração ocorrem, a soma é referida como retração total.

Retração Plástica

Segundo Sales (2006), a retração plástica, que cronologicamente antecede a retração por secagem, ocorre quando há perda da água com o material ainda no estado plástico. Podem ser observadas em componentes feitos com pasta, argamassa ou concreto de cimento Portland quando, ainda no estado fresco, ficam expostos a condições ambientais que causem forte evaporação, especialmente em peças com grande relação área superficial/volume, como é o caso de placas.

Difícil de ser controlada, a retração plástica, que se processa durante as primeiras horas, é, algumas vezes, acompanhada pela formação de fissuras, geralmente de pequena profundidade e por vezes quase imperceptíveis.

A retração plástica pode ocorrer devido ao efeito combinado de alguns eventos que acontecem logo após a moldagem do componente construtivo, com a mistura cimentícia ainda no estado plástico. Inicialmente, ocorre o assentamento de materiais que compõem a mistura, tais como o cimento, agregados e demais inserções sólidas. Por diferenças de peso específico, a água tende a ascender, podendo haver exsudação seguida de evaporação.

Adicionalmente, a retração plástica pode ser agravada por elevadas temperatura ou velocidade do vento. Quando a superfície do elemento perde o brilho característico, há indicação de que a velocidade de evaporação superou a velocidade de ascensão da água do interior para a superfície. Quando a velocidade de evaporação excede a velocidade de ascensão da água de exsudação, é provável que ocorram fissuras por retração plástica.

O material apresenta fissuração por retração plástica, quando a pasta de cimento já estiver dotada de uma certa rigidez, porém ainda sem ter desenvolvido resistência mecânica suficiente para se contrapor às tensões que surgem devidas à acomodação da massa.

A fissuração é induzida por retração plástica diferencial ou por restrição ao assentamento uniforme do material fresco. Essas restrições podem ser promovidas pelo

atrito com superfícies de moldes, pela presença de reforço ou agregados. Além de efeitos adversos sobre o comportamento mecânico, com o enfraquecimento do material, podem propiciar o surgimento de vias de entrada para a umidade e substâncias agressivas presentes no meio externo, reduzindo sua vida útil.

O reforço com determinados tipos de fibras curtas, distribuídas aleatoriamente na matriz à base de cimento, traz redução da retração plástica e por secagem do concreto endurecido (SALES, 2006). Redução da área total das aberturas das fissuras foi observada por Sales (2006) na ordem de 78% e 40%, no concreto convencional e no de alto desempenho com adição de fibras celulósicas, respectivamente, em relação ao concreto sem fibras.

Retração por Secagem do Compósito Endurecido

A retração por secagem, com o compósito já endurecido, tem como causa principal a saída da água do material. Normalmente, a água é perdida por evaporação para a atmosfera, mas pode também ocorrer sucção por camadas precedentes de material já seco ou pelo solo.

Compósitos cimentícios podem absorver ou ceder água para o ambiente. Expostos ao ar nas primeiras idades, passam a perder água por percolação, através de sua complexa estrutura porosa, e por posterior evaporação na superfície. Em ambiente de secagem, essa saída da água se dá de forma brusca. A água dos poros capilares da pasta hidratada, chamada de água livre, é extraída por forças que aumentam para menores diâmetros desses poros. Surgem, então, pressões negativas nos capilares, levando à contração do volume da pasta (SALES, 2006).

Portanto, a força motriz da retração por secagem de longa duração é a evaporação da água dos poros capilares da pasta de cimento hidratada, através das extremidades expostas ao ar com umidade relativa inferior à dos poros. A retração por secagem em materiais cimentícios é uma deformação lenta que progride com o tempo. Trata-se de uma propriedade inerente a todo material à base de cimento, pela estrutura essencialmente porosa da pasta endurecida.

A magnitude da perda da água presente nos poros e a velocidade com que ocorre depende de numerosos fatores, tais como: tipo de aplicação (cobertura ou vedação), forma do elemento, temperatura e umidade relativa ambiental, velocidade do vento, porosidade do material, orientação de sua estrutura (anisotropia), presença de fibras (naturais ou sintéticas), tipo de revestimento, impregnação aplicada ao produto, da relação superfície/volume do elemento, da idade em que o compósito cimentício foi exposto à secagem e das características do sistema da pasta, tais como tamanho, forma e continuidade dos poros capilares (SALES, 2006).

Retração Autógena ou por Autodessecação

Durante o endurecimento da pasta de cimento, ocorre a retração por autodessecação ou retração autógena, mesmo que a mistura cimentícia não tenha contato com o meio externo.

A hidratação do cimento engloba vários fenômenos que têm a reação química do cimento Portland com a água como elemento gerador, resultando na formação de um sólido coeso e adesivo, a pasta de cimento hidratada. A pasta que compõe a matriz dos compósitos cimentícios é o elemento essencial de sua resistência. Concomitantemente ao desenvolvimento da resistência mecânica, ocorrem a geração de calor e a redução do volume da pasta de cimento hidratada, havendo possibilidade de que os dois últimos produzam danos à estrutura do material, se medidas não forem adotadas para seu controle (SALES, 2006).

A quantidade de calor gerada e o desenvolvimento da resistência são influenciados por diversos fatores, sendo os principais a composição química do cimento (teores de C_2S, C_3S, C_3A e C_4AF), a temperatura ambiente durante a hidratação e a forma e as dimensões do elemento, que controlam a dissipação do calor para o meio externo.

A retração autógena corresponde à variação de volume da pasta de cimento, mesmo sem troca de umidade com o meio externo e sob temperatura constante. No concreto endurecido, a tensão capilar da água do poro é comumente considerada como a força motriz para a retração autógena. Ao ser usada a água do poro na hidratação, a autodessecação

causa redução do raio do menisco da água dentro dos poros, aumentando a tensão capilar (SALES, 2006).

Retração Térmica

A retração térmica pode se dar como resultado do decréscimo da temperatura provocado pela dissipação do calor produzido pela hidratação do cimento, no período de pega ou logo após, com as dimensões da massa tendendo a se tornarem fixas. Já as ações térmicas relacionadas ao clima são cíclicas. Seus efeitos mecânicos de longo prazo são, portanto, relacionados principalmente à diferença entre a temperatura inicial e a temperatura média do local em que o elemento se encontra. As ações das variações de umidade devidas ao clima também são cíclicas, mas a secagem é de 1.000 a 10.000 vezes mais lenta que o resfriamento e, consequentemente, seu efeito no comportamento a longo prazo do material pode ser pouco significativo, quando os ciclos de variação são de curta duração (ACKER e ULM, 2001).

Retração por Carbonatação

O último tipo relacionado é a retração por carbonatação. Resultante da reação entre o CO_2 do ar e os compostos hidratados do cimento que causa diminuição de volume na pasta endurecida, a retração por carbonatação tem lugar numa camada superficial muito fina do concreto exposto ao ar, com umidade relativa entre 30% e 70% (AÏTCIN et al., 1997).

Na carbonatação, o $Ca(OH)_2$ reage com o CO_2 (sendo o agente, de fato, o ácido carbônico) formando $CaCO_3$, outros componentes do cimento são decompostos e são produzidos sílica hidratada, alumina e óxido férrico.

Essa reação acontece mesmo para pequenas concentrações de CO_2, como no meio rural. A carbonatação tem sua velocidade aumentada com o aumento da concentração de CO_2, mas penetra muito lentamente além da superfície exposta. A velocidade depende, ainda, do teor de umidade do material e da umidade relativa do ambiente (NEVILLE, 1975).

Sob ciclos alternados de molhamento e secagem, a retração por carbonatação aumenta a magnitude da parcela de retração irreversível e pode contribuir para fissuração do compósito exposto.

Sua extensão pode ser facilmente determinada por aplicação de fenolftaleína numa superfície quebrada de um corpos de prova do compósito. O $Ca(OH)_2$ livre adquire cor rosa, enquanto a porção carbonatada não é colorida (SALES, 2006).

O polipropileno, muito usado nas fibras para o concreto, é um polímero de alta resistência química e de alta resistência a solventes. O emprego das fibras de polipropileno para a mitigação de problemas na retração também já vem sendo bastante praticado.

As fibras poliméricas de maior emprego atualmente são as fibras de polipropileno. No entanto, outros tipos de fibras podem ser ditados, tais como nylon, poliéster, polietileno, celulose e kevlar (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Misturas de fibras de resinas de polipropileno e de polietileno estão sendo utilizadas, uma vez que esses dois polímeros são incompatíveis e se separam, durante o manuseio e a mistura no concreto, facilitando a obtenção da homogeneidade da mistura (MINDESS, 1994).

A adição de fibras de polipropileno, em baixos teores, apesar de não contribuir para o aumento da resistência mecânica propriamente, melhora o comportamento do concreto em relação a solicitações dinâmicas e, principalmente, é imputado a elas a capacidade de redução da área de fissuras associadas à retração (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Os mecanismos de diminuição da fissuração por retração devem ser analisados para a melhor compreensão do comportamento do compósito e para a avaliação do grau de contribuição das fibras na diminuição da fissuração por retração, uma vez que os resultados divergem de um pesquisador para outro, de acordo com a metodologia empregada. Apesar de falta de consenso, as fibras de polipropileno têm sido empregadas em teores fixos de 0,1% em volume, independentemente do desempenho esperado (TANESI e FIGUEIREDO, 1999). Uma dosagem de 900 gramas dessa fibra por metro cúbico de concreto corresponde a aproximadamente 0,1% do seu volume.

Em 1966, a Shell desenvolveu e patenteou o processo de produção de fibras de polipropileno em forma de filmes fibrilados, bem como concretos contendo essas fibras. O material obtido foi denominado de "caricrete" e a adição máxima possível de fibras com essa tecnologia foi de 1% em volume (TANESI e FIGUEIREDO, 1999), bem acima da dosagem usual atual de 0,1%.

As figuras 2.7 e 2.8 ilustram duas amostras, a primeiro sem adição de fibras, e a segunda com fibras de polipropileno. A amostra com fibras de polipropileno apresentou uma quantidade menor de fissuras, apesar de ter sofrido a mesma retração da amostra sem adição de fibras (FITESA – BOLETIM TÉCNICO Nº 2, 2002).

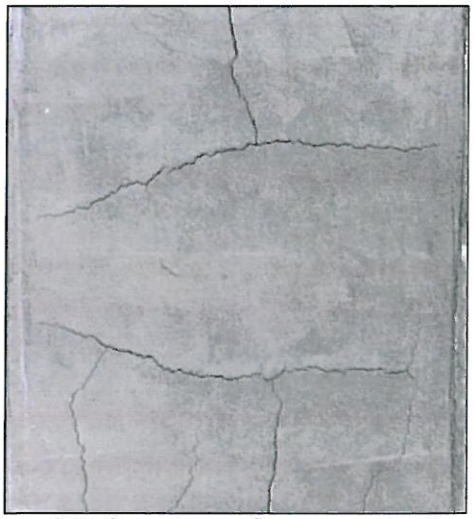


Figura 2.7 - Concreto com fissuras por retração por secagem do compósito endurecido
(Fonte: MANUAL TÉCNICO DA MACCAFERRI DO BRASIL LTDA., sem data)

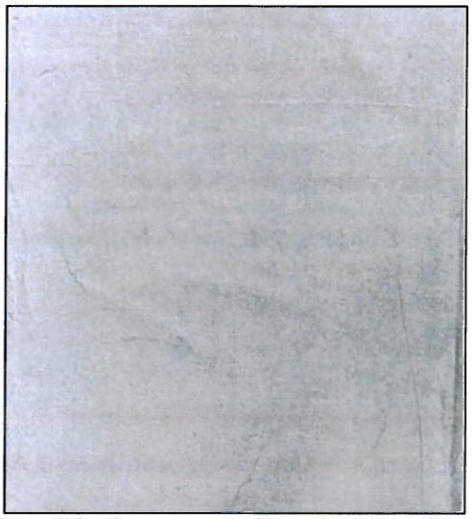


Figura 2.8 - Concreto com fibras de polipropileno: redução das fissuras
(Fonte: MANUAL TÉCNICO DA MACCAFERRI DO BRASIL LTDA., sem data)

As fibras de polipropileno de baixo módulo, ao serem adicionadas ao concreto, tornam o mesmo mais maleável nas primeiras idades. Essa propriedade da fibra é transmitida ao concreto, que passa a trabalhar de forma eficaz a deformação por retração. Dessa forma, as fissuras são controladas e, em alguns casos, até totalmente contidas. (FITESA – BOLETIM TÉCNICO Nº 2, 2002).

Em estudos realizados por diversos pesquisadores da área científica, em fibras tanto de aço quanto sintéticas, no intuído do combate à retração, pôde-se chegar a várias conclusões. Dentre elas, três são principais (DOBBIN JUNIOR e ROCHA, 2011):

a) a adição de fibras em concreto, mesmo que em baixo teor, garante reduções substanciais no aparecimento de fissuras;
b) no caso das fibras longas, as que apresentam menor módulo de elasticidade possuem um desempenho melhor; e
c) em fibras sintéticas, como as de polipropileno, não ocorre a redução do aparecimento de fissuras, mas sim o seu controle de dimensão.

A qualidade dos componentes de matrizes cimentícias não é mais caracterizada apenas pela resistência que apresentam (MEHTA, 1994), mas devem refletir outras propriedades que influenciam o desempenho global do material, tanto no estado fresco quanto no estado endurecido, tais como a trabalhabilidade e a durabilidade. As matrizes de cimento sem reforço apresentam características de fragilidade, baixas deformações quando submetidas à tração e praticamente não apresentam deformações plásticas (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

A adição das fibras de polipropileno em concreto aumenta a coesão da mistura no estado fresco. Essa qualidade resulta na diminuição do aparecimento de fissuras que geralmente ocorrem no estado plástico do compósito e nas suas primeiras horas de endurecimento (FITESA – BOLETIM TÉCNICO Nº 2, 2002).

O fenômeno da exsudação também é um problema que se tem decorrência nos concretos, logo nas suas primeiras idades. Porém, esse efeito pode acarretar danos também em longo prazo. Exsudação se define como a separação da parte de água do compósito, a qual aflora para a superfície do mesmo. A partir desse efeito, é gerado um aumento direto na relação a/c na superfície do concreto, prejudicando essa área. A utilização das fibras de polipropileno possui capacidades que vão além de aumento da tenacidade em compósitos, pois tornam também a exsudação menor nesses materiais (FITESA – BOLETIM TÉCNICO Nº 3, 2002).

Durante o lançamento do concreto, o espaço entre a ferragem e o concreto fica preenchido por água. Posteriormente, essa água tende a percolar para a superfície, onde se forma uma lâmina de água, conforme ilustra a figura 2.9. Além disso, a vibração e o acabamento excessivo do concreto podem aumentar a exsudação. A exsudação não

controlada pode gerar fissuras de assentamento plástico (DOBBIN JUNIOR e ROCHA, 2011).

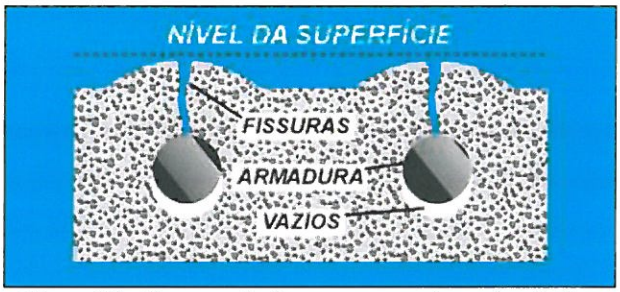


Figura 2.9 - Processo de fissura por assentamento plástico
(Fonte: FITESA – BOLETIM TÉCNICO Nº 3, 2002)

A partir do momento em que a água exsuda, uma película é formada na superfície, provocando o surgimento de uma camada porosa com baixa resistência mecânica. Dessa forma, a superfície poderá sofrer desgastes e erosões com mais rapidez, podendo ocorrer o surgimento de pó, comum em pisos de estacionamentos e calçadas.

As fibras de polipropileno possibilitam a diminuição das fissuras causadas por assentamento plástico e aumentam a resistência dos compósitos à abrasão pelo controle de exsudação. As fibras de polipropileno do tipo multifilamento, por possuírem pequeno diâmetro e baixa densidade, apresentam elevada área superficial. Essas fibras, como são hidrofóbicas, não absorvem água, mas realizam um processo de adsorção, que faz com que as moléculas de água sejam mantidas perto delas, conforme mostra a figura 2.10. Portanto, também realizam a diminuição do processo de exsudação, tornando-a controlada (FITESA – BOLETIM TÉCNICO Nº 3, 2002).

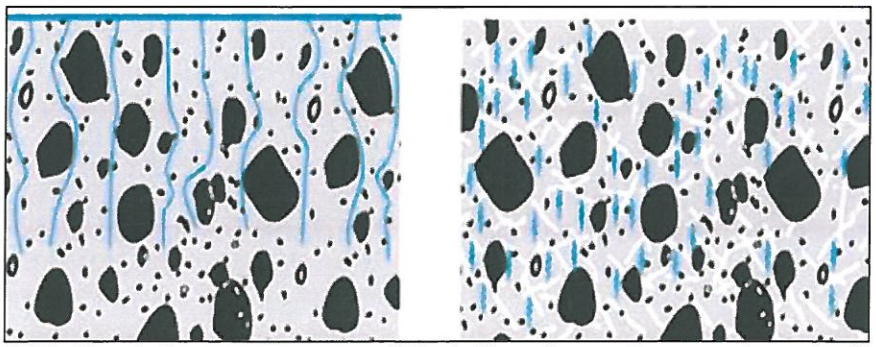


Figura 2.10 – Exsudação em concretos sem adição de fibras, à esquerda, e mecanismos das fibras de polipropileno no controle da exsudação, à direita (Fonte: FITESA – BOLETIM TÉCNICO Nº 3, 2002).

Portanto, as fibras de polipropileno realizam o reforço secundário de concretos e argamassas, de modo a controlar e reduzir a deformação plástica na sua retração, conferindo-lhes maiores resistências mecânicas e químicas e elevando a sua durabilidade e a sua qualidade. As fibras são introduzidas no processo da mistura do concreto e espalham-se homogeneamente por todo o volume, criando um reforço efetivo em todos os sentidos e direções.

Uma estrutura de concreto normal fissura, quando é sujeita a um valor limite de tensão, a partir do qual não suporta mais carga ou deformação adicional, subdividindo-se em partes. Quando se reforça o concreto com fibra, a estrutura fissura no mesmo valor de tensão, mas não se separa e pode suportar maiores deformações, quando sujeitada à carga de tensão efetivamente mais elevadas, conforme ilustra a figura 2.11. A energia absorvida pelo concreto reforçado com fibra corresponde à área sob a curva do gráfico tensão x deformação. Esse comportamento pode ser entendido como resposta pós-fissura do concreto reforçado com fibra.

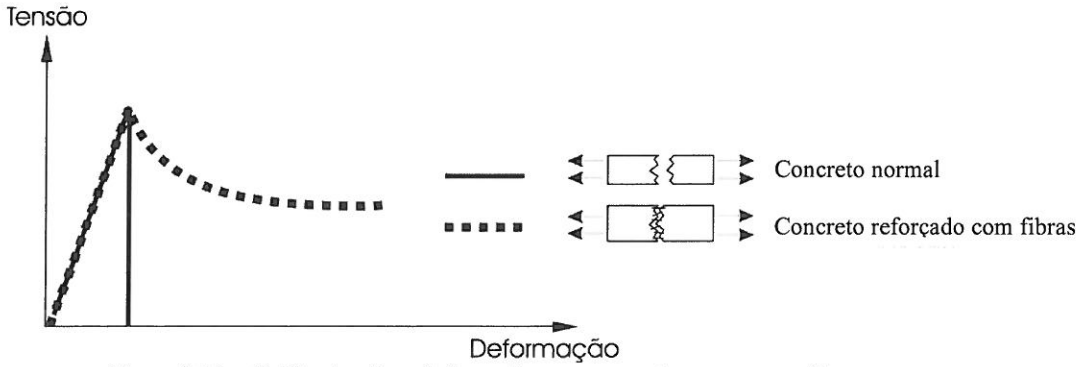


Figura 2.11 – Gráfico tensão x deformação para concretos com e sem fibras
(Fonte: SOTEXFIL SOCIEDADE TÊXTIL DE FIBRAS E FILAMENTOS LTDA.)

Existe vantagem real na adição de fibras de polipropileno ao concreto, pois elas constroem pontes sobre as fissuras, provocando sistemas de forças, que permitem que as deformações continuem com uma quantidade adicional de energia da fonte da carga. As fibras do reforço se alongam mais do que o concreto sob o carregamento. Consequentemente, o sistema composto do concreto reforçado com fibra supostamente trabalha como se fosse não reforçado até que alcance sua primeira força da ruptura elástica. É a partir desse ponto que a fibra de polipropileno assume o seu papel e mantém o concreto

unido. A capacidade de carga máxima é controlada pelas fibras que reforçam o composto. A tenacidade é baseada na energia total absorvida antes de ruptura total (SOTEXFIL, sem data).

Segundo Sales (2006), se o crescimento da fissura pode ser impedido de alguma maneira, então uma energia maior será requerida para fazê-la propagar-se. No modelo apresentado na figura 2.12.a, se o compósito está sob tensão, uma fissura pode surgir e começar a se propagar normalmente à superfície da interface matriz/fibra. Quando a fissura se aproxima da interface (figura 2.12.b), ela é momentaneamente impedida pela fibra. Se a interface é pouco resistente, o cisalhamento interfacial e a contração lateral da fibra e da matriz provocados pelo estado de tensão aplicado resultam em descolamento e deflexão da fissura, na direção normal à interface (figura 2.12.c). Um aumento da fissura na sua direção principal de crescimento ocorre após algum tempo (figura 2.12.d). Com o crescimento da tensão no compósito, o descolamento na interface continua (figura 2.12.e) e a ruptura da fibra pode ocorrer em algum ponto mais fraco, ao longo de seu comprimento. As extremidades inseridas na matriz são então arrancadas, encontrando como oposição à resistência friccional da interface e, finalmente, há a total separação.

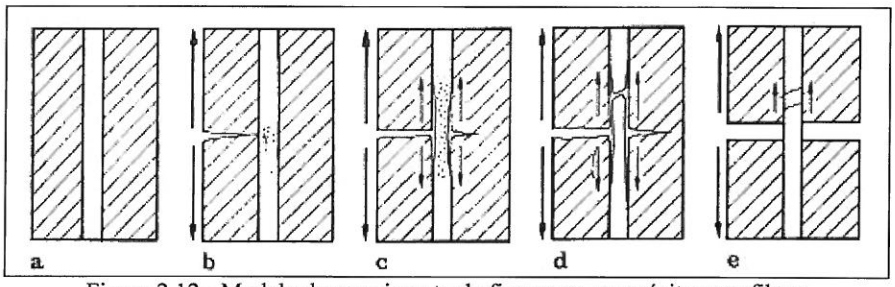


Figura 2.12 - Modelo de crescimento da fissura no compósito com fibras
(Fonte: CHAWLA, 1987)

A relação entre o volume de fibras e o de concreto também é muito importante. Dá-se o nome de volume crítico em um compósito ao teor de fibras necessárias para manter a mesma capacidade portante, a partir da ruptura da matriz. Sendo o volume de fibras abaixo do volume crítico, há a ocorrência necessária de uma perda de carga que o material tem capacidade de suportar. Quando o volume está acima do crítico, o compósito consegue suportar níveis crescentes de carregamento, mesmo após o surgimento da primeira fissura, conforme demonstra o gráfico da figura 2.13 (FIGUEIREDO, 2000).

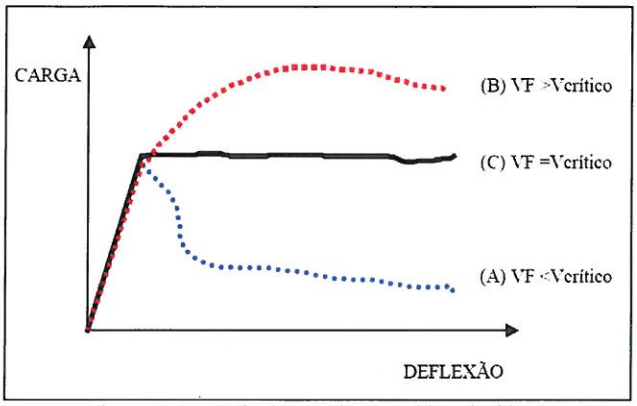


Figura 2.13 - Nível de volume crítico de fibras
(Fonte: FIGUEIREDO, 2000)

Experimentos têm comprovado que o aumento da fração volumétrica das fibras leva ao aumento da tenacidade. Isso se deve ao fato de que são as fibras os elementos promotores do impedimento ao crescimento abrupto das fissuras. A presença das fibras em maior escala garante que mais processos de interação com a matriz possam consumir energia, garantindo um maior montante de energia requerida. Entretanto, esse aumento da fração volumétrica tem um limite, que depende do tipo, da geometria e do arranjo das fibras, acima do qual há detrimento de outras características, como trabalhabilidade, homogeneidade e coesão entre fibra e matriz, que culminam por causar um decréscimo na resistência mecânica e, também, na tenacidade (SALES, 2006). As propriedades principais que influenciam a carga máxima e a tenacidade do concreto reforçado com fibra são baseadas no tipo de fibras usadas, no volume da fibra e na orientação das fibras na matriz. Os outros fatores que controlam o desempenho do material composto são as propriedades físicas do concreto e da matriz reforçada e a força da ligação entre fibras e matriz. As propriedades químicas da fibra, quanto a sua condição de ser inerte ou reativa com o meio ambiente, têm um papel importante em determinar as características da ligação entre fibra e a matriz (SOTEXFIL, sem data).

A aderência entre a fibra e a matriz é também prejudicada pela formação de uma zona de transição, que difere do restante da pasta, no entorno da fibra. A presença de inclusões na matriz ainda plástica cria o chamado "efeito parede", ou seja, a formação de um filme de água na interface, levando a uma maior porosidade e a uma maior concentração de portlandita e de etringita (SALES, 2006).

Quando as fibras de polipropileno são incorporadas ao concreto, a sua percentagem do volume deve ser mantida relativamente baixa para se manter a trabalhabilidade do concreto. Como as fibras de polipropileno são hidrofóbicas (não absorvem água) e não polares (boa resistência ao ataque químico), podem ser misturadas de forma a assegurar a dispersão uniforme na mistura com o concreto. As fibras de polipropileno podem ser adicionadas antes ou depois da adição de água, no processo de mistura. Aconselha-se que a mistura se desenvolva no mínimo durante um intervalo de tempo entre 5 e 10 minutos. A quantidade de fibras para aplicações em que se pretendem reforços moderados deve variar entre 0,6 kg e 2 kg por metro cúbico de concreto. Quando se pretendem reforços especialmente fortes para aplicação em estruturas de risco ou sujeitas a esforços mais elevados, devem ser utilizadas dosagens de 2 a 5 kg por metro cúbico de concreto.

O uso de fibras de polipropileno aumenta com sucesso a tenacidade do concreto. É dado adquirido que a capacidade de resistência de uma estrutura sob cargas de flexão é aumentada consideravelmente. O concreto reforçado com fibras de polipropileno, nas percentagens de volume que variam de 0,1 a 10%, revela excelentes comportamentos. O outro fator inerente principal que afeta as propriedades da fibra reforçada é a força adesão da fibra de polipropileno ao compósito com cimento. A eficácia da fibra como reforço do concreto depende da ligação entre a fibra e a matriz (SOTEXFIL, sem data).

O concreto reforçado com fibra começou encontrar seu lugar em muitas áreas de construção de estruturas, onde há necessidade de longa durabilidade. O concreto reforçado com fibras de polipropileno é usado também nas estruturas civis, onde a corrosão deve ser evitada no máximo. As fibras do polipropileno reduzem e aliviam as forças internas, obstruindo fissuras microscópicas que se possam desenvolver dentro do concreto.

O polipropileno tem um ponto de derretimento elevado (165°C) e é inerte. Essa sua qualidade de ser quimicamente inerte torna suas fibras resistentes aos ataques da maioria dos produtos químicos. O polipropileno tem uma superfície hidrofóbica que impede que seja molhado pela pasta do cimento. A natureza hidrofóbica da fibra de polipropileno não afeta as exigências da mistura da água no concreto. As fibras têm baixa combustibilidade e, por isso, o fogo deixa o concreto com uma porosidade adicional igual à percentagem do volume das fibras, o que lhe confere maiores dilatações antes de fissurar e explodir.

A aplicação de fibras de polipropileno não invalida que se mantenham as precauções e os procedimentos habituais, na aplicação do concreto, como (SOTEXFIL, sem data):

- todas as fases para a correta cura do concreto devem ser seguidas;
- deve ser efetuada a divisão de uma laje em partes, em função de sua espessura, quando necessária; e
- devem ser respeitadas as juntas de dilatação.

2.3.6. 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 PROGRAMA EXPERIMENTAL, MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, são apresentados o programa experimental, os materiais, a produção e a caracterização dos concretos e os métodos aplicados nesta pesquisa.

3.1 Programa Experimental

O programa experimental foi dividido em cinco etapas, conforme o fluxograma da figura 3.1.

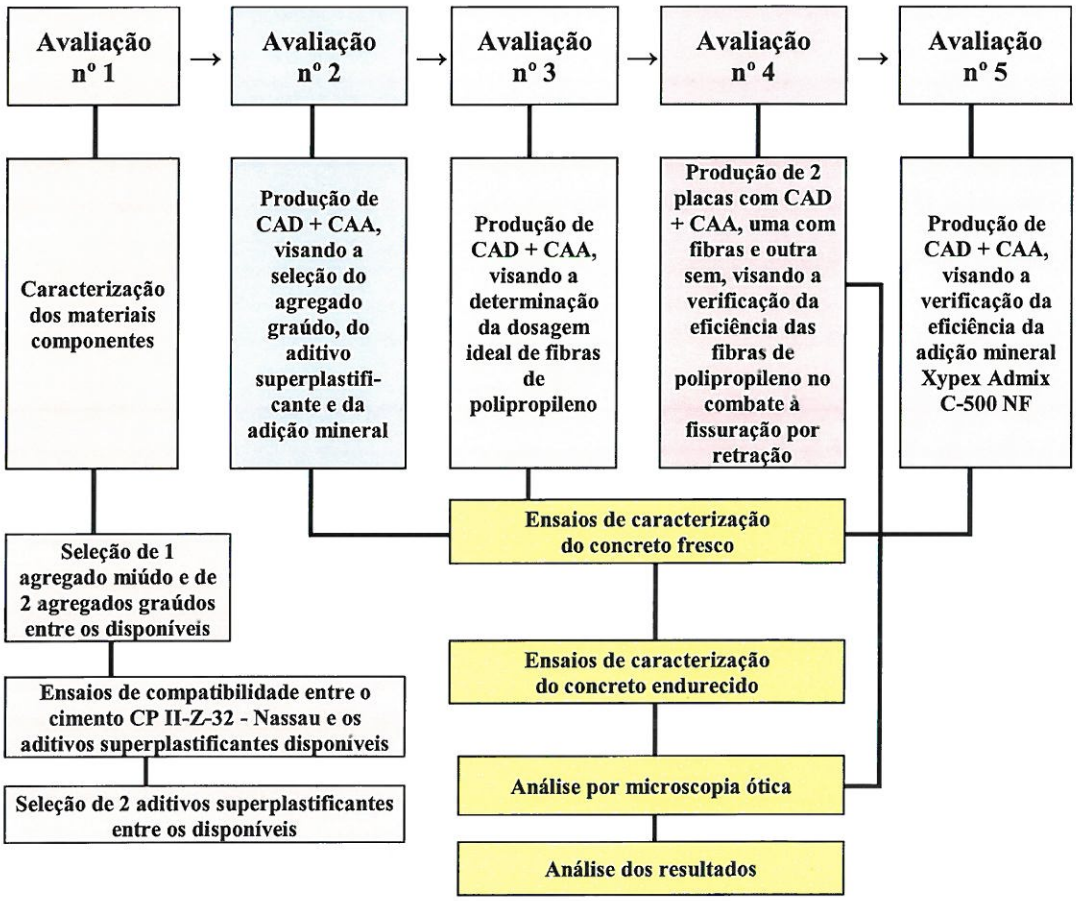


Figura 3.1 – Fluxograma das etapas da pesquisa

Para caracterização dos concretos frescos, foram realizados os ensaios de espalhamento e T_{500}, enquanto que, para caracterização dos concretos endurecidos, foram realizados os ensaios de determinação das resistências à compressão axial e à tração por compressão diametral e os de determinação dos módulos estáticos de elasticidade à compressão.

3.2 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. Resultados dos ensaios físicos, mecânicos e químicos realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A. com duas amostras desse cimento encontram-se no Apêndice. Apesar do cimento ensaiado ser de lote diferente do utilizado nesta pesquisa, os resultados apresentados no Apêndice são relevantes, uma vez que ambos são do mesmo tipo e procedência.

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.

Em alguns traços produzidos nesta pesquisa, foram empregadas fibras curtas de polipropileno Fibromac 12, com 18 μm de diâmetro, 12 mm de comprimento, massa específica de 0,91g/cm^3, área superficial específica de 244 m^2/kg e frequência de 360 milhões de fibras por kg, produzida pela Maccaferri do Brasil Ltda.. As fibras de polipropileno foram selecionadas para emprego nesta pesquisa por serem as fibras poliméricas de maior emprego em concretos. Foram empregadas com o objetivo único de reduzir a área de abertura de fissuras que ocorrem por retração do concreto nas primeiras horas de sua secagem.

Os demais materiais componentes foram variados entre as seguintes alternativas:

a) agregados miúdos e graúdos selecionados entre algumas opções disponíveis na região metropolitana de Manaus, sendo identificados segundo sua origem;
b) aditivos superplastificantes, todos à base de policarboxilatos, selecionados entre quatro opções; e
c) adições minerais selecionadas entre três opções, todas a base de sílica ativa.

Para o agregado miúdo, foram adotadas as seguintes opções:

- areia da empresa Prestativa, do rio Manacapuru, Manacapuru - AM;
- areia da jazida Hidracal, BR-174 - AM;

- areia da jazida Geonorte, Manacapuru - AM;
- areia da fazenda Rio do Peixe, BR-174 - AM;
- areia da jazida Francisco R. Chagas Moura, Barcelos - AM; e
- areia da empresa Prestativa, do rio Negro, Novo Airão – AM.

Para o agregado graúdo, foram adotadas as seguintes opções:

- brita da empresa Britamazon/Capital, região de Moura, Barcelos - AM; e
- brita da empresa Ita Mineração, região de Moura, Barcelos - AM;
- brita da jazida Arco-Íris, região de Moura, Barcelos – AM;
- brita da empresa Mineradora Figueiredo, BR-174, Km 152,5, Presidente Figueiredo – AM;
- brita da jazida Boa Vista, BR-174, Km 15, Boa Vista – RR;
- brita da jazida Fidens, PA-254, Km 22, Monte Alegre – PA;
- brita da jazida Pedra Norte, BR-174, Km 600, Mucajaí – RR;
- brita do britador do 6º BEC, BR-174, Km 500, Caracaraí – RR;
- brita da empresa Amazônia Mineração (EBAM), BR-174, Km 134, Presidente Figueiredo – AM;
- brita da jazida Monte Alegre, BR-254, Km 12, Monte Alegre – PA;
- seixo de Japurá, Japurá- AM;
- seixo de Iriporanã - AM; e
- seixo de Arapuanã – AM.

Para a seleção dos melhores agregados miúdos e graúdos, entre as opções acima mencionadas, foi dada preferência aos potencialmente inócuos, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, tomando como referência os resultados de ensaios realizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A para identificação e seleção de agregados provenientes de diversas jazidas, nas proximidades de Manaus.

Os estudos realizados por essa empresa tiveram como objetivo a seleção dos melhores materiais disponíveis nas proximidades de Manaus para emprego na construção da ponte sobre o rio Negro, que interliga a capital do estado do Amazonas ao município de Iranduba. Esses agregados também estão dentro dos limites impostos pelas normas da ABNT para teor de material pulverulento, teor de argila em torrões e materiais friáveis e impurezas

orgânicas. Suas composições granulométricas são também adequadas para obtenção de concretos autoadensáveis e de alto desempenho.

Para o agregado miúdo, visando a obtenção de CAA e CAD, foi dada atenção especial ao teor de impurezas orgânicas e ao módulo de finura, pois as areias, oriundas do estado do Amazonas, geralmente, apresentam elevado teor de impurezas orgânicas e baixo módulo de finura.

Foram os seguintes os ensaios realizados com agregados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., durante e execução da obra de construção da ponte Manaus-Iranduba, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto:

a) análise petrográfica;
b) determinação da reatividade álcali-agregado pelo método acelerado; e
c) determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado.

No Apêndice, são apresentados os resultados de alguns ensaios que foram realizados com amostras de agregados provenientes de diversas jazidas existentes nas proximidades de Manaus. Pelos resultados apresentados nesse Apêndice, é possível perceber que há a ocorrência de agregados miúdos e graúdos potencialmente reativos na presença de álcalis do concreto, na região metropolitana de Manaus.

Apesar dos agregados ensaiados serem de lotes diferentes do utilizado nesta pesquisa, os resultados apresentados no Apêndice são relevantes, uma vez que, os agregados pré-selecionados para esta pesquisa, são provenientes de jazidas investigadas pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A..

Maiores detalhes sobre a seleção dos agregados miúdos e graúdos encontram-se no item 4.1, Resultados e Discussões da Avaliação nº 1, no Capítulo 4.

Entre as opções disponíveis para o agregado miúdo, apenas areia da empresa Prestativa, do rio Manacapuru, no município de Manacapuru – AM, foi selecionada para uso nesta pesquisa, conforme resultados obtidos na avaliação nº 1.

Entre as opções disponíveis para o agregado graúdo, foram selecionadas para uso nesta pesquisa as britas da empresa Britamazon/Capital e da empresa Ita Mineração, ambas da região de Moura, no município de Barcelos - AM, conforme resultados obtidos na avaliação nº 1.

Para o aditivo superplastificante, foram adotadas inicialmente as seguintes opções:

- Sika ViscoCrete 3535 CB, produzido pela Sika S.A., com sede na Av. Dr. Alberto Jackson Byington, nº 1.525, Vila Menck, Osasco, São Paulo,
- MC-PowerFlow 1102, produzido pela MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., com sede na Rua Henry Martin, nº 235, Tijuco Preto, Vargem Grande Paulista, São Paulo;
- MC-PowerFlow 1159, também produzido pela MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.; e
- MC-PowerFlow 1160, também produzido pela MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda..

Entre os quatro aditivos superplastificante disponíveis para esta pesquisa, apenas o Sika ViscoCrete 3535 CB e o MC-PowerFlow 1102 foram selecionados, conforme resultados obtidos na avaliação nº 1 desta pesquisa. A única exceção ocorreu em um único traço, entre todos os demais produzidos, onde foi empregado o MC-PowerFlow 1159. As fichas técnicas das quatro opções de aditivos superplastificantes acima mencionadas encontram-se no Apêndice. Os ensaios e os seus respectivos resultados para determinação das dosagens ótimas desses aditivos superplastificantes também são apresentados no Apêndice.

Nesta pesquisa, foram empregadas todas as três opções de adição mineral, a seguir relacionadas:

- Silmix, sílica ativa em pó, produzida pela Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda.;
- Centrilit Fume S, sílica ativa em suspensão, produzida pela MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.; e

- Xypex Admix C-500 NF, que é uma mistura de cimento Portland, sílica e diversas substâncias químicas ativas em pó, produzido pela MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda..

As fichas técnicas das três adições minerais empregadas nesta pesquisa também se encontram no Apêndice. Na avaliação final para seleção da melhor adição mineral entre as três opções utilizadas, após o término da etapa denominada avaliação nº 5, foram levados em consideração os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial, tração por compressão diametral e módulo estático de elasticidade à compressão, assim como a distância de transporte de cada produto até a cidade de Manaus.

Maiores detalhes sobre a seleção dos aditivos superplastificante e das adições minerais encontram-se no item 4.1, Resultados e Discussões da Avaliação nº 1, no Capítulo 4.

3.3 Produção dos Concretos

Para produção dos concretos com emprego das adições minerais Silmix e Centrilit Fume S, foi utilizado o traço adotado por Mendes (2002) na produção de CAD, com o consumo de cimento 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).

As quantidades dos materiais componentes empregados nestes concretos foram:

a) 486 kg/m³ de cimento;
b) 42 kg/m³ de adição;
c) 722 kg/m³ de areia;
d) 1.052 kg/m³ de brita; e
e) 137 kg/m³ de água.

Adotar o traço empregado por Mendes (2002) na produção de CAD com granito da região metropolitana de Curitiba neste trabalho teve como objetivo possibilitar a comparação e a avaliação dos resultados de ambas as pesquisas. Por esse motivo, a dosagem da adição mineral foi pré-definida em 8,6% do peso do cimento, ou seja, 42 kg/m³ de concreto.

A introdução de fibras orgânicas ou poliméricas dentro qualquer mistura de concreto é normalmente executada de forma manual. As dosagens típicas para estes tipos de fibras são da ordem de 0,6 a 1,5 kg/m³ de concreto. Este material é acondicionado em bolsas hidrossolúveis que são lançadas diretamente na mistura. A embalagem, apresentada na figura 3.2, pode ser dissolvida pela água contida na massa. Para que a embalagem seja distribuída uniformemente na massa, deve-se misturar por alguns minutos.

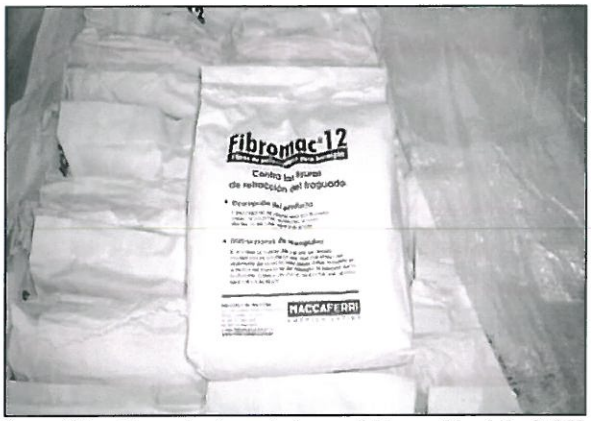


Figura 3.2 - Formato da embalagem hidrossolúvel de 0,6 Kg
(Fonte: MANUAL TÉCNICO DA MACCAFERRI DO BRASIL LTDA., sem data)

As dosagens de fibra de polipropileno ensaiadas foram 0,25, 0,40, 0,60 e 1,00 kg por metro cúbico de concreto. Como referência, alguns traços foram produzidos sem a adição de fibras. Os traços produzidos nas avaliações 2, 3 e 4 desta pesquisa foram denominados, em função das diferentes dosagens de fibra de polipropileno adotadas, da seguinte forma: T-1 (0,40 kg/m³), T-2 (sem fibra), T-3 (0,25 kg/m³), T-4 (0,60 kg/m³) e T-5 (1,00 kg/m³).

Foram também levados em consideração os seguintes fatos de conhecimento notório:

a) os compósitos reforçados com fibras ainda não possuem métodos de ensaio normatizados de aceitação no mundo todo;
b) as fibras melhoram a durabilidade do concreto, em decorrência da diminuição da fissuração por retração plástica e autógena, mas incorporam maior quantidade de vazios, podendo reduzir sua resistência à compressão; e
c) as fibras sintéticas possuem grande superfície específica, o que pode ser prejudicial à trabalhabilidade do concreto (TANESI e FIGUEIREDO, 1999).

Para avaliar a influência da fibra de polipropileno na redução da fissuração, foram confeccionadas duas placas de concreto com 1,00 m x 1,00 m x 0,05 m, adicionando-se fibra de polipropileno no concreto de uma delas e utilizando, na outra, concreto produzido com o mesmo traço e nas mesmas condições de cura, mas sem adição de fibras. Foram, então, mensuradas as fissuras de ambas, na mesma idade, para obtenção de comparações e conclusões.

Como a ficha técnica do Xypex Admix C-500 NF recomenda uma dosagem de 1,0 a 1,5% do peso do cimento, para a avaliação nº 5, o traço utilizado como referência para esta pesquisa precisou ser adequado. Foram mantidas, entretanto, as proporções dos materiais componentes mais próximas possíveis do traço original. Esse traço passou a ser 1,000 (cimento) : 0,015 (Xypex Admix C-500 NF) : 1,406 (areia) : 2,055 (brita) : 0,300 (água). Dessa forma, na avaliação nº 5, os consumos dos materiais componentes por metro cúbico de concreto passaram a ser os seguintes:

a) cimento: 510 kg/m³;
b) Xypex Admix C-500 NF: 7,6 kg/m³;
c) areia: 717 kg/m³;
d) brita: 1.048 kg/m³; e
e) água: 153 kg/m³.

Os pontos de saturação dos aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB, MC-PowerFlow 1159, MC-PowerFlow 1160 e MC-PowerFlow 1102 foram verificados com a relação sp/c em 0,90%, 0,92%, 0,92% e 1,40% e com a relação p/c em 2,57%, 3,07%, 3,07% e 4,67%, respectivamente. Os dois aditivos selecionados para esta pesquisa foram o Sika ViscoCrete 3535 CB e o MC-PowerFlow 1102, conforme Apêndice. Conforme já comentado no tópico sobre materiais, a única exceção ocorreu em um único traço, entre todos os demais produzidos, onde foi empregado o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159. Maiores detalhes sobre as dosagens dos aditivos SP podem ser encontrados no item 4.1, Resultados e Discussões da Avaliação nº 1, no Capítulo 4.

A tabela 3.1 apresenta os pesos dos materiais componentes dos concretos das avaliações de números 2, 3 e 4, em quilogramas por metro cúbico de concreto, quando utilizada a adição sílica ativa em pó Silmix. As quantidades exatas de água de amassamento

a serem adicionadas nesses concretos, considerando as deduções das partes líquidas dos diferentes aditivos SP empregados, encontram-se na tabela 3.4.

Tabela 3.1 - Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos das avaliações 2, 3 e 4 com Silmix

Cimento	Adição	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água Total	Fibra
486	42	722	1.052	137	variável

As tabelas 3.2 e 3.3 apresentam os pesos dos materiais componentes dos concretos das avaliações de números 2, 3 e 4 em quilogramas por metro cúbico de concreto, quando utilizada a adição sílica ativa em suspensão Centrilit Fume S. Considerando que apenas 50% desse produto é sólido, há necessidade de calcular a quantidade de água existente na suspensão para dedução na água de amassamento. Sendo assim, a quantidade de água a ser adicionada nesses concretos, considerando a dedução das parte líquida da adição mineral em suspensão Centrilit Fume S, encontra-se na tabela 3.3, enquanto as quantidades de água de amassamento, considerando as deduções das partes líquidas dos diferentes aditivos superplastificantes empregados, encontram-se na tabela 3.5.

Tabela 3.2 - Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos das avaliações 2, 3 e 4 com Centrilit Fume S

Cimento	Traço	Parte Sólida da Adição	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água Total	Fibra
486	T-2	42	722	1.052	137	variável

Tabela 3.3 - Pesos em kg/m³ da adição mineral e da dedução na quantidade de água de amassamento, nas avaliações 2, 3 e 4 com Centrilit Fume S

Peso Total da Adição	Parte Sólida da Adição	Parte Líquida da Adição	Água Total	Água Adicionada ao Concreto Deduzindo a Parte Líquida da Adição
84	42	42	137	95

Os traços de concreto das avaliações de números 2, 3 e 4 foram produzidos com teores dos aditivos superplastificantes selecionados nos seus pontos de saturação, que foram determinados na avaliação nº 1 desta pesquisa. Os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102 foram empregados com a relação sp/c em 0,90% e 1,40% e com a relação p/c em 2,57% e 4,67%, respectivamente. Como a parte sólida desses aditivos é de 35% e 30% do seu peso total, respectivamente, seus consumos puderam ser determinados para a quantidade de 486 kg de cimento Portland, conforme tabelas 3.4 e 3.5. O aditivo MC-PowerFlow 1159, que também possui 30% de parte sólida, foi empregado apenas em um único traço da avaliação nº 3 (T-2E), com sp/c de 0,92% e p/c de 3,07%, conforme Apêndice.

Tabela 3.4 - Teores e quantidades dos aditivos SP das avaliações 2, 3 e 4 com Silmix

Aditivo Químico	sp/c (%)	p/c (%)	Teor de Sólidos no Aditivo (%)	Peso de Superplastificante (kg por m³ de concreto)			Água Adicionada ao Concreto
				Parte Sólida	Parte Líquida	Total	
Sika ViscoCrete 3535 CB	0,90	2,57	35,00	4,37	8,13	12,49	128,87
MC-PowerFlow 1102	1,40	4,67	30,00	6,80	15,89	22,69	121,11
MC-PowerFlow 1159 (*)	0,92	3,07	30,00	4,48	10,44	14,92	126,56

(*) O aditivo MC-PowerFlow 1159 foi empregado apenas em um único traço da avaliação nº 3 (T-2E)

Tabela 3.5 - Teores e quantidades dos aditivos SP das avaliações 2, 3 e 4 com Centrilit Fume S

Aditivo Químico	sp/c (%)	p/c (%)	Teor de Sólidos no Aditivo (%)	Peso de Superplastificante (kg por m³ de concreto)			Água Adicionada ao Concreto
				Parte Sólida	Parte Líquida	Total	
Sika ViscoCrete 3535 CB	0,90	2,57	35,00	4,37	8,13	12,49	86,87
MC-PowerFlow 1102	1,40	4,67	30,00	6,80	15,89	22,69	79,11
MC-PowerFlow 1159	0,92	3,07	30,00	4,48	10,44	14,92	84,56

As misturas dos concretos desta pesquisa foram realizadas em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 120 litros. Antes de iniciar os processos de mistura, o interior da betoneira era molhado, a fim de evitar qualquer perda de água de amassamento, com o cuidado do excesso ser eliminado. Após a conclusão de cada processo de mistura e antes de iniciar o próximo, o interior da betoneira era lavado para evitar a contaminação por restos de componentes utilizados no processo anterior. A área de produção de concretos da Universidade Federal do Amazonas – UFAM é apresentada nas fotografias das figuras 3.3 e 3.4.





Figuras 3.3 e 3.4 – Área de produção de concretos da Universidade Federal do Amazonas – UFAM

A ordem de colocação dos materiais na betoneira em movimento foi mantida constante para todas as misturas das avaliações de números 2, 3 e 4 e seguiu a seguinte sequência:

a) 100% de brita;

b) 100% da fibra (quando houver);
c) mistura por 2 minutos (se houver adição de fibra);
d) 20% da água;
e) 100% do cimento e 100% da sílica ativa (previamente misturados);
f) 70% da água e 80% do aditivo (previamente misturados);
g) mistura por 2 minutos;
h) 100% da areia;
i) mistura por 2 minutos;
j) parada por 2 minutos;
k) 10% restantes da água e 20% do aditivo (previamente misturados); e
l) mistura por 2 minutos.

No caso dos traços da avaliação nº 5, onde o Xypex Admix C-500 NF foi adotado como adição mineral, atenção especial foi dada para se obter uma mistura homogênea desse produto dentro do concreto. Para garantir a obtenção dessa homogeneidade e uma boa dispersão, deve-se evitar adicionar o produto diretamente ao concreto fresco.

Há três maneiras de realizar a mistura do Xypex Admix C-500 NF, a seguir, relacionadas:

a) operação de dosagem a seco;
b) operação de dosagem úmida; e
c) operação realizada na obra.

Na operação de dosagem a seco, o Xypex Admix C-500 NF deve ser lançado na betoneira juntamente com parte do agregado e parte da água. Em seguida, deve-se misturar por 3 minutos para assegurar que o Xypex Admix C-500 NF esteja bem distribuído dentro da água de amassamento. A seguir, deve-se adicionar o restante do material e continuar a mistura de acordo com a prática padrão.

Na operação de dosagem úmida, deve-se misturar o Xypex Admix C-500 NF com a água de amassamento para formar uma pasta bem fluida e carregar a betoneira. A seguir, o agregado, o cimento e a água devem ser dosados e misturados de acordo as práticas padrões, levando em conta a quantidade de água já colocada dentro do caminhão. Após a

dosagem, deve-se misturar o concreto por, pelo menos, 5 minutos para assegurar uma distribuição homogênea do Xypex Admix C-500 NF.

Na operação realizada na obra, deve-se adicionar o Xypex Admix C-500 NF à brita e à areia e misturar por 3 minutos, antes de adicionar o cimento e a água. O processo de mistura deve ser feito de acordo com as práticas padrões.

Na avaliação nº 5, a ordem de colocação dos materiais na betoneira em movimento adotada nesta pesquisa foi mantida constante para todas as misturas e seguiu a seguinte sequência:

a) 100% de brita;
b) 100% do Xypex Admix C-500 NF;
c) mistura por 2 minutos;
d) 20% da água;
e) mistura por 5 minutos;
f) 100% da fibra (quando houver);
g) mistura por 2 minutos (se houver adição de fibra);
h) 100% do cimento;
i) mistura por 2 minutos;
j) 70% da água e 80% do aditivo (previamente misturados);
k) mistura por 2 minutos;
l) 100% da areia;
m) mistura por 2 minutos;
n) parada por 2 minutos;
o) 10% restantes da água e 20% do aditivo (previamente misturados); e
p) mistura por 2 minutos.

Na avaliação nº 5, foram produzidos os traços MC1102-A a MC1102-M e SIKA3535-A a SIKA3535-H com variadas dosagens de aditivos superplastificantes.

As tabelas 3.6 e 3.7 apresentam os pesos dos materiais componentes em quilogramas por metro cúbico de concreto dos traços MC1102-A, MC1102-B, MC1102-C, MC1102-D, MC1102-E, MC1102-F, MC1102-G, MC1102-H, MC1102-I, MC1102-J e MC1102-L.

Esses traços foram produzidos com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 em dosagens variadas e com 0,40 kg de fibras de polipropileno por metro cúbico de concreto.

Tabela 3.6 - Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos dos traços MC1102-A a MC1102-L com Xypex Admix C-500 NF

Traços	Cimento	Adição	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água Total	Fibra
MC1102-A a MC1102-L	510	7,65	717	1.048	153	0,40

Tabela 3.7 - Teores e quantidades dos aditivos SP empregados nos traços MC1102-A a MC1102-L

Traço	Aditivo Químico	sp/c (%)	p/c (%)	Teor de Sólidos no Aditivo (%)	Peso de Superplastificante (kg por m³ de concreto)			Água Adicionada ao Concreto
					Parte Sólida	Parte Líquida	Total	
MC1102-A	MC-1102	0,80	2,67	30,00	4,09	9,53	13,62	143,47
MC1102-B	MC-1102	0,80	2,67	30,00	4,09	9,53	13,62	143,47
MC1102-C	MC-1102	0,90	3,00	30,00	4,59	10,71	15,30	142,29
MC1102-D	MC-1102	1,00	3,33	30,00	5,09	11,89	16,98	141,11
MC1102-E	MC-1102	1,08	3,60	30,00	5,51	12,85	18,36	140,15
MC1102-F	MC-1102	1,20	4,00	30,00	6,12	14,28	20,40	138,72
MC1102-G	MC-1102	1,40	4,67	30,00	7,15	16,67	23,82	136,33
MC1102-H	MC-1102	1,40	4,67	30,00	7,15	16,67	23,82	136,33
MC1102-I	MC-1102	1,50	5,00	30,00	7,65	17,85	25,50	135,15
MC1102-J	MC-1102	1,50	5,00	30,00	7,65	17,85	25,50	135,15
MC1102-L	MC-1102	1,50	5,00	30,00	7,65	17,85	25,50	135,15

Como todos os concretos MC1102 possuem o mesmo traço, variando apenas a dosagem do aditivo SP, pode-se afirmar que, em relação aos ensaios realizados com o concreto endurecido, todos esses concretos são repetições de um mesmo traço, uma vez que as variações das dosagens do aditivo superplastificante alteram apenas as características do concreto no estado fresco (teoricamente, não alteram as características do concreto no estado endurecido).

No traço MC1102-M, foi empregado o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, mas não foram adicionados fibras de polipropileno. Para possibilitar comparação com a sílica ativa Silmix, cuja dosagem adotada foi de 8,6% em todos os traços nos quais foi empregada, o traço MC1102-M foi adequado para um consumo de 8% de Xypex Admix C-500 NF, mesmo estando esse valor muito acima da dosagem recomendada pelo fabricante.

No traço MC1102-M, foi empregado o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, na dosagem de 4,67% do peso de cimento por metro cúbico de concreto. As tabelas

3.8 e 3.9 apresentam os pesos dos materiais componentes em quilogramas por metro cúbico de concreto empregados na confecção do traço MC1102-M.

Tabela 3.8 - Pesos em kg/m³ dos materiais do concreto do traço MC1102-M com Xypex Admix C-500 NF

Traço	Cimento	Adição	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água Total	Fibra
MC1102-M	483	39	719	1.052	145	0,00

Tabela 3.9 - Teores e quantidades do aditivo SP empregado no traço MC1102-M

Aditivo Químico	sp/c (%)	p/c (%)	Teor de Sólidos no Aditivo (%)	Peso de Superplastificante (kg por m³ de concreto)			Água Adicionada ao Concreto
				Parte Sólida	Parte Líquida	Total	
MC-PowerFlow 1102	1,40	4,67	30,00	6,77	15,79	22,56	129,21

As tabelas 3.10 e 3.11 apresentam os pesos dos materiais componentes em quilogramas por metro cúbico de concreto empregados na confecção dos traços SIKA3535-A, SIKA3535-B, SIKA3535-C, SIKA3535-D, SIKA3535-E, SIKA3535-F, SIKA3535-G e SIKA3535-H. Esses traços foram produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB em dosagens variadas e com 0,40 kg de fibras de polipropileno por metro cúbico de concreto.

Tabela 3.10 - Pesos em kg/m³ dos materiais dos concretos dos traços SIKA3535-A a SIKA3535-H com Xypex Admix C-500 NF

Traços	Cimento	Adição	Agregado Miúdo	Agregado Graúdo	Água Total	Fibra
SIKA3535-A a SIKA3535-H	510	7,65	717	1.048	153	0,40

Tabela 3.11 - Teores e quantidades dos aditivos SP empregados nos traços SIKA3535-A a SIKA3535-H

Traço	Aditivo Químico	sp/c (%)	p/c (%)	Teor de Sólidos no Aditivo (%)	Peso de Superplastificante (kg por m³ de concreto)			Água Adicionada ao Concreto
					Parte Sólida	Parte Líquida	Total	
SIKA3535-A	SIKA3535	0,80	2,29	35,00	4,09	9,54	11,68	143,46
SIKA3535-B	SIKA3535	0,90	2,57	35,00	3,93	9,18	13,11	143,82
SIKA3535-C	SIKA3535	0,90	2,57	35,00	3,93	9,18	13,11	143,82
SIKA3535-D	SIKA3535	0,90	2,57	35,00	3,93	9,18	13,11	143,82
SIKA3535-E	SIKA3535	0,94	2,69	35,00	4,80	8,92	13,72	144,08
SIKA3535-F	SIKA3535	1,00	2,86	35,00	5,11	9,48	14,59	143,52
SIKA3535-G	SIKA3535	1,20	3,43	35,00	6,12	11,37	17,49	141,63
SIKA3535-H	SIKA3535	1,50	4,29	35,00	7,66	14,22	21,88	138,78

Todos os concretos SIKA3535 são repetições de um mesmo traço, em relação aos ensaios realizados com o concreto endurecido, uma vez que as variações das dosagens do aditivo superplastificante alteram apenas as características do concreto no estado fresco (teoricamente, não alteram as características do concreto no estado endurecido).

3.3.1 Traços Produzidos na Avaliação nº 2

3.3.1.1 Traços T-1

Os traços T-1 foram produzidos com as seguintes proporções em peso:

1,000 (cimento) : 0,086 (adição) : 1,486 (areia) : 2,165 (brita) : 0,282 (água).

Nos traços T-1, foram adicionados 0,40 kg de fibras de polipropileno por metro cúbico de concreto. Foram confeccionados sete versões para os traços T-1, que são T-1A, T-1B, T-1C, T-1D, T-1E, T-1F e T-1G. Para confecção desses traços, foram selecionados os materiais componentes apresentados na tabela 3.12. Os concretos T-1A, T-1B e T-1C são repetições de um mesmo traço.

Tabela 3.12 - Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços T-1

Discriminação dos Materiais	**Consumos (kg/m³ de concreto)**				
	T-1A = T-1B = T-1C	**T-1D**	**T-1E**	**T-1F**	**T-1G**
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	486	486	486	486	486
Adição mineral: Silmix	42	42	42		
Adição mineral: Centrilit Fume S (*)				ps=42	ps=42
Areia: Rio Manacapuru	722	722	722	722	722
Brita: Britamazon/Capital	1.052			1.052	1.052
Brita: Ita Mineração		1.052	1.052		
Fibra de polipropileno: Fibromac 12	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Água (**)	a=137	a=137	a=137	a=137	a=137
Aditivo SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (***)	p=12,49	p=12,49		p=12,49	
Aditivo SP: MC-PowerFlow 1102 (***)			p=22,69		p=22,69

(*) **ps** = peso da parte sólida
(**) **a** = peso total, sem deduções das partes líquidas dos SP e da adição em suspensão, quando empregada
(***) **p** = peso total do SP (partes sólida e líquida)

No que diz respeito aos ensaios realizados com o concreto endurecido, o traço T-1E é uma repetição do traço T-1D, uma vez que a única diferença entre ambos é o tipo de aditivo superplastificante e sua dosagem. O traço T-1G também é uma repetição do traço T-1F, em relação às suas características no estado endurecido, pelo mesmo motivo.

3.3.2 Traços Produzidos na Avaliação nº 3

3.3.2.1 Traços T-2

Os traços T-2 foram produzidos com as seguintes proporções em peso:

1,000 (cimento) : 0,086 (adição) : 1,486 (areia) : 2,165 (brita) : 0,282 (água).

Os traços T-2 foram produzidos sem adição de fibras de polipropileno. Foram confeccionados seis versões para os traços T-2, que são: T-2A, T-2B, T-2C, T-2D, T-2E e T-2F. Para confecção desses traços, foram selecionados os materiais componentes apresentados na tabela 3.13. Os concretos T-2A, T-2B e T-2C são repetições de um mesmo traço.

Tabela 3.13 - Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços T-2

Discriminação dos Materiais Empregados	Consumos (kg/m³ de concreto)			
	T-2A = T-2B = T-2C	T-2D	T-2E	T-2F
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	486	486	486	486
Adição mineral: Silmix	42			
Adição mineral: Centrilit Fume S (*)		ps=42	ps=42	ps=42
Areia: Rio Manacapuru	722	722	722	722
Brita: Britamazon/Capital	1.052	1.052	1.052	1.052
Água (**)	a=137	a=137	a=137	a=137
Aditivo SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (***)	p=12,49	p=12,49		
Aditivo SP: MC-PowerFlow 1159 (***)			p=14,92	
Aditivo SP: MC-PowerFlow 1102 (***)				p=22,69

(*) **ps** = peso da parte sólida
(**) **a** = peso total, sem deduções das partes líquidas dos SP e da adição em suspensão, quando empregada
(***) **p** = peso total do SP (partes sólida e líquida)

No que diz respeito aos ensaios realizados com o concreto endurecido, os concretos T-2E, T-2D e T-2F são repetições de um mesmo traço, uma vez que a única diferença entre eles é o tipo de aditivo superplastificante e sua dosagem.

3.3.2.2 Traços T-3, T-4, T-5A e T-5B

Os traços T-3, T-4, T-5A e T-5B foram produzidos com as seguintes proporções:
1,000 (cimento) : 0,086 (adição) : 1,486 (areia) : 2,165 (brita) : 0,282 (água).

Nos traços T-3, T-4, T-5A e T-5B foram adicionados 0,25, 0,60, 1,00 e 1,00 kg de fibras de polipropileno por metro cúbico de concreto, respectivamente.

Para confecção dos traços T-3, T-4, T-5A e T-5B, foram selecionados os materiais componentes apresentados na tabela 3.14.

Tabela 3.14 - Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços T-3, T-4, T-5A e T-5B

Discriminação dos Materiais Empregados	Consumos (kg/m³ de concreto)			
	T-3	T-4	T-5A	T-5B
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	486	486	486	486
Adição mineral: Silmix		ps=42	ps=42	
Adição mineral: Centrilit Fume S (*)	ps=42			ps=42
Areia: Rio Manacapuru	722	722	722	722
Brita: Britamazon/Capital	1.052	1.052	1.052	1.052
Fibra de polipropileno: Fibromac 12	0,25	0,60	1,00	1,00
Água (**)	a=137	a=137	a=137	a=137
Aditivo SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (***)	p=12,49	p=12,49	p=12,49	p=12,49

(*) **ps** = peso da parte sólida
(**) **a** = peso total, sem deduções das partes líquidas dos SP e da adição em suspensão, quando empregada
(***) **p** = peso total do SP (partes sólida e líquida)

3.3.3 Traços Produzidos na Avaliação nº 4

3.3.3.1 Traços PCF e PSF

Os traços PCF e PSF foram produzidos com as seguintes proporções em peso:

1,000 (cimento) : 0,086 (adição) : 1,486 (areia) : 2,165 (brita) : 0,282 (água).

No traço PCF, foram adicionados 0,40 kg de fibras de polipropileno por metro cúbico de concreto. O traço PSF foi produzido sem adição de fibras de polipropileno. Para confecção dos traços PCF e PSF, foram selecionados os materiais componentes apresentados na tabela 3.15.

Tabela 3.15 - Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços PCF (T-1C) e PSF (T-2C)

Discriminação dos Materiais Empregados	Consumos (kg/m³ de concreto)	
	PCF (= T-1C)	PSF (= T-2C)
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	486	486
Adição mineral: Silmix	42	42
Adição mineral: Centrilit Fume S (*)		
Areia: Rio Manacapuru	722	722
Brita: Britamazon/Capital	1.052	1.052
Fibra de polipropileno: Fibromac 12	0,40	
Água (**)	a=137	a=137
Aditivo SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (***)	p=12,49	p=12,49

(*) **ps** = peso da parte sólida
(**) **a** = peso total, sem deduções das partes líquidas dos SP e da adição em suspensão, quando empregada
(***) **p** = peso total do SP (partes sólida e líquida)

3.3.4 Traços Produzidos na Avaliação nº 5

3.3.4.1 Traços MC1102-A a MC1102-M e SIKA3535-A a SIKA3535-H

Os traços MC1102-A a MC1102-L e SIKA3535-A a SIKA3535-H foram produzidos com as seguintes proporções em peso: 1,000 (cimento) : 0,015 (adição) : 1,406 (areia) : 2,055 (brita) : 0,300 (água).

O traço MC1102-M foi produzido com as seguintes proporções em peso:
1,000 (cimento) : 0,08 (adição) : 1,489 (areia) : 2,177 (brita) : 0,300 (água).

Para confecção dos traços MC1102-A a MC1102-M e SIKA3535-A a SIKA3535-H, foram selecionados os materiais componentes apresentados nas tabelas 3.16 e 3.17.

Tabela 3.16 - Quadro-resumo das quantidades de materiais componentes dos traços MC1102-A a MC1102-M e SIKA3535-A a SIKA3535-H

Discriminação dos Materiais Empregados	**Consumos**		
	MC1102-A a L	**MC1102-M**	**SIKA3535-A a H**
Cimento: CP II-Z-32 – Nassau	**510 kg/m³**	**483 kg/m³**	**510 kg/m³**
Adição mineral: Xypex Admix C-500 NF	**7,65 kg/m³**	**39 kg/m³**	**7,65 kg/m³**
Areia: Rio Manacapuru	**717 kg/m³**	**719 kg/m³**	**717 kg/m³**
Brita: Britamazon/Capital	**1.048 kg/m³**	**1.052 kg/m³**	**1.048 kg/m³**
Fibra de polipropileno: Fibromac 12	**0,40 kg/m³**	**-**	**0,40 kg/m³**
Água (**)	**153 kg/m³**	**129,21 kg/m³**	**153 kg/m³**
Aditivo SP: MC-PowerFlow 1102 (*) (***)	**p/c variando de 2,67% a 5,00%**	**p/c = 4,67% p = 22,56 kg/m³**	**p/c variando de 2,29% a 4,29%**

(*) **p/c (%)** = relação entre a massa do total do aditivo SP (parte líquida + parte sólida) e a massa do cimento
(**) **a** = peso total, sem deduções das partes líquidas dos SP e da adição em suspensão, quando empregada
(***) **p** = peso total do SP (partes sólida e líquida)

Tabela 3.17 - Teores e quantidades dos aditivos SP empregados nos traços MC1102-A a MC1102-L e SIKA3535-A a SIKA3535-H

Aditivo SP	**Consumos**										
	Traços MC1102-A a MC1102-L										
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**	**I**	**J**	**L**
MC PowerFlow 1102	**p/c = 2,67%**	**p/c = 2,67%**	**p/c = 3,00%**	**p/c = 3,33%**	**p/c = 3,60%**	**p/c = 4,00%**	**p/c = 4,67%**	**p/c = 4,67%**	**p/c = 5,00%**	**p/c = 5,00%**	**p/c = 5,00%**
	p = 13,62	**p = 13,62**	**p = 15,30**	**p = 16,98**	**p = 18,36**	**p = 20,40**	**p = 23,82**	**p = 23,82**	**p = 25,50**	**p = 25,50**	**p = 25,50**
	Traços SIKA3535-A a SIKA3535-H										
	A	**B**	**C**	**D**	**E**	**F**	**G**	**H**			
Sika ViscoCrete 3535 CB	**p/c = 2,29%**	**p/c = 2,57%**	**p/c = 2,57%**	**p/c = 2,57%**	**p/c = 2,69%**	**p/c = 2,86%**	**p/c = 3,43%**	**p/c = 4,29%**			
	p = 11,68	**p = 13,11**	**p = 13,11**	**p = 13,11**	**p = 13,72**	**p = 14,59**	**p = 17,49**	**p = 21,88**			

(*) **p/c (%)** = relação entre a massa do total do aditivo SP (parte líquida + parte sólida) e a massa do cimento
(***) **p (kg/m³ de concreto)** = peso total do SP (partes sólida e líquida)

3.4 Confecção das Placas e Procedimento de Coleta dos Resultados da Avaliação nº 4

3.4.1 Confecção das Placas

O concreto empregado nas placas seguiu os mesmos procedimentos dos demais concretos. As placas foram moldadas sem adensamento de qualquer espécie, conforme fotografias das figuras 3.5 a 3.8. Logo em seguida ao lançamento do concreto nas formas de 1 metro x 1 metro, a regularização da espessura de 4,5 cm foi realizada com utilização de colher de pedreiro.

A cura em ambas as placas foi realizada em ambiente aberto sob condições climáticas de sol e chuva, sem nenhuma condição especial. As placas foram confeccionadas uma ao lado da outra, para que ambas passassem pela mesmas variações de temperatura e umidade.




Figuras 3.5 e 3.6 – Formas e placa produzida com o traço PSF



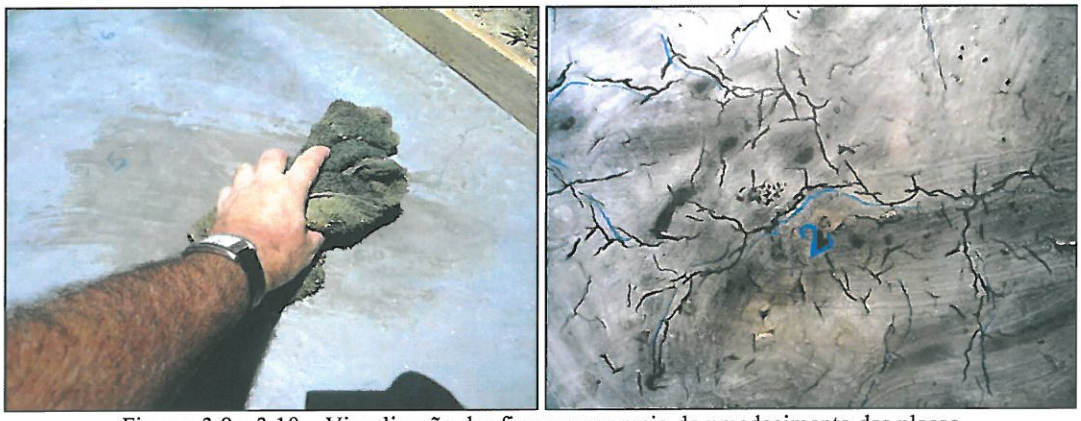

Figuras 3.7 e 3.8 – Placas de concreto com e sem fibra de polipropileno

3.4.2 Procedimento de Coleta dos Resultados

A medição das fissuras em ambas as placas seguiu o mesmo procedimento. A medição das fissuras era realizada em toda a área de ambas as placas. Foram realizadas medições com régua e fissurômetro, diariamente, durante 90 dias.

Como todas as fissuras apresentaram abertura de no máximo 0,1 mm e, portanto, quase invisíveis numa inspeção visual, para facilitar sua visualização, fotografia e mensuração, foi adotado o seguinte procedimento, conforme ilustração das figuras 3.9 e 3.10:

a) molhar superficialmente as placas de concreto com um pano umedecido;
b) aguardar, por um período de poucos minutos, pela evaporação da água existente na superfície das placas;
c) realizar medidas com fissurômetro, somente enquanto a água existente no interior das fissuras ainda não tiver evaporado, permitindo assim sua melhor visualização;
d) encerrar as medidas e as observações, antes da completa evaporação da água existente no interior das fissuras; e
e) repetir o processo, caso não tenha havido tempo suficiente para realização de todas as medidas, uma vez que, quando secas, as fissuras tornam-se quase imperceptíveis numa inspeção visual.



Figuras 3.9 e 3.10 – Visualização das fissuras por meio do umedecimento das placas

3.5 Caracterização dos Concretos

3.5.1 Caracterização do Concretos Frescos

As amostragens de concreto fresco foram realizadas segundo as determinações da NBR NM 33:1998. Os ensaios do espalhamento ou *slump flow* (SF) e do tempo de escoamento T_{500} (VS) foram realizados pelo método do cone de *Abrams*, segundo a parte 2 da NBR 15823-2:2010. A classificação, o controle e a aceitação no estado fresco do CAA, quanto ao resultado desses ensaios, seguiram os requisitos estabelecidos pela parte 1 dessa mesma norma. 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.

3.5.1.1 Ensaio de *Slump Flow* (SF)

O valor do espalhamento, medido por meio do ensaio *slump flow*, avalia o grau de fluidez e escoamento da mistura de CAA fresco, por meio do diâmetro de espalhamento da amostra deformada sob o efeito do seu próprio peso. A média de duas medidas perpendiculares do concreto espraiado resulta no valor do parâmetro de extensão final do fluxo. Esse ensaio fornece indicações da habilidade do CAA para preenchimento das fôrmas em fluxo livre (BARROS, 2009).

Os principais equipamentos utilizados nesse ensaio são o cone de *Abrams*, ilustrado na figura 3.11, e uma placa de aço quadrada, com no mínimo 900 mm de lado, que deve servir de base e possuir três demarcações circulares centradas, com diâmetros de 100 mm, 200 mm e 500 mm, para facilitar a centralização do cone e permitir as medições.

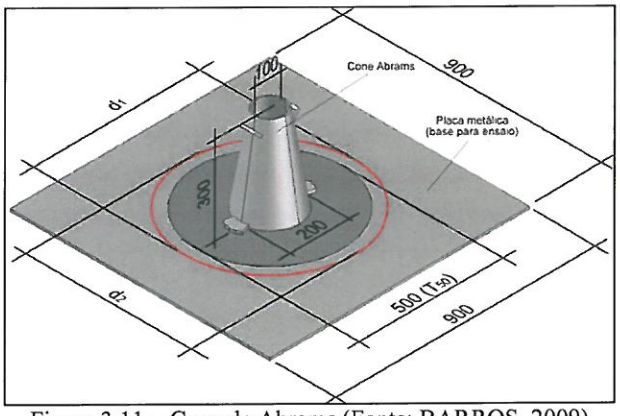


Figura 3.11 – Cone de Abrams (Fonte: BARROS, 2009)

3.5.1.2 Ensaio T_{500} (VS)

O valor da velocidade do espalhamento, que pode ser medido aproveitando o ensaio de *slump flow*, avalia o grau de viscosidade plástica aparente da mistura de CAA fresco. A viscosidade do concreto é uma propriedade relacionada à sua consistência no estado fresco e influencia a resistência deste ao escoamento. Quanto maior a viscosidade do concreto, maior sua resistência ao escoamento. Na prática, o CAA com baixa viscosidade apresenta um rápido escoamento. Já o CAA com alta viscosidade se movimenta de forma mais lenta (ALENCAR et al., 2010).

Os equipamentos utilizados são os mesmos do ensaio de *slump flow* (figura 3.11). O círculo com 500 mm de diâmetro na chapa de base facilita a medição do tempo que o concreto leva para atingir esse diâmetro.

3.5.2 Caracterização do Concretos Endurecidos

Os ensaios com os concretos endurecidos foram realizados segundo as normas apresentadas na tabela 3.18.

Tabela 3.18 – 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

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

a) resistências à compressão axial (MPa), nas idades de 3, 7, 28 e 90 dias;
b) resistências à tração por compressão diametral (MPa), na idade de 28 dias; e
c) módulos estáticos de elasticidade à compressão (GPa), na idade de 28 e/ou 90 dias.

A NBR 12655:2006 determina tomar o maior dos valores de resistência à compressão axial, quando são rompidos mais de dois corpos de prova de uma mesma amassada, moldados conforme a NBR 5738:2003. A prensa hidráulica da empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda., onde foram realizados os ensaios de caracterização dos concretos no estado endurecido, é apresentada nas fotografias das figuras 3.12 e 3.13.




Figuras 3.12 e 3.13 - Prensa hidráulica da empresa Konkrex Engenharia de Concreto Ltda., onde foram realizados os ensaios de caracterização dos concretos no estado endurecido

Microfotografias, em idades variadas, foram realizadas, com o microscópio ótico *Motic Images Plus 2.0 ML* (apresentado na figura 3.14), da superfície interna de corpos de prova seccionados de todos os concretos produzidos, comparando as produzidas com diferentes concretos, na mesma idade.



Figuras 3.14 - Microscópio ótico *Motic Images Plus 2.0 ML*

3.6 Métodos

Esta pesquisa pode ser classificada, quanto ao método, como bibliográfica, por ser elaborada com base em pesquisas já publicadas; quanto à finalidade, como experimental, por ser derivada de experiências práticas com vistas à produção de novos compósitos; e, quanto aos seus objetivos, como explicativa, por ter o propósito de identificar fatores que contribuem para a ocorrência de fenômenos (GIL, 2010).

A seguir, são descritos os ensaios e procedimentos aplicados na presente pesquisa.

3.6.1 Métodos de Ensaios dos Agregados

Os métodos dos ensaios realizados na avaliação nº 1 desta pesquisa para caracterização dos agregados miúdos e graúdos encontram-se nas tabelas 3.19 e 3.20, respectivamente.

Tabela 3.19 - 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 3.20 - 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

3.6.2 Métodos de Ensaios das Adições Minerais

São apresentados, a seguir, os métodos dos ensaios realizados com as três opções de adição mineral disponíveis para esta pesquisa.

As massas específicas das adições minerais foram determinadas segundo a NBR NM-23:2001 - Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da massa específica.

As atividades pozolânicas das adições minerais foram determinadas pelo método Chapelle modificado (NBR 15895, 2010). Para aplicação desse método de verificação da atividade pozolânica, as seguintes diretrizes foram adotadas:

> *NBR 15895:2010 - Materiais pozolânicos – Determinação do teor de hidróxido de cálcio fixado – Método Chapelle modificado e publicação M. Raverdy, F. Brivot, A. M. Paillere, R. Dron, "Appréciation de l'activité pouzzolanique dês constituants secondaires" - 7e. Congrès International de la Chimie des Ciments, Paris - 1980, Vol. III, IV-36/41 (CT-OBRAS-LMCC-Q-PE-041).*
>
> *O método consiste em manter sob agitação à 90 ± 5°C, durante 16 horas, uma mistura de 1g de material "pozolânico" com 2 g de óxido de cálcio em 250 ml de água. O resultado é expresso pela quantidade de hidróxido de cálcio consumido ou fixado por grama de material "pozolânico".*

Os ensaios para determinação da superfície específica das adições minerais pelo método de Blaine foram realizados segundo a NBR NM 76:1998.

Para determinação da atividade pozolânica pelo método Chapelle modificado da sílica ativa em suspensão, o resíduo de secagem dessa adição mineral foi obtido segundo a NBR 13957:1997 - Sílica ativa para uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland - Métodos de ensaio.

3.6.3 Métodos de Ensaios dos Aditivos Superplastificantes

Os ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro foram utilizados para determinar o ponto de saturação dos aditivos superplastificantes e para avaliar sua compatibilidade com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus. O ponto de saturação indicou para cada superplastificante a dosagem ótima, a partir da qual não se verificam ganhos relevantes de fluidez.

O funil de Marsh é ilustrado na figura 3.15.

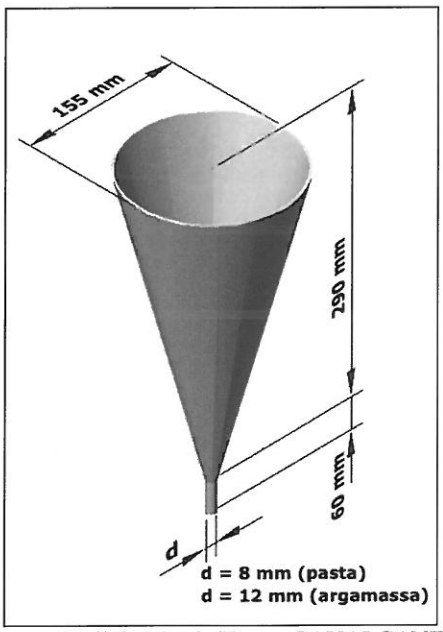


Figura 3.15 – Funil de Marsh (Fonte: CAVALCANTI, 2006)

O ensaio do miniabatimento de Kantro requer um molde tronco-cônico, conforme mostra a figura 3.16.

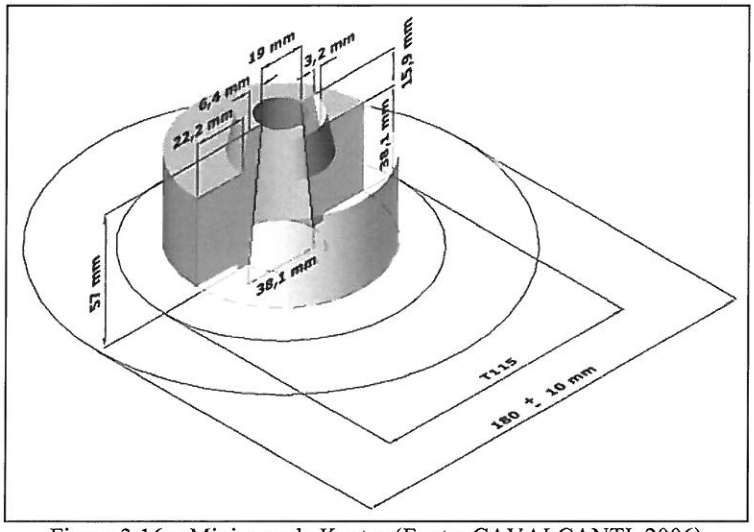


Figura 3.16 – Minicone de Kantro (Fonte: CAVALCANTI, 2006)

A fluidez e a viscosidade das pastas produzidas com diferentes dosagens de cada um dos aditivos superplastificantes disponíveis 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.

Os resultados de fluidez e viscosidade obtidos com as pastas 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.

Os gráficos traçados com os resultados dos ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro realizados com pastas, na avaliação nº 1, puderam assim ser comparados com os traçados com os resultados dos ensaios de *slump flow* e do tempo de escoamento (T_{500}) realizados com os concretos da avaliação nº 5, permitindo análises e conclusões sobre a correlação entre a fluidez e a viscosidade de pastas e concretos frescos.

3.6.3.1 Métodos de Preparo e Ensaio das Pastas

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 de todas as pastas, foi utilizado um mesmo misturador planetário, 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 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 ilustrações das figuras 3.17 e 3.18. A quantidade de água presente no superplastificante foi devidamente tida em consideração no cálculo da composição das pastas.




Figuras 3.17 e 3.18 – Misturador planetário e preparo das pastas

Após a mistura, as pastas passaram pela peneira ABNT 2,4 mm, 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, antes da realização dos ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro, conforme mostram as figuras 3.19 e 3.20.




Figuras 3.19 e 3.20 – Peneiramento das pastas e descanso por 60 minutos

O ensaio, ilustrado pelas figuras 3.21 e 3.22, 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.



Figuras 3.21 e 3.22 – Ensaio do funil de Marsh

As pastas foram preparadas com apenas os seguintes materiais componentes: cimento, aditivo superplastificante e água. A quantidade de cimento foi prefixada em 2.581 g e a de água em 726,25 ml, mantendo-se, dessa forma, constante a relação água/cimento em 0,282. Para a dosagem do aditivo superplastificante, foram adotados valores variados.

Após a realização do ensaio do funil de Marsh, as pastas foram submetidas ao ensaio do miniabatimento de Kantro. Esse ensaio requer um molde tronco-cônico, conforme já mencionado. Após o completo enchimento do minicone com a pasta a ensaiar, retira-se o molde e mede-se o espalhamento da pasta 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, conforme figura 3.23, 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, uma vez

que não foi empregada nenhuma adição mineral na confecção das pastas. Essa adaptação consistiu em relacionar o espalhamento de cada pasta com o tempo, registrando o espraiamento 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, consequentemente, as melhores.



Figura 3.23 – Ensaio do miniabatimento

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 Kantro versus as mesmas relações foram utilizados para definir os pontos de saturação de cada um dos aditivos superplastificantes ensaiados.

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 de cada um dos aditivos superplastificantes ensaiados.

Foram, então, selecionados os aditivos superplastificantes que, entre as quatro opções disponíveis, produziram, nos seus respectivos pontos de saturação, pastas com maiores resultados de fluidez e viscosidade. Na produção dos concretos, foram utilizados somente esses melhores aditivos superplastificantes, empregando-os nas suas respectivas dosagens ótimas, ou seja, nas relações aditivo/cimento de seus respectivos pontos de saturação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados e Discussões da Avaliação nº 1

4.1.1 Seleção do Agregado Miúdo

Por meio de análise dos resultados dos ensaios realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., apresentados no Apêndice, foram pré-selecionados para este trabalho três agregados miúdos: dois potencialmente inócuos, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, e um potencialmente reativo, segundo os critérios estabelecidos pela NBR 15577-4:2009. Amostras dos três agregados miúdos selecionados foram caracterizadas fisicamente. Os resultados dos ensaios de caracterização são a seguir apresentados.

4.1.1.1 Amostras 1AM, 2AM e 3AM

A amostra 1AM de areia, proveniente do rio Manacapuru, no município de Manacapuru, foi fornecida pela empresa Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda.. A amostra 2AM de areia, proveniente do rio Negro, no município de Novo Airão, foi fornecida pela mesma empresa, enquanto a amostra 3AM, também de areia, proveniente da jazida Francisco R. Chagas Moura, no município de Barcelos, foi fornecida por um depósito de materiais de construção na cidade de Manaus.

Os resultados dos ensaios de caracterização física das amostras 1AM, 2AM e 3AM são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Ensaios de caracterização física das amostras 1AM, 2AM e 3AM

Ensaio	Unidade	Resultados 1AM	Resultados 2AM	Resultados 3AM	Limites da norma
Massa específica	(kg/dm³)	2,626	2,632	2,626	-
Massa unitária	(kg:dm³)	1,618	1,597	1,557	-
Teor de material pulverulento	(%)	0,180	0,190	0,600	3,00 e 5,00
Impurezas orgânicas	(ppm)	aprox. 300	> 300	> 300	300
Módulo de finura	-	2,272	2,095	1,997	-
Diâmetro máximo	(mm)	2,400	2,400	1,200	-
Teor de argila em torrões e materiais friáveis	(%)	0,690	0,700	0,600	1,50

As composições granulométricas das amostras 1AM, 2AM e 3AM são apresentadas na tabela 4.2, e suas curvas granulométricas, na figura 4.1.

Tabela 4.2 - Composição granulométrica das amostras 1AM, 2AM e 3AM

Abertura Peneira (mm)	Amostra 1AM			Amostra 2AM			Amostra 3AM		
	Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)
76,2	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
50,8	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
38,1	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
25,4	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
19,1	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
12,5	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
9,5	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
6,3	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
4,8	0,0	0,00	0,00	1,4	0,14	0,14	0,0	0,00	0,00
2,4	9,3	0,93	0,93	13,0	1,30	1,44	2,1	0,21	0,21
1,2	101,1	10,11	11,04	62,5	6,25	7,69	23,6	2,36	2,57
0,6	274,8	27,48	38,52	245,4	24,54	32,23	279,9	27,99	30,56
0,3	394,6	39,46	77,98	381,2	38,12	70,35	414,5	41,45	72,01
0,15	207,0	20,70	98,68	273,0	27,30	97,65	223,6	22,36	94,37
0,075	13,2	1,32	100,00	23,5	2,35	100,00	56,3	5,63	100,00
Total	1000,0	100,00	-	1000,0	100,00	-	1000,0	100,00	-

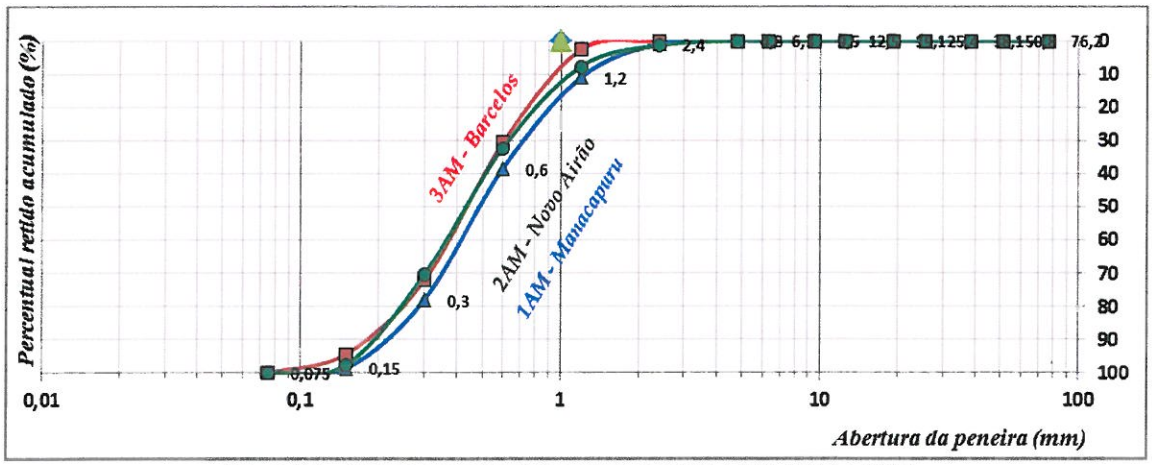


Figura 4.1 - Curvas granulométricas das amostras 1AM, 2AM e 3AM

4.1.1.2 Análise dos Resultados e Seleção do Agregado Miúdo

Do ponto de vista dos teores de material pulverulento e de argila em torrões e materiais friáveis, as três amostras se assemelharam.

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 da amostra nº

1AM apresentou intensidade de cor muito próxima à da solução padrão, indicando que o teor de impurezas orgânicas é limítrofe, em relação à referida norma, conforme fotografia da figura 4.2.

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 da amostra nº 1AM apresentou intensidade de cor próxima dos limites determinados da referida norma. O mesmo não ocorreu com as amostras de números 2AM e 3AM, conforme figura 4.2.

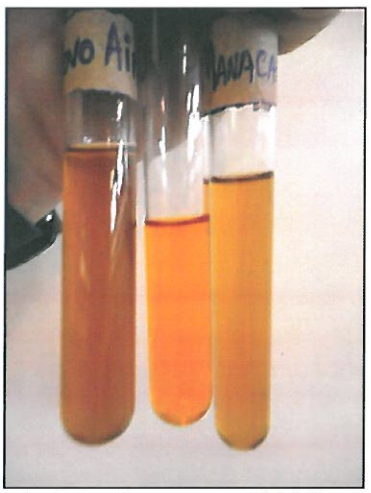


Figura 4.2 - Ensaio colorimétrico das amostras 2AM, à esquerda, e 1AM, à direita

Entretanto, 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), o teor de impurezas orgânicas das areias comercializadas em Manaus normalmente não está de acordo com o limite imposto pela NBR NM 49:2001, mas são usadas indiscriminadamente sem a realização do ensaio da qualidade da areia. As areias oriundas de jazidas naturais do estado do Amazonas sofrem forte influência de material orgânico, composto por raízes, caules e folhas, em função de se encontrarem aos arredores ou no meio de florestas. Ainda segundo Perdiz (2009), as areias oriundas de leitos de rio também sofrem a influência do material orgânico proveniente da floresta alagada, em função do sistema anual de vazante e cheia dos rios.

Entre as três amostras de agregados miúdos selecionadas para caracterização por esta pesquisa, a que apresentou maior módulo de finura foi a amostra nº 1AM, proveniente do rio Manacapuru, no município de Manacapuru, com valor aproximado de 2,3, e, mesmo assim, bem abaixo do intervalo entre 2,7 e 3,0, recomendado por Aïtcin (2000) para obtenção de concretos com alta resistência. As amostras de números 2AM e 3AM obtiveram 2,1 e 2,0 para seus módulos de finura, respectivamente. Entretanto, observa-se que o módulo de finura obtido é favorável à produção do CAA, conforme comentários apresentados na revisão da literatura sobre o agregado miúdo.

A areia natural proveniente do rio Iguaçu empregada por Mendes (2002) em sua pesquisa possuía módulo de finura no valor de 2,75, estando portanto dentro do intervalo recomendado por Aïtcin (2000) para obtenção de CAD. Nesta pesquisa, o módulo de finura da amostra composta por areia proveniente do rio Manacapuru aproxima-se mais do valor recomendado para obtenção do CAA (< 2,10) do que do valor recomendado para obtenção do CAD (2,70 a 3,00).

Por meio de análise dos resultados dos ensaios realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., apresentados no Apêndice, a areia proveniente do Rio Manacapuru teve preferência para emprego nos concretos desta pesquisa.

A amostra 3AM é proveniente de uma jazida que, conforme resultados dos ensaios apresentados no Apêndice, possui areia potencialmente reativa, segundo os critérios estabelecidos pela NBR 15577-4:2009. Apesar das amostras 1AM e 2AM serem provenientes de jazidas que apresentaram areais potencialmente inócuas, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, conforme ensaios realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A. (Apêndice), a areia do Rio Manacapuru (amostra 1AM) teve preferência para emprego nos concretos desta pesquisa, por apresentar resultados mais baixos de expansão, em relação aos demais obtidos, de acordo com a NBR 15577-4:2009, com utilização do cimento CP V-ARI, e com a NBR 15577-5:2008, quando combinada com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, conforme demonstrado no Apêndice.

Sendo assim, a escolha do agregado miúdo da amostra nº 1AM foi confirmada para emprego nesta pesquisa, também pelos seguintes motivos:

a) a análise petrográfica, realizada pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A. com a amostra 120.568, composta por areia proveniente do rio Manacapuru, levou a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto, conforme resultados apresentados no Apêndice;

b) o ensaio para determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, com utilização do cimento CP V-ARI, comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado, e de acordo com a NBR 15577-4:2009, apresentou, para a amostra nº 125.640 (composta por areia proveniente do rio Manacapuru), valores de expansão de 0,02%, aos 28 dias de cura, em solução alcalina, sendo os resultados mais baixos de expansão, em relação a todas as demais amostras analisadas por esse tipo de ensaio, conforme Apêndice;

c) o ensaio para determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado, quando combinada com o cimento mitigador da reação álcali-agregado CP II-Z-32 – Nassau e de acordo com a NBR 15577-5:2008, apresentou, para ambas as amostras nº 120.568 e nº 125.640 (compostas por areia proveniente do rio Manacapuru), valores iguais de expansão de 0,03%, aos 14 dias de cura, em solução alcalina, sendo os resultados mais baixos de expansão, em relação a todas as demais amostras analisadas por esse tipo de ensaio, conforme Apêndice;

d) o ensaio para determinação do teor de impurezas orgânicas, realizado com a amostra composta por areia proveniente do rio Manacapuru, apontou o valor próximo de 300 ppm, enquanto as demais amostras apresentaram valores superiores a esse limite, que é tido como o máximo aceitável pela norma NBR NM 49:2001; e

e) a amostra composta por areia proveniente do rio Manacapuru apresentou o valor mais elevado para o módulo de finura (2,27), em relação aos obtidos pelas demais amostras, e, apesar de fora do intervalo recomendado por Aïtcin (2000) para produção de concretos com alta resistência, essa amostra possui o módulo de finura que mais se aproxima desse intervalo recomendado (2,70 a 3,00).

4.1.2 Seleção do Agregado Graúdo

Por meio de análise dos resultados dos ensaios realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., apresentados no Apêndice, foram pré-selecionados para este trabalho três agregados graúdos: dois potencialmente inócuos, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, e um potencialmente reativo, segundo os critérios estabelecidos pela NBR 15577-4:2009. Amostras dos três agregados graúdos selecionados foram caracterizadas fisicamente. Os resultados dos ensaios de caracterização são a seguir apresentados.

4.1.2.1 Amostras 1AG, 2AG e 3AG

As amostras 1AG e 2AG de agregado graúdo são compostas por britas provenientes da região de Moura, no município de Barcelos. A primeira foi fornecida pelas empresas Britamazon/Capital, enquanto a segundo, pela empresa Ita Mineração. Esses agregados são transportados até Manaus em balsas. O tempo do deslocamento fluvial é de dois dias, pelo rio Negro. A amostra nº 3AG de agregado graúdo, composta por seixos provenientes do município de Japurá, foi fornecida pela empresa Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda..

Os resultados dos ensaios de caracterização física das amostras 1AG, 2AG e 3AG são apresentados na tabela 4.3.

Tabela 4.3 - Ensaios de caracterização física das amostras 1AG, 2AG e 3AG

Ensaio	Unidade	Resultados 1AG	Resultados 2AG	Resultados 3AG	Limites da norma
Massa específica	(kg/dm³)	2,674	2,667	2,618	-
Massa unitária	(kg/dm³)	1,523	1,519	1,564	-
Absorção de água	(%)	0,39	0,40	0,32	-
Módulo de finura	-	7,171	6,913	6,356	-
Diâmetro máximo	(mm)	25,00	19,00	19,00	-

As composições granulométricas das amostras 1AG, 2AG e 3AG são apresentadas na tabela 4.4, e suas curvas granulométricas, na figura 4.3.

Tabela 4.4 - Composição granulométrica das amostras 1AG, 2AG e 3AG

Abertura Peneira (mm)	Amostra 1AG			Amostra 2AG			Amostra 3AG		
	Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)	Peso Retido (g)	Percentual Retido (%)	Percentual Retido Acumulado (%)
76,2	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
50,8	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
38,1	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
25,4	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
19,1	961,1	19,22	19,22	231,5	4,63	4,63	150,9	3,02	3,02
12,5	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00	0,0	0,00	0,00
9,5	3962,3	79,25	98,47	4295,0	85,90	90,53	2971,2	59,42	62,44
6,3	0,0	0,00	98,47	0,0	0,00	90,53	0,0	0,00	62,44
4,8	70,8	1,42	99,88	435,0	8,70	99,23	1111,6	22,23	84,67
2,4	0,0	0,00	99,88	5,8	0,12	99,35	447,7	8,95	93,63
1,2	0,5	0,01	99,89	0,3	0,01	99,35	132,6	2,65	96,28
0,6	0,2	0,00	99,90	0,0	0,00	99,35	58,8	1,18	97,46
0,3	0,3	0,01	99,90	0,0	0,00	99,35	57,2	1,14	98,60
0,15	1,4	0,03	99,93	7,1	0,14	99,49	44,4	0,89	99,49
0,075	3,4	0,07	100,00	25,3	0,51	100,00	25,6	0,51	100,00
Total	5000,0	100,00	-	1000,0	100,00	-	1000,0	100,00	-

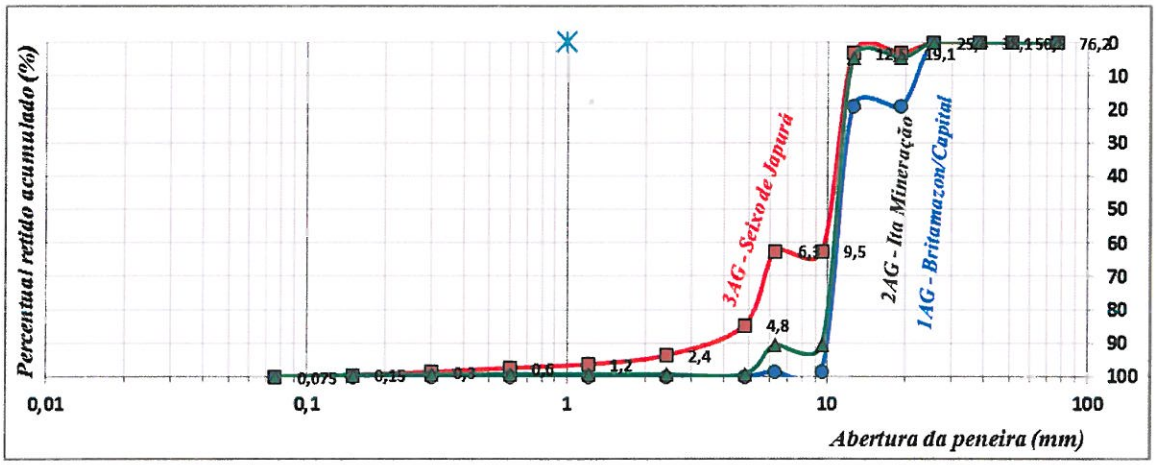


Figura 4.3 - Curvas granulométricas das amostras 1AG, 2AG e 3AG

4.1.2.2 Análise dos Resultados e Seleção do Agregado Graúdo

Entre as três amostras de agregados graúdos selecionadas para caracterização por esta pesquisa, as amostras 1AG e 2AG foram confirmadas para emprego nos concretos produzidos nesta pesquisa, pelos seguintes motivos:

a) a análise petrográfica, realizada pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A. com as amostras nº 127.353 e nº 127.356, compostas por rocha da região de Moura, levaram a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a

sua reatividade frente aos álcalis do concreto, conforme resultados apresentados no Apêndice;

b) o ensaio para determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, com utilização do cimento comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado CP V-ARI e de acordo com a NBR 15577-4:2009, apresentou, para ambas as amostras nº 127.353 e nº 127.356 (compostas por rocha da região de Moura), valores iguais de expansão de 0,08%, aos 28 dias de cura, em solução alcalina, sendo os resultados mais baixos de expansão, em relação às demais amostras analisadas por esse tipo de ensaio, conforme Apêndice; e

c) o ensaio para determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado, quando combinada com o cimento mitigador da reação álcali-agregado CP II-Z-32 – Nassau e de acordo com a NBR 15577-5:2008, apresentou, para ambas as amostras nº 127.353 e nº 127.356 (compostas por rocha da região de Moura), valores iguais de expansão de 0,04%, aos 14 dias de cura, em solução alcalina, sendo os resultados mais baixos de expansão, em relação às demais amostras analisadas por esse tipo de ensaio, conforme Apêndice.

Portanto, os agregados graúdos das amostras 1AG e 2AG, provenientes da região de Moura, no município de Barcelos, no estado do Amazonas, fornecidos pelas empresas Britamazon/Capital e Ita Mineração, respectivamente, tiveram preferência para emprego nos concretos desta pesquisa, por apresentarem baixos resultados de expansão nos ensaios realizados de acordo com a NBR 15577-4:2009, com utilização do cimento CP V-ARI, e com a NBR 15577-5:2008, quando combinada com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, conforme demonstrado no Apêndice, assim como suas jazidas localizam-se mais próximas da região metropolitana de Manaus, do que a maioria das demais jazidas relacionadas no item 3.2 Materiais. Portanto, além das amostras oriundas das mesmas jazidas das amostras 1AG e 2AG terem obtido resultados de expansão com valores idênticos e, ainda, dentro dos limites para serem consideradas inócuas, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, suas jazidas localizam-se na mesma região (Moura), no município de Barcelos, ou seja, possuem a mesma distância de transporte até a cidade de Manaus.

Observou-se, ainda, que o ensaio para determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, com utilização do cimento CP V-ARI, comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado, e de acordo com a NBR 15577-4:2009, conforme resultados apresentados no Apêndice, apresentou, para as amostras nº 112.617, nº112.618 e nº 112.619 (compostas por seixo das regiões de Japurá, Iriporanã e Arapuanã, respectivamente), valores de expansão de 0,50%, 0,32% e 0,65%, respectivamente, aos 28 dias de cura, em solução alcalina, indicando que os agregados dessas amostras são potencialmente reativos, uma vez que os valores de expansão obtidos nessa idade superam o limite de 0,19%. Por esse motivo, resolveu-se não empregar, nos concretos produzidos, agregados da amostra 3AG, composta por seixos provenientes do município de Japurá. Além disso, a jazida da amostra 3AG localiza-se no município de Japurá, que é mais distante, em relação a Manaus, do que o município de Barcelos, onde se localizam as jazidas das amostras 2AG e 3AG.

4.1.3 Seleção da Adição Mineral

São apresentados, na tabela 4.5, os resultados dos ensaios realizados com as três opções de adição mineral disponíveis.

Tabela 4.5 – Resultados dos ensaios de caracterização das adições minerais

Adição mineral	Massa específica (g/dm³)		Atividade Pozolânica	Teor de sólidos (%)	
	Resultado	Valor adotado	(mg $Ca(OH)_2$/g de amostra)	Resultado	Valor adotado
Silmix	2,17	2,20	1.522	-	-
Centrilit Fume S	-	2,20	1.470	50,60	50,00
Xypex Admix C-500 NF	-	1,10	-	-	-

A massa específica da sílica ativa em pó Silmix foi determinada pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT em 2,17 g/cm³. Neste experimento, foi adotado o valor de 2,20 g/cm³ para a massa específica da sílica ativa Silmix, seguindo orientações do fornecedor do produto.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT também determinou pelo método Chapelle modificado a atividade pozolânica da sílica ativa Silmix, conforme Relatório de Ensaio n.º

1 027 269-203, datado de 10 de novembro de 2011. A atividade pozolânica à (90 ± 5)°C foi de 1.522 mg $Ca(OH)_2$/g de amostra.

A área específica Blaine da sílica ativa Silmix não pôde ser determinada. O Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT forneceu a seguinte informação sobre o motivo do insucesso desse ensaio:

> *O ensaio de área específica Blaine não foi realizado, porque não foi possível medir a velocidade de deslocamento da coluna de água no aparelho Blaine, uma vez que a amostra possui grumos de difícil dispersão e separação.*

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT determinou pelo método Chapelle modificado a atividade pozolânica do resíduo de secagem da sílica ativa em suspensão Centrilit Fume S, conforme Relatório de Ensaio n.° 1 027 269-203, datado de 10 de novembro de 2011. A atividade pozolânica à (90 ± 5)°C, no resíduo de secagem da sílica ativa em suspensão Centrilit Fume S, foi de 1.470 mg $Ca(OH)_2$/g de amostra.

O teor de sólidos foi determinado pelo IPT como sendo 50,6% da amostra. Para a massa específica do resíduo de secagem da sílica ativa em suspensão Centrilit Fume S e para o teor de sólidos, foram adotados os valores de 2,20 g/cm³ e 50%, respectivamente, seguindo orientações da MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda..

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas – IPT não conseguiu determinar a atividade pozolânica do Xypex Admix C-500 NF pelo método Chapelle modificado, uma vez que esse produto possui natureza alcalina, ou seja, possui hidróxido em sua composição, o que lhe confere pH elevado, quando disperso em água, que interfere no processo de titulação ácido-base, aplicado no método.

Neste experimento, foi adotado o valor de 1,10 g/cm³ para a massa específica do Xypex Admix C-500 NF, seguindo orientações do fornecedor do produto.

4.1.3.1 Análise dos Resultados e Seleção das Adições Minerais

Como a atividade pozolânica à (90 ± 5)°C, no resíduo de secagem da sílica ativa em suspensão Centrilit Fume S, foi de 1.470 mg $Ca(OH)_2$ por grama de amostra e a da sílica ativa em pó Silmix de 1.522 mg $Ca(OH)_2$ por grama de amostra, conclui-se que ambas adições obtiveram para esse ensaio resultados muito semelhantes. A sílica ativa em pó apresentou atividade pozolânica, nas condições ensaiadas, ligeiramente superior.

Todos os três tipos de adição mineral disponíveis foram selecionados e utilizados na produção de concretos desta pesquisa. As sílicas ativas em pó e em suspensão foram empregadas nas avaliações de números 2, 3 e 4, enquanto o Xypex Admix C-500 NF foi utilizado na avaliação nº 5.

4.1.4 Seleção do Aditivo Superplastificante

Um gráfico com os resultados dos ensaios do funil de Marsh é apresentado na figura 4.4.

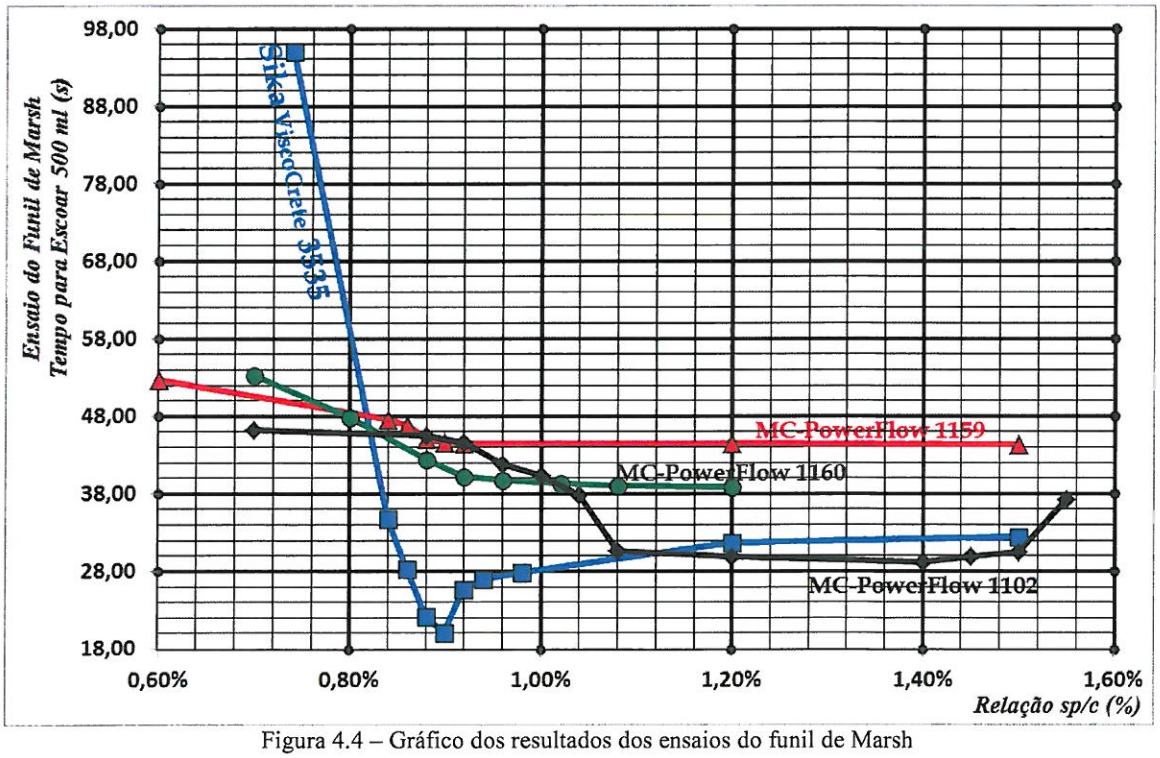


Figura 4.4 – Gráfico dos resultados dos ensaios do funil de Marsh

Um gráfico com os resultados dos ensaios do miniabatimento de Kantro é apresentado na figura 4.5.

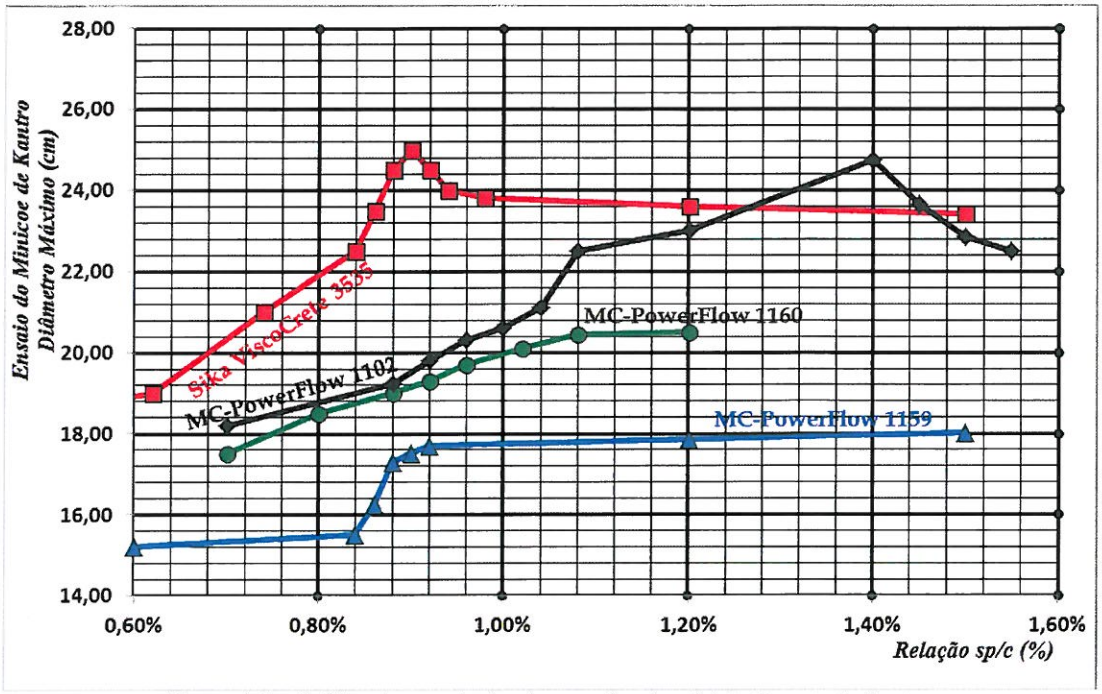
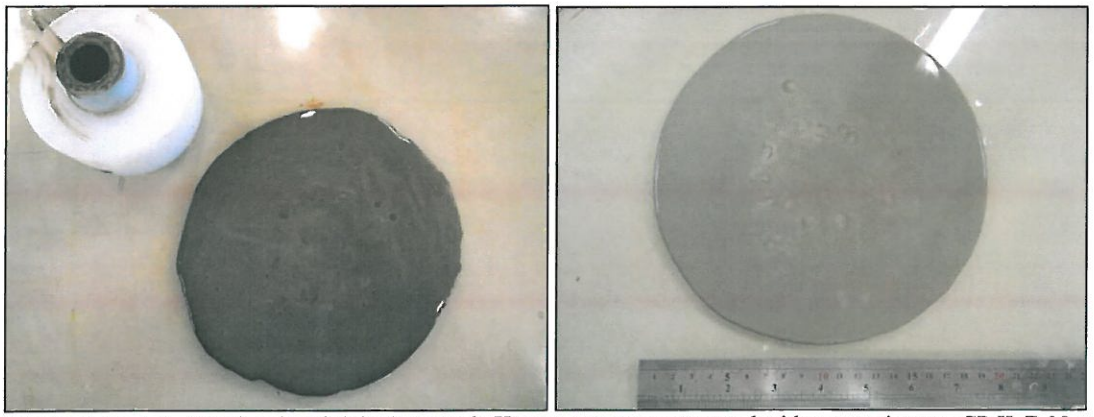
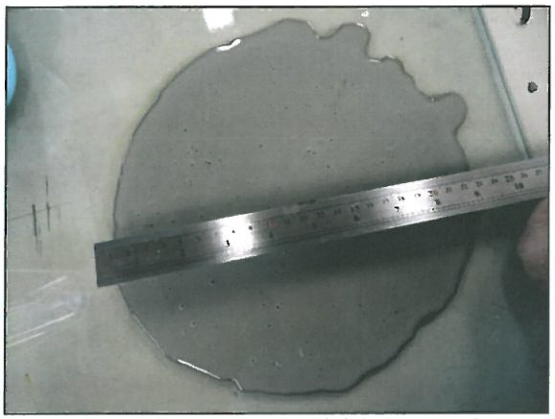
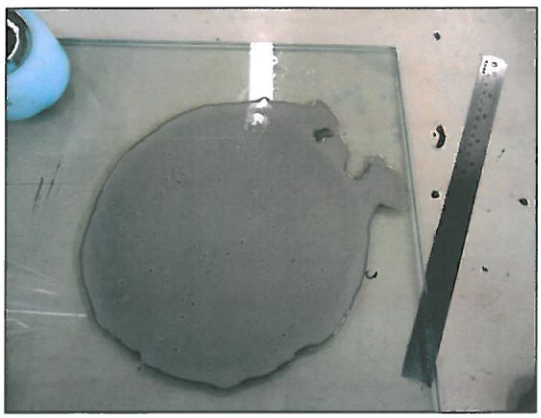


Figura 4.5 – Gráfico dos resultados dos ensaios do miniabatimento de Kantro

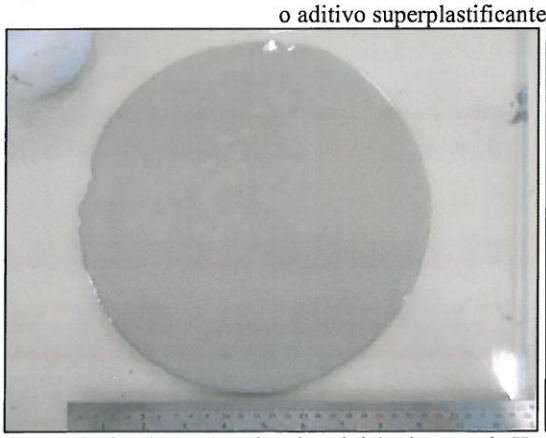
Fotografias dos ensaios do miniabatimento de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e os aditivos superplastificantes selecionados para esta pesquisa são apresentadas nas figuras 4.6 a 4.11.



Figuras 4.6 e 4.7 - Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159 e MC-PowerFlow 1160, respectivamente

Figuras 4.8 e 4.9 - Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB




Figuras 4.10 e 4.11 - Ensaios do miniabatimento de Kantro com as pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102

4.1.4.1 Análise dos Resultados e Seleção dos Aditivos Superplastificantes

O resumo dos resultados dos ensaios realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivos superplastificantes são apresentados nas tabelas 4.6 e 4.7.

Tabela 4.6 - Resumo dos resultados dos ensaios do funil de Marsh

Característica	Sika ViscoCrete 3535 CB	MC-PowerFlow 1159	MC-PowerFlow 1160	MC-PowerFlow 1102
Relação sp/c no ponto de saturação	0,90%	0,92%	0,92%	1,40%
Tempo de escoamento de 500 ml no ponto de saturação	20,03 s	44,43 s	40,18 s	29,13 s
Tendência do gráfico a partir do partir do ponto de saturação	Tempo de escoamento passou a aumentar	Tempo de escoamento estabilizou-se com pequenos decréscimos	Tempo de escoamento estabilizou-se com pequenos decréscimos	Tempo de escoamento passou a aumentar

Tabela 4.7 - Resumo dos resultados dos ensaios do miniabatimento de Kantro

Característica	Sika ViscoCrete 3535 CB	MC-PowerFlow 1159	MC-PowerFlow 1160	MC-PowerFlow 1102
Relação sp/c no ponto de saturação	0,90%	0,92%	0,92%	1,40%
Diâmetro de espraiamento médio medido com um minuto	23,50 cm	17,50 cm	18,30 cm	23,20 cm
Diâmetro de espraiamento médio máximo	25,00 cm	17,70 cm	19,30 cm	24,75 cm
Diferença entre os diâmetros de espraiamento com um minuto e máximo (em cm e %)	1,50 cm (6,38%)	0,20 cm (1,14%)	1,00 cm (5,46%)	1,55 cm (6,68%)
Tendência do gráfico a partir do partir do ponto de saturação	Espraiamento passou a diminuir	Espraiamento estabilizou-se com pequenos acréscimos	Espraiamento estabilizou-se com pequenos acréscimos	Espraiamento passou a diminuir

O desempenho dos aditivos superplastificantes ensaiados, em relação à fluidez e à viscosidade plástica aparente das pastas produzidas, pode ser resumido da seguinte forma:

a) o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB gerou pastas com maiores fluidez e viscosidade;

b) o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 gerou pastas com fluidez e viscosidade ligeiramente inferiores às produzidas com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB;

c) apesar de similares os resultados de fluidez e viscosidade das pastas produzidas com os aditivos superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102, o primeiro obteve melhor desempenho, uma vez que o seu ponto de saturação foi atingido com menor consumo de aditivo, e, consequentemente, com maior economia; e

d) o desempenho dos aditivos superplastificantes MC-PowerFlow 1159 e MC-PowerFlow 1160, em relação à fluidez e à viscosidade plástica aparente das pastas produzidas, não foi tão satisfatório quanto o obtido pelos outros dois aditivos, sendo, portanto, descartados para produção dos concretos desta pesquisa.

Em função do exposto, os aditivos superplastificante selecionados para utilização nos experimentos desta pesquisa foram o Sika ViscoCrete 3535 CB e o MC-PowerFlow 1102. O seleção de dois superplastificante teve como objetivo confirmar se ocorreria nos concretos a mesma tendência de fluidez e viscosidade obtida nas pastas, possibilitando a comparação entre os resultados dos ensaios de caracterização dos concretos no estado fresco produzidos com ambos.

O desempenho desses aditivos foi testado também nos concretos produzidos, uma vez que podem ocorrer diferenças de fluidez e viscosidade entre pastas e concretos, mesmo que mantida a dosagem do aditivo superplastificante em relação ao peso do cimento. Segundo observações de Camões (2005), conforme revisão da literatura, o emprego de adições minerais pode afetar o comportamento reológico das pastas e dos concretos.

Os aditivos superplastificantes selecionados foram empregados nos concretos utilizando as dosagens ótimas correspondentes aos pontos de saturação determinados pelos ensaios com as pastas. Nas pastas produzidas, as dosagens ótimas para os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102 foram determinadas com a relação sp/c em 0,90% e 1,40% e com a relação p/c em 2,57% e 4,67%, respectivamente. Como a parte sólida desses aditivos é de 35% e 30% do seu peso total, respectivamente, seus consumos puderam ser determinados para a quantidade de 486 kg de cimento Portland.

O aditivo MC-PowerFlow 1159, que possui 30% de parte sólida em relação ao seu peso total, foi empregado apenas em um único traço da avaliação nº 3 (T-2E), com sp/c de 0,92% e p/c de 3,07%, conforme Apêndice. O emprego desse superplastificante em um dos traços teve como objetivo confirmar se, nesse concreto, ocorreria a mesma tendência a uma menor fluidez, como ocorreu nas pastas produzidas com esse aditivo.

4.2 Resultados e Discussões da Avaliação nº 2

Na avaliação nº 2 desta pesquisa, foram produzidos os traços T-1A, T-1B, T-1C, T-1D, T-1E, T-1F e T-1G. Por meio da análise dos resultados desta avaliação, foi possível selecionar as melhores alternativas entre as opções disponíveis de adição mineral, agregado graúdo e aditivo superplastificante, uma vez que os demais materiais componentes não foram variados.

Os resultados dos ensaios da avaliação nº 2 são apresentados nas tabelas 4.8 e 4.9, sendo f_c, a resistência à compressão axial; f_{tD}, resistência à tração na compressão diametral; Ec, o módulo estático de elasticidade à compressão; $\bar{Y}$, a média; e δ, o desvio padrão.

Tabela 4.8 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-1: média e desvio padrão

Ensaio	T-1A		T-1B		T-1C		T-1D		T-1E		T-1F		T-1G	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	42,2	1,5	42,6	1,8	43,6	3,3	43,1	1,8	41,1	1,7	38,3	1,0	49,7	3,7
f_c: 7 dias (MPa)	53,1	2,0	68,8	2,2	55,6	3,1	58,7	1,4	62,0	3,0	49,5	2,8	67,0	2,2
f_c: 28 dias (MPa)	63,0	1,4	74,2	4,5	78,6	1,6	74,0	2,3	73,4	1,6	64,6	0,2	76,3	5,2
f_c: 90 dias (MPa)	88,5	3,2	78,6	2,6	88,2	2,9	89,6	2,2	81,6	2,4	87,8	2,2	87,1	4,0
f_{tD}: 28 dias (MPa)	5,57	0,15	5,18	0,41	5,36	0,22	5,59	0,32	5,35	0,38	5,59	0,12	5,55	0,25
Ec: 28 dias (GPa)	(**)	(**)	38,28	0,82	33,16	2,43	36,93	1,72	37,09	1,86	(**)	(**)	39,26	0,28
Ec: 90 dias (GPa)	36,41	0,47	42,28	3,62	37,39	0,23	39,05	1,45	37,41	2,02	36,26	4,00	38,30	0,62

(**) Ensaio não realizado

Tabela 4.9 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-1

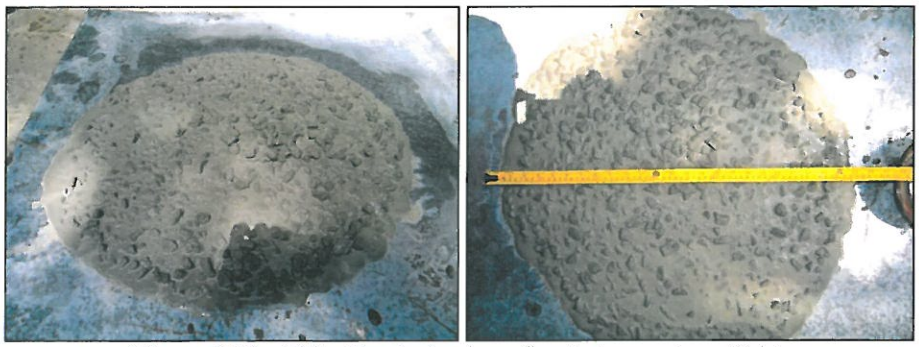
Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	T-1A	T-1B	T-1C	T-1D	T-1E	T-1F	T-1G
Adição: Silmix	x	x	x	x	x		
Adição: Centrilit Fume S						x	x
Brita: Britamazon/Capital	x	x	x			x	x
Brita: Ita Mineração				x	x		
SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (p/c=2,57%)	x	x	x	x		x	
SP: MC-PowerFlow 1102 (p/c=4,67%)					x		x
Slump Flow Test (mm)	620	575	620	580	645	525	680
T_{500} *Test* (s)	34,84	39,81	39,45	38,76	26,25	28,06	25,15
Maior valor (•) de f_c a 3 dias (MPa)	43,9	43,8	46,5	45,2	43,0	39,4	54,0
Maior valor (•) de f_c a 7 dias (MPa)	55,1	71,2	58,9	60,0	65,3	52,2	68,6
Maior valor (•) de f_c a 28 dias (MPa)	64,5	78,1	80,2	76,6	74,9	64,7	82,2
Maior valor (•) de f_c a 90 dias (MPa)	90,7	81,5	91,2	92,0	83,4	89,4	90,0
Maior valor (•) de f_{tD} a 28 dias (MPa)	5,73	5,45	5,55	5,95	5,60	5,71	5,83
Maior valor (•) de Ec a 28 dias (GPa)	(**)	39,00	35,87	38,89	39,07	(**)	39,34
Maior valor (•) de Ec a 90 dias (GPa)	36,74	45,94	37,59	40,19	39,41	39,08	38,75

(**) Ensaio não realizado

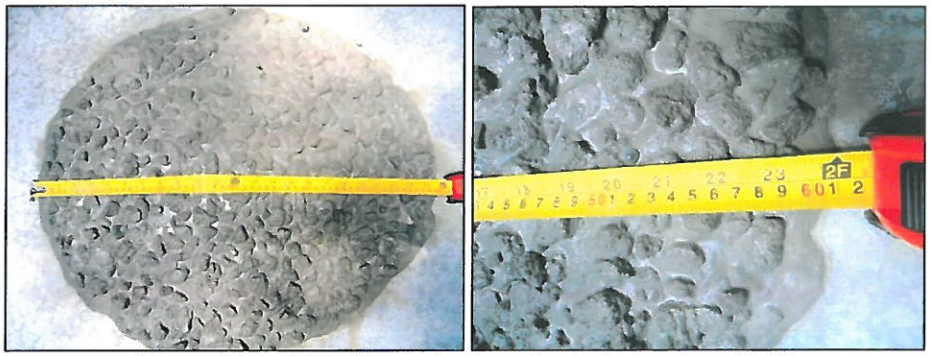
(•) Maior valor de fc, ftD e Ec, segundo NBR 12655:2006

A seguir, são apresentadas fotografias, microfotografias e gráficos relativos à avaliação nº 2 desta pesquisa.

As figuras 4.12 a 4.23 ilustram alguns ensaios de caracterização dos concretos da avaliação nº 2 no estado fresco.



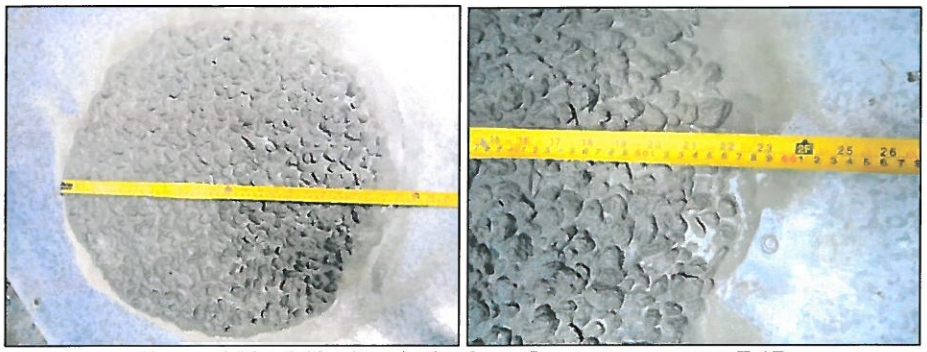
Figuras 4.12 e 4.13 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1A



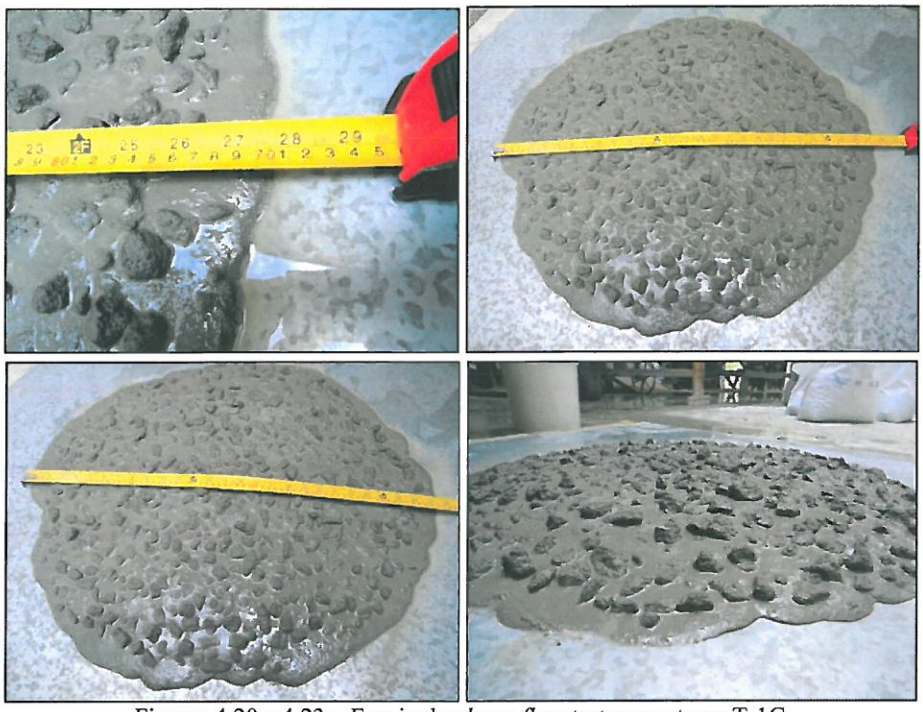
Figuras 4.14 e 4.15 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1B



Figuras 4.16 e 4.17 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1C



Figuras 4.18 e 4.19 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1D



Figuras 4.20 e 4.23 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-1G

Os gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1 são apresentados nas figuras 4.24 e 4.25.

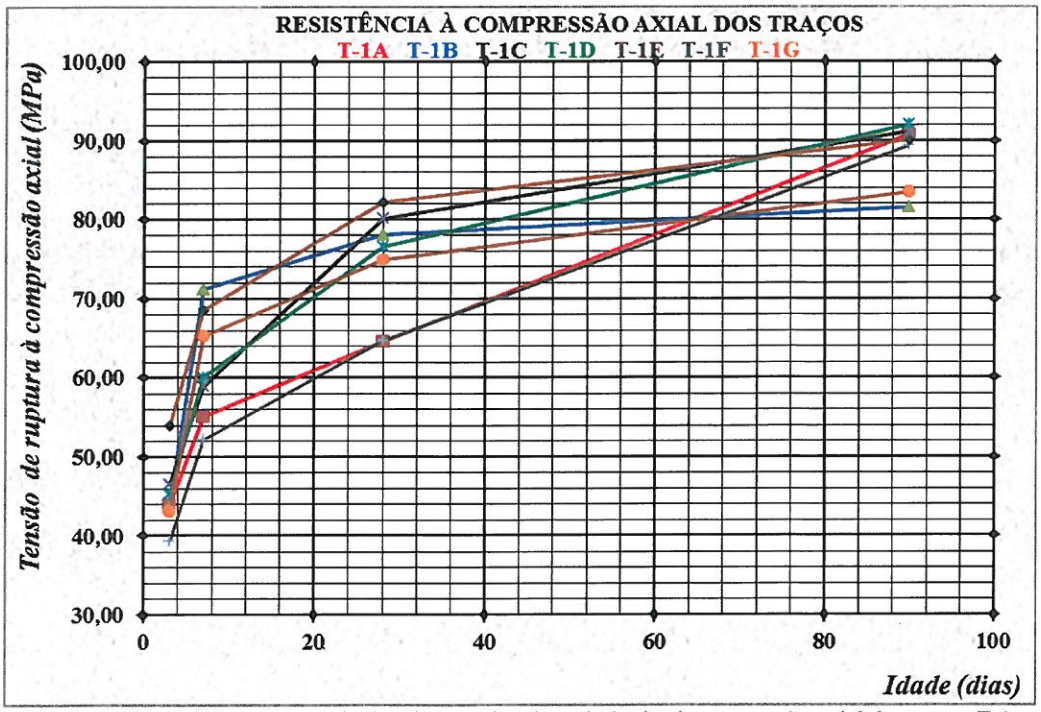


Figura 4.24 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1

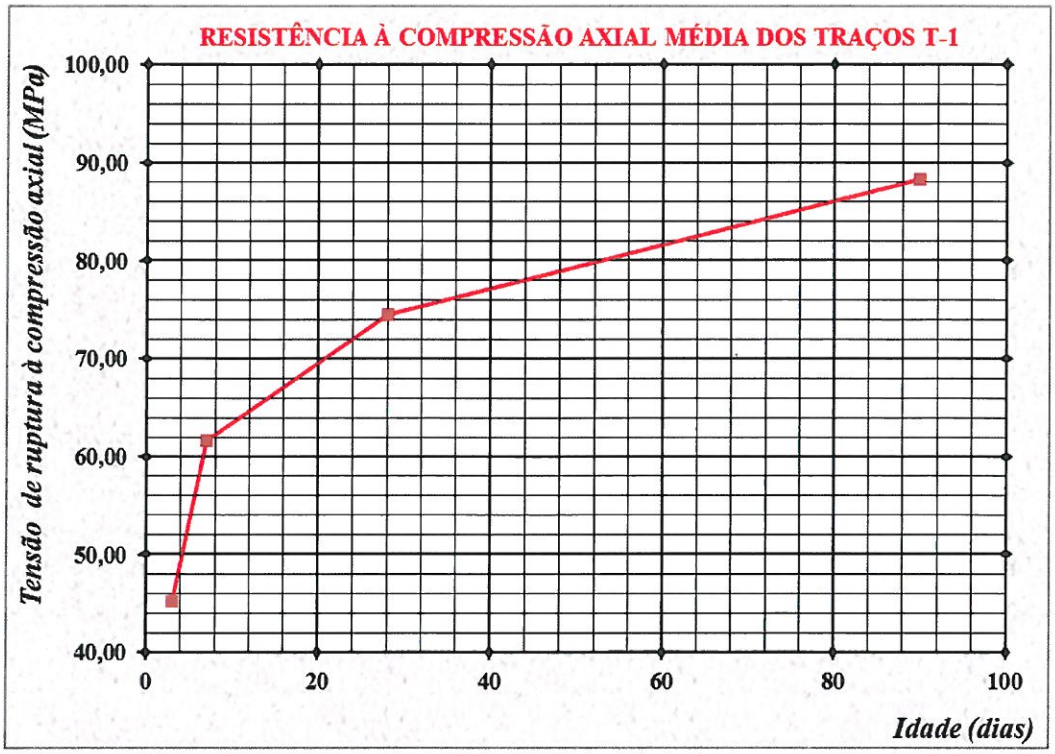
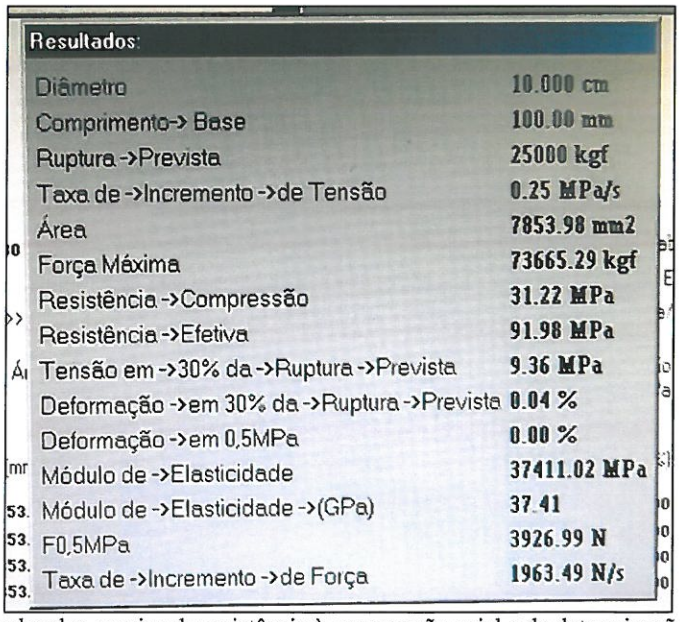


Figura 4.25 – Gráficos da média dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1

As figuras 4.26 a 4.28 ilustram ensaios de resistências à compressão axial e de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão de alguns traços T-1.



Resultados:

Diâmetro	10.000 cm
Comprimento-> Base	100.00 mm
Ruptura ->Prevista	25000 kgf
Taxa de ->Incremento ->de Tensão	0.25 MPa/s
Área	7853.98 mm2
Força Máxima	73665.29 kgf
Resistência ->Compressão	31.22 MPa
Resistência ->Efetiva	91.98 MPa
Tensão em ->30% da ->Ruptura ->Prevista	9.36 MPa
Deformação ->em 30% da ->Ruptura ->Prevista	0.04 %
Deformação ->em 0,5MPa	0.00 %
Módulo de ->Elasticidade	37411.02 MPa
Módulo de ->Elasticidade ->(GPa)	37.41
F0,5MPa	3926.99 N
Taxa de ->Incremento ->de Força	1963.49 N/s

Figura 4.26 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do traço T-1D (90 dias)

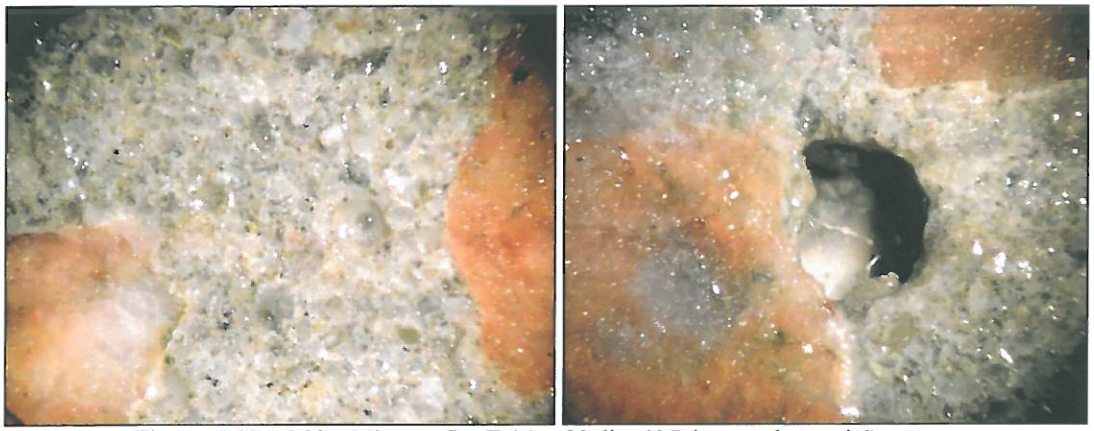
Na figura 4.28, observa-se a ruptura através do agregado graúdo, resultante da realização de ensaio de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão, por ser esta a fase mais fraca do compósito produzido pelo traço T-1A.



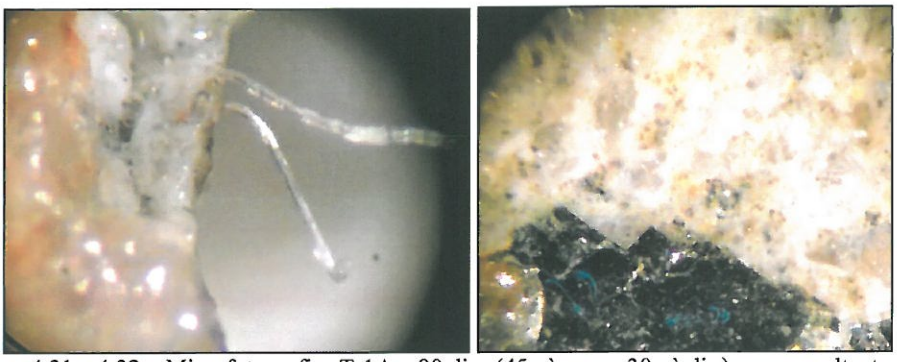
Figuras 4.27 e 4.28 – Ensaios de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do traço T-1A (28 dias): ruptura através do agregado graúdo (fase mais fraca do compósito)

Nas figuras 4.29 a 4.48, são apresentadas microfotografias obtidas com microscópio ótico *Motic Images Plus 2.0 ML*, com legendas indicando a idade de cada corpo de prova e a ampliação da objetiva.

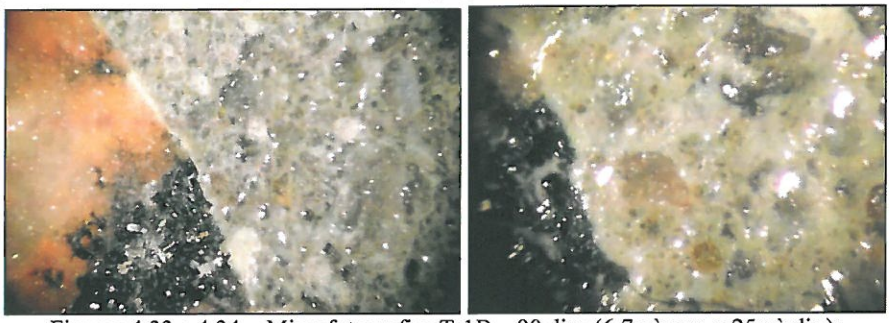
Poros resultantes do ar incorporado, decorrente da adição de fibra de polipropileno aos concretos T-1, zonas de transição compactas, fibras de polipropileno e agregados miúdo e graúdo podem ser observadas nas microfotografias existentes nas figuras 4.29 a 4.48.



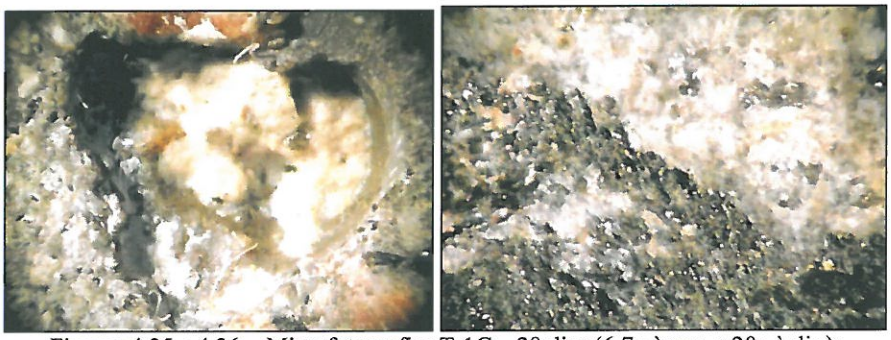
Figuras 4.29 e 4.30 – Micrografias T-1A – 90 dias (6,7x): zona de transição e poro



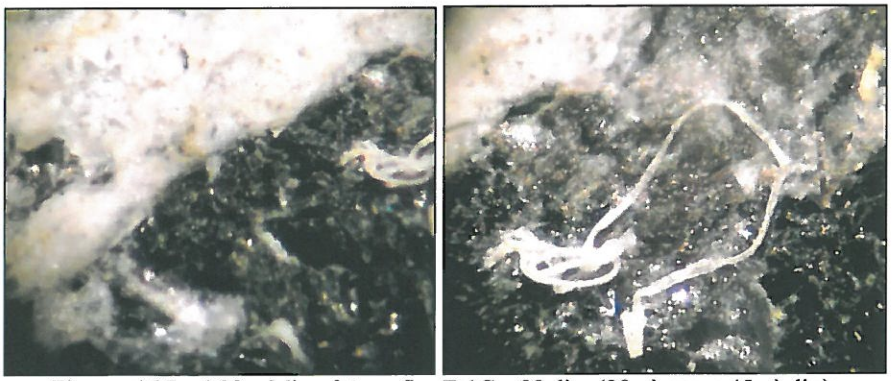
Figuras 4.31 e 4.32 – Microfotografias T-1A – 90 dias (45x à esq. e 30x à dir.): poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno ao concreto e zona de transição compacta



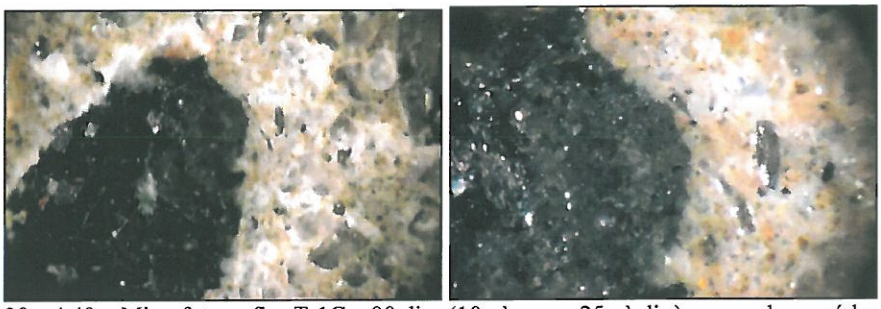
Figuras 4.33 e 4.34 – Microfotografias T-1B – 90 dias (6,7x à esq. e 25x à dir.): zona de transição compacta



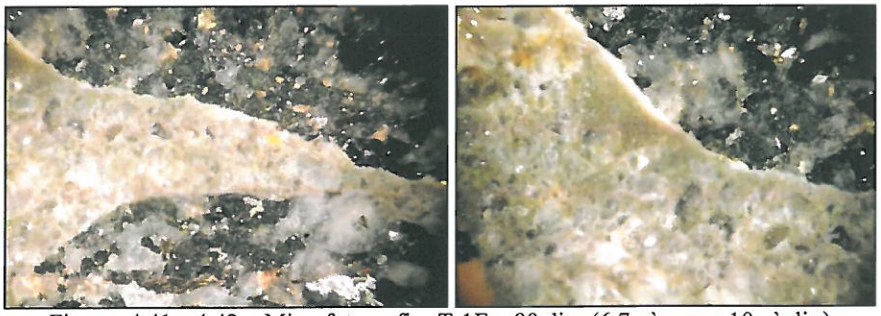
Figuras 4.35 e 4.36 – Microfotografias T-1C – 28 dias (6,7x à esq. e 20x à dir.): poro e zona de transição compacta



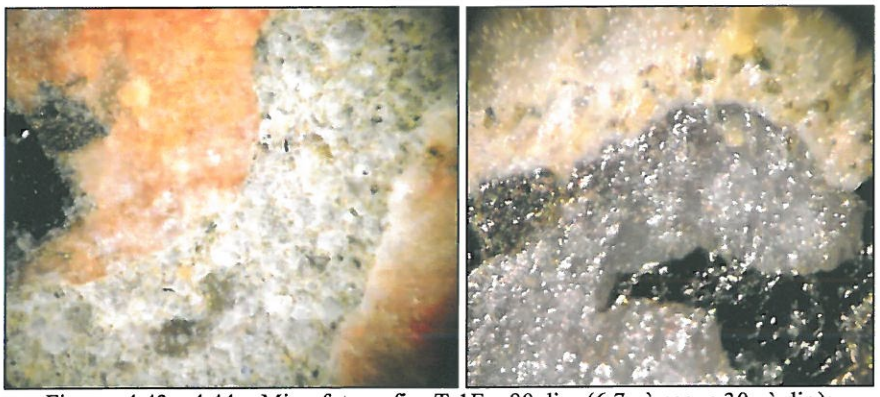
Figuras 4.37 e 4.38 – Microfotografias T-1C – 28 dias (30x à esq. e 45x à dir.): fibras de polipropileno



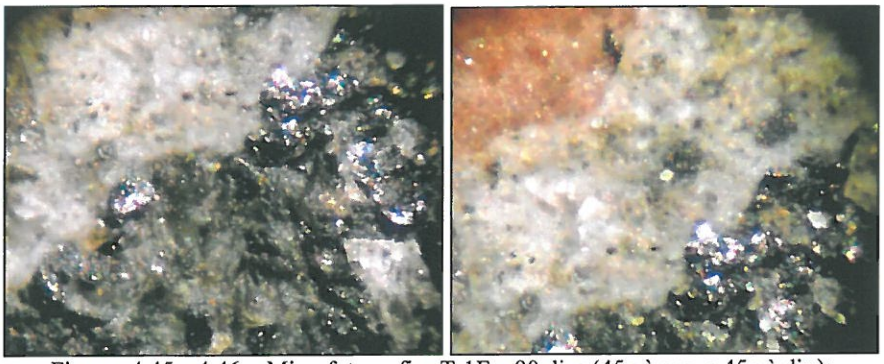
Figuras 4.39 e 4.40 – Microfotografias T-1C – 90 dias (10x à esq. e 25x à dir.): agregados graúdos e miúdos



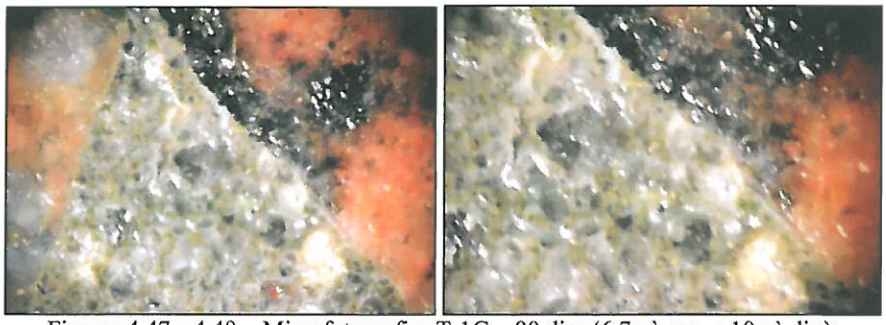
Figuras 4.41 e 4.42 – Microfotografias T-1E – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.)
densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo



Figuras 4.43 e 4.44 – Microfotografias T-1F – 90 dias (6,7x à esq. e 30x à dir.):
densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo



Figuras 4.45 e 4.46 – Microfotografias T-1F – 90 dias (45x à esq. e 45x à dir.):
densa zona de transição e agregados miúdo e graúdo



Figuras 4.47 e 4.48 – Microfotografias T-1G – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.): densa zona de transição e coloração variada do agregado graúdo

Na discussão apresentada a seguir, há preferência pela análise mediante a comparação entre resultados de ensaios de compressão axial obtidos aos 90 dias, em relação aos obtidos aos 28 dias ou outra idade menor, uma vez que:

- essa consideração melhor se adequa às análises relativas ao objetivo geral desta pesquisa;
- os maiores e mais antigos resultados são os que mais se aproximam dos valores característicos definitivos dos concretos; e
- é grande a diferença entre os resultados obtidos em concretos de diferentes idades produzidos com o cimento Portland composto com pozolana CP II-Z-32 – Nassau, utilizado nesta pesquisa, em relação a outros com cimento sem quantidade expressiva de pozolana.

Para seleção da melhor adição mineral, foi realizada análise, mantendo constantes todos os materiais componentes, inclusive a brita da Britamazon/Capital como agregado graúdo, e variando somente a adição mineral, para que não haja dúvida sobre a influência de nenhum outro material nos resultados dos ensaios com o concreto endurecido, exceto os provocados pela variação da sílica ativa em pó Silmix e em suspensão Centrilit Fume S, como adição mineral. Com esse objetivo, variando somente a adição mineral, foram produzidos os traços T-1A, T-1B e T-1C, com a adição mineral Silmix, e os traços T-1F e T-1G, com a Centrilit Fume S. Como teoricamente a variação do aditivo superplastificante não interfere nos resultados dos ensaios de resistência a compressão axial, observa-se que, entre os concretos com Silmix, o traço T-1C obteve o maior valor nesse ensaio (91,2 MPa aos 90 dias), enquanto que, entre os concretos com Centrilit Fume S, o traço T-1G obteve o maior valor nesse ensaio (90,0 MPa aos 90 dias).

Supõe-se que as diferenças de resultados ocorridas entre os ensaios de compressão axial aos 28 dias dos traços T-1F e T-1G, onde foram mantidos constantes todos os materiais componentes, exceto os aditivos superplastificantes, devem ter ocorrido por alguma falha na moldagem de algum dos corpos de prova, considerando que, aos 90 dias, os resultados foram muito similares (89,4 e 90,0 MPa, respectivamente). Com intuito de evitar qualquer dúvida, em relação às alterações que podem ter sido provocadas pela utilização de diferentes aditivos superplastificantes, é realizada a seguir comparação entre os resultados dos ensaios de compressão axial obtidos pelos traços T-1C e T-1F, uma vez que ambos empregaram o aditivo Sika ViscoCrete 3535 CB. Nesse caso, chega-se a uma conclusão similar à do parágrafo anterior, pois, entre os concretos com Silmix, o traço T-1C obteve o maior valor nesse ensaio (91,2 MPa aos 90 dias), enquanto que, entre os concretos com Centrilit Fume S, o traço T-1F obteve o maior valor nesse ensaio (89,4 MPa aos 90 dias).

Como os resultados dos ensaios de compressão axial da avaliação nº 2 apresentaram valores muito próximos, aos 90 dias, de qualquer forma que seja realizada sua análise, conforme aqui exposto, conclui-se que as eficiências das adições Silmix e Centrilit Fume S são muito similares.

Observa-se, entretanto, que a sílica ativa em pó Silmix é produzida e fornecida pela Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda., com sede na Rodovia PA-263, km 3,5, Breu Branco, Pará, enquanto a sílica ativa em suspensão Centrilit Fume S é produzida e fornecida pela MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., com sede na Rua Henry Martin, nº 235, Tijuco Preto, Vargem Grande Paulista, São Paulo.

Além da maior distância de transporte até a região Norte do Brasil, 50% do peso da sílica ativa em suspensão Centrilit Fume S é água, o que aumenta a quantidade de material a ser transportado e, consequentemente, o custo desse transporte.

Como resultado da análise relativa à adição mineral, entre as alternativas Silmix e Centrilit Fume S, foi selecionada a sílica ativa em pó Silmix, como a melhor opção para esta pesquisa, pelas razões acima expostas.

Resta, ainda, analisar a viabilidade de utilização da adição mineral Xypex Admix C-500 NF, que é uma mistura de cimento Portland, sílica e diversas substâncias químicas ativas em pó, também produzida pela MC - Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.. Essa análise é realizada somente na avaliação nº 5 desta pesquisa. Preferiu-se realizar a análise dos resultados obtidos com essa adição mineral separadamente das demais, pois, enquanto as adições Silmix e Centrilit Fume S foram empregadas na dosagem de 8,6% do peso do cimento, para o Xypex Admix C-500, essa proporção foi de 1,5%, em atendimento às respectivas recomendações das fichas técnicas desses produtos, o que resultou na necessidade de adequação do traço dos concretos produzidos com essa adição mineral.

A análise dos resultados dos ensaios de caracterização dos concretos no estado fresco dos traços T-1 é realizada mais adiante, ainda neste tópico 4.2, relativo aos resultados e discussões da avaliação nº 2.

Para seleção do melhor agregado graúdo, verificou-se que, mantendo constantes todos os materiais componentes, inclusive a sílica ativa Silmix como adição mineral, e variando somente o agregado graúdo, para que não haja dúvida sobre a influência de nenhum outro material nos resultados dos ensaios com o concreto endurecido, exceto os provocados pela variação das britas Britamazon/Capital e Ita Mineração, como agregado graúdo. Com esse objetivo, variando somente o agregado graúdo, foram produzidos os traços T-1A, T-1B e T-1C, com a brita da Britamazon/Capital, e os traços T-1D e T-1E, com a brita da Ita Mineração. Entre os concretos com a brita da Britamazon/Capital, o traço T-1C obteve o maior valor nesse ensaio (91,2 MPa), enquanto que, entre os concretos com brita da Ita Mineração, o traço T-1D obteve o maior valor nesse ensaio (92,0 MPa). Nesta comparação de resultados, não há dúvida sobre uma possível influência por conta de variação do aditivo superplastificante, uma vez que ambos os traços, T-1C e T-1D, empregam o Sika ViscoCrete 3535 CB.

Da mesma forma que ocorreu com a análise do emprego das adições minerais Silmix e Centrilit Fume S, como os resultados dos ensaios de compressão axial da avaliação nº 2 apresentaram valores muito próximos, aos 90 dias, conforme aqui exposto, conclui-se que as eficiências das britas da Britamazon/Capital e da Ita Mineração são muito similares.

Como não há distinção entre a distância de transporte de ambas, uma vez que ambas são produzidas na mesma localidade, a região de Moura, no município de Barcelos, no estado do Amazonas, não há preferência por uma delas para utilização nesta pesquisa, ou seja, ambas podem ser utilizadas, uma vez que ambas resultaram em eficiências muito similares.

Também nesta análise, vale observar que, com exceção do traço T-1F, todos os demais apresentaram características de CAA e CAD simultaneamente.

Ao analisar, de acordo com a NBR 15823-1:2010, os resultados dos ensaios de *slump flow* e T_{500} obtidos com os concretos produzidos na avaliação nº 2 desta pesquisa, pode-se observar o seguinte:

a) os concretos T-1A, T-1B, T-1C e T-1D, com adição de 0,40 kg de fibra de polipropileno por m³ de concreto e produzido com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, são autoadensáveis e, quanto à fluidez, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* entre 575 e 620 mm), são classificados como SF 1, pois seus espalhamentos médios encontram-se no intervalo de 550 a 650 mm, porém o concreto T-1F, também produzido com 0,40 kg de fibra de polipropileno por m³ de concreto e com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, não é autoadensável, uma vez que, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* de 525 mm), seu *slump flow* encontra-se abaixo de 550 mm (*slump flow* mínimo para ser classificado como CAA);
b) o concreto T-1G, com adição de 0,40 kg de fibra de polipropileno por m³ de concreto e produzido com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, é autoadensável e, quanto à fluidez, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* de 680 mm), é classificado como SF 2, pois seu espalhamento médio encontra-se no intervalo de 660 a 750 mm, porém o concreto T-1E, também produzido com 0,40 kg de fibra de polipropileno por m³ de concreto e com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, apresentou *slump flow* de 645 mm e, portanto, é classificado como SF1; e
c) tanto os concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, como os produzidos com o MC-PowerFlow 1102, são todos

classificados, quanto à viscosidade plástica aparente, pelo ensaio do tempo T_{500}, como VS 2, pois todos os tempos de espalhamento decorridos do início do ensaio até a cobertura completa da marca circular com diâmetro de 500 mm da placa base são superiores a 2s.

Outras observações da avaliação nº 2 da pesquisa são, a seguir, relacionadas:

a) as pastas produzidas com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 na dosagem p/c de 2,57%, em relação às produzidas com MC-PowerFlow 1102 na dosagem p/c de 4,67%, obtiveram maior fluidez, segundo os ensaios do funil de Marsh e do minicone de Kantro, realizados na avaliação nº 1 desta pesquisa;

b) como um aditivo superplastificante gerou pastas mais fluidas do que outro, apesar deste segundo ter sido empregado numa dosagem quase o dobro da dosagem do primeiro, deduz-se que não há garantia de que uma dosagem maior gere maior fluidez em pastas e concretos, quando utilizados diferentes aditivos superplastificantes, pois diferentes fabricantes adotam diferentes processos e diferentes composições químicas na fabricação de seus produtos, e estas diferenças geram diferentes rendimentos e eficiências;

c) entretanto, os concretos produzidos com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 foram, em média, mais fluidos do que os concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 (sendo estes dosados, respectivamente, nas mesmas relações p/c empregadas nas pastas), não confirmando assim nos concretos as mesmas tendências de fluidez observadas nos ensaios com as pastas;

d) as pastas produzidas com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 (com tempo de escoamento de 29,13s no ensaio do funil de Marsh, com a dosagem do aditivo no ponto de saturação, p/c = 4,67%) foram classificadas como menos fluidas, em relação às pastas produzidas com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 (com tempo de escoamento de 20,03s no ensaio do funil de Marsh, com dosagem do aditivo no ponto de saturação, p/c = 2,57%), conforme tópico 4.1.4.1, comprovando que os resultados dos ensaios de fluidez realizados com as pastas nem sempre possuem as mesmas tendências dos resultados dos ensaios de *slump flow* realizados com os concretos frescos, mesmo que seja

adotada, para as pastas e para os concretos, a mesma dosagem do aditivo superplastificante nos seus respectivos pontos de saturação;

e) conforme previsto na revisão da literatura, as divergências entre os resultados dos ensaios de fluidez entre as pastas produzidas na avaliação nº 1 da pesquisa e os concretos desta avaliação podem ter origem na ausência de adição mineral nas pastas ensaiadas, enquanto os concretos foram produzidos com seu emprego;

f) portanto, os ensaios de fluidez realizados com as pastas, pelo funil de Marsh, devem sempre ser confirmados com os concretos, por meio do ensaio *slump flow*;

g) mantendo constantes a adição Silmix e o aditivo Sika ViscoCrete 3535 CB e variando somente o tipo de agregado graúdo, observou-se que o concreto produzido com a brita Britamazon/Capital (T-1C) obteve *slump flow* de 620 mm, enquanto que o concreto produzido com a brita Ita Mineração (T-1D) obteve *slump flow* de 580 mm;

h) mantendo constantes a brita da Britamazon/Capital e o aditivo Sika ViscoCrete 3535 CB e variando somente o tipo de adição mineral, observou-se que as melhores características de CAA dos concretos que empregaram a adição Silmix (T-1A, T-1B e T-1C) foram obtidas igualmente pelos traços T-1A e T-1C (*slump flow* de 620 mm), enquanto que o concreto produzido com Centrilit Fume S (T-1F) obteve *slump flow* de 525 mm;

i) quanto ao *slump flow*, foram os seguintes os resultados obtidos com as combinações entre aditivo superplastificante e adição mineral, da mais para a menos fluida: MC-PowerFlow 1102 com a adição Centrilit Fume S (680 mm), MC-PowerFlow 1102 com Silmix (645 mm), Sika ViscoCrete 3535 CB com Silmix (620 mm) e Sika ViscoCrete 3535 CB com Centrilit Fume S (525 mm);

j) a melhor combinação de adição mineral e aditivo superplastificante, no que diz respeito ao resultado do ensaio de *slump flow*, foi obtida pelo concreto T-1G (*slump flow* de 680 mm), quando foi empregada a combinação MC-PowerFlow 1102 com Centrilit Fume S, talvez, por haver maior compatibilidade entre ambos, uma vez que são fabricados e fornecidos pela mesma empresa (MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.);

k) como os tempos médios de espalhamento T_{500} dos concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB são superiores aos produzidos com o MC-PowerFlow 1102, os primeiros apresentaram maior viscosidade plástica aparente; e

l) como os resultados de fluidez e viscosidade obtidos com os concretos produzidos com ambos superplastificantes empregados apresentaram valores muito próximos, apesar de, em média, os resultados de fluidez obtidos com concretos produzidos com o do aditivo MC-PowerFlow 1102 (680 mm de *slump flow*, quando combinado com Centrilit Fume S e brita da Britamazon/Capital) serem ligeiramente melhores, em relação aos obtidos com o aditivo Sika ViscoCrete 3535 CB (620 mm de *slump flow*, quando combinado com Silmix e brita da Britamazon/Capital), este último foi considerado preferível por esta pesquisa, uma vez que sua dosagem p/c é de 2,57%, no seu ponto de saturação, enquanto a dosagem do aditivo MC-PowerFlow 1102, nesse mesmo ponto, é de 4,67%, ou seja, o Sika ViscoCrete 3535 CB necessita de menor consumo para obter concretos com fluidez e viscosidade semelhantes.

4.3 Resultados e Discussões da Avaliação nº 3

Na avaliação nº 3 desta pesquisa, foram produzidos os traços T-2A, T-2B, T-2C, T-2D, T-2E, T-2F, T-3, T-4, T-5A e T-5B. Por meio da análise dos resultados desta avaliação, foi possível selecionar a melhor opção de teor de fibra de polipropileno. A adição mineral e o aditivo superplastificante foram variados entre as opções disponíveis de materiais componentes na produção dos concretos.

Os resultados dos ensaios da avaliação nº 2 são apresentados nas tabelas 4.10 a 4.13.

Tabela 4.10 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-2: média e desvio padrão

Ensaio	T-2A		T-2B		T-2C		T-2D		T-2E		T-2F	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	41,3	1,6	35,4	3,4	51,8	1,7	34,9	3,2	40,4	0,8	47,5	1,4
f_c: 7 dias (MPa)	48,4	2,2	46,5	3,6	61,9	2,6	47,1	1,5	59,0	1,3	59,9	3,2
f_c: 28 dias (MPa)	63,4	2,0	61,4	2,9	77,0	2,6	65,7	3,2	65,8	3,2	78,9	5,0
f_c: 90 dias (MPa)	81,6	0,0	84,4	3,1	88,1	5,5	77,2	1,1	81,6	0,0	87,5	4,8
f_{tD}: 28 dias (MPa)	6,11	0,57	5,67	0,20	5,46	0,27	5,78	0,22	5,91	0,12	5,65	0,27
Ec: 28 dias (GPa)	(**)	(**)	(**)	(**)	39,38	0,71	(**)	(**)	(**)	(**)	41,30	2,92
Ec: 90 dias (GPa)	35,57	0,00	35,40	0,66	39,15	1,24	34,80	2,33	38,35	0,00	39,53	2,74

(**) Ensaio não realizado

Tabela 4.11 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-2

Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	T-2A	T-2B	T-2C	T-2D	T-2E	T-2F
Adição: Silmix	x	x	x			
Adição: Centrilit Fume S				x	x	x
Brita: Britamazon/Capital	x	x	x	x	x	x
SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (p/c=2,57%)	x	x	x	x		
SP: MC-PowerFlow 1159 (p/c=3,07%)					x	
SP: MC-PowerFlow 1102 (p/c=4,67%)						x
Slump Flow Test (mm)	690	690	680	690	< 500	710
T_{500} *Test* (s)	17,27	16,84	14,63	14,06	(**)	20,88
Maior valor (•) de f_c a 3 dias (MPa)	43,2	39,1	53,4	38,6	41,3	48,6
Maior valor (•) de f_c a 7 dias (MPa)	50,8	49,0	64,8	48,1	60,3	62,0
Maior valor (•) de f_c a 28 dias (MPa)	65,2	63,4	79,8	69,3	69,5	82,2
Maior valor (•) de f_c a 90 dias (MPa)	81,6	86,6	92,6	78,0	81,6	92,4
Maior valor (•) de f_{tD} a 28 dias (MPa)	6,76	5,83	5,74	6,03	6,05	5,95
Maior valor (•) de Ec a 28 dias (GPa)	(**)	(**)	40,16	(**)	(**)	42,12
Maior valor (•) de Ec a 90 dias (GPa)	35,57	35,86	40,15	33,15	38,35	42,26

(**) Ensaio não realizado

(•) Maior valor de f_c, f_{tD} e Ec, segundo NBR 12655:2006

Tabela 4.12 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-3, T-4 e T-5: média e desvio padrão

Ensaio	T-3		T-4		T-5A		T-5B	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	36,1	2,0	44,9	1,1	38,0	1,8	39,4	1,6
f_c: 7 dias (MPa)	55,4	3,3	51,6	2,7	50,2	0,4	61,5	2,1
f_c: 28 dias (MPa)	65,9	2,5	62,0	2,8	62,9	1,7	70,2	3,6
f_c: 90 dias (MPa)	82,6	1,2	88,9	2,2	78,7	0,0	88,2	0,0
f_{tD}: 28 dias (MPa)	5,83	0,31	5,62	0,08	5,56	0,14	6,43	0,08
Ec: 28 dias (GPa)	(**)	(**)	(**)	(**)	(**)	(**)	(**)	(**)
Ec: 90 dias (GPa)	33,02	5,29	37,91	1,89	39,92	0,00	38,74	0,00

(**) Ensaio não realizado

Tabela 4.13 – Resultados dos ensaios realizados com os traços T-3, T-4 e T-5

Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	T-3	T-4	T-5A	T-5B
Adição: Silmix		x	x	
Adição: Centrilit Fume S	x			x
Brita: Britamazon/Capital	x	x	x	x
SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (p/c=2,57%)	x	x	x	x
Fibra de polipropileno (kg/m³)	0,25	0,60	1,00	1,00
Slump Flow Test (mm)	680	505	190 (*)	180 (*)
T_{500} *Test* (s)	17,60	39,12	(**)	(**)
Maior valor (•) de f_c a 3 dias (MPa)	37,6	46,1	40,0	41,3
Maior valor (•) de f_c a 7 dias (MPa)	58,9	54,3	50,6	63,9
Maior valor (•) de f_c a 28 dias (MPa)	68,0	64,5	64,6	74,3
Maior valor (•) de f_c a 90 dias (MPa)	83,5	90,5	78,7	88,2
Maior valor (•) de f_{tD} a 28 dias (MPa)	6,17	5,69	5,69	6,52
Maior valor (•) de Ec a 28 dias (GPa)	(**)	(**)	(**)	(**)
Maior valor (•) de Ec a 90 dias (GPa)	36,76	39,24	39,92	38,74

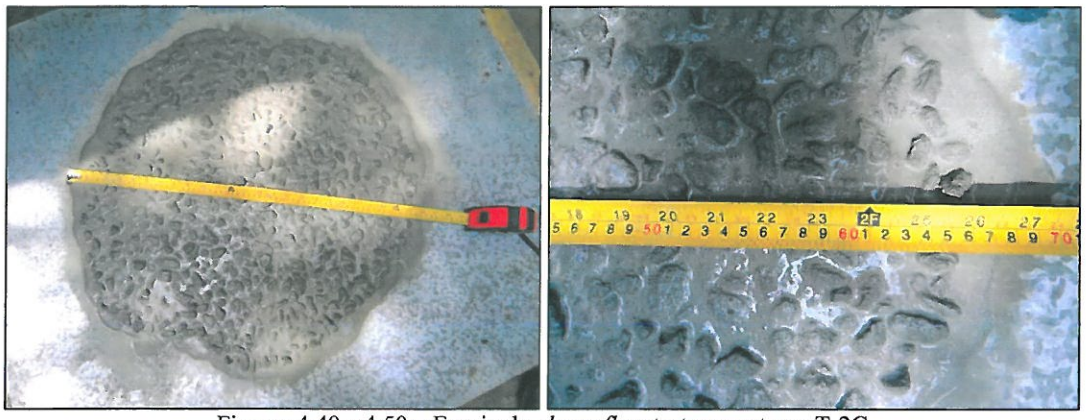
(*) Ensaio do abatimento do tronco de cone (mm), pela NBR NM 67:1998

(**) Ensaio não realizado

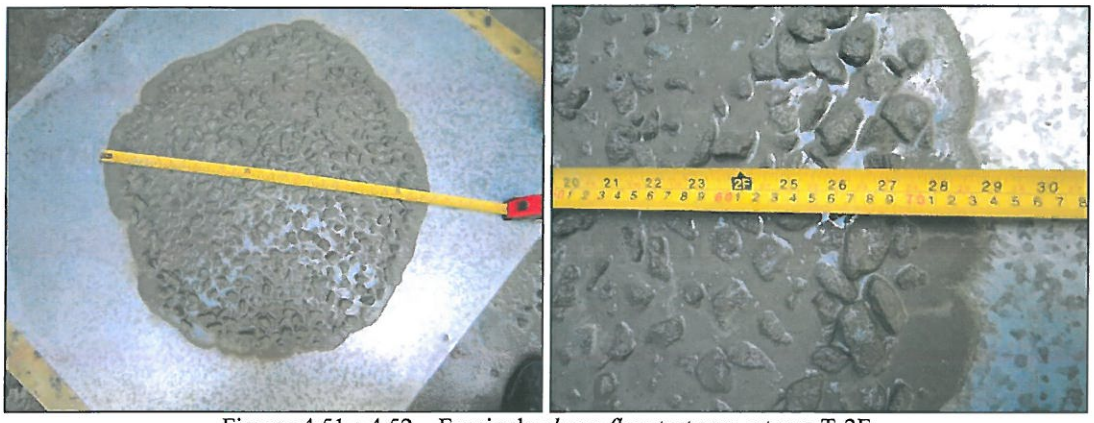
(•) Maior valor de f_c, f_{tD} e Ec, segundo NBR 12655:2006

A seguir, são apresentadas figuras com fotografias, microfotografias e gráficos relativos à avaliação nº 3 desta pesquisa.

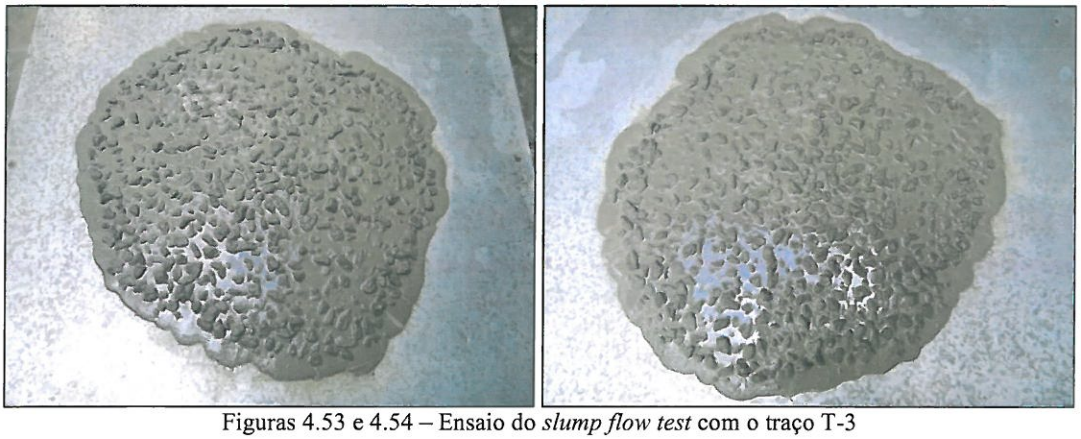
As figuras 4.49 a 4.56 ilustram alguns ensaios de caracterização dos concretos da avaliação nº 3 no estado fresco.



Figuras 4.49 e 4.50 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-2C



Figuras 4.51 e 4.52 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-2F



Figuras 4.53 e 4.54 – Ensaio do *slump flow test* com o traço T-3

Nas figuras 4.55 e 4.56, é apresentado o ensaio do abatimento do tronco de cone realizado com o traço T-5A, pois não foi possível realizar o *slump flow test*, uma vez que a adição de 1,00 kg de fibra de polipropileno por m³ de concreto impediu que o mesmo possuísse as condições mínimas, conforme a NBR 15823-1:2010, para ser autoadensável.



Figuras 4.55 e 4.56 – Ensaio do abatimento do tronco de cone com o traço T-5A

Os gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-2 são apresentados nas figuras 4.57 e 4.58.

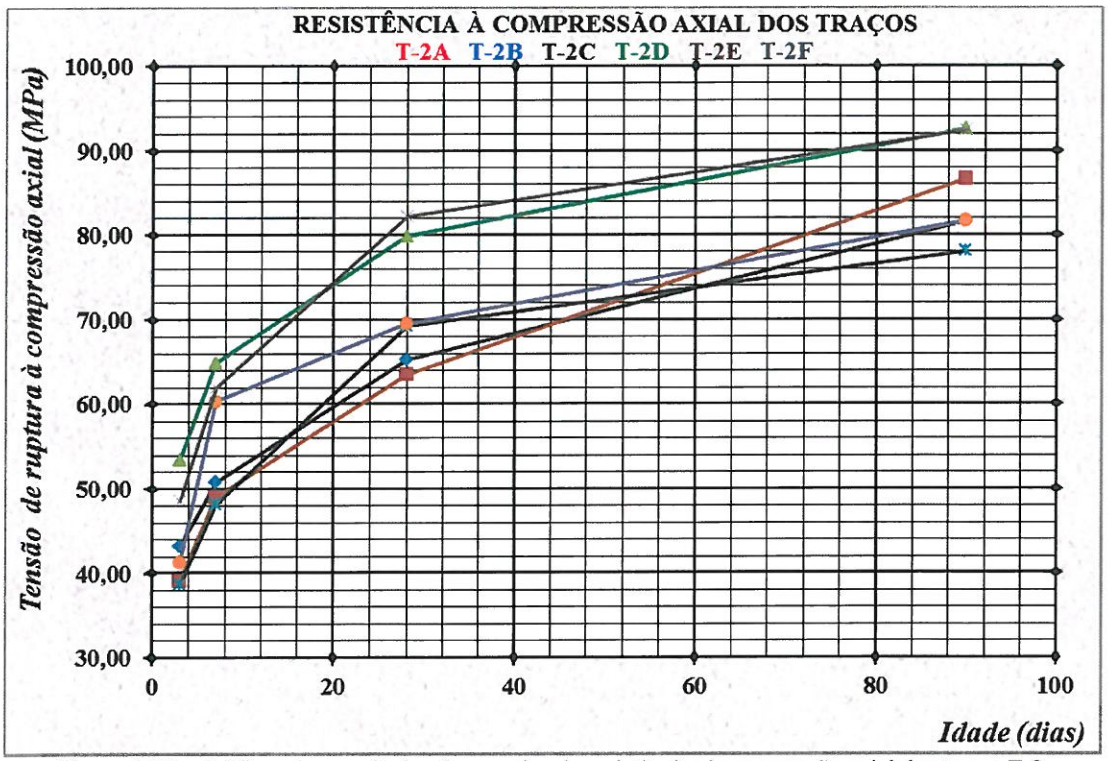


Figura 4.57 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-2

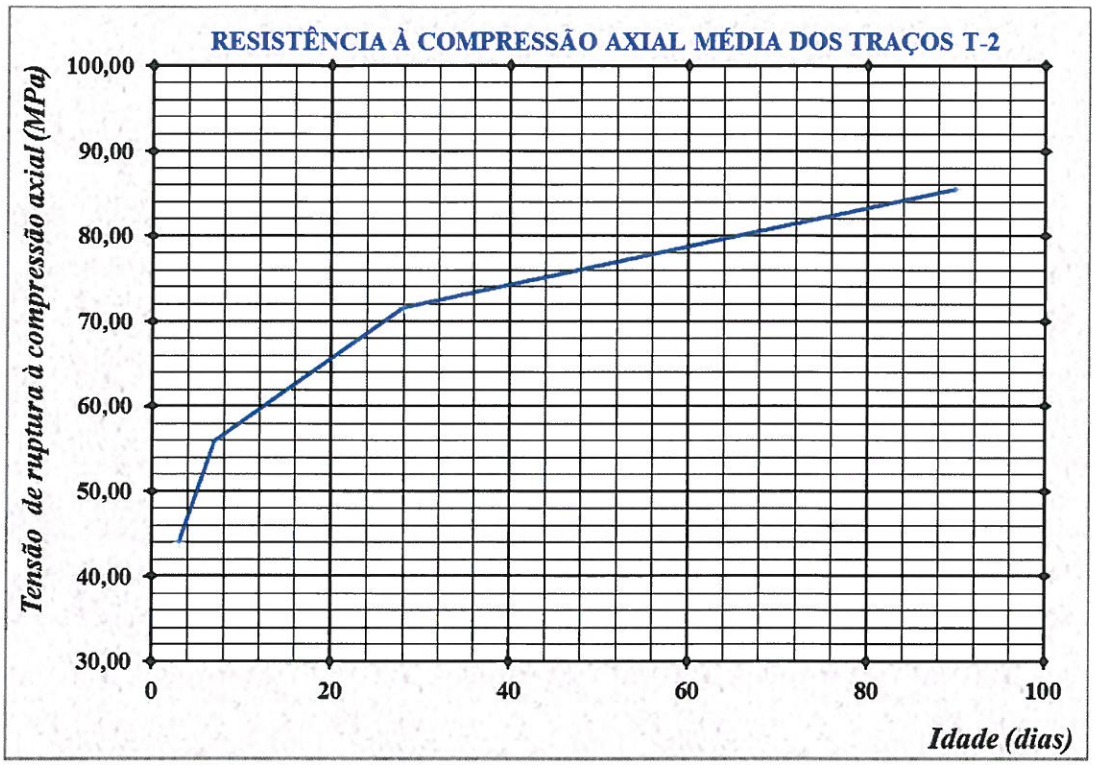


Figura 4.58 – Gráfico da média dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-2

A figura 4.59 ilustra os ensaios de resistência à compressão axial e de determinação do módulo estático de elasticidade à compressão do traço T-2C (90 dias).

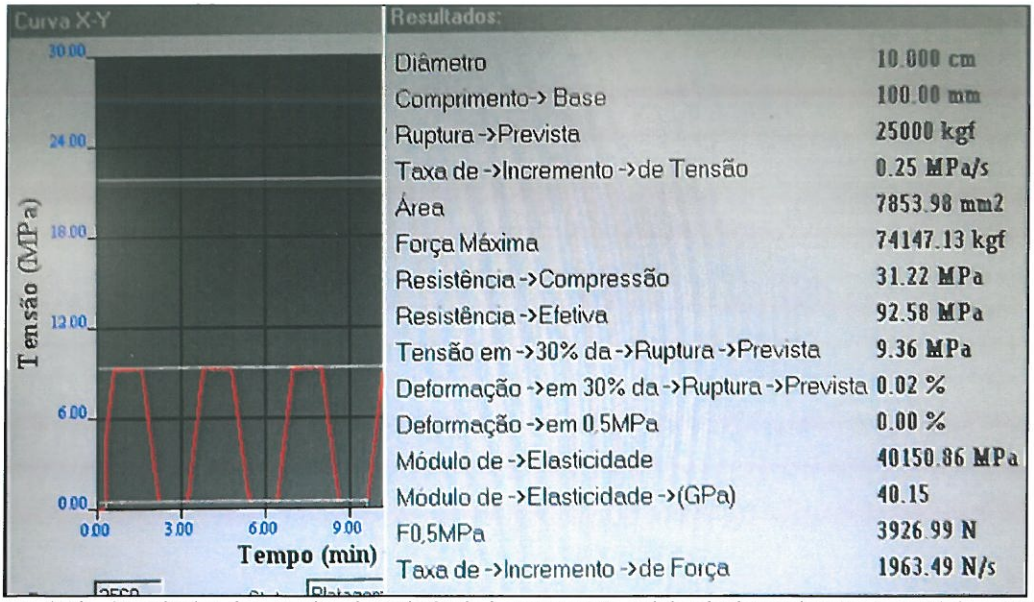
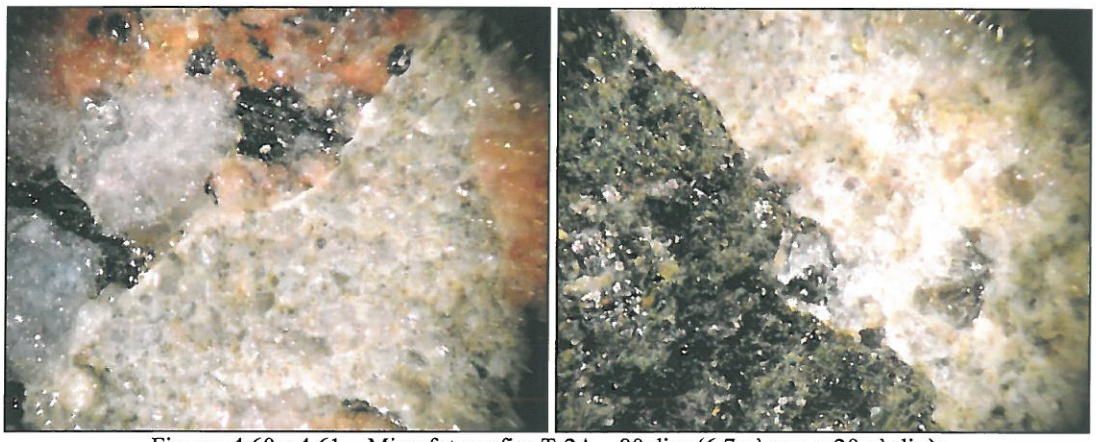


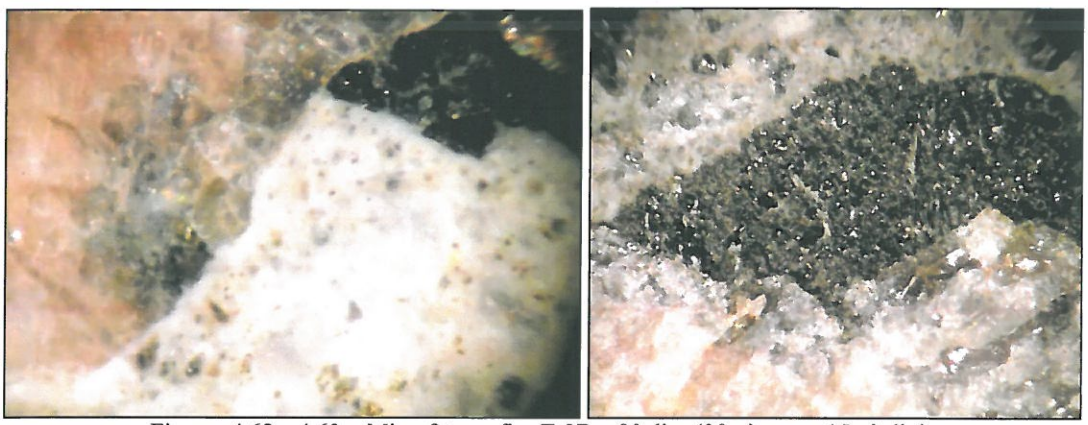
Figura 4.59 – Resultados dos ensaios de resistência à compressão axial e de determinação do módulo estático e elasticidade à compressão do traço T-2C (90 dias)

Nas figuras 4.60 a 4.77, são apresentadas microfotografias obtidas com microscópio ótico *Motic Images Plus 2.0 ML*, com legendas indicando a idade de cada corpos de prova e a ampliação da objetiva.

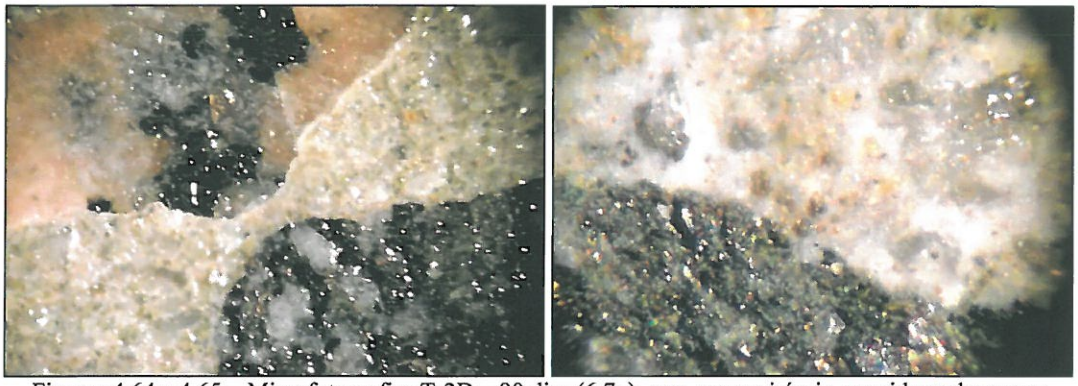
Nas microfotografias dos traços T-2 (figuras 4.60 a 4.69), não são visíveis os mesmos poros percebidos nos traços T-1, em função da menor quantidade de ar incorporado, uma vez que esses traços não contêm fibra de polipropileno. Entretanto, nas micrografias dos traços T-5 (4.74 a 4.77), esses poros são novamente observados, decorrentes da adição de fibra de polipropileno a esses concretos. São percebidas também zonas de transição compactas e fibras de polipropileno nas micrografias dos traços T-3, T-4 e T-5 (figuras 4.70 a 4.77).



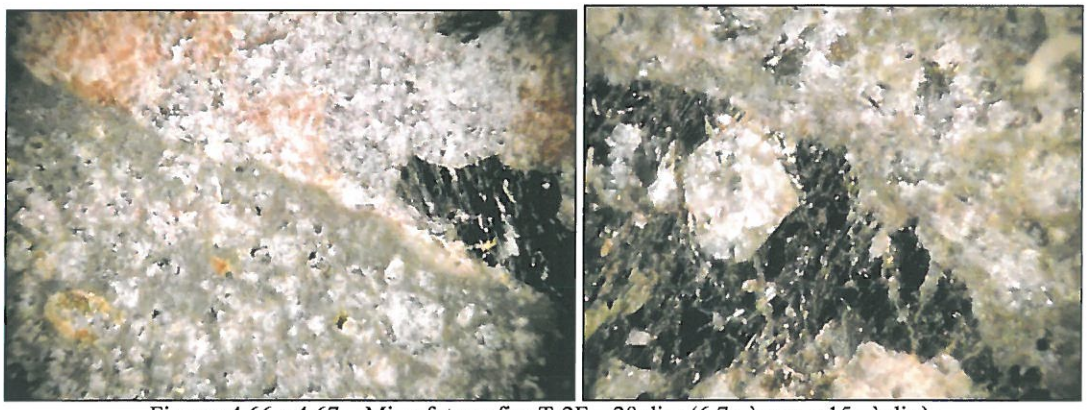
Figuras 4.60 e 4.61 – Microfotografias T-2A – 90 dias (6,7x à esq. e 20x à dir.):
densa zona de transição



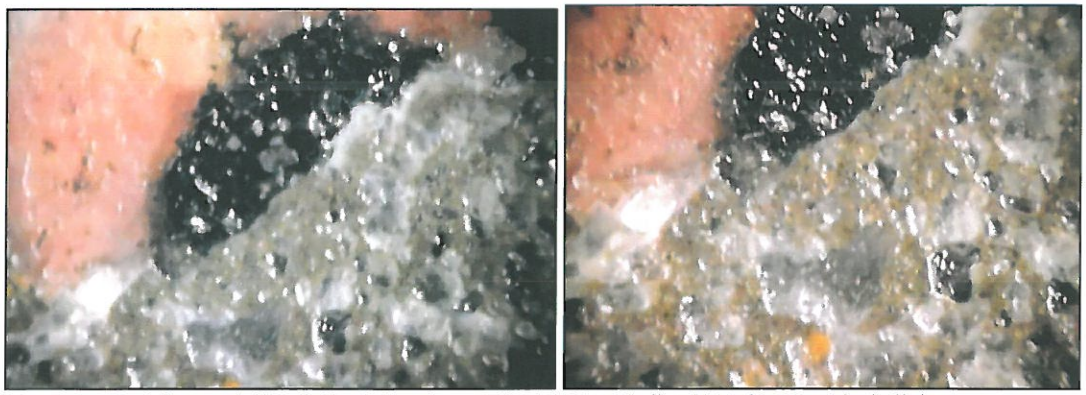
Figuras 4.62 e 4.63 – Microfotografias T-2B – 90 dias (30x à esq. e 15x à dir.):
zona de transição compacta, sem poros



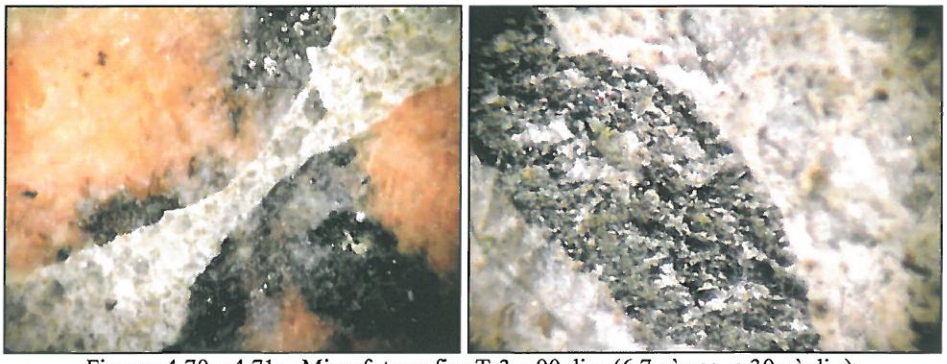
Figuras 4.64 e 4.65 – Microfotografias T-2D – 90 dias (6,7x): sem poros visíveis, considerando menor quantidade de ar incorporado, em função da ausência de fibra de polipropileno nos concretos T-2



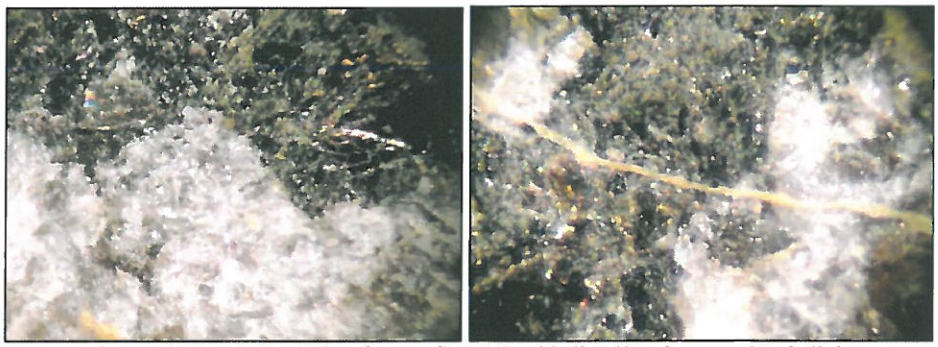
Figuras 4.66 e 4.67 – Microfotografias T-2F – 28 dias (6,7x à esq. e 15x à dir.): densas zonas de transição



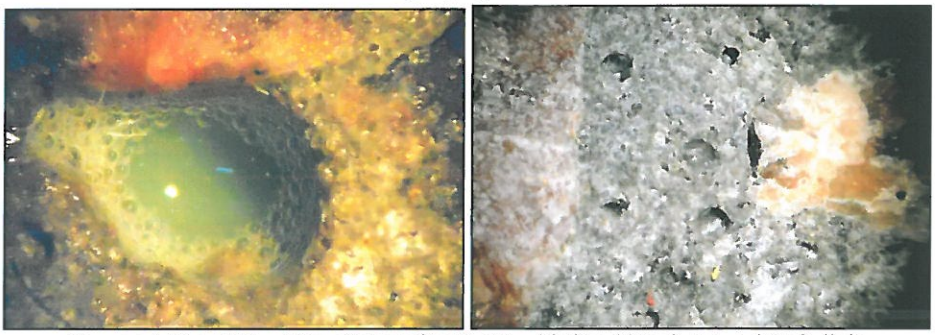
Figuras 4.68 e 4.69 – Microfotografias T-2F – 90 dias (6,7x à esq. e 10x à dir.): agregados graúdos e miúdos



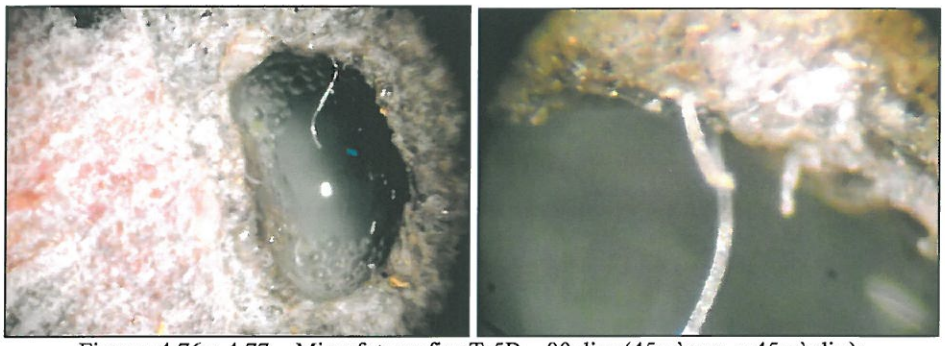
Figuras 4.70 e 4.71 – Microfotografias T-3 – 90 dias (6,7x à esq. e 30x à dir.):
densas zonas de transição



Figuras 4.72 e 4.73 – Microfotografias T-4 – 90 dias (25x à esq. e 45x à dir.):
fibras de polipropileno visíveis



Figuras 4.74 e 4.75 – Microfotografias T-5B – 90 dias (6,7x à esq. e 6,7x à dir.):
poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno nos traços T-5



Figuras 4.76 e 4.77 – Microfotografias T-5B – 90 dias (45x à esq. e 45x à dir.):
poro resultante do ar incorporado decorrente da adição de fibra de polipropileno nos traços T-5

Observa-se, pela figura 4.78, que houve certa similaridade entre os resultados dos ensaios de compressão axial dos concretos dos traços T-2, sem adição de fibras, com os dos traços T-1, T-3, T-4 e T-5, com emprego de fibra. A adição de fibra de polipropileno parece não ter influenciado significativamente as propriedades mecânicas dos concretos endurecidos, uma vez que o traçado da curva representativa das resistências médias à compressão axial dos traços T-2 (sem fibra) está situada aproximadamente entre as curvas dos traços T-1 (com 0,40 kg de fibra/m³ de concreto), T-3 (0,25 kg de fibra/m³), T-4 (0,60 kg de fibra/m³) e T-5 (1,00 kg de fibra/m³). Entretanto, como a curva dos resultados dos ensaios de compressão axial dos traços T-2 (sem fibra) está acima da curva representativa dos realizados com os traços T-5 (1,00 kg de fibra/m³), a partir dos 28 dias de idade, suspeita-se que maiores dosagens de fibra de polipropileno podem acarretar uma ligeira redução das resistências à compressão axial dos concretos endurecidos, o que era esperado, em função do ar incorporado.

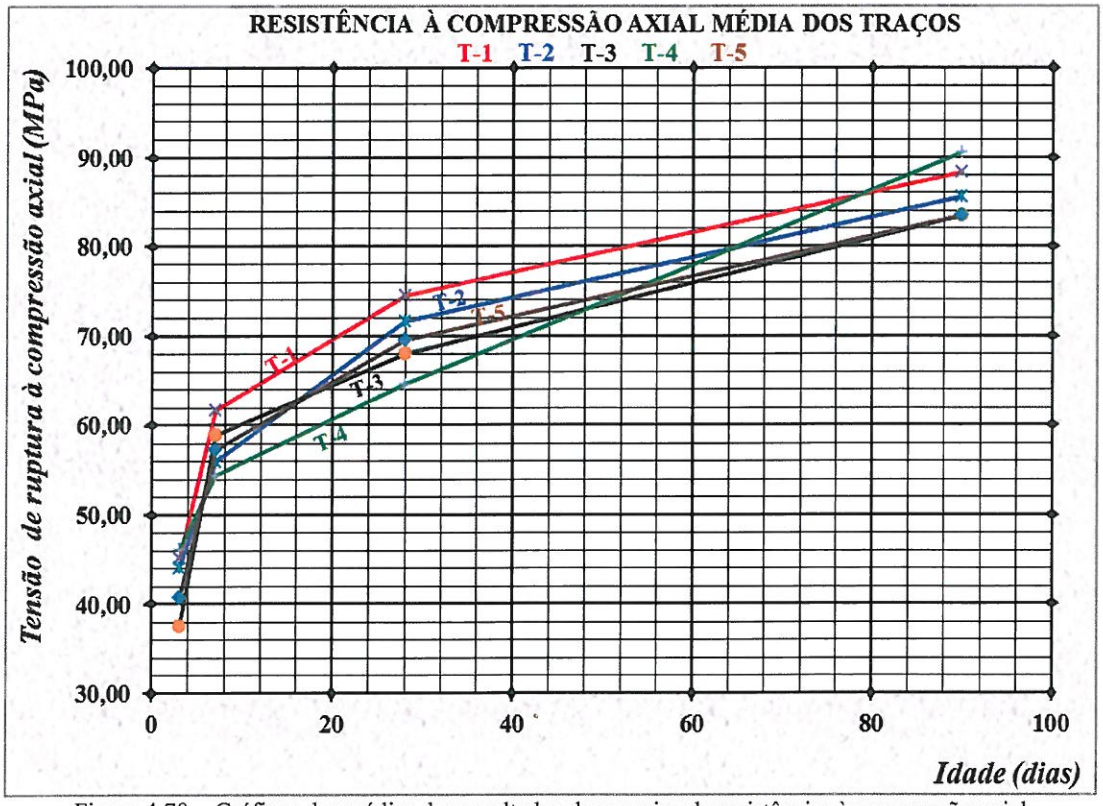


Figura 4.78 – Gráficos das médias dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1, T-2, T-3, T-4 e T-5

Considerando o gráfico da figura 4.79, foi realizada análise dos resultados dos ensaios de compressão axial dos concretos que foram produzidos nas avaliações 1 e 2 com a adição mineral Centrilit Fume S, brita da Britamazon/Capital e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB. Os traços que fazem parte desse grupo são: T-1F, com 0,40 kg de fibra/m³ de concreto; T-2D, sem fibra; T-3, com 0,60 kg de fibra/m³; e, T-5A, com 1,00 kg de fibra/m³. Por essa análise, foi possível perceber que, como a curva dos resultados dos ensaios de compressão axial do traço T-5B (1,00 kg de fibra/m³ de concreto) está acima das demais curvas representativas dos traços com dosagens inferiores de fibra de polipropileno, nas idades de 3,7 e 28 dias, ficando somente pouco abaixo da curva do traço T-1F (0,40 de fibra/m³), na idade de 90 dias, deduz-se que a adição de fibra de polipropileno parece não ter influenciado significativamente as propriedades mecânicas dos concretos endurecidos. Essa dedução entra em conflito, portanto, com a suspeita de que maiores dosagens de fibra de polipropileno podem acarretar numa ligeira redução das resistências à compressão axial dos concretos endurecidos, segundo o resultado da análise do gráfico da figura 4.78, apresentado na página anterior.

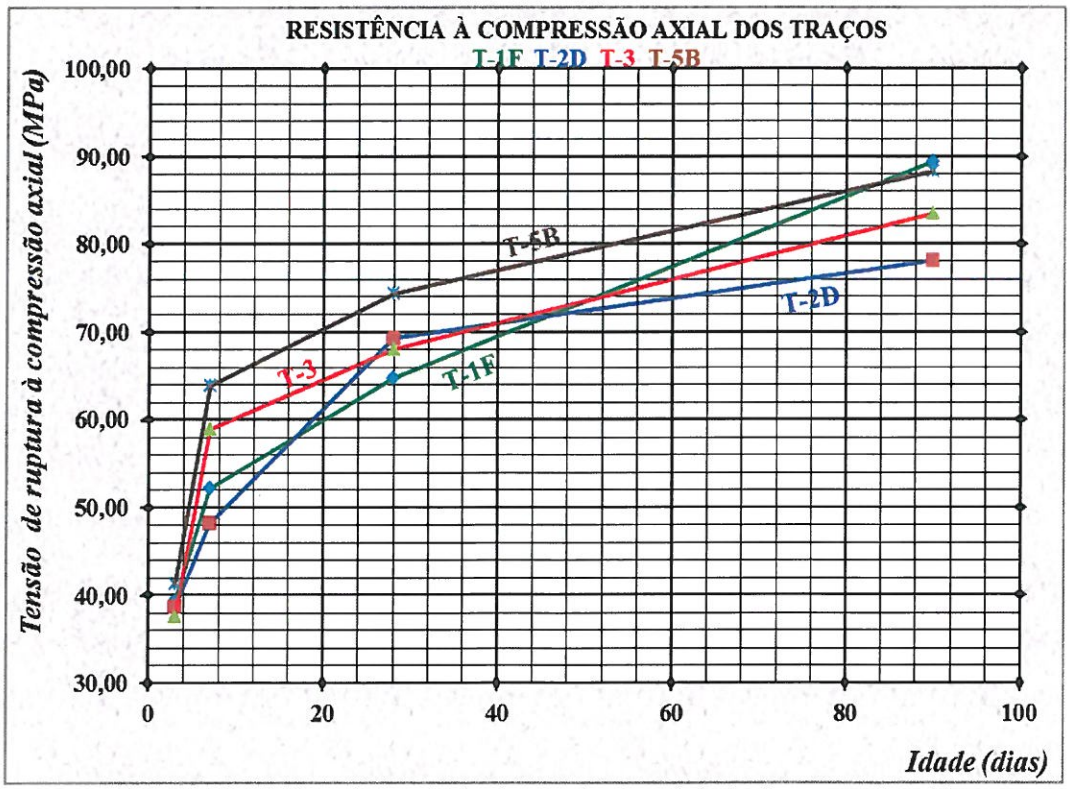


Figura 4.79 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1F, T-2D, T-3 e T-5B

Considerando o gráfico da figura 4.80, foi realizada análise dos resultados dos ensaios de compressão axial dos concretos que foram produzidos nas avaliações 1 e 2 com a adição mineral Silmix, brita da Britamazon/Capital e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB. Como os traços T-1A, T-1B e T-1C fazem parte desse grupo e foram produzidos com 0,40 kg de fibra/m³ de concreto, considerou-se nessa análise a média dos resultados de seus ensaios. O mesmo foi realizado para os traços T-2A, T-2B e T-2C, sem adição de fibras, que também fazem parte desse grupo. Além desses traços, os concretos T-4 (com 0,60 kg de fibra/m³) e T-5A (com 1,00 kg de fibra/m³) também fazem parte do mesmo grupo. Por essa análise, foi possível perceber que, como o traçado da curva representativa das resistências médias à compressão axial dos traços T-2 (sem fibra) está situada aproximadamente entre as curvas dos demais traços (com fibra), deduz-se, mais uma vez, que a adição de fibra de polipropileno parece não ter influenciado significativamente as propriedades mecânicas dos concretos endurecidos.

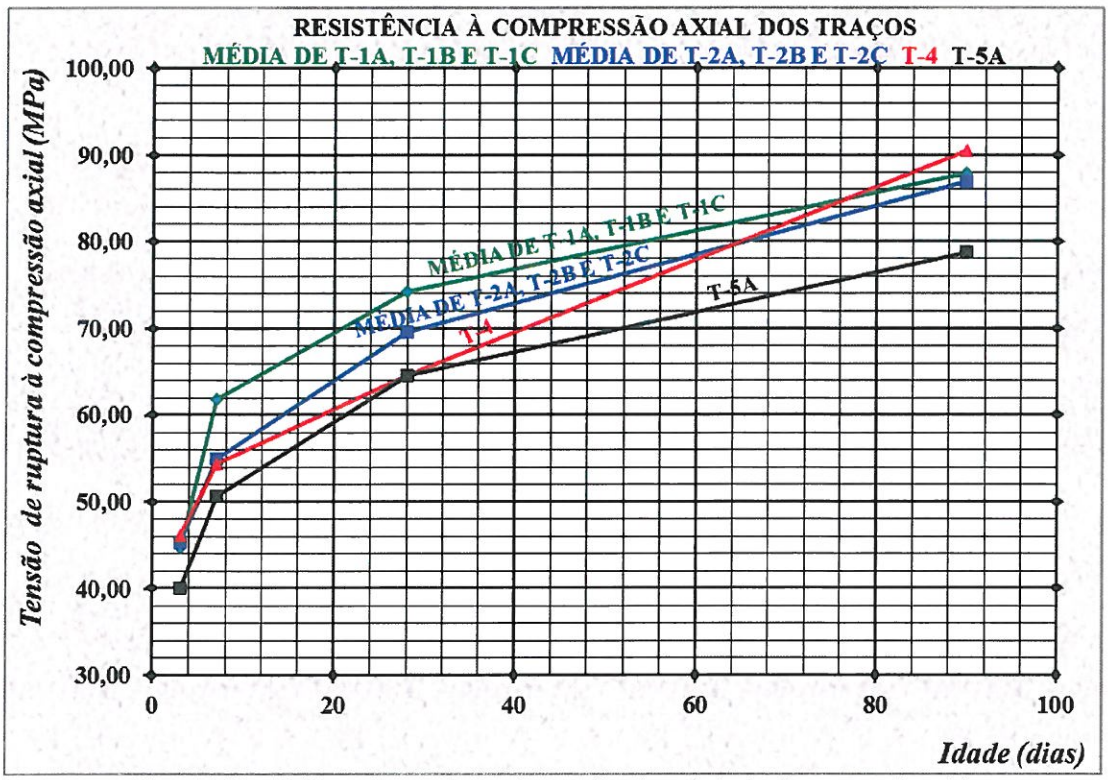


Figura 4.80 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços T-1A, T-1B, T-1C, T-2A, T-2B, T-2C, T-4 e T-5A

Entretanto, como a curva dos resultados dos ensaios de compressão axial dos traços T-2 (sem fibra), no gráfico da figura 4.80, está acima da curva representativa dos realizados com o traço T-5A (1,00 kg de fibra/m³), em qualquer idade, volta-se a suspeitar que maiores dosagens de fibra de polipropileno podem acarretar uma ligeira redução das resistências à compressão axial dos concretos endurecidos, confirmando, assim, o resultado da análise do gráfico da figura 4.78, apresentado na página 141.

Em função das análises realizadas, em relação aos gráficos das figuras 4.78, 4.79 e 4.80, pode-se afirmar que maiores dosagens de fibra de polipropileno podem ou não acarretar uma ligeira redução das resistências à compressão axial dos concretos endurecidos, devendo essa hipótese ser sempre considerada nesses casos.

Como as resistências à tração na compressão diametral dos concretos sem adição de fibras (traços T-2) variaram entre 5,74 e 6,76 MPa (média de 6,06 MPa) e dos concretos com fibra (traços T-1, T-3, T-4 e T-5) variaram entre 5,45 e 6,52 MPa (média de 5,81 MPa); como os módulos estáticos de elasticidade à compressão dos concretos sem adição de fibras (traços T-2) variaram entre 33,15 e 42,26 GPa (média de 37,56 GPa) e dos concretos com fibra (traços T-1, T-3, T-4 e T-5) variaram entre 36,74 e 45,94 GPa (média de 39,31 GPa); e, como não houve um padrão de variação entre esses valores que possa sinalizar qualquer influência das fibras nesses resultados, pode-se afirmar que houve similaridade entre os resultados de todos os ensaios realizados com os concretos, com e sem fibra, no estado endurecido, e a adição de fibra de polipropileno parece não ter influenciado significativamente as propriedades mecânicas desses concretos.

Como, para produção dos concretos com emprego das adições minerais Silmix e Centrilit Fume S, foi utilizado o traço adotado por Mendes (2002) na produção de CAD, com o objetivo de possibilitar a realização de uma análise comparativa e a avaliação dos resultados de ambas as pesquisas, essa comparação é realizada a seguir.

Os concretos produzidos por Mendes (2002) não atingiram as condições de classificação de um CAA, mas, como CAD, estão situados na fronteira entre as classes II (75 a 100 MPa) e III (100 a 125 MPa), de acordo com a classificação adotada pela tabela

2.1, uma vez que atingiram a tensão de ruptura média à compressão axial de 99,15 MPa, aos 28 dias.

O gráfico da figura 4.81 ilustra a evolução com a idade das tensões de ruptura à compressão axial dos concretos T-1D e T-2C, produzidos por esta pesquisa com e sem fibras, respectivamente, e o concreto RGS-026 produzido por Mendes (2002), com granito da região metropolitana de Curitiba (sem adição de fibras).

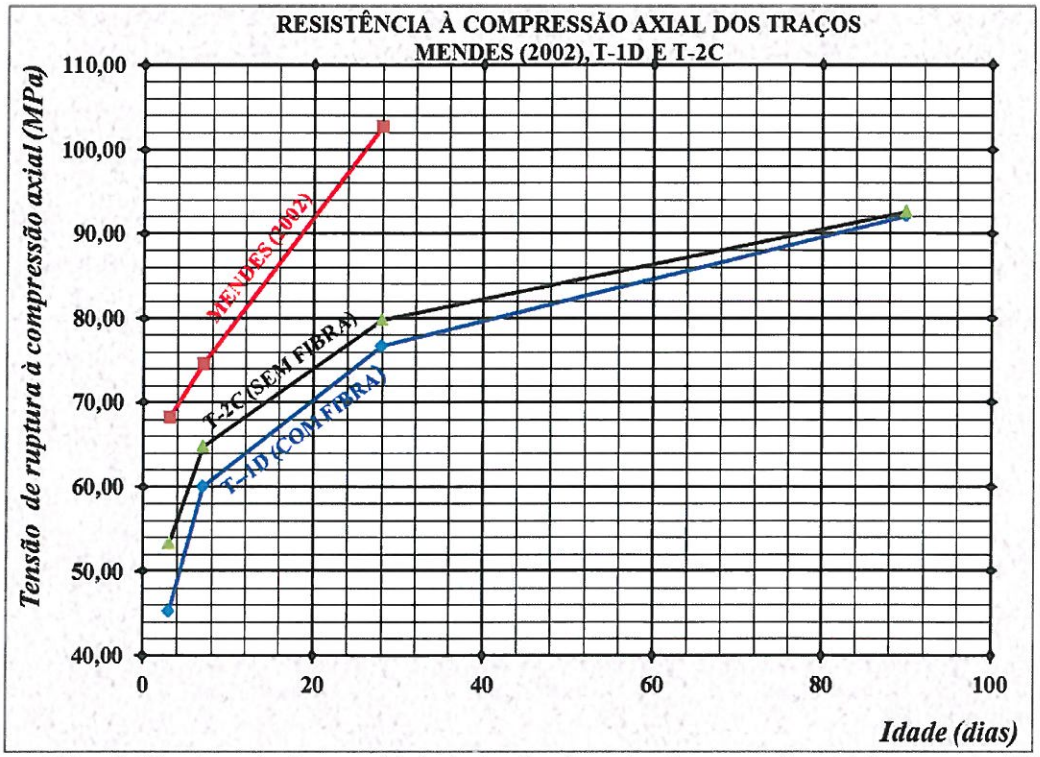


Figura 4.81 – Gráfico da evolução com a idade das tensões de ruptura à compressão axial dos concretos T-1D, T-2C e RGS-026, produzido por Mendes (2002), com granito da região metropolitana de Curitiba

Em todos os ensaios, os concretos produzidos por Mendes obtiveram maiores resultados. Observa-se que o cimento utilizado por Mendes (2002) foi o CP V-ARI, enquanto esta pesquisa utilizou o cimento CP II-Z-32, o que explica seus resultados mais baixos, em relação aos da pesquisa adotada como referência, na idade de 28 dias.

Como é não é simples comparar concretos produzidos com cimentos diferentes, uma vez que a resistência à compressão axial dos concretos produzidos com cimentos compostos com pozolana demanda prazos maiores para atingir valores mais elevados,

enquanto a dos concretos produzidos com cimentos de alta resistência inicial demanda curtos prazos os atingir os mesmos valores, a comparação aqui somente é viável, se realizada de forma aproximada entre as resistências obtidas aos 90 dias pelos concretos produzidos com o cimento CP II-Z-32 com as obtidas aos 28 dias pelos produzidos com o cimento CP V-ARI. Sendo assim, aos 90 dias de idade, a resistência à compressão axial média obtida com o traço adotado por esta pesquisa chega a 89% do valor obtido por Mendes (2002), aos 28 dias.

Essa diferença pode ser justificada não só pelos diferentes cimentos adotados, como também pelas demais diferenças entre os demais materiais componentes empregados em ambas pesquisas.

Outra diferença marcante entre as duas pesquisas diz respeito à qualidade do aditivo superplastificante. Mendes (2002) utilizou aditivo superplastificante à base de naftaleno sulfonado, enquanto esta pesquisa utilizou aditivos superplastificantes de última geração, à base de policarboxilatos. Essa diferença foi decisiva para os concretos desta pesquisa serem classificados como CAA.

Observa-se, ainda, que esta pesquisa possui como produto final um concreto autoadensável e de alto desempenho, destinado à fabricação de cais flutuantes da região amazônica, enquanto a pesquisa de Mendes (2002) visava apenas a obtenção de um de alto desempenho. Além disso, para esta pesquisa, não é viável a utilização de cimento CP V-ARI, uma vez que o cimento selecionado necessita possuir fornecimento facilitado e menor custo de aquisição na região metropolitana de Manaus.

Ao analisar, de acordo com a NBR 15823-1:2010, os resultados dos ensaios de *slump flow* e T_{500}, nas tabelas 4.11 e 4.13, relativas à avaliação nº 3 desta pesquisa, pode-se observar o seguinte:

a) os concretos T-2A, T-2B, T-2C e T-2D, sem adição de fibra de polipropileno e produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, são autoadensáveis e, quanto à fluidez, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* entre 680 e 690 mm), são classificados como SF 2, pois seus espalhamentos médios encontram-se no intervalo de 660 a 750 mm;

b) o concreto T-2E, sem adição de fibra de polipropileno e produzido com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159, não é autoadensável, uma vez que, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* < 500 mm), seu *slump flow* encontra-se abaixo de 550 mm;

c) o concreto T-2F, sem adição de fibra de polipropileno e produzido com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, é autoadensável e, quanto à fluidez, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* 710 mm), é classificado como SF 2, pois seu espalhamento médio encontra-se no intervalo de 660 a 750 mm;

d) o concreto T-3, com adição de 0,25 kg de fibra de polipropileno por m^3 de concreto e produzido com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, é autoadensável e, quanto à fluidez, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* de 680 mm), é classificado como SF 2, pois seu espalhamento médio encontra-se no intervalo de 660 a 750 mm;

e) os concretos T-4 (com 0,60 kg de fibra/m^3), T-5A (com 1,00 kg de fibra/m^3) e T-5B (com 1,00 kg de fibra/m^3), produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, não são autoadensáveis, uma vez que, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow* < 500 mm), seus espalhamentos médios encontram-se abaixo de 550 mm; e

f) tanto os concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, como os produzidos com o MC-PowerFlow 1102 (exceto os concretos T-2E, T-5A e T-5B), são todos classificados, quanto à viscosidade plástica aparente, pelo ensaio do tempo T_{500}, como VS 2, pois todos os tempos de espalhamento decorridos do início do ensaio até a cobertura completa da marca circular com diâmetro de 500 mm da placa base são superiores a 2s.

Outras observações desta avaliação da pesquisa são, a seguir, relacionadas:

a) os concretos produzidos com os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102, sem adição de fibra de polipropileno, cujos resultados dos ensaios encontram-se na tabela 4.11, são mais fluidos do que os produzidos na avaliação nº 2 desta pesquisa, com 0,40 kg/m^3 de fibra de polipropileno, cujos resultados dos ensaios encontram-se na tabela 4.9, ou seja, os concretos dos traços T-2 são mais autoadensáveis do que os concretos dos traços T-1, ou ainda, a

adição de 0,40 kg/m³ de fibra de polipropileno diminuiu a trabalhabilidade dos concretos frescos, em relação à dos concretos sem adição de fibras;

b) os concretos produzidos com os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102, sem adição de fibra de polipropileno, são menos viscosos do que os produzidos na avaliação nº 2 desta pesquisa, com 0,40 kg/m³ de fibra de polipropileno, ou seja, a adição de 0,40 kg/m³ de fibra de polipropileno aumentou a viscosidade plástica aparente dos concretos frescos, em relação aos concretos sem adição dessas fibras;

c) os concretos produzidos com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 são, em média, mais fluidos do que os concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535, uma vez que, entre todos os concretos produzidos com o traço T-1 (0,40 kg de fibra/m³), os espalhamentos máximos foram, respectivamente, 680 e 620 mm, e, com o traço T-2 (sem fibras), os espalhamentos máximos foram, respectivamente, 710 e 690 mm;

d) as pastas produzidas com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 (com tempo de escoamento de 29,13s no ensaio do funil de Marsh, com dosagem do aditivo no ponto de saturação) foram classificadas como menos fluidas, em relação às pastas produzidas com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 (com tempo de escoamento de 20,03s no ensaio do funil de Marsh, com dosagem do aditivo no ponto de saturação), conforme tópico 4.1.4.1, comprovando que os resultados dos ensaios de fluidez realizados com as pastas nem sempre possuem as mesmas tendências dos resultados dos ensaios de *slump flow* realizados com os concretos frescos, mesmo que seja adotada para as pasta e para os concretos a mesma dosagem do aditivo superplastificante, ou seja, em seu ponto de saturação, confirmando a mesma tendência já apontada na avaliação nº 2;

e) os ensaios de fluidez realizados com as pastas, pelo funil de Marsh, devem sempre ser confirmados, portanto, com os concretos, pelo *slump flow*;

f) como os resultados de fluidez e viscosidade obtidos com os concretos produzidos com os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102 são similares, apesar de, em média, os resultados de fluidez obtidos com concretos produzidos com o do aditivo MC-PowerFlow 1102 (710 mm de *slump*

flow, quando combinado com Centrilit Fume S e brita da Britamazon/Capital) serem ligeiramente melhores, em relação aos obtidos com o aditivo Sika ViscoCrete 3535 CB (690 mm de *slump flow*, quando combinado com Silmix ou Centrilit Fume S e brita da Britamazon/Capital), este último foi considerado preferível por esta pesquisa, uma vez que sua dosagem p/c é de 2,57%, no seu ponto de saturação, enquanto a dosagem do aditivo MC-PowerFlow 1102, nesse mesmo ponto, é de 4,67%, ou seja, o Sika ViscoCrete 3535 CB necessita de menor consumo para obter concretos com fluidez e viscosidade semelhantes;

g) o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159, empregado no traço T-2E, não gerou concreto autoadensável, confirmando os resultados dos ensaios realizados com as pastas, uma vez que, nesses ensaios, os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102 geraram pastas mais fluidas do que as produzidas com o aditivo MC-PowerFlow 1159;

h) quanto aos ensaios de *slump flow* dos traços T-2, foram obtidos os seguintes resultados com as combinações entre aditivo superplastificante e adição mineral, da mais para a menos fluida: MC-PowerFlow 1102 com a adição Centrilit Fume S (710 mm), Sika ViscoCrete 3535 CB com Silmix (690 mm) e Sika ViscoCrete 3535 CB com Centrilit Fume S (690 mm);

i) nos traços T-2, a combinação do aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB com Silmix gerou fluidez igual à da combinação desse mesmo aditivo com o Centrilit Fume S, no que diz respeito ao resultado do ensaio de *slump flow*, uma vez que ambas as combinações obtiveram, como melhor resultado de *slump flow*, o espalhamento de 690 mm;

j) nos traços T-2, a melhor combinação de adição mineral e aditivo superplastificante, no que diz respeito ao resultado do ensaio de *slump flow*, foi obtida pelo concreto T-2F (*slump flow* de 710 mm), quando foi empregada a combinação MC-PowerFlow 1102 com Centrilit Fume S, talvez, por haver maior compatibilidade entre ambos, uma vez que são fabricados e fornecidos pela mesma empresa (MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.);

k) quanto ao T_{500} *test*, o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB gerou concretos mais viscosos do que o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102,

na avaliação nº 2 (traços T-1, com 0,40 kg de fibra de polipropileno/m³ de concreto), enquanto que, na avaliação nº 3 (traços T-2, sem adição de fibra de polipropileno), ocorreu o inverso, pois o concreto T-2F, produzido com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, obteve 20,88s, como resultado do ensaio T_{500}, enquanto o maior resultado de T_{500} obtido pelos concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB foi de 17,27s.

Portanto, não há dúvida que existe uma interferência significativa das fibras de polipropileno nos resultados dos ensaios realizados com o concreto fresco, ou seja, na fluidez e na viscosidade plástica aparente do concreto e, consequentemente, em sua trabalhabilidade. Decidiu-se, dessa forma, nesta pesquisa, pelo emprego de baixo teor de fibras de polipropileno (0,40 kg de fibra de polipropileno/m³ de concreto) apenas para o controle do estado de fissuração por retração no concreto. Apesar de não interferirem significativamente nas resistências mecânicas dos concretos, ficou confirmado, pela presente pesquisa, que maiores dosagens de fibras de polipropileno podem influenciar o comportamento reológico do concreto, no que diz respeito à redução de sua fluidez e trabalhabilidade e no aumento de sua viscosidade.

Ao analisar, de acordo com a NBR 15823-1:2010, os resultados dos ensaios de *slump flow* e T_{500}, nas tabelas 4.9, 4.11 e 4.13, relativas às avaliações de números 1 e 2 desta pesquisa, respectivamente, pode-se concluir o seguinte:

a) os concretos produzidos com os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102, sem adição de fibra de polipropileno ou com adição de 0,25 kg/m³ de fibra de polipropileno, conforme resultados apresentados nas tabelas 4.11 e 4.13, são autoadensáveis e podem ser classificados quanto à fluidez, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow*), como SF 2, pois a média dos espalhamentos desses concretos encontra-se no intervalo de 660 a 750 mm;
b) os concretos produzidos com os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102 e com adição de 0,40 kg/m³ de fibra de polipropileno, conforme resultados apresentados na tabela 4.9, são autoadensáveis e podem ser classificados quanto à fluidez, pelo ensaio do espalhamento (*slump flow*), como SF

1, pois a média dos espalhamentos desses concretos encontra-se no intervalo de 550 a 650 mm;

c) os concretos produzidos com adição de 0,60 kg/m³ e 1,00 kg/m³ de fibra de polipropileno, conforme resultados apresentados na tabela 4.13, não são autoadensáveis, pois a média dos espalhamentos desses concretos é inferior a 550 mm, confirmando que teores de adição de fibras mais elevados alteram significativamente a reologia do concreto; e

d) quanto à viscosidade plástica aparente, todos os concretos autoadensáveis podem ser classificados como VS 2, conforme resultados apresentados nas tabelas 4.9, 4.11 e 4.13, pois todos os tempos de espalhamento são superiores a 2s.

Outras conclusões desta avaliação da pesquisa são, a seguir, relacionadas:

a) quanto maior a dosagem dessa fibra, menor a trabalhabilidade do concreto, uma vez que sua fluidez também se torna menor;

b) em relação à viscosidade plástica aparente, o concreto torna-se mais viscoso quanto maior for o teor aplicado de fibra de polipropileno; e

c) a partir desta análise, foi tomada a decisão de manter como padrão, para os concretos desta pesquisa, a dosagem de 0,40 kg de fibra de polipropileno por m³ de concreto, uma vez que dosagens a partir de 0,60 kg/m³ de fibra de polipropileno não resultaram em CAA.

Segundo a literatura, conforme já anteriormente mencionado, as fibras de polipropileno têm sido empregadas em teores fixos de 0,1% em volume, independentemente do desempenho esperado (TANESI e FIGUEIREDO, 1999). Uma dosagem de 900 gramas dessa fibra por metro cúbico de concreto corresponde a aproximadamente 0,1% do seu volume. Dessa forma, a dosagem de 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno corresponde a aproximadamente 0,045% do volume de concreto, um pouco menos da metade do teor recomendado pela literatura. Entretanto, essa dosagem não pode ser superior à adotada (0,40 kg/m³), uma vez que, para dosagens acima desse valor, o concreto deixa de ser CAA.

Para confirmação de que 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno têm a capacidade de reduzir nos concretos a área de fissuras associadas à retração, foi planejada a avaliação nº 4 desta pesquisa.

4.4 Resultados e Discussões da Avaliação nº 4

Na avaliação nº 4, foram produzidos os traços PCF, com 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno, e PSF, sem adição de fibras. Por meio da análise dos resultados desta avaliação, foi possível confirmar se a dosagem de 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno possui a capacidade de reduzir o estado de fissuração associado à retração. Com essa finalidade, foram moldadas duas placas de concreto, uma com o traço PCF, e outra, com o traço PSF.

Os resultados dos ensaios realizados com os concretos PCF e PSF nos estados fresco e endurecido são apresentados nas tabelas 4.14 e 4.15.

Tabela 4.14 – Resultados dos ensaios realizados com os traços PCF e PSF: média e desvio padrão

Ensaio	PCF		PSF	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	43,6	3,3	51,8	1,7
f_c: 7 dias (MPa)	55,6	3,1	61,9	2,6
f_c: 28 dias (MPa)	78,6	1,6	77,0	2,6
f_c: 90 dias (MPa)	88,2	2,9	88,1	5,5
f_{tD}: 28 dias (MPa)	5,36	0,22	5,46	0,27
Ec: 28 dias (GPa)	33,16	2,43	39,38	0,71
Ec: 90 dias (GPa)	37,39	0,23	39,15	1,24

Tabela 4.15 – Resultados dos ensaios realizados com os traços PCF e PSF

Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	PCF	PSF
Adição: Silmix	x	x
Brita: Britamazon/Capital	x	x
SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (p/c=2,57%)	x	x
Fibra de polipropileno (kg/m³)	0,40	0,00
Slump Flow Test (mm)	620	680
T_{500} *Test* (s)	39,45	14,63
Maior valor (•) de f_c a 3 dias (MPa)	46,5	53,4
Maior valor (•) de f_c a 7 dias (MPa)	58,9	64,8
Maior valor (•) de f_c a 28 dias (MPa)	80,2	79,8
Maior valor (•) de f_c a 90 dias (MPa)	91,2	92,6
Maior valor (•) de f_{tD} a 28 dias (MPa)	5,55	5,74
Maior valor (•) de Ec a 28 dias (GPa)	35,87	40,16
Maior valor (•) de Ec a 90 dias (GPa)	37,59	40,15

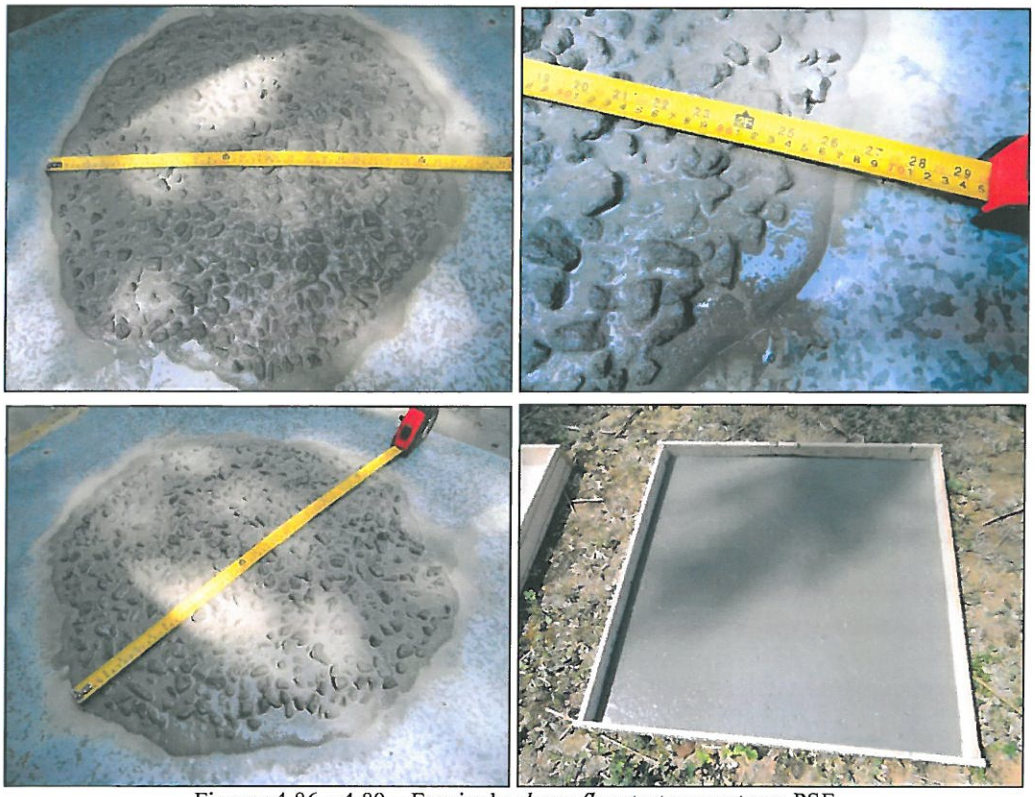
(•) Maior valor de f_c, f_{tD} e Ec, segundo NBR 12655:2006

A seguir, são apresentadas figuras com fotografias, microfotografias e gráficos relativos à avaliação nº 4 desta pesquisa.

As figuras 4.82 a 4.89 ilustram o processo de mistura, alguns ensaios de caracterização dos concretos da avaliação nº 4 no estado fresco e uma placa recém concretada.



Figuras 4.82 a 4.85 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PCF



Figuras 4.86 a 4.89 – Ensaio do *slump flow test* com o traço PSF

Os gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços PCF e PSF são apresentados na figura 4.90.

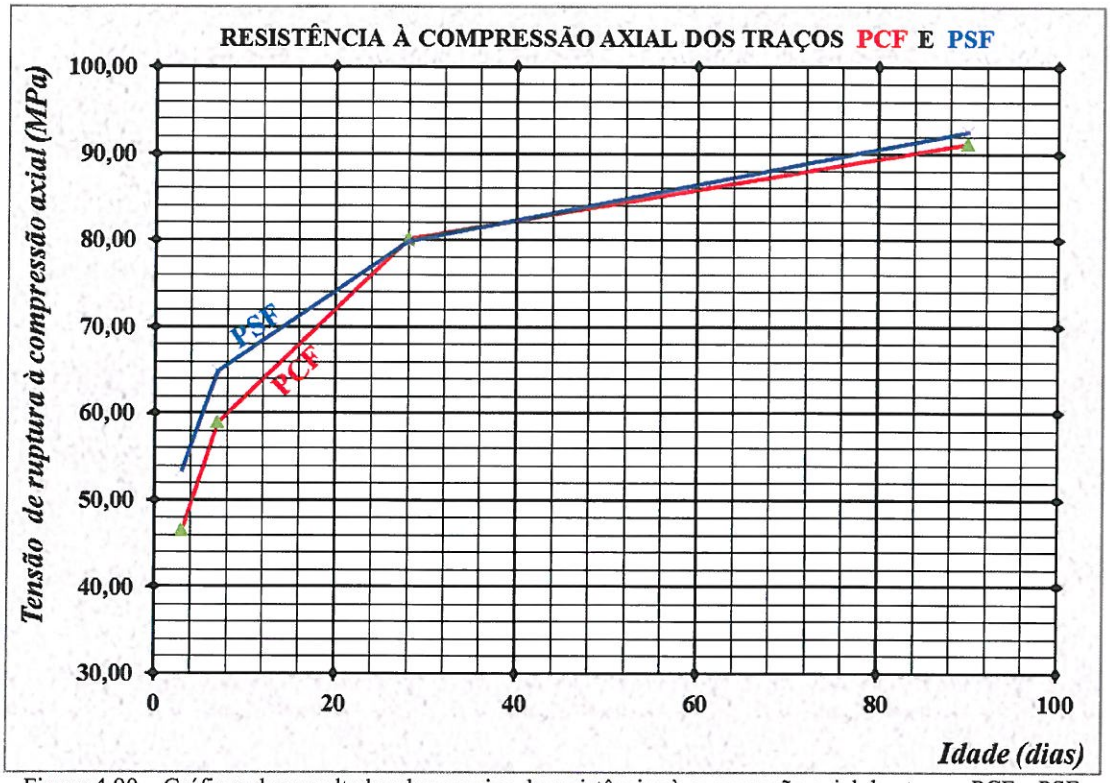
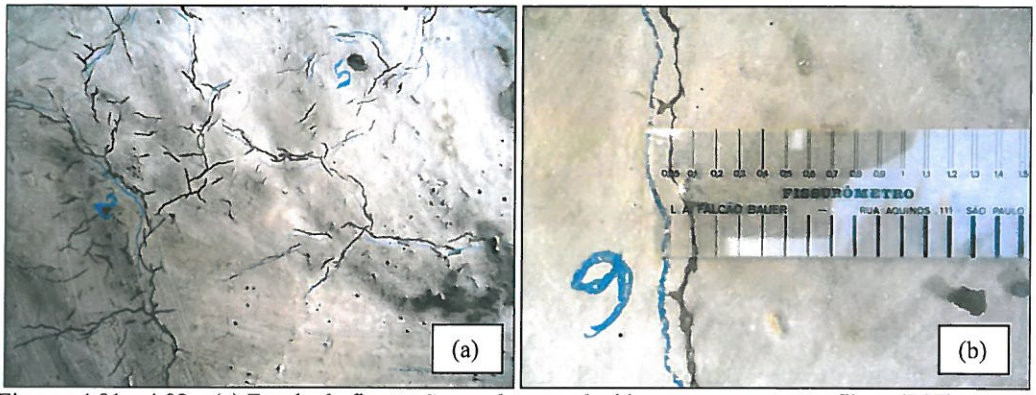


Figura 4.90 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços PCF e PSF

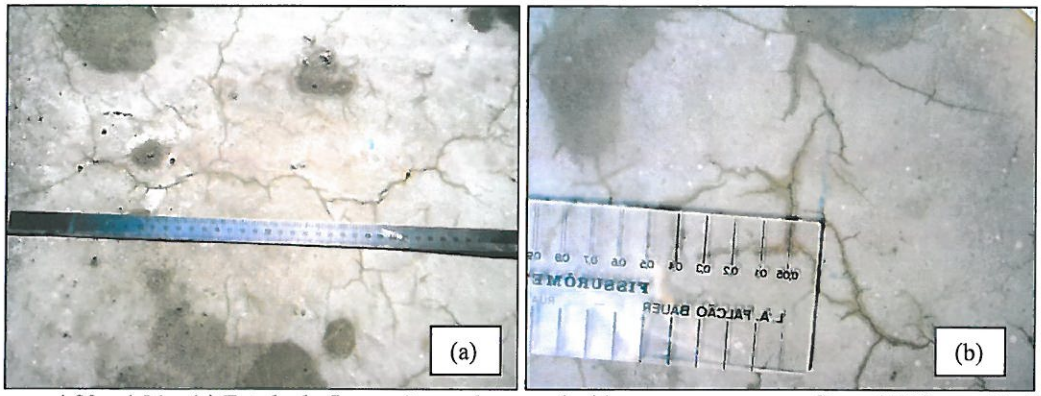
A medição das fissuras em ambas as placas seguiu o mesmo procedimento. Foram realizadas medições com régua e fissurômetro, diariamente, durante 90 dias.

Foram observadas algumas fissuras com no máximo 0,1 mm de abertura na placa moldada com concreto sem adição de fibra. Essas fissuras surgiram até 12 horas, após o lançamento do concreto, e não mais evoluíram. Após 90 dias, as fissuras que ainda existiam na placa sem fibras eram as mesmas que surgiram até 12 horas após sua moldagem. Na placa moldada com concreto com adição de 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno, não surgiram fissuras em momento algum, durante todo o prazo de 90 dias do monitoramento.

Fotografias apresentadas nas figuras 4.91 a 4.96 ilustram os resultados obtidos.



Figuras 4.91 e 4.92 – (a) Estado de fissuração na placa produzida com concreto sem fibras (PSF) com 12 horas, e (b) detalhe da abertura de uma fissura



Figuras 4.93 e 4.94 – (a) Estado de fissuração na placa produzida com concreto sem fibras (PSF) com 90 dias, e (b) detalhe da abertura de uma fissura

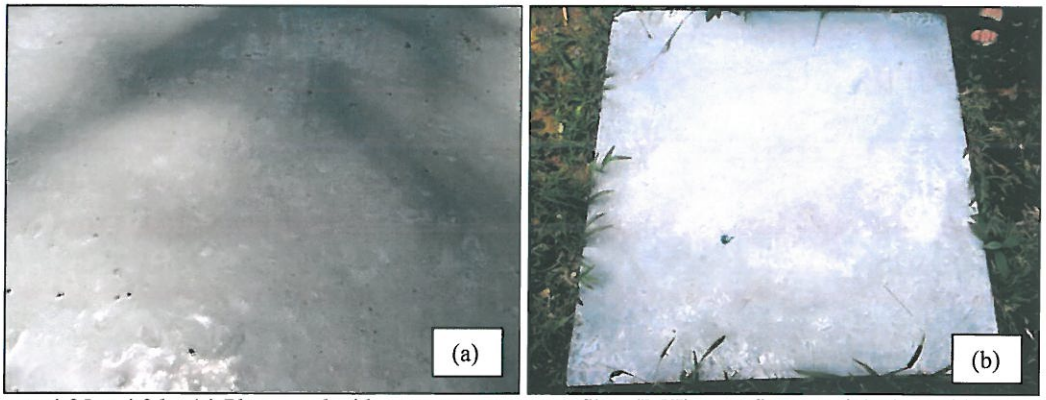


Figura 4.95 e 4.96 – (a) Placa produzida com concreto com fibra (PCF), sem fissuras visíveis, na idade de 12 horas; e (b) Placa produzida com concreto com fibras (PCF), sem fissuras visíveis, com idade de 90 dias

Observou-se ainda maior quantidade de ar incorporado no concreto do traço PCF do que no concreto do traço PSF, conforme previsto pela literatura (MINDESS, 1994). Portanto, já era esperado que a fibra de polipropileno provocasse essa incorporação de ar. As fotografias das figuras 4.97 e 4.98 ilustram essa observação.



Figura 4.97 – Maior quantidade de ar incorporado no concreto do traço PCF (placa com fibra)

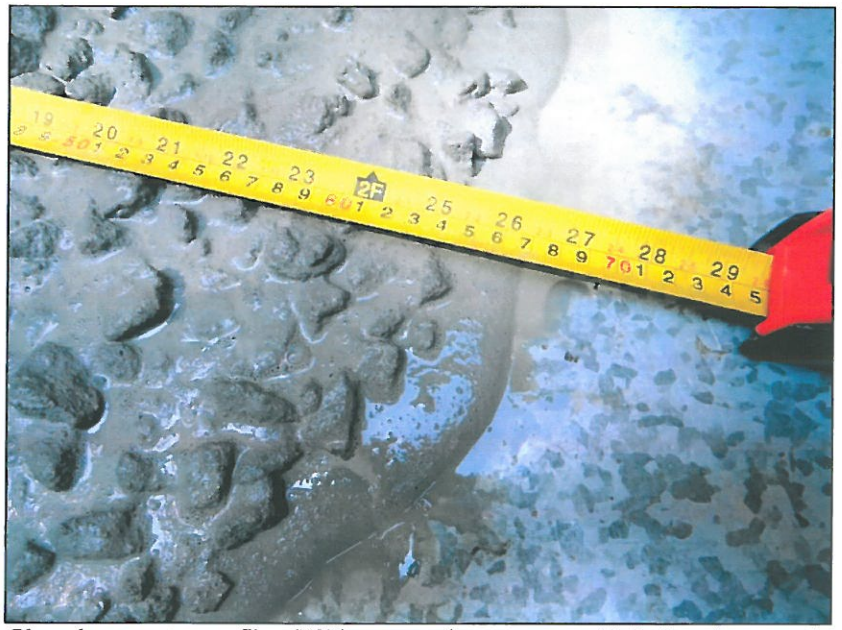


Figura 4.98 – Placa de concreto sem fibra (PSF), mostrando menor quantidade de ar incorporado em relação à placa de concreto com fibra (PCF)

Pelos resultados dos experimentos desta avaliação nº 4, por meio de medições de fissuras, realizadas com régua e fissurômetro, diariamente, durante 90 dias, em duas placas de 1,00 m x 1,00 m x 0,04 m, uma, moldada com concreto sem adição de fibras, e outra,

com adição de 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno, puderam ser obtidas as seguintes observações:

a) como as fissuras por retração surgiram apenas nas primeiras 12 horas, na placa moldada sem adição de fibras, conclui-se que essas fissuras surgiram em consequência de retração plástica e/ou autógena (a retração plástica comumente ocorre antes do concreto ter desenvolvido muita resistência, principalmente aqueles com alto consumo de cimento, em função do assentamento de materiais que compõem a mistura, tais como o cimento, agregados e demais inserções sólidas, e da ascensão da água, por diferenças de peso específico, podendo haver exsudação seguida de evaporação, e a retração autógena ocorre, quando as reações químicas do cimento Portland com a água geram calor e redução do volume da pasta de cimento hidratada);

b) a adição de 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno ao concreto de uma das placas, que corresponde a 0,045% do volume de concreto, foi suficiente para não permitir a fissuração, mesmo sem a aplicação de nenhum processo de cura;

c) este experimento confirmou os resultados dos ensaios de retração plástica em concretos convencionais e de alto desempenho, realizados por Soroushian e Ravanbakhsh (1998), que obtiveram redução estatisticamente significativa da fissuração por retração plástica com a adição de baixa fração volumétrica (0,06%) de fibras celulósicas, conforme comentado na revisão da literatura (SALES, 2006);

d) com a adição de fibras, o resultado do ensaio T_{500} *test* foi ampliado de 14,63 s para 39,45 s, sinalizando um aumento da viscosidade do concreto com adição de 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno, assim como maior coesão da mistura, em relação ao concreto sem adição de fibras;

e) percebeu-se, visualmente, que ocorreu maior incorporação de ar no concreto com adição de fibras, conforme fotografias apresentadas neste tópico da dissertação, não resultando em redução significativa nos resultados dos ensaios de resistência mecânica realizados;

f) para o concreto com adição de fibras de polipropileno, utilizado na moldagem de uma das placas, foram obtidos resultados muito similares aos do concreto sem fibras, nos ensaios de compressão axial (aos 28 dias: PSF = 79,8 MPa e PCF =

80,2 MPa, diferença de 0,5%; aos 90 dias: PSF = 92,6 MPa e PCF=91,2 MPa, diferença de 1,53%), tração na compressão diametral (PSF = 5,74 MPa e PCF = 5,55 MPa, diferença de 3,4%), e módulo estático de elasticidade longitudinal à compressão (aos 90 dias: PSF = 40,15 GPa e PCF = 37,59 GPa, diferença de 6,8%;

g) embora as fibras de polipropileno sejam capazes de reduzir a segregação, a exsudação, a deformação na retração plástica e a área de fissuras associadas à retração plástica e de aumentar a resistência ao fogo e à abrasão, conforme comentado na revisão da literatura (SOTEXFIL, sem data), adotou-se a dosagem de 0,40 kg/m³ de fibras de polipropileno como padrão para os concretos desta pesquisa, uma vez que, com esse teor de fibra, apesar da redução da trabalhabilidade (*slump flow* de 680 mm reduziu para 620 mm), o concreto foi mantido dentro dos limites de classificação de um CAA e de um CAD, sendo a fissuração por retração plástica e/ou autógena, totalmente eliminada, mediante inspeção visual; e

h) enfim, foi confirmado, dessa forma, o que já era esperado, de acordo com a revisão da literatura aqui apresentada (tópico 2.3.5 Fibras, página 55), ou seja, a adição de fibras em concreto, mesmo que em baixo teor, garante reduções substanciais no aparecimento de fissuras.

4.5 Resultados e Discussões da Avaliação nº 5

Na avaliação nº 5 desta pesquisa, foram produzidos os traços MC1102-A a MC1102-M e SIKA3535-A a SIKA3535-H. Por meio da análise dos resultados desta avaliação, foi possível verificar a viabilidade de utilização, como opção de material componente, a adição mineral Xypex Admix C-500 NF.

Alguns concretos produzidos com teores dos aditivos superplastificantes iguais ou próximos das dosagens ótimas correspondentes aos pontos de saturação determinados pelos ensaios com as pastas na avaliação nº 1 da pesquisa, foram repetidos, nesta avaliação nº 5, duas ou três vezes. Pelos ensaios com as pastas, as dosagens ótimas para os aditivos superplastificantes Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102 foram determinadas

com a relação sp/c em 0,90% e 1,40% e com a relação p/c em 2,57% e 4,67%, respectivamente.

Os resultados obtidos nos ensaios realizados são apresentados nas tabelas 4.16 a 4.19.

Tabela 4.16 – Resultados dos ensaios realizados com os traços MC1102: média e desvio padrão

Ensaio	MC1102-A		MC1102-B		MC1102-C		MC1102-D		MC1102-E		MC1102-F	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	36,8	1,2	38,5	0,9	43,3	1,0	38,7	0,8	33,3	2,0	39,4	1,7
f_c: 7 dias (MPa)	43,3	0,9	41,9	1,7	47,2	0,7	42,0	1,6	39,5	0,9	42,9	2,5
f_c: 28 dias (MPa)	46,6	2,7	44,7	1,3	49,2	1,8	45,2	1,6	42,1	2,4	45,1	2,9
Ensaio	MC1102-G		MC1102-H		MC1102-I		MC1102-J		MC1102-L		MC1102-M	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	33,4	0,7	39,6	0,9	36,2	2,3	32,7	2,3	32,7	0,8	42,0	1,4
f_c: 7 dias (MPa)	40,6	1,0	42,3	2,2	45,2	0,6	45,1	2,8	46,0	2,6	46,7	1,7
f_c: 28 dias (MPa)	42,6	2,5	47,0	1,5	48,5	1,7	49,5	3,4	49,1	3,4	50,5	3,2

Tabela 4.17 – Resultados dos ensaios realizados com os traços MC1102

Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	L	M
Adição: Xypex Admix C-500 NF	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
Brita: Britamazon/Capital	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
SP: MC-PowerFlow 1102 (teor em %)	2,67	2,67	3,00	3,33	3,60	4,00	4,67	4,67	5,00	5,00	5,00	4,67
Fibra de polipropileno (kg/m³)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Slump Flow Test (mm)	605	600	615	640	650	665	710	715	700	710	705	180(*)
T_{500} *Test* (s)	20,45	20,21	20,67	20,45	20,58	18,10	14,89	14,64	13,47	13,58	13,55	(**)
Maior valor (•) de f_c a 3 dias (MPa)	38,2	39,4	43,9	39,5	35,2	41,1	33,9	40,6	38,8	35,0	33,2	43,5
Maior valor (•) de f_c a 7 dias (MPa)	44,3	43,5	47,9	43,8	40,3	45,7	41,7	44,8	45,3	48,2	48,4	48,6
Maior valor (•) de f_c a 28 dias (MPa)	49,6	46,2	50,8	46,9	44,8	48,3	45,2	48,8	50,1	53,1	52,8	53,8

(*) Ensaio do abatimento do tronco de cone (mm), pela NBR NM 67:1998

(**) Ensaio não realizado

(•) Maior valor de f_c, segundo NBR 12655:2006

Tabela 4.18 – Resultados dos ensaios realizados com os traços SIKA3535: média e desvio padrão

Ensaio	SIKA3535-A		SIKA3535-B		SIKA3535-C		SIKA3535-D	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	37,0	0,4	42,1	1,0	34,3	1,1	34,4	2,9
f_c: 7 dias (MPa)	49,8	2,9	46,3	2,2	47,6	2,0	40,9	2,4
f_c: 28 dias (MPa)	52,7	3,1	51,2	1,8	51,2	1,8	45,9	1,7
Ensaio	SIKA3535-E		SIKA3535-F		SIKA3535-G		SIKA3535-H	
	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ	$\bar{Y}$	δ
f_c: 3 dias (MPa)	41,7	1,4	43,4	2,0	33,8	1,3	37,2	1,6
f_c: 7 dias (MPa)	46,7	0,9	46,1	3,1	44,6	1,4	42,1	2,7
f_c: 28 dias (MPa)	47,8	1,7	49,8	1,7	46,9	2,7	47,5	1,9

Tabela 4.19 – Resultados dos ensaios realizados com os traços SIKA3535

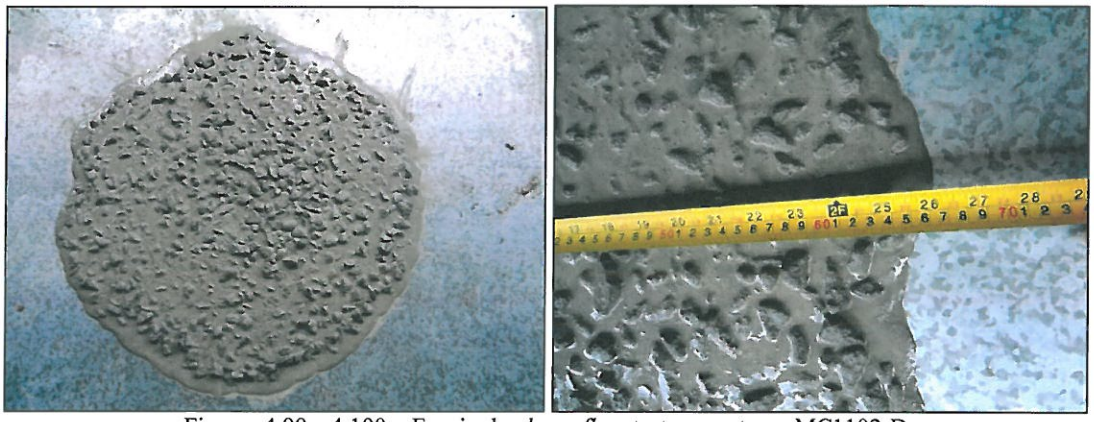
Discriminação dos Materiais Empregados ou dos Ensaios Realizados	A	B	C	D	E	F	G	H
Adição: Xypex Admix C-500 NF	x	x	x	x	x	x	x	x
Brita: Britamazon/Capital	x	x	x	x	x	x	x	x
SP: Sika ViscoCrete 3535 CB (teor em %)	**2,29**	**2,57**	**2,57**	**2,57**	**2,69**	**2,86**	**3,43**	**4,29**
Fibra de polipropileno (kg/m³)	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40
Slump Flow Test (mm)	355	460	465	455	500	550	605	600
T_{500} *Test* (s)	(**)	(**)	(**)	(**)	33,28	32,44	16,47	12,86
Maior valor (•) de f_c a 3 dias (MPa)	37,4	43,1	35,1	37,3	42,7	45,1	35,1	38,6
Maior valor (•) de f_c a 7 dias (MPa)	52,8	48,7	49,2	43,2	47,5	49,3	45,9	44,7
Maior valor (•) de f_c a 28 dias (MPa)	56,1	53,2	53,0	47,3	49,7	51,6	49,8	49,6

(**) Ensaio não realizado

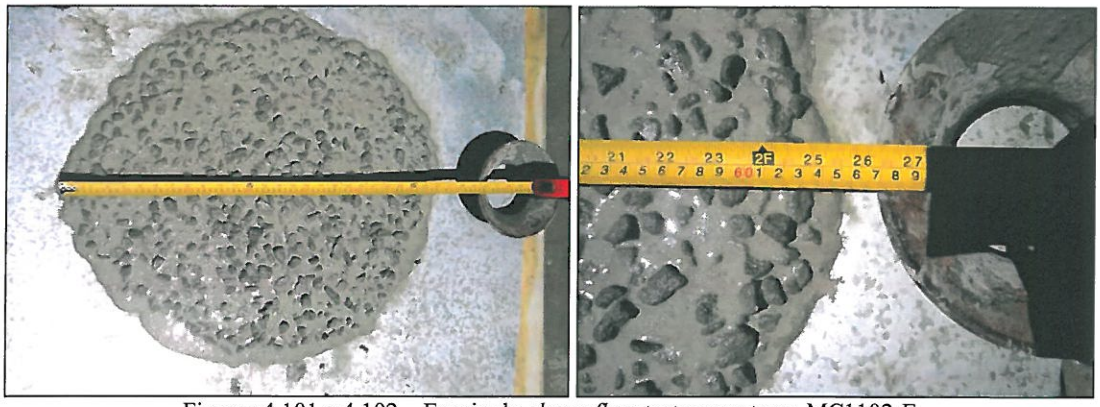
(•) Maior valor de f_c, segundo NBR 12655:2006

A seguir, são apresentadas figuras com fotografias, microfotografias e gráficos relativos à avaliação nº 5 desta pesquisa.

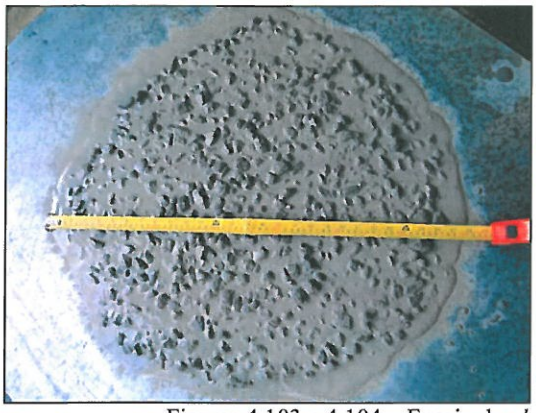
As figuras 4.99 a 4.108 ilustram alguns ensaios de caracterização dos concretos da avaliação nº 5 no estado fresco.



Figuras 4.99 e 4.100 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-D



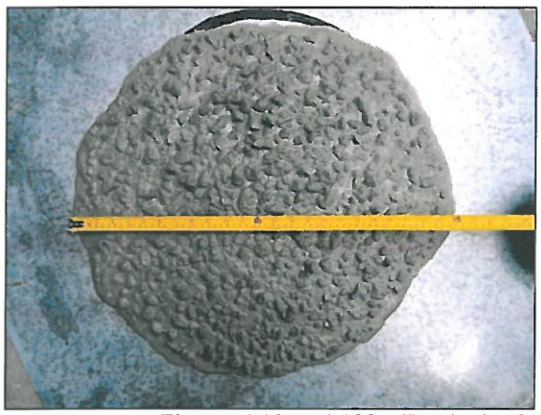
Figuras 4.101 e 4.102 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-E




Figuras 4.103 e 4.104 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-G




Figuras 4.105 e 4.106 – Ensaio do *slump flow test* com o traço MC1102-J




Figuras 4.107 e 4.108 – Ensaio do *slump flow test* com o traço SIKA3535-F

Os gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos concretos da avaliação nº 5 são apresentados nas figuras 4.109 a 4.111.

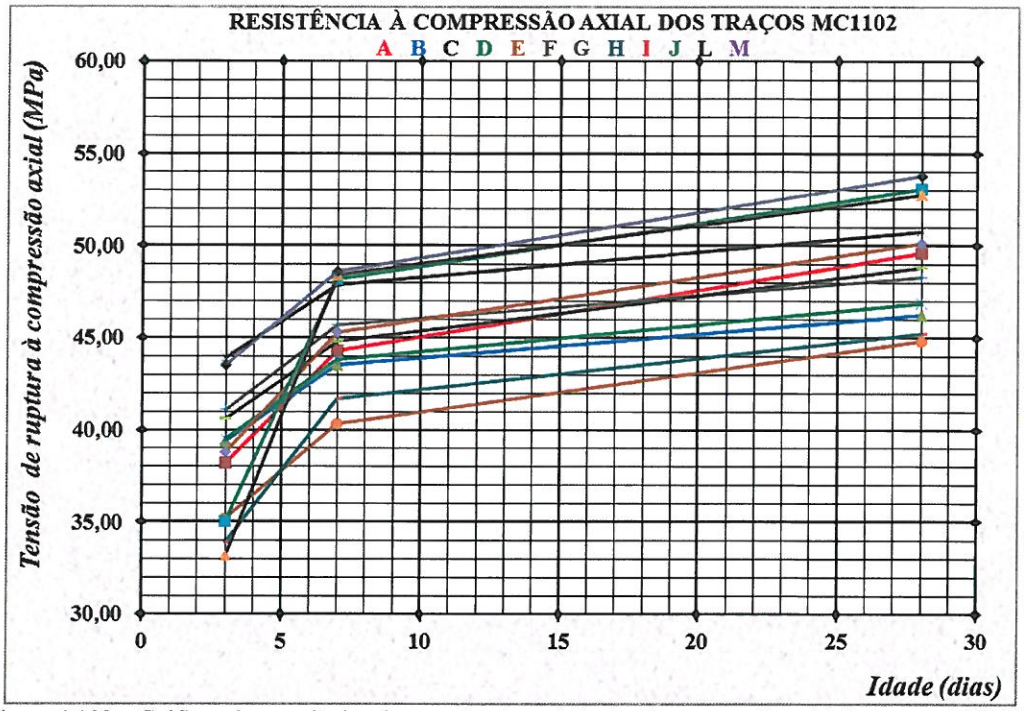


Figura 4.109 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços MC1102

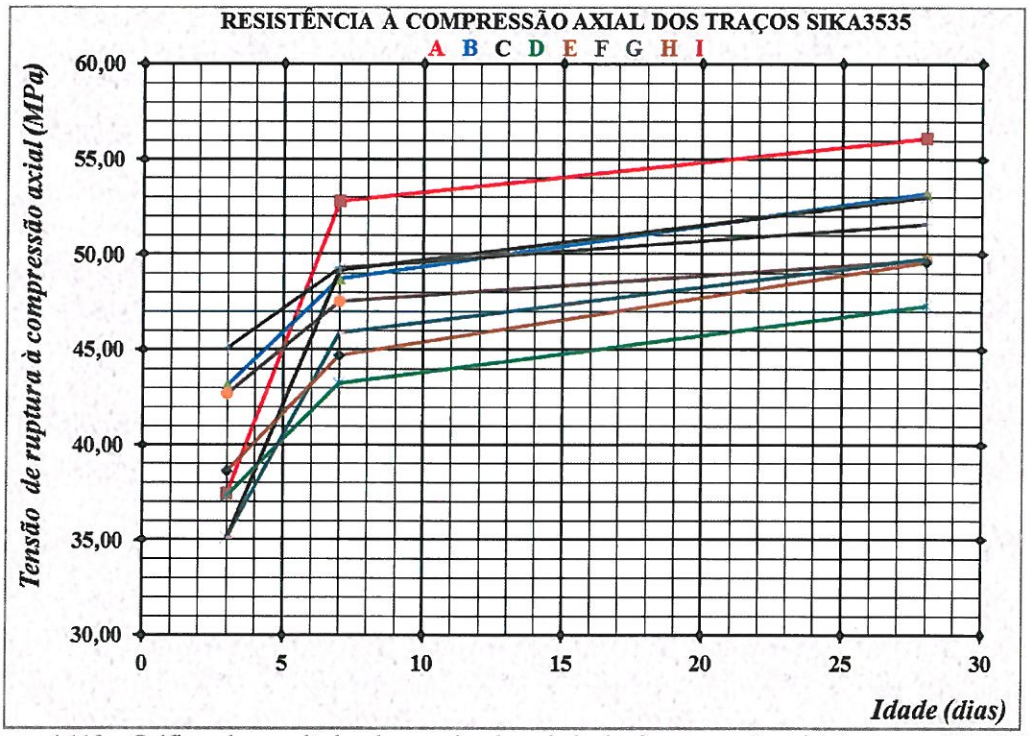


Figura 4.110 – Gráficos dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços SIKA3535

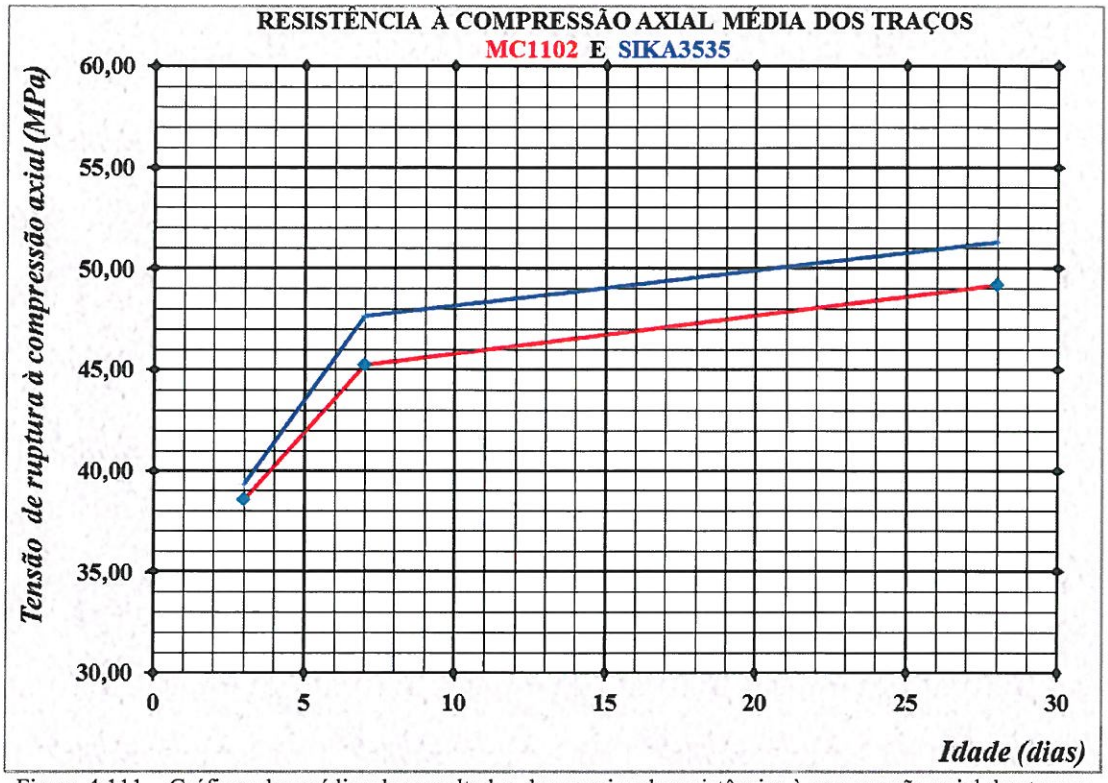


Figura 4.111 – Gráficos das médias dos resultados dos ensaios de resistências à compressão axial dos traços MC1102 e SIKA3535

Com relação aos concretos produzidos com emprego da adição Xypex Admix C-500 NF, pode-se afirmar que os resultados dos ensaios de compressão axial não foram satisfatórios, uma vez que:

a) os concretos denominados MC1102 obtiveram em média 48,78 MPa nos ensaios de compressão axial, aos 28 dias, não atingindo assim 50 MPa, que é o valor mínimo da tensão de ruptura necessária para obtenção de um CAD; e
b) os concretos denominados SIKA3535 atingiram em média 51,29 MPa nos ensaios de compressão axial, aos 28 dias, sendo essa tensão de ruptura muito próxima do valor mínimo necessário para o concreto denominar-se CAD.

Como os concretos produzidos com emprego da adição Xypex Admix C-500 NF não foram satisfatórios, nesta pesquisa, os ensaios de compressão axial foram realizados somente até os 28 dias, e os demais ensaios previstos para os concretos no estado endurecido não foram realizados. Portanto, a utilização do Xypex Admix C-500 NF como adição mineral foi descartada, uma vez que os concretos produzidos com seu emprego não

puderam ser classificados como CAD, considerando os materiais e as demais condições desta pesquisa, não eliminando, entretanto, a possibilidade de que, em outras circunstâncias, resultados satisfatórios possam ser obtidos com esse produto.

A figura 4.112 mostra uma fotografia de alguns corpos de prova de um traço que foi descartado por esta pesquisa por apresentar diferentes colorações na superfície do seu concreto, no estado endurecido, demonstrando que esse concreto não obteve homogeneidade adequada em sua mistura.

O surgimento desse problema demonstrou a dificuldade, nesta pesquisa, de conseguir homogeneidade com as misturas dos concretos produzidos com o Xypex Admix C-500 NF, quando foi empregado o procedimento de mistura denominado operação de dosagem a seco, que foi o primeiro a ser adotado. A boa qualidade da mistura somente foi obtida, nesta pesquisa, por meio do procedimento denominado operação realizada na obra, detalhado no item 3.3 Produção dos Concretos.



Figura 4.112 – Corpos de prova com diferentes colorações em sua superfície

A ficha técnica do Xypex Admix C-500 NF encontra-se reproduzida no Apêndice, onde, entre outras informações, há a afirmação de que o Xypex Admix C-500 NF é um

aditivo único para impermeabilização, proteção e melhoria da qualidade do concreto, que consiste em uma mistura de cimento Portland, sílica e diversas substâncias químicas ativas e que ao ser adicionado ao concreto, suas substâncias ativas reagem com a umidade do concreto fresco e com os subprodutos da reação de hidratação do cimento, causando uma reação catalítica, que é uma reação gera uma formação cristalina insolúvel nos poros e capilaridades do concreto tornando-o permanentemente selado contra a penetração da água ou substâncias agressivas de qualquer direção e também protegido contra a deterioração mesmo em condições ambientais severas.

Esta pesquisa não detectou o motivo pelo qual os concretos produzidos com o Xypex Admix C-500 NF não obtiveram resultados satisfatórios nos ensaios de compressão axial, no que diz respeito á obtenção de CAD.

4.5.1 Estudo Comparativo dos Pontos de Saturação dos Aditivos Superplastificantes em Concretos e Pastas

Para análise dos pontos de saturação dos aditivos superplastificantes, 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 Xypex Admix C-500 NF, na avaliação nº 5 da pesquisa, com os resultados dos ensaios do funil de Marsh e do miniabatimento de Kantro obtidos com as pastas confeccionadas sem nenhuma adição mineral, na avaliação nº 1, de caracterização dos materiais componentes, conforme tópico 4.1.4.1.

A análise comparativa entre os resultados dos ensaios com as pastas e os realizados com concretos no estado fresco foi realizada somente na avaliação nº 5 da pesquisa. Não pôde ser realizada com os concretos produzidos nas avaliações anteriores, uma vez que, nelas, os concretos foram produzidos com emprego somente dos aditivos superplastificantes em suas dosagens ótimas, correspondentes aos pontos de saturação determinados pelos ensaios com as pastas, na avaliação nº 1 da pesquisa. Somente na avaliação nº 5, foram empregadas diferentes dosagens de aditivos superplastificantes na produção dos concretos.

4.5.1.1 Resultados dos Ensaios Realizados com Pastas e Concretos Produzidos com o Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow 1102

No gráfico da figura 4.113, são representados os resultados dos ensaios do funil de Marsh, realizados com as pastas confeccionadas na avaliação nº 1 (sem adição mineral), e também os resultados dos ensaios de *slump flow*, realizados com os concretos produzidos com a adição Xypex Admix C-500 NF.

Tanto as pastas, quanto os concretos, foram produzidos com o mesmo aditivo superplastificante, o MC-PowerFlow 1102. Na figura 4.113, são traçadas duas curvas que interligam, respectivamente, os resultados de ensaios de fluidez de pastas e concretos.

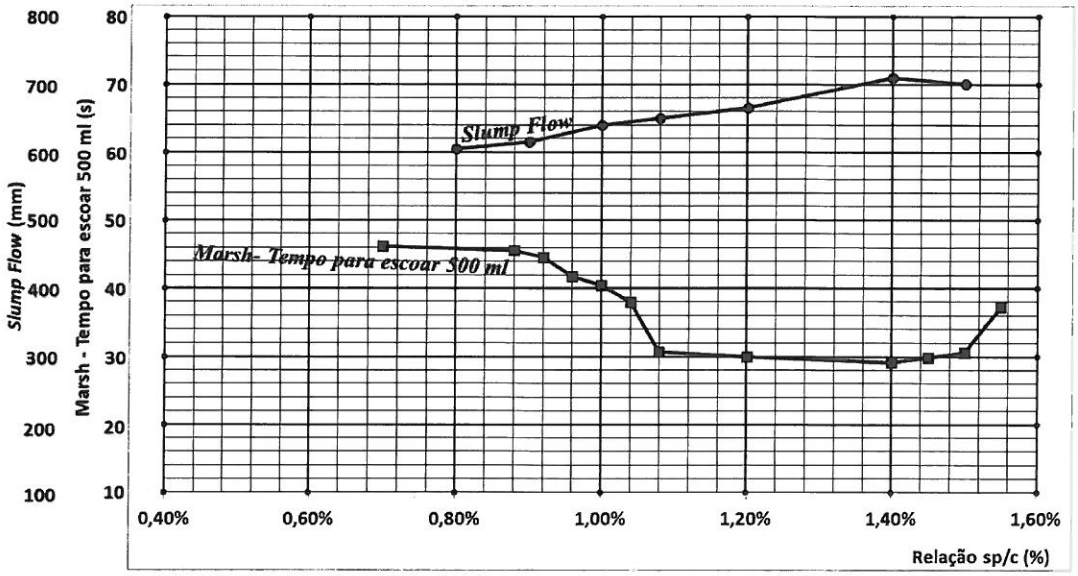


Figura 4.113 – Gráfico dos ensaios de fluidez de pastas e concretos produzidos com o aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102

Pode-se observar, pelo gráfico da figura 4.113, que o ponto de saturação do aditivo MC-PowerFlow 1102 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 com as pastas, quanto pela curva que une os resultados de *slump flow* com os concretos.

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, realizados com as pastas e com os concretos produzidos com o superplastificante MC-PowerFlow 1102, são coincidentes e correspondem à relação p/c de 4,67%.

4.5.1.2 Resultados dos Ensaios Realizados com Pastas e Concretos Produzidos com o Aditivo Superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB

No gráfico da figura 4.114, são representados os resultados dos ensaios do funil de Marsh, realizados com as pastas confeccionadas na avaliação nº 1 (sem adição mineral), e também os resultados dos ensaios de *slump flow*, realizados com os concretos produzidos com a adição Xypex Admix C-500 NF.

Tanto as pastas, quanto os concretos, foram produzidos com o mesmo aditivo superplastificante, o Sika ViscoCrete 3535 CB. Na figura 4.114, são traçadas duas curvas que interligam, respectivamente, os resultados de ensaios de fluidez de pastas e concretos.

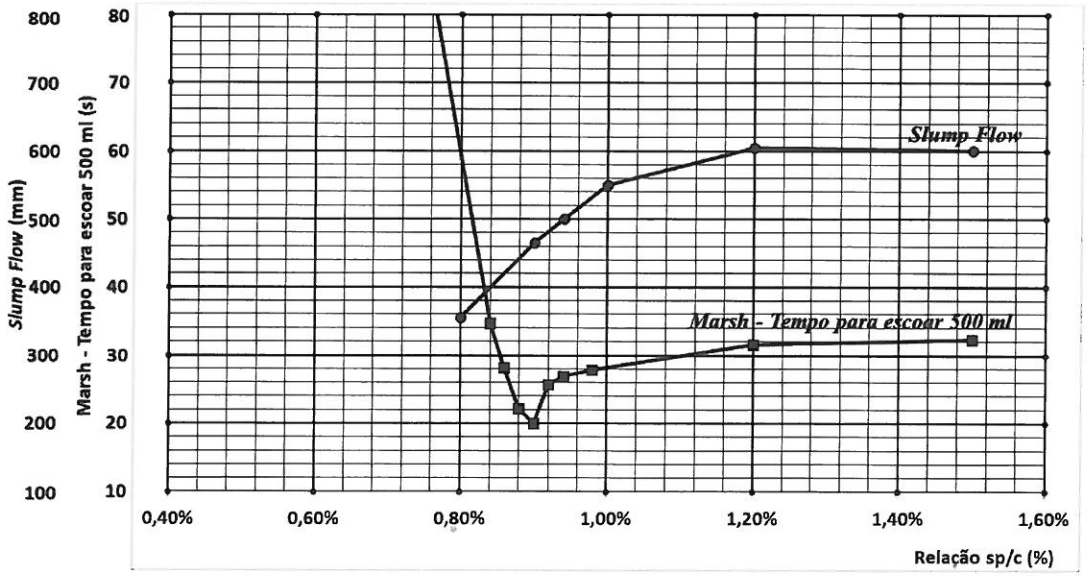


Figura 4.114 – Gráfico dos ensaios de fluidez de pastas e concretos produzidos com o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB

Pode-se observar, pelo gráfico da figura 4.114, que o ponto de saturação do aditivo Sika ViscoCrete 3535 CB encontra-se na relação sp/c de 0,90% (p/c de 2,57%), pela curva que interliga os resultados dos ensaios do funil de Marsh com as pastas, enquanto, pela curva que une os resultados de *slump flow* com os concretos, o ponto de saturação do aditivo Sika ViscoCrete 3535 CB encontra-se na relação sp/c de 1,20% (p/c de 3,43%).

Na curva que interliga os resultados dos ensaios do funil de Marsh com as pastas, observa-se que há uma mudança do sinal do coeficiente angular entre o segmento de reta que antecede a relação sp/c de 0,90% (p/c de 2,57%) e o segmento de reta seguinte, caracterizando ser este o ponto de saturação do Sika ViscoCrete 3535 CB, ou seja, o ponto que define sua dosagem ótima.

Na curva que interliga os resultados dos ensaios de *slump flow* com os concretos, observa-se que, a partir do ponto correspondente à relação sp/c de 1,20% (p/c de 3,43%), não se verificam ganhos relevantes de fluidez, caracterizando ser este o ponto de saturação do Sika ViscoCrete 3535 CB, ou seja, o ponto que define sua dosagem ótima.

Portanto, os resultados dos ensaios de fluidez, realizados com as pastas e com os concretos produzidos com o superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, não são coincidentes e correspondem, respectivamente, às relações p/c de 2,57% e 3,43%.

4.5.1.3 Comentários sobre os Pontos de Saturação dos Aditivos Superplastificantes em Concretos e Pastas

As observações da avaliação nº 5 da pesquisa relativa aos pontos de saturação dos aditivos superplastificantes em pastas e concretos, respectivamente, sem e com o emprego da adição mineral Xypex.Admix C-500 NF, são, a seguir, relacionadas:

a) o ponto de saturação do aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 pelos ensaios de fluidez foi confirmado com a relação p/c em 4,67%, tanto nas pastas, como nos concretos produzidos, enquanto o ponto de saturação do aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, nas pastas, foi verificado na relação p/c em 2,57%, e, nos concretos, na relação p/c de 3,43%, a partir do qual a fluidez no gráfico estabiliza-se, em vez de apontar um declínio, como nas pastas;

b) conforme previsto na revisão da literatura, as divergências entre os resultados dos ensaios de fluidez entre as pastas produzidas na avaliação nº 1 da pesquisa e os concretos da avaliação nº 1 podem ter origem na ausência de adição mineral nas pastas ensaiadas, enquanto os concretos foram produzidos com seu emprego (CAMÕES, 2005);

c) para realização de ensaios do funil de Marsh e miniabatimento de Kantro, as pastas devem ser produzidas não só com cimento, água e aditivo superplastificante, mas também com a adição mineral que será empregada nos concretos, uma vez que esse material componente também pode influenciar nos resultados de fluidez e viscosidade plástica aparente de pastas e concretos;

d) no caso da avaliação nº 5, a adição mineral empregada nos concretos foi o Xypex Admix C-500 NF, mas a mesma divergência pode ocorrer, quando empregada outra adição mineral, como por exemplo, a sílica ativa, tanto na sua forma em pó, como em suspensão;

e) com o término da pesquisa, ao ser concluída a avaliação nº 5, chega-se à conclusão que o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, que foi empregado na dosagem p/c de 2,57% do peso do cimento, deveria ter sido empregado na relação p/c de 3,43%, em todos os concretos que foram produzidos, ao longo desta pesquisa (não há, entretanto, como reiniciar, neste momento, esta pesquisa para corrigir essa dosagem);

f) os ensaios de fluidez (*slump flow*) com os concretos da avaliação nº 5 que empregaram a combinação MC-PowerFlow 1102 com Xypex Admix C-500 NF apontaram o mesmo ponto de saturação indicado pelos ensaios de fluidez (funil de Marsh) das pastas, produzidas com o mesmo aditivo, mas sem qualquer adição mineral;

g) em função do exposto no item anterior, suspeita-se que deva haver maior compatibilidade entre o MC-PowerFlow 1102 e o Xypex Admix C-500 NF, uma vez que o emprego da referida adição mineral nos concretos não alterou o ponto de saturação que já havia sido determinado com as pastas, produzidas sem adição mineral na avaliação nº 1 (observa-se que ambos são fabricados e fornecidos pela mesma empresa, a MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda.);

h) mais uma vez, enfatiza-se a importância de determinar os pontos de saturação dos aditivos superplastificantes, por meio de elaboração de gráficos de dosagens 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;

i) se tal providência tivesse sido adotada, o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB teria sido dosado na relação p/c de 3,43% do peso do cimento, e, consequentemente, os concretos produzidos com esse aditivo teriam apresentado maior fluidez e, ainda, maiores espalhamentos nos ensaios *slump flow*, em todas as avaliações desta pesquisa; e

j) observa-se ainda que, mesmo com a dosagem p/c de 3,43% do peso do cimento, o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB ainda seria aplicado em quantidade menor do que a do aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102, uma vez que a dosagem p/c de 4,67% para este último foi confirmada pelos ensaios de fluidez com pastas e concretos, não deixando dúvida, portanto, sobre ser esta realmente sua dosagem ótima.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

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

5.1 Conclusões

O traço adotado na produção dos concretos desta pesquisa, com o consumo de cimento de 486 kg/m³, possui as seguintes proporções de materiais componentes: 1,000 (cimento) : 0,086 (adição mineral) : 1,486 (areia) : 2,165 (brita) : 0,282 (água). Recomenda-se, portanto, o emprego desse traço, na fabricação de cais flutuantes, uma vez que o mesmo obteve resultados satisfatórios na produção de CAA e CAD simultaneamente, assim como dos seguintes materiais, também empregados nesta pesquisa:

a) cimento CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus;
b) areia proveniente do rio Manacapuru, no município de Manacapuru – AM; e
c) fibras curtas de polipropileno, com 18 μm de diâmetro, 12 mm de comprimento, massa específica de 0,91g/cm³, área superficial específica de 244 m²/kg e frequência de 360 milhões de fibras por kg (na dosagem de 0,40 kg de fibras por m³ de concreto).

Em relação aos demais materiais, são muito similares os resultados obtidos com as duas opções de sílica ativa, Silmix e Centrilit Fume S, as duas opções de brita, Britamazon/Capital e Ita Mineração, e as duas opções de aditivo superplastificante, Sika ViscoCrete 3535 CB e MC-PowerFlow 1102, permitindo assim concluir que todas essas opções de materiais componentes são viáveis para produção de CAA e CAD. Quando for utilizado o aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB, deve-se empregá-lo na dosagem p/c de 2,57% do peso do cimento, podendo chegar a 3,43%, caso seja necessária a obtenção de concreto mais fluido, e, quando for o MC-PowerFlow 1102, 4,67%.

Observou-se boa evolução da resistência à compressão axial entre 28 e 90 dias, em função das características pozolânicas do cimento Portland composto com pozolana CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus, empregado nesta pesquisa.

Os traços T-1, com adição de 0,40 kg/m³ de fibra de polipropileno, foram classificados como CAA, com fluidez SF 1, podendo chegar a SF 2, e viscosidade plástica aparente VS

2, e, como CAD, com tensão de ruptura média devido à compressão axial de 74,46 MPa aos 28 dias e 88,31 MPa aos 90 dias.

Como a classificação do CAD deve ser realizada, tomando como referência a resistência à compressão axial obtida aos 28 dias, pode-se afirmar que o CAD obtido nesta pesquisa está situado na fronteira entre as classes I e II, de acordo com a classificação adotada por Aïtcin (2000), apresentada na tabela 2.1, uma vez a tensão de ruptura média à compressão axial atingiu 74,46 MPa, aos 28 dias.

Considerando que o cimento utilizado foi o Portland composto com pozolana, CP II-Z-32, uma exceção a essa regra foi aqui admitida, para classificá-lo com a resistência obtida aos 90 dias, ou seja, o CAD produzido pode ser considerado como pertencente ao grupo II, que é destinado aos concretos que atingem a tensão de ruptura à compressão axial entre 75 e 100 MPa, aos 28 dias.

Observa-se, ainda, que esta pesquisa possui como produto final um concreto autoadensável e de alto desempenho, destinado à fabricação de cais flutuantes da região amazônica. Como os costados dos cais flutuantes são placas esbeltas com alturas que variam entre 2 e 4 metros, para fabricação dessas peças estruturais, há a necessidade de um concreto que possa ser facilmente adensado. Apesar de um CAA atender essa exigência, em função da elevada esbeltez das peças, é recomendável que seja aplicada uma leve vibração para garantir o perfeito adensamento e reduzir a quantidade de ar incorporado, uma vez que o emprego de fibras aumenta essa incorporação. Essa vibração deve ser aplicada dentro de um limite de energia que não provoque segregação. Há, ainda, a necessidade de um concreto que possua elevadas resistências, impermeabilidade, durabilidade e capacidade de resistir a choque de troncos e de embarcações, que são qualidades proporcionadas por um CAD. A redução, por meio do emprego de fibras de polipropileno, da abertura das fissuras provocadas pela retração plástica é importante para o bloqueio à entrada de agentes agressivos e o aumento da impermeabilidade do concreto, uma vez que grande parte da estrutura de um cais flutuante é submersa.

Como todos os concretos autoadensáveis e de alto desempenho produzidos com fibras de polipropileno e com materiais disponíveis na região metropolitana de Manaus possuem

todas as qualidades necessárias para o emprego na fabricação de cais flutuantes, uma vez que atendem aos pré-requisitos descritos no parágrafo anterior, pode-se afirmar que os resultados desta pesquisa são satisfatórios.

5.2 Sugestões para Futuras Pesquisas

Como o produto final desta pesquisa visa somente 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 para futuros experimentos, que a durabilidade, por meio de estudos de penetração de íons cloretos, carbonatação, porosidade, permeabilidade e reação álcali-agregado, e os custos dos concretos sejam analisados para confirmação de sua viabilidade na fabricação de cais flutuantes, em substituição às chapas e aos perfis metálicos atualmente utilizados.

Outras sugestões para pesquisas futuras são:

a) produzir concretos com outros materiais componentes, como por exemplo, utilizando pó de vidro e sílica da cinza da casca de arroz como adição; e
b) por meio de um método de dosagem experimental, como o método de empacotamento, estudar outros traços para melhorar os resultados, principalmente, com relação à resistência à compressão.

REFERÊNCIAS

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.; 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.

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.

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

_____. **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 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 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 76: Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine).** Rio de Janeiro, Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1998.

_____. **NBR NM 131:** ***Hormigón endurecido – Determinación de la retracción hidraulica o higrométrica del hormigón.*** 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.

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.

BANTHIA, N.; SHENG, J. ***Fracture toughness of micro-fiber reinforced cement composites.*** Cement & Concrete Composites, 1996.

BARROS, A. R. **Avaliação do comportamento de vigas de concreto autoadensável reforçado com fibras de aço.** Dissertação de mestrado. Maceió, Universidade Federal de Alagoas, 2009.

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.

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.

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.

BEAUDOIN, J. J. ***Handbook of fiber-reinforced concrete.*** New Jersey, 1990.

BENTUR, A., MINDESS, S. ***Fibre reinforced cementitious composites.*** London, Elsevier Science, 1990.

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.

BISSONETE, B.; PIGEON, M. ***Tensile creep at early ages of ordinary, silica fume and fiber reinforced concretes.*** Cement and Concrete Research, 25(5), 1995.

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.

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.

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

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.

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.

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.

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 reactives rocks.*** In: OBERHOLSTER, R. E. (Ed.). *Proceedings of the 5. International Conference on Alkali Reaction in Concrete. Cape Town*: [s.n.], 1981.

DOBBIN JUNIOR, E. S.; ROCHA, L. F. S. **Estudo de concreto com adição de fibra de polipropileno para controle de fissuração.** Artigo técnico. Belém, Universidade da Amazônia, 2011.

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.

EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. ***Specificacion and guidelinex for self-compacting concrete.*** EFNARC, 2002.

EUROPEAN FEDERATION OF SPECIALIST CONTRUCTION CHEMICALS AND CONCRETE SYSTEMS. ***Specificacion and guidelinex for self-compacting concrete.*** EFNARC, 2005.

FIGUEIREDO, A. D. **Concreto com fibras de aço**. Boletim técnico BT/PCC/260. São Paulo, Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

FITESA. **As fibras de polipropileno e a retração plástica do concreto.** Boletim técnico nº 2, 2002. Disponível em: <www.fitesa.com.br>, Acesso em: 02 fev 2012.

FITESA. **As influencias das fibras de polipropileno na exsudação do concreto.** Boletim técnico nº 3, 2002. Disponível em: <www.fitesa.com.br>, Acesso em: 02 fev 2012.

FITESA. **Uso de fibras de polipropileno para reduzir a reflexão de concretos projetados.** Boletim técnico nº 5, 2003. Disponível em: <www.fitesa.com.br>, Acesso em: 02 fev 2012.

FITESA. **Uso de fibras na construção civil.** Apostila técnica nº 001, 2001. Disponível em: <www.fitesa.com.br>, Acesso em: 02 fev 2012.

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.

GIL, A. **Como elaborar projetos de pesquisa.** São Paulo, Atlas, 2010.

GILLOTT, J. E. ***Alkali-aggregate reactions in concrete.*** *Engineering Geology*, v. 9, 1975.

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. ***Optimization and characterization of high-strength self-compacting concrete.*** Tese de doutorado. Barcelona, Universitat Politècnica de Catalunya, 2002.

GOULART NETO, A. A.; GALLETTI, 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.

GRAM, H. E. ***Durability of natural fibres in concrete. SAREC Report. Natural fibre concrete.*** SAREC – Swedish Agency for Research Cooperation with Developing Countries, Stockolm, 1984.

GRZYBOWSKI, M.; SHAH, S. P. ***Shrinkage cracking of fibre reinforced concrete.*** ACI Material Journal, Technical Paper, Title no. 87-M16, 1990.

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.

HAMMER, T. A. ***Is there a relationship between pore water pressure and autogenous shrinkage before and during setting?*** *Proceedings of the Third International Research Seminar in Lund.* Lund, Sweden, 2002.

HETÉNYI, M. ***Handbook of experimental stress analysis.*** USA, John Wiley and Sons, 1950.

HUA, C.; ACKER, P.; EHRLACHER, A. ***Analyses and models of the autogenous shrinkage of hardening cement paste.*** *Cement and Concrete Research*, 25(7), 1995.

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. **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.; 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.

HOBBS, D. W. ***Alkali-silica reaction in concrete.*** London, Thomas Telford, 1988.

HOLT, E. ***Very early age autogenous shrinkage: governed by chemical shrinkage or self-desiccation.*** Proceedings of the Third International Research Seminar in Lund, Lund, Sweden, 2002.

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

KHAYAT, K. H. ***Workability, testing, and performance of self-consolidating***. ACI Materials Journal, v. 94, n. 4, 1999.

KECK, R. H. ***Improving concrete durability with cementitious materials. Concrete International.*** 2001.

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.

KOVLER, K.; SIKULER, J.; BENTUR, A. ***Restrained shrinkage tests of fibrereinforced concrete ring specimens: effect of core thermal expansion.*** *Materials and Structures,* 26, 1993.

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.; PÍNFARI, 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.

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.

MAILVAGANAM, N. P. ***Admixture compatibility in special concretes.*** In: *International Conference on High-Performance Concrete, and Performance and Quality of Concrete Structures*, 2nd, Gramado, Procededings... 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.; CARRETE, G. G. ***Silica fume concrete – properties, applications, and limitations.*** *Concrete International*, v.5, n.5, p. 40-46, 1983.

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.

MANGAT, P. S.; AZARI, M. M. ***A theory for the free shrinkage of steel fiber reinforced cement matrices.*** *Journal of Material Science*, 19, 1984.

MANGAT, P. S.; AZARI, M. M. ***Shrinkage of steel fiber reinforced cement composite.*** *Materials and Structures*, 21, 1988.

MANGAT, P. S.; AZARI, M. M. ***Plastic shrinkage of steel fiber reinforced concrete.*** *Materials and Structures*, 23, 1990.

MELO, K. A. **Contribuição à dosagem de concreto autoadensável com adição de fíler 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.

MEHTA, P. K. ***Concrete technology for sustainable development.*** *Concrete International.* v. 21, n. 11, 1999.

MEHTA, P. K. ***Natural pozzolan.*** In: Suplementary Cementing Materials. Ottawa, 1987.

MEHTA, P. K. ***Pozzolanic and cementitius by-products in concrete – another look.*** In: *International Conference on Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozolans 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.

METHA, 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.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais.** São Paulo, PINI, 2008.

MINDESS S. ***Fiber reinforced concrete – myth and reality. advances in cement and concrete.*** ASME – American Society of Civil Engineers, 1994.

MINDESS S. ***Fiber reinforced concrete. Concrete.*** Prentice-Hall, 2002

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.

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-compactível: tecnologia e propriedades.** Pós-Graduação em Estruturas de Engenharia Civil, Porto, Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2001.

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.

PADRON, I.; ZOLLO, R. F. ***Effect of synthetic fibers on volume stability and cracking of Portland Cement Concrete and Mortar.*** *Journal of Materials*, American Concrete Institute, 1990.

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 arcelos como agregado graúdo em concreto.** Dissertação de mestrado. Manaus, Universidade Federal do Amazonas, 2009.

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.

RAMACHANDRAN, V. S.; BEAUDOIN, J. J.; SHIHUA, Z. ***Control of slump loss is 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.

RAMASWAMY, H. S.; AHUJA, B. M.; KRISHNAMOORTHY, S. ***Bahaviour of concrete reinforced with jute, coir and bamboo fibers.*** *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, 5, 1983.

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 dês 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. RILEM TC 107 CSP. ***Measurement of time-dependent strains of concrete.*** RILEM, 1997.

RILEM TECHNICAL COMMITTEE 49 TFR. ***Testing methods for fiber reinforced cement-based composites.*** *Materiaux et Constructions*, 17(102), 1984.

RILEM TECHNICAL REPORTS. ***Final report: siliceous by-products for use in concrete.*** *Materials and Structures*, v. 21, n. 121, 1988.

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 Politécnica de Catalunya*, Catalúnya, 2002.

RONCERO, J.; GETTU, R. ***Aditivos superfluidificantes para hormigones de altas prestaciones.*** In: IV Simposio ANFAH – *Especialidades Químicas para la Construcción, Madrid*, 1998.

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.

SALES, A. T. C. **Retração, fluência e fratura em compósitos cimentícios reforçados com polpa de bambu.** Tese de doutorado. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2006.

SARIGAPHUTI, M.; SHAH, S. P.; VINSON, K. D. ***Shrinkage cracking and durability characteristics of cellulose fiber reinforced concrete.*** ACI Materials Journal, Title n. 90-M33, 1993.

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.

SILVA, P. F. A. **Durabilidade das estruturas de concreto aparente em atmosfera urbana**. São Paulo, Pini, 1995.

SILVA, F. G. S.; DANTAS, A. B. **Estudo sobre a retração autógena em concretos de alto desempenho.** Brasília, Universidade de Brasília, 2009.

SLOWIK, V.; SCHLATTNER, E.; KLINK, T. ***Experimental investigation into early age shrinkage of cement paste by using fiber bragg gratings***. Cement & Concrete Composites, 2003.

SOTEXFIL. **Betão reforçado com fibra de polipropileno.** Artigo técnico. Lousã, Portugal, sem data.

SOROUSHIAN, P.; RAVANBAKHSH, S. ***Control of plastic shrinkage with specialty cellulose fibers.*** *ACI Materials Journal,* Title n. 95-M40, 1998.

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.

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.

SWAMY, R. N.; STRAVIDES, H. ***Influence of fiber reinforcement on restrained shrinkage and cracking.*** ACI Journal, Title n. 76-21, 1979.

TANESI, J.; FIGUEIREDO, A. D. **Fissuração por retração em concretos reforçados com fibra de polipropileno.** Boletim técnico BT/PCC/239. São Paulo, Politécnica da Universidade de São Paulo, 1999.

TAYLOR, H. F. W. ***Cement chemistry.*** London, Thomas Telford, 1997.

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.

TOLÊDO FILHO, R. D. **Materiais compósitos reforçados com fibras naturais: caracterização experimental.** Tese de doutorado. Rio de Janeiro, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 1997.

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 parametrico de variables y componentes relativos a la dosificación de hormigón de altas prestaciones***. Tese de doutorado. Universitat Politécnica 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: 16ª *Reunión Técnica – Asociación Argentina de Tecnologia 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.

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.

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.

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.

ZHANG, J. ***Modeling of the influence of fibers on creep of fiber reinforced cementitious composite.*** Composites Science and Technology, 63, 2003.

ZONSVELD, J. J. ***Polypropylene network for cement reinforcement.*** *Shell polymers.* v. 7, n. 3, 1983.

APÊNDICE

ILUSTRAÇÕES E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DA AVALIAÇÃO Nº 1

ILUSTRAÇÕES E INFORMAÇÕES COMPLEMENTARES DA AVALIAÇÃO Nº 1

1 Cimento

Resultados dos ensaios físicos, mecânicos e químicos realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A. de duas amostras do cimento CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus, encontram-se nas tabelas 1 a 4.

Tabela 1 - Caracterização físico-mecânica da amostra nº 143.515 [a]

Ensaios	Métodos de ensaio	Resultados	Limites da NBR 11578:1991
Finura – resíduo na peneira de 75 µm (%)	NBR 11579:1991	4,0	≤ 12,0
Massa específica (g/cm³) [b]	NBR NM 23:2001	3,10	–
Área específica (cm²/g) [b]	NBR NM 76:1998	3520 [c]	≥ 260 m²/kg
Água da pasta de consistência normal (%) [b]	NBR NM 43:2003	27,6	–
Início de pega (h:min) [b]	NBR NM 65:2003	4:15	≥ 1h
Fim de pega (h:min) [b]	NBR NM 65:2003	5:45	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)	NBR 11582:1991	0,5	≤ 5

Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215:1996)

Idade (dias)	Corpo de prova nº				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 11578:1991
	1	2	3	4			
3	22,0	21,4	22,0	21,6	21,8	1,8	≥ 10,0
7	29,7	29,4	29,5	29,6	29,6	0,7	≥ 20,0
28	39,8	40,1	40,8	39,9	40,2	1,5	≥ 32,0

a. Ensaios realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP
a. Período de realização dos ensaios: 28/04/2011 a 01/06/2011
b. Ensaio realizado à temperatura de (23±2)°C
c. 352 m²/kg

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 2 - Caracterização físico-mecânica da amostra nº 143.516 [a]

Ensaios	Métodos de ensaio	Resultados	Limites da NBR 11578:1991
Finura – resíduo na peneira de 75 µm (%)	NBR 11579:1991	3,0	≤ 12,0
Massa específica (g/cm³) [b]	NBR NM 23:2001	3,07	–
Área específica (cm²/g) [b]	NBR NM 76:1998	3710 [c]	≥ 260 m²/kg
Água da pasta de consistência normal (%) [b]	NBR NM 43:2003	27,5	–
Início de pega (h:min) [b]	NBR NM 65:2003	3:05	≥ 1h
Fim de pega (h:min) [b]	NBR NM 65:2003	4:45	≤ 10h
Expansibilidade de Le Chatelier – a quente (mm)	NBR 11582:1991	0,5	≤ 5

Resistência à compressão (MPa) - (NBR 7215:1996)

Idade (dias)	Corpo de prova nº				Média	Desvio relativo máximo (%)	Limites da NBR 11578:1991
	1	2	3	4			
3	23,7	23,4	24,1	23,4	23,7	1,7	≥ 10,0
7	30,1	30,3	30,8	30,2	30,4	1,3	≥ 20,0
28	38,6	39,7	38,9	38,6	39,0	1,8	≥ 32,0

a. Ensaios realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP
a. Período de realização dos ensaios: 28/04/2011 a 01/06/2011
b. Ensaio realizado à temperatura de (23±2)°C
c. 371 m²/kg

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 3 - Caracterização química da amostra nº 143.515 [a]

Ensaios	Métodos de ensaio	Resultados % em massa	Limites da NBR 11578:1991
Perda ao fogo – PF	NBR NM 18:2004	2,77	≤ 6,5%
Dióxido de silício total - SiO_2	NBR 14656:2001	21,34	–
Óxido de alumínio - Al_2O_3	NBR 14656:2001	5,81	–
Óxido de ferro - Fe_2O_3	NBR 14656:2001	3,82	–
Óxido de cálcio total - CaO	NBR 14656:2001	59,75	–
Óxido de magnésio - MgO	NBR 14656:2001	2,77	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico - SO_3	NBR 14656:2001	2,59	≤ 4,0%
Óxido de sódio - Na_2O	NBR 14656:2001	0,02	–
Óxido de potássio - K_2O	NBR 14656:2001	0,51	–
Óxido de titânio - TiO_2	NBR 14656:2001	0,32	–
Óxido de estrôncio - SrO	NBR 14656:2001	0,03	–
Pentóxido de fósforo - P_2O_5	NBR 14656:2001	0,12	–
Óxido de manganês - Mn_2O_3	NBR 14656:2001	0,03	–
Óxido de cálcio livre - CaO (livre)	NBR NM 13:2004	1,05	–
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15:2004	4,26	≤ 16,0%
Anidrido carbônico - CO_2	NBR NM 20:2004	1,44	≤ 5,0%
Equivalente alcalino em Na_2O (0,658 x K_2O% + Na_2O%)		0,36	–

a. Ensaios realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP
a. Período de realização dos ensaios: 28/04/2011 a 23/05/2011

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 4 - Caracterização química da amostra nº 143.516 [a]

Ensaios	Métodos de ensaio	Resultados % em massa	Limites da NBR 11578:1991
Perda ao fogo – PF	NBR NM 18:2004	3,25	≤ 6,5%
Dióxido de silício total - SiO_2	NBR 14656:2001	22,02	–
Óxido de alumínio - Al_2O_3	NBR 14656:2001	6,07	–
Óxido de ferro - Fe_2O_3	NBR 14656:2001	3,01	–
Óxido de cálcio total - CaO	NBR 14656:2001	59,25	–
Óxido de magnésio - MgO	NBR 14656:2001	2,51	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico - SO_3	NBR 14656:2001	2,68	≤ 4,0%
Óxido de sódio - Na_2O	NBR 14656:2001	0,01	–
Óxido de potássio - K_2O	NBR 14656:2001	0,49	–
Óxido de titânio - TiO_2	NBR 14656:2001	0,32	–
Óxido de estrôncio - SrO	NBR 14656:2001	0,03	–
Pentóxido de fósforo - P_2O_5	NBR 14656:2001	0,10	–
Óxido de manganês - Mn_2O_3	NBR 14656:2001	0,02	–
Óxido de cálcio livre - CaO (livre)	NBR NM 13:2004	1,27	–
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15:2004	6,80	≤ 16,0%
Anidrido carbônico - CO_2	NBR NM 20:2004	2,01	≤ 5,0%
Equivalente alcalino em Na_2O (0,658 x K_2O% + Na_2O%)		0,33	–

a. Ensaios realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland - ABCP
a. Período de realização dos ensaios: 28/04/2011 a 23/05/2011

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)



Figuras 1, 2 e 3 – Cimentos disponíveis para venda em Manaus: o primeiro nacional e os demais importados

2 Agregado Miúdo

Foram os seguintes os ensaios realizados com agregados miúdos pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., durante e execução da obra de construção da ponte Manaus-Iranduba, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto:

d) análise petrográfica;
e) determinação da reatividade álcali-agregado pelo método acelerado; e
f) determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado.

2.1 Análise Petrográfica

A análise petrográfica tem como objetivo a avaliação da qualidade de amostras de areia para utilização como agregados para concreto do ponto de vista mineralógico e seu método é prescrito pela NBR 7389-1:2009: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 1: Agregado miúdo.

A primeira etapa dessa análise consiste na avaliação das características petrográficas, realizada ao microscópio estereoscópico (lupa) de luz refletida, que é realizada na amostra de areia, após seu peneiramento a úmido, na malha de 0,15 mm, para eliminação da porção argilosa.

A segunda etapa da análise petrográfica consiste na avaliação da mineralogia da areia. Com essa finalidade, as amostras de areia são primeiramente peneiradas e separadas em frações granulométricas. Cada uma destas frações é observada ao microscópio estereoscópio para uma avaliação de sua mineralogia, por meio de contagem simples de no mínimo 500 grãos, sendo lavadas para melhor observação microscópica.

Quando a amostra é considerada potencialmente reativa, deve-se considerar que o grau de reatividade dessas amostras só pode ser avaliado por meio de ensaios específicos de desempenho. Neste sentido, deve-se realizar ensaio de reatividade álcali-agregado tal como prescrito pela NBR 15577-4:2009, a partir do qual, levando-se em consideração as condições de exposição da estrutura de concreto, seu tipo e nível de responsabilidade e o

teor de álcalis do concreto podem ser tomadas as medidas preventivas necessárias para evitar a ocorrência de manifestações patológicas devidas à reação álcali-agregado.

Os ensaios apresentados, a seguir, foram disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland, segundo relatórios de ensaio n^{os} 55.244 e 58.775, datados de 28/04/2009 e 13/11/2009, respectivamente.

2.1.1 Amostra n° 120.565

A análise petrográfica da amostra n° 120.565, composta por areia fina proveniente da Jazida Hidracal, em 30/10/2009, obteve os resultados apresentados nas tabelas 5 e 6.

Tabela 5 - Síntese das características gerais da areia da amostra n° 120.565

Cor (seca)		Creme acinzentado
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Feldspato, fragmento de rocha e opacos
	Deletéria	<5% de quartzo microcristalino e sílex
Grau de arredondamento		Anguloso a subanguloso
Grau de esfericidade		Baixa
Superfície dos grãos		Fosca a rugosa (algumas películas ferruginosas)
Alteração		Raras nos feldspatos
Reatividade potencial		Potencialmente reativa

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 6 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra n° 120.565

Fração (mm)	Minerais						
	Quartzo	Feldspatos	Fragmentos de rocha	Agregados limoníticos e argilosos	Quartzo microcrista-lino e sílex	Mica	Outros
2,4 – 1,2	95,2	0,4	0,4	0,0	3,2	0,0	0,8
1,2 – 0,6	95,4	0,4	0,0	0,0	3,0	0,0	1,2
0,6 – 0,3	97,2	0,0	0,2	0,0	2,2	0,0	0,4
0,3 – 0,15	97,6	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,2

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra n° 120.565 levou a considerá-la como potencialmente reativa. Essa reatividade está relacionada com a ocorrência significativa de quartzo microcristalino e sílex. Esses minerais deletérios ocorrem de forma significativa com teores menores que 5% na amostra.

2.1.2 Amostra nº 120.566

A análise petrográfica da amostra nº 120.566, composta por areia proveniente da Jazida Geonorte, no município de Manacapuru, obteve os resultados apresentados nas tabelas 7 e 8.

Tabela 7 - Síntese das características gerais da areia da amostra nº 120.566

Cor (seca)		Creme
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Opacos e feldspato
	Deletéria	<3% de quartzo microcristalino e sílex
Grau de arredondamento		Anguloso a subanguloso
Grau de esfericidade		Baixa
Superfície dos grãos		Fosca (algumas películas ferruginosas)
Alteração		Raras nos feldspatos
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 8 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 120.566

Fração (mm)	Minerais						
	Quartzo	Feldspatos	Fragmentos de rocha	Agregados limoníticos e argilosos	Quartzo microcrista-lino e sílex	Mica	Outros
2,4 – 1,2	97,2	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,8
1,2 – 0,6	97,6	0,2	0,0	0,0	1,4	0,0	0,8
0,6 – 0,3	97,2	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,8
0,3 – 0,15	97,4	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	0,6

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 120.566 levou a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto.

2.1.3 Amostra nº 120.567

A análise petrográfica da amostra nº 120.567, composta por areia fina proveniente da Fazenda Rio do Peixe em 04/02/2009, obteve os resultados apresentados nas tabelas 9 e 10.

Tabela 9 - Síntese das características gerais da areia da amostra nº 120.567

Cor (seca)		Branco acinzentado
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Opacos e mica
	Deletéria	<5% de quartzo microcristalino
Grau de arredondamento		Anguloso a subanguloso
Grau de esfericidade		Baixa
Superfície dos grãos		Fosca a rugosa (algumas películas ferruginosas)
Alteração		Ausente
Reatividade potencial		Potencialmente reativa

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 10 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 120.567

Fração (mm)	Minerais						
	Quartzo	Feldspatos	Fragmentos de rocha	Agregados limoníticos e argilosos	Quartzo microcrista-lino e sílex	Mica	Outros
4,8 – 2,4	94,5	0,0	0,0	0,0	4,9	0,0	0,6
2,4 – 1,2	97,4	0,0	0,0	0,0	2,2	0,0	0,4
1,2 – 0,6	98,2	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,6
0,6 – 0,3	98,0	0,0	0,0	0,0	1,8	0,0	0,2
0,3 – 0,15	98,4	0,0	0,0	0,0	1,2	0,0	0,4

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 120.567 levou a considerá-la como potencialmente reativa. Essa reatividade está relacionada com a ocorrência significativa de quartzo microcristalino e sílex. Esses minerais deletérios ocorrem de forma significativa com teores menores que 5% na amostra.

2.1.4 Amostra nº 120.568

A análise petrográfica da amostra nº 120.568, composta por areia fina proveniente do Rio Manacapuru, no município de Manacapuru, em 13/02/2009, fornecida pela empresa Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda., obteve os resultados apresentados nas tabelas 11 e 12. A amostra nº 120.568 foi coletada na mesma jazida da amostra 1AM, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

Tabela 11 - Síntese das características gerais da areia da amostra nº 120.568

Cor (seca)		Creme acinzentado
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Opacos
	Deletéria	<2% de quartzo microcristalino
Grau de arredondamento		Subanguloso a anguloso
Grau de esfericidade		Baixa
Superfície dos grãos		Fosca (algumas películas ferruginosas)
Alteração		Ausente
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 12 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 120.568

Fração (mm)	Minerais						
	Quartzo	Feldspatos	Fragmentos de rocha	Agregados limoníticos e argilosos	Quartzo microcrista-lino e sílex	Mica	Outros
1,2 – 0,6	98,0	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,4
0,6 – 0,3	98,2	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	0,2
0,3 – 0,15	98,8	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,2

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 120.568 levou a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto.

2.1.5 Amostra nº 125.639

A análise petrográfica da amostra nº 125.639, composta por areia proveniente da Jazida Francisco R. Chagas Moura, no município de Barcelos, obteve os resultados apresentados nas tabelas 13 e 14. A amostra nº 125.639 foi coletada na mesma jazida da amostra 3AM, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

Tabela 13 - Síntese das características gerais da areia da amostra nº 125.639

Cor (seca)		Creme
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Mica, feldspato, turmalina e opacos
	Deletéria	<5% de quartzo microcristalino
Grau de arredondamento		Subanguloso
Grau de esfericidade		Baixa
Superfície dos grãos		Fosca a rugosa (algumas películas ferruginosas)
Alteração		Poucas nos feldspatos e micas
Reatividade potencial		Potencialmente reativa

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 14 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 125.639

Fração (mm)	Minerais						
	Quartzo	Feldspatos	Fragmentos de rocha	Agregados limoníticos e argilosos	Quartzo microcrista-lino e sílex	Mica	Outros
4,8 – 2,4	85,6	1,0	0,0	0,0	13,5	0,0	0,0
2,4 – 1,2	95,0	0,0	0,0	0,0	4,0	0,0	1,0
1,2 – 0,6	94,4	0,0	0,0	0,0	5,0	0,0	0,6
0,6 – 0,3	92,4	0,0	0,0	0,0	6,2	0,0	1,4
0,3 – 0,15	97,6	0,0	0,0	0,0	1,4	0,4	0,6

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 125.639 levou a considerá-la como potencialmente reativa. Essa reatividade está relacionada com a ocorrência significativa de quartzo microcristalino e sílex. Esses minerais deletérios ocorrem de forma significativa com teores menores que 5% na amostra.

2.1.6 Amostra nº 125.640

A análise petrográfica da amostra nº 125.640, composta por areia fina proveniente do Rio Manacapuru, no município de Manacapuru, fornecida pela empresa Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda., obteve os resultados apresentados nas tabelas 15 e 16. A amostra nº 125.640 foi coletada na mesma jazida da amostra 1AM, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa (as amostras nº 120.568 e nº 125.640 são diferentes amostras de uma mesma jazida).

Tabela 15 - Síntese das características gerais da areia da amostra nº 125.640

Cor (seca)		Creme acinzentado
Mineralogia	Principal	Quartzo
	Subordinada	Turmalina e opacos
	Deletéria	<5% de quartzo microcristalino e sílex
Grau de arredondamento		Subanguloso
Grau de esfericidade		Baixa
Superfície dos grãos		Fosca a rugosa (algumas películas ferruginosas)
Alteração		Ausente
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 16 – Composição Mineralógica (% de número de grãos) da amostra nº 125.640

Fração (mm)	Minerais						
	Quartzo	Feldspatos	Fragmentos de rocha	Agregados limoníticos e argilosos	Quartzo microcrista-lino e sílex	Mica	Outros
4,8 – 2,4	92,3	0,0	0,0	0,0	5,8	0,0	1,9
2,4 – 1,2	96,8	0,0	0,0	0,0	2,8	0,0	0,4
1,2 – 0,6	97,0	0,0	0,0	0,0	2,6	0,0	0,4
0,6 – 0,3	98,6	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,4
0,3 – 0,15	97,4	0,0	0,0	0,0	1,6	0,0	1,0

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 125.640 levou a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto.

2.1.7 Considerações Finais

As considerações finais dos ensaios disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland, segundo relatórios de ensaio n^{os} 55.244 e 58.775, datados de 28/04/2009 e 13/11/2009, respectivamente, são as seguintes:

> As análises petrográficas revelaram que todas as amostras de areia ensaiadas são compostas principalmente por quartzo. Os grãos são predominantemente subangulosos e apresentam esfericidade baixa, superfície normalmente rugosa a fosca, com algumas impregnações ferruginosas. Essas características permitem classificar essas areias como de boa qualidade para uso em concreto, porém apresentam comportamento diferenciado frente aos álcalis do concreto.

Para confirmação dos resultados das análises petrográficas, mesmo para as amostras consideradas inócuas com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, foram também realizados ensaios de Determinação da Reatividade Álcali-Agregado pelo Método Acelerado, segundo NBR 15577-4:2009, e de Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado de Reatividade Álcali-Agregado, segundo NBR 15577-5:2008. Essa confirmação foi realizada somente para alguns agregados miúdos considerados mais importantes.

2.2 Determinação da Reatividade Álcali-Agregado pelo Método Acelerado, segundo NBR 15577-4:2009

A NBR 15577-4:2009 prevê a utilização de um cimento padrão, comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado, com o objetivo de avaliar, por meio do monitoramento das expansões dimensionais de barras de argamassa pelo método acelerado, a reatividade de agregados frente a uma solução alcalina de hidróxido de sódio.

A NBR 15577-5:2008 tem como objetivo a avaliação da eficiência de inibição de cimentos com adições de pozolanas ou escórias de alto-forno com relação à expansão de agregados classificados como potencialmente reativos, também por meio do monitoramento das expansões dimensionais de barras de argamassa utilizando o método acelerado.

São apresentados neste item os resultados dos ensaios que adotaram as determinações da NBR 15577-4:2009, utilizando o cimento CP V-ARI, comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado.

No item seguinte, são apresentados os resultados dos ensaios que adotaram as prescrições da NBR 15577-5:2008, utilizando o cimento CP II-Z-32, fabricado no polo industrial de Manaus, como mitigador da reação álcali-agregado.

Também são consideradas as prescrições da NBR 15577-1:2008: Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.

Outros métodos de ensaio e documentos referenciados são:

a) NBR NM 17:2004 - Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama;
b) NBR NM 76:1998 - Cimento Portland - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine);
c) ASTM C 151:2005 - Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement; e
d) NBR 5733:1991 - Cimento Portland de alta resistência inicial.

A tabela 17 apresenta a composição da argamassa prescrita pela NBR 15577-5:2008 para a preparação de três barras para a realização dos ensaios. As amostras de areia foram compostas na distribuição granulométrica sem nenhuma moagem.

Tabela 17 – Composição da argamassa prescrita pela NBR 15577-5:2008

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

O cimento padrão utilizado, o CP V-ARI, obedece integralmente às especificações da NBR 5733:1991. As exigências adicionais da norma NBR 15577-4:2009 estão registradas na tabela 18, a seguir apresentada.

Tabela 18 – Propriedades exigidas pela NBR 15577-4:2009 para o cimento

Propriedade	Método de ensaio	Resultado	Especificação da NBR 15577-4:2009
Óxido de sódio (Na_2O)	NBR NM 17:2004	0,32%	-
Óxido de potássio (K_2O)	NBR NM 17:2004	0,87%	-
Equivalente alcalino em Na_2O*	-	0,89%	(0,90 ± 0,10)%
Área específica Blaine	NBR NM 76:1998	4920 cm^2/g	(4900 ± 200) cm^2/g
Expansibilidade em autoclave	ASTM C 151	0,02%	< 0,20%

De acordo com a norma NBR 15577-1:2008, quando o resultado do ensaio acelerado pela NBR 15577-4:2009 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. Uma 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, 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 tabela 19 exemplifica as medidas de mitigação, em função da intensidade da ação preventiva.

Tabela 19 – 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/m³ de Na_2O equivalente [a], ou 2) utilizar cimentos CP II-E ou CP II-Z, conforme NBR 11578:1991, ou CP III, conforme NBR 5735:1991, ou CP IV, conforme NBR 5736:1999, 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/m³ de Na_2O equivalente [a], 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 5736:1999, 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.

[a] Aceita-se considerar o aporte de álcalis trazido ao concreto pelo cimento na ausência de ensaios de todos os componentes do concreto.

2.2.1 Amostras

Os ensaios apresentados, a seguir, foram disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-4:2009. Os resultados foram apresentados por meio do relatório de ensaio nº 58.957, datado de 27/11/2009. As amostras nº 125.639 e nº 125.640 foram coletadas, respectivamente, nas mesmas jazidas das amostras 3AM e 1AM, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

As amostras foram identificadas conforme tabela 20, a seguir.

Tabela 20 – Identificação das amostras

Amostra nº	Identificação da amostra
125.639	Areia – Francisco R. Chagas Moura – Barcelos
125.640	Areia – Rio Manacapuru – Manacapuru - Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda.

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

2.2.2 Resultados

A tabela 21 a seguir apresenta os resultados dos ensaios realizados nas amostras de areia, destacando-se os valores aos 14 e 28 dias de cura em solução de NaOH 1N a 80°C. Pode-se observar a evolução das expansões médias das barras de argamassa com o tempo de cura.

Tabela 21 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 58.957, datado de 27/11/2009

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)	
	125.639 Areia – Francisco R. Chagas Moura + CP V-ARI	125.640 Areia – Rio Manacapuru + CP V-ARI
1	-	-
2	-	-
3	-	-
4	0,00	0,00
5	-	-
6	-	-
7	0,01	0,00
8	-	-
9	-	-
10	0,02	0,00
11	-	-
12	-	-
13	0,04	0,00
14	**0,04**	**0,00**
15	-	-
16	-	-
17	-	-
18	-	-
19	0,07	0,01
20	-	-
21	-	-
22	-	-
23	-	-
24	-	-
25	-	-
26	0,16	0,01
27	-	-
28	**0,19**	**0,02**

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

2.2.3 Considerações Finais

As considerações finais dos ensaios disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-4:2009, conforme relatório de ensaio nº 58.957, datado de 27/11/2009, são as seguintes:

> De acordo com os resultados apresentados, observa-se que a amostra 125.640 apresentou expansão inferior a 0,19% aos 28 dias de cura em solução alcalina, indicando que os agregados são potencialmente inócuos, segundo os critérios estabelecidos.
>
> Diferentemente, a amostra 125.639 apresentou expansão de 0,19% aos 28 dias de cura em solução alcalina, indicando que é potencialmente reativa, segundo os critérios estabelecidos.

2.3 Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado de Reatividade Álcali-Agregado, segundo NBR 15577-5:2008

A determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado tem como objetivo a avaliação da 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 15577-4:2009.

O método utilizado nos ensaios a seguir apresentados obedeceu às determinações da NBR 15577-5:2008 - Agregados – Reatividade álcali-agregado - Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Esse método é indicado 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, que são mitigadas pela ação de um cimento inibidor da reação álcali-agregado.

Também são consideradas as prescrições da NBR 15577-1:2008 - Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto.

Os agregados foram analisados combinados com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, fabricado no polo industrial de Manaus.

2.3.1 Amostras

Os ensaios apresentados, a seguir, foram disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-5:2008. Os resultados foram apresentados por meio dos relatórios dos ensaios nº 55.189, datado de 20/07/2009, e nº 58.517, datado de 29/06/2009. As amostras nº 120.568 e nº 125.640, apesar de diferentes, foram coletadas na mesma jazida da amostra 1AM, enquanto a amostra nº 125.639 foi coletada na mesma jazida da amostra 3AM, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

As amostras foram identificadas conforme tabela 22, a seguir.

Tabela 22 – Identificação das amostras

Amostra nº	Identificação da amostra
120.565	Areia fina – Jazida Hidracal – BR174 (AM) – Leandro Lima
120.566	Areia fina – Jazida Geonorte – Manacapuru (AM) – Marco Gairão
120.567	Areia fina – Fazenda Rio do Peixe (AM) – BR174 (km-08)
120.568	Areia fina – Rio Manacapuru – Manacapuru (AM) - Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda.
125.639	Areia – Francisco R. Chagas Moura – Barcelos
125.640	Areia – Rio Manacapuru – Manacapuru - Prestativa Serviços, Navegação e Comércio Ltda.

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

2.3.2 Resultados

As tabelas 23 e 24 apresentam os resultados dos ensaios realizados nas amostras de areia, destacando-se os valores aos 14 dias de cura em solução de NaOH 1N a 80°C.

Tabela 23 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio n° 55.189, datado de 20/07/2009

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)			
	120.565 Areia Fina Jazida Hidracal + CP II-Z-32–Nassau	120.566 Areia Fina Jazida Geonorte + CP II-Z-32–Nassau	120.567 Areia Fina Fazenda Rio do Peixe + CP II-Z-32–Nassau	120.568 Areia Fina Rio Manacapuru + CP II-Z-32–Nassau
1	-	-	-	-
2	0,02	0,02	0,02	0,02
3	-	-	-	-
4	-	-	-	-
5	0,02	0,02	0,01	0,02
6	-	-	-	-
7	0,03	0,03	0,02	0,02
8	-	-	-	-
9	0,04	0,04	0,03	0,03
10	-	-	-	-
11	-	-	-	-
12	0,05	0,05	0,03	0,03
13	-	-	-	-
14	**0,06**	**0,07**	**0,05**	**0,03**
15	-	-	-	-
16	0,07	0,07	0,06	0,03
17	-	-	-	-
18	-	-	-	-
19	0,09	0,09	0,09	0,03
20	-	-	-	-
21	0,10	0,10	0,10	0,04
22	-	-	-	-
23	-	-	-	-
24	-	-	-	-
25	-	-	-	-
26	0,13	0,13	0,15	0,05
27	-	-	-	-
28	0,15	0,15	0,17	0,06

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 24 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 58.517, datado de 29/06/2009

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)	
	125.639 Areia – Francisco R. Chagas Moura + CP II-Z-32–Nassau	125.640 Areia – Rio Manacapuru + CP II-Z-32–Nassau
1	-	-
2	-	-
3	0,01	0,01
4	-	-
5	0,03	0,02
6	-	-
7	0,05	0,02
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	0,07	0,02
12	0,08	0,02
13	-	-
14	**0,09**	**0,03**
15	-	-
16	-	-
17	-	-
18	0,11	0,03
19	0,12	0,03
20	-	-
21	0,14	0,04
22	-	-
23	-	-
24	0,17	0,04
25	-	-
26	0,18	0,04
27	-	-
28	0,18	0,04

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

2.3.3 Considerações Finais

As considerações finais dos ensaios disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-5:2008, conforme relatório de ensaio nº 55.189, datado de 20/07/2009, são as seguintes:

> 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).
>
> 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 (pozolana, escória de alto-forno, sílica ativa, metacaulim) ou ainda substituir o agregado.
>
> Todas as amostras de agregado, quando combinadas com o cimento CP II-Z-32 – Nassau apresentaram valores de expansão inferiores a 0,10%, aos 14 dias de cura, em solução alcalina.
>
> Isso não permite 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-agregado.

Da mesma forma, as considerações finais do relatório de ensaio nº 58.517, datado de 29/06/2009, são as seguintes:

> As amostras de areia quando combinadas com o cimento CP II-Z-32 - Nassau apresentaram valores de expansão inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina. Deve-se levar em consideração que a combinação da areia – Francisco R. Chagas Moura com cimento CP II-Z-32 - Nassau apresentou valor de expansão inferior a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina, porém muito próximo ao limite máximo admissível pela norma.



Figuras 4 – Areia do rio Manacapuru, selecionada para utilização nesta pesquisa (amostra 1AM)

As amostras das areias pré-selecionadas para esta pesquisa, conforme o item 4.1.1 Seleção do Agregado Miúdo, foram denominadas 1AM, 2AM e 3AM. Entretanto, a Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., ensaiou, para verificação da reatividade frente aos álcalis do concreto, somente as areias das mesmas jazidas das amostras 1AM e 3AM. Dessa forma, as amostras nº 120.568 e nº 125.640, apesar de diferentes, foram coletadas na mesma jazida da amostra 1AM, enquanto a amostra nº 125.639 foi coletada na mesma jazida da amostra 3AM, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa. A Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A. não realizou, portanto, nenhum ensaio com areia oriunda do rio Negro, no município de Novo Airão, onde foram coletadas as amostras 2AM.

Apesar das amostras 1AM e 2AM serem provenientes de jazidas que apresentaram areais potencialmente inócuas, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, conforme ensaios realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., a areia do Rio Manacapuru (amostra 1AM) teve preferência para emprego nos concretos desta pesquisa, por apresentar resultados mais baixos de expansão, em relação aos demais obtidos, de acordo com a NBR 15577-4:2009, com utilização do cimento CP V-ARI, e com a NBR 15577-5:2008, quando combinada com o cimento CP II-Z-32 – Nassau. Sendo assim, a escolha do agregado miúdo da amostra nº 1AM (da mesma jazida das amostras nº 120.568 e nº 125.640) foi confirmada para emprego nesta pesquisa, também pelos motivos expostos no item 4.1.1.2 Análise dos Resultados e Seleção do Agregado Miúdo.

3 Agregado Graúdo

Foram os seguintes os ensaios realizados com agregados miúdos pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., durante e execução da obra de construção da ponte Manaus-Iranduba, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto:

a) análise petrográfica;
b) determinação da reatividade álcali-agregado pelo método acelerado; e
c) determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado de reatividade álcali-agregado.

3.1 Análise Petrográfica

A análise petrográfica tem como objetivo a avaliação da qualidade de amostras de britas e seixos para utilização como agregados para concreto do ponto de vista mineralógico e seu método é prescrito pela NBR 7389-2:2009: Agregados - Análise petrográfica de agregado para concreto - Parte 2: Agregado graúdo.

A análise petrográfica consiste na avaliação das características petrográficas, realizada ao microscópio estereoscópico de luz refletida, sendo complementada por observação de lâminas delgadas ao microscópio óptico de luz transmitida.

Quando a amostra é considerada potencialmente reativa, deve-se considerar que o grau de reatividade dessas amostras só pode ser avaliado por meio de ensaios específicos de desempenho. Neste sentido, deve-se realizar ensaio de reatividade álcali-agregado tal como prescrito pela NBR 15577-4:2009, a partir do qual e levando-se em consideração as condições de exposição da estrutura de concreto, seu tipo e nível de responsabilidade e o teor de álcalis do concreto podem ser tomadas as medidas preventivas necessárias para evitar a ocorrência de manifestações patológicas devidas à reação álcali-agregado.

Os ensaios apresentados, a seguir, foram disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland, segundo relatório de ensaio nº 58.874, datado de 19/01/2010.

3.1.1 Amostra nº 127.354

A análise petrográfica da amostra nº 127.354, composta por pedra de mão proveniente da Jazida Arco-Íris, da região de Moura, no município de Barcelos, obteve os resultados apresentados na tabela 25.

Tabela 25 - Síntese das características petrográficas da rocha da amostra nº 127.354

Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspatos (plagioclásio e microclínio)
	Subordinada	Sericita, anfibólio, clorita, titanita, biotita e opacos
	Deletéria	Quartzo com extinção ondulante (25°): < 5%; quartzo microcristalino: 1%; e feldspatos alterados: 1%
Cor		Róseo com pontos escuros
Estrutura		Maciça
Textura		Granular (formada pelo imbricamento de grânulos)
Granulação		Média
Feldspatos (mirmequitas e pertitas)		< 1%
Estado de alteração		Pouco alterada (feldspatos alterados para sericita; e anfibólios, biotitas e cloritas ocorrem associados, podendo ser uma alteração entre eles)
Deformação do agregado		Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante de 25°)
Propriedades físico-mecânicas		Rocha muito coerente
Forma dos fragmentos		Hipidiomórficos (grãos parcialmente limitados por faces do mineral) a xenomórficos (grãos desprovidos de limitação pelas faces do mineral)
Tipo de rocha		Ígnea
Classificação petrográfica		Hornblenda granito
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 127.354 levou a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto.

3.1.2 Amostra nº 127.353

A análise petrográfica da amostra nº 127.353, composta por pedra de mão proveniente da pedreira da empresa Britamazon/Capital, da região de Moura, no município de Barcelos, obteve os resultados apresentados na tabela 26. A amostra nº 127.353 foi coletada na mesma jazida da amostra 1AG, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

Tabela 26 - Síntese das características petrográficas da rocha da amostra nº 127.353

Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspatos (plagioclásio e microclínio)
	Subordinada	Sericita, anfibólio, clorita, titanita, biotita e opacos
	Deletéria	Quartzo com extinção ondulante (20°): < 5%; quartzo microcristalino: < 3%; e feldspatos alterados: < 1%
Cor		Róseo com pontos escuros
Estrutura		Maciça
Textura		Granular (formada pelo imbricamento de grânulos)
Granulação		Média
Feldspatos (mirmequitas e pertitas)		< 1%
Estado de alteração		Pouco alterada (feldspatos alterados para sericita; e anfibólios, biotitas e cloritas ocorrem associados, podendo ser uma alteração entre eles)
Deformação do agregado		Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante de 25°)
Propriedades físico-mecânicas		Rocha muito coerente
Forma dos fragmentos		Hipidiomórficos (grãos parcialmente limitados por faces do mineral) a xenomórficos (grãos desprovidos de limitação pelas faces do mineral)
Tipo de rocha		Ígnea
Classificação petrográfica		Hornblenda granito
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 127.353 levou a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto.

3.1.3 Amostra nº 127.356

A análise petrográfica da amostra nº 127.356, composta por pedra de mão proveniente da pedreira da empresa Ita Mineração, da região de Moura, no município de Barcelos, obteve os resultados apresentados na tabela 27. A amostra nº 127.356 foi coletada na mesma jazida da amostra 2AG, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

Tabela 27 - Síntese das características petrográficas da rocha da amostra nº 127.356

Mineralogia	Principal	Quartzo e feldspatos (plagioclásio e microclínio)
	Subordinada	Sericita, titanita, biotita e opacos
	Deletéria	Quartzo com extinção ondulante (30º): < 5%; quartzo microcristalino: < 2%; e feldspatos alterados: < 1%
Cor		Cinza rosado com intercalação de faixas escuras
Estrutura		Foliada
Textura		Granolepdoblástica (formada pela intercalação de faixas ricas em grânulos, quartzo e feldspato) com micas
Granulação		Média e fina
Feldspatos (mirmequitas e pertitas)		< 2%
Estado de alteração		Pouco alterada (feldspatos alterados para sericita)
Deformação do agregado		Quartzo deformado (ângulo de extinção ondulante de 30º); pontos com minerais tendendo a poligonização, indicando a recristalização da rocha e poucos minerais estirados segundo a orientação preferencial da rocha
Propriedades físico-mecânicas		Rocha muito coerente
Forma dos fragmentos		Hipidiomórficos (grãos parcialmente limitados por faces do mineral) a xenomórficos (grãos desprovidos de limitação pelas faces do mineral)
Tipo de rocha		Metamórfica
Classificação petrográfica		Biotita gnaisse
Reatividade potencial		Potencialmente inócua

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

A conclusão sobre a análise petrográfica realizada com a amostra nº 127.356 levou a considerá-la como potencialmente inócua, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto.

3.1.4 Considerações Finais

Pelas análises petrográficas, todas as amostras compostas por pedra de mão provenientes da região de Moura, no município de Barcelos, foram consideradas como potencialmente inócuas, com relação a sua reatividade frente aos álcalis do concreto.

Para confirmação dos resultados das análises petrográficas, foram também realizados ensaios de Determinação da Reatividade Álcali-Agregado pelo Método Acelerado, segundo NBR 15577-4:2009, e de Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado de Reatividade Álcali-Agregado, segundo NBR 15577-5:2008. Essa confirmação foi realizada somente para alguns agregados graúdos considerados mais importantes.

3.2 Determinação da Reatividade Álcali-Agregado pelo Método Acelerado, segundo NBR 15577-4:2009

Em relação ao ensaio realizado de acordo com o método da NBR 15577-4:2009: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, com a utilização do cimento comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado CP V-ARI, todas as observações já realizadas para os agregados miúdos são também válidas para os agregados graúdos.

Destaca-se apenas que as amostras de brita e seixos devem ser previamente britadas e pulverizadas, até obtenção da granulometria indicada na tabela 28.

Tabela 28 – Composição da argamassa prescrita pela NBR 15577-5:2008

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

3.2.1 Amostras

Os ensaios apresentados, a seguir, foram disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-4:2009. Os resultados foram apresentados por meio dos relatórios dos ensaios nº 50.635, datado de 03/07/2008; nº 59.875, datado de 20/01/2010; e nº 58.957, datado de 27/11/2009. A amostra nº 127.353 foi coletada na mesma jazida da amostra 1AG, enquanto a amostra nº 127.356 foi coletada na mesma jazida da amostra 2AG, e a amostra nº 112.617 foi coletada na mesma jazida da amostra 3AG, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

As amostras foram identificadas conforme tabela 29, a seguir.

Tabela 29 – Identificação das amostras

Amostra nº	Identificação da amostra
112.617	Seixo – Japurá-AM
112.618	Seixo – Iriporanã-AM
112.619	Seixo – Arapuanã-AM
127.352	Brita 1 – Jazida Arco-Íris – região de Moura – município de Barcelos-AM
127.353	Brita 1 – Britamazon/Capital – região de Moura – município de Barcelos-AM
127.356	Pedra de mão – Ita Mineração – região de Moura – município de Barcelos-AM
125.641	Brita 1 – Mineradora Figueiredo – BR-174 (km 152,5) – município de Presidente Figueiredo-AM
125.642	Pedra de mão cinza – Mineradora Figueiredo – BR-174 (km 152,5) – município de Presidente Figueiredo-AM
125.773	Pedra de mão rósea – Mineradora Figueiredo – BR-174 (km 152,5) – município de Presidente Figueiredo-AM

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

3.2.2 Resultados

As tabelas 30 a 32 apresentam os resultados dos ensaios realizados nas amostras de rocha, destacando-se os valores aos 14 e 28 dias de cura em solução de NaOH 1N a 80°C. Pode-se observar a evolução das expansões médias das barras de argamassa com o tempo de cura.

Tabela 30 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 50.635, datado de 03/07/2008

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)		
	112.617 Seixo – Japurá-AM + CP V-ARI	112.618 Seixo – Iriporanã-AM + CP V-ARI	112.619 Seixo – Arapuanã-AM + CP V-ARI
1	-	-	-
2	-	-	0,02
3	0,03	0,01	-
4	-	-	-
5	0,09	0,02	0,09
6	-	-	-
7	-	-	0,15
8	-	-	-
9	-	-	0,22
10	-	-	-
11	0,21	0,07	-
12	0,22	0,07	0,32
13	-	-	-
14	**0,26**	**0,10**	**0,37**
15	-	-	-
16	-	-	0,43
17	0,31	0,15	-
18	-	-	-
19	0,35	0,19	0,50
20	-	-	-
21	0,38	0,22	0,54
22	-	-	-
23	-	-	0,58
24	0,42	0,27	-
25	-	-	-
26	0,46	0,30	0,62
27	-	-	-
28	**0,50**	**0,32**	**0,65**

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 31 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 59.875, datado de 20/01/2010

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)		
	127.352 Brita 1 – Jazida Arco-Íris + CP V-ARI	127.353 Brita 1 – Britamazon/Capital + CP V-ARI	127.356 Pedra de mão – Ita Mineração + CP V-ARI
1	-	-	-
2	0,01	0,02	0,03
3	-	-	-
4	-	-	-
5	0,02	0,02	0,03
6	-	-	-
7	0,03	0,02	0,03
8	-	-	-
9	0,03	0,03	0,04
10	-	-	-
11	-	-	-
12	0,06	0,04	0,05
13	-	-	-
14	**0,06**	**0,04**	**0,05**
15	-	-	-
16	0,08	0,05	0,06
17	-	-	-
18	-	-	-
19	0,10	0,06	0,06
20	-	-	-
21	0,10	0,06	0,06
22	-	-	-
23	-	-	-
24	-	-	-
25	-	-	-
26	0,12	0,07	0,07
27	-	-	-
28	**0,14**	**0,08**	**0,08**

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 32 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-4:2009, segundo relatório de ensaio nº 58.957, datado de 27/11/2009

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)		
	125.641 Brita 1 Mineradora Figueiredo + CP V-ARI	125.642 Pedra de mão cinza Mineradora Figueiredo + CP V-ARI	125.773 Pedra de mão rósea Mineradora Figueiredo + CP V-ARI
1	-	-	-
2	-	-	-
3	-	-	-
4	0,00	0,00	0,01
5	-	-	-
6	-	-	-
7	0,01	0,03	0,02
8	-	-	-
9	-	-	-
10	0,02	0,04	0,02
11	-	-	-
12	-	-	-
13	0,02	0,05	0,03
14	**0,03**	**0,05**	**0,03**
15	-	-	-
16	-	-	-
17	-	-	-
18	-	-	-
19	0,05	0,08	0,05
20	-	-	-
21	-	-	-
22	-	-	-
23	-	-	-
24	-	-	-
25	-	-	-
26	0,07	0,14	0,07
27	-	-	-
28	**0,08**	**0,16**	**0,08**

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

3.2.3 Considerações Finais

As considerações finais dos ensaios disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-4:2009, conforme relatório de ensaio nº 50.635, datado de 03/07/2008, são as seguintes:

> De acordo com os resultados apresentados, observa-se que o valor médio de expansão das barras de argamassa aos 28 dias de cura em solução alcalina foi acima de 0,19% para as amostras de seixo, indicando que o agregado é potencialmente reativo, segundo os critérios estabelecidos.
>
> Finalmente, na eventual 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.

Entretanto, as considerações finais do relatório de ensaio nº 59.875, datado de 20/01/2010, são as seguintes:

> Pode-se observar pelos resultados apresentados pelas amostras de rocha, que o valor médio de expansão das barras de argamassa aos 28 dias de cura em solução alcalina foi inferior a 0,19%, indicando que os agregados são potencialmente inócuos, segundo os critérios estabelecidos.

E, ainda, as considerações finais do relatório de ensaio nº 58.957, datado de 27/11/2009, são as seguintes:

> De acordo com os resultados apresentados, observa-se que as amostras 125.641, 125.642 e 125.773 apresentaram expansão inferior a 0,19% aos 28 dias de cura em solução alcalina, indicando que os agregados são potencialmente inócuos, segundo os critérios estabelecidos.
>
> Em suma, as amostras 125.641 e 125.773 podem ser utilizadas com qualquer tipo de cimento quanto à prevenção de reação álcali-agregado. Já a amostra 125.642 deve ser utilizada com cimento inibidor ou com baixo teor de álcalis.

3.3 Determinação da Mitigação da Expansão em Barras de Argamassa pelo Método Acelerado de Reatividade Álcali-Agregado, segundo NBR 15577-5:2008

Em relação ao ensaio realizado de acordo com o método da NBR 15577-5:2008: Agregados – Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, com utilização do cimento inibidor da reação álcali-agregado CP II-Z-32 – Nassau, todas as observações já realizadas para os agregados miúdos são também válidas para os agregados graúdos.

3.3.1 Amostras

Os ensaios apresentados, a seguir, foram disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-5:2008. Os resultados foram apresentados por meio dos relatórios de ensaio nº 55.189, datado de 20/07/2009, nº 59.875, datado de 20/01/2010, e nº 58.517, datado de 29/06/2009. A amostra nº 127.353 foi coletada na mesma jazida da amostra 1AG, enquanto a amostra nº 127.356 foi coletada na mesma jazida da amostra 2AG, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

As amostras foram identificadas conforme tabela 33, a seguir.

Tabela 33 – Identificação das amostras

Amostra nº	Identificação da amostra
120.569	Brita 1 – Jazida Boa Vista – Boa Vista (RR) – BR 174 (km 15)
120.570	Brita 1 – Fidens – Monte Alegre (PA) – PA 254 (km 22)
120.571	Brita 1 – Pedra Norte – Mucajaí (RR) – BR 174 (km 600)
120.572	Brita 1 – Britador 6º BEC – Caracaraí (RR) – BR 174 (km 500)
120.573	Brita 1 – Pedra Norte – Mucajaí (RR) – BR 174 (km 600)
120.574	Pedra de mão rosa – Amazônia Mineração (EBAM) – Presidente Figueiredo (AM) – BR 174 (km 134)
120.575	Pedra de mão cinza – Amazônia Mineração (EBAM) – Presidente Figueiredo (AM) – BR 174 (km 134)
120.576	Pedra de mão – Jazida Monte Alegre – Monte Alegre (PA) – PA 254 (km 12)
127.352	Brita 1 – Jazida Arco-Íris – região de Moura – município de Barcelos-AM
127.353	Brita 1 – Britamazon/Capital – região de Moura – município de Barcelos-AM
127.356	Pedra de mão – Ita Mineração – região de Moura – município de Barcelos-AM
125.641	Brita 1 – Mineradora Figueiredo – Presidente Figueiredo (AM) – BR 174 (km 152,5)
125.642	Pedra de mão cinza – Mineradora Figueiredo – Presidente Figueiredo (AM) – BR 174 (km 152,5)

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

3.3.2 Resultados

As tabelas 34 a 37 apresentam os resultados dos ensaios realizados nas amostras de brita, destacando-se os valores aos 14 dias de cura em solução de NaOH 1N a 80°C.

Tabela 34 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio n° 55.189, datado de 20/07/2009

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)				
	120569 Brita Jazida Boa Vista + CP II -Z-32 Nassau	120570 Brita Fidens + CP II -Z-32 Nassau	120571 Brita Pedra Norte + CP II -Z-32 Nassau	120572 Brita Britador 6° BEC + CP II -Z-32 Nassau	120573 Brita Pedra Norte + CP II -Z-32 Nassau
1	-	-	-	-	-
2	0,02	0,02	-	-	-
3	-	-	0,00	0,00	0,01
4	-	-	-	-	-
5	0,02	0,02	0,00	0,02	0,01
6	-	-	-	-	-
7	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01
8	-	-	-	-	-
9	0,04	0,03	-	-	-
10	-	-	0,02	0,02	0,02
11	-	-	-	-	-
12	0,08	0,03	0,03	0,03	0,02
13	-	-	-	-	-
14	**0,13**	**0,04**	**0,04**	**0,04**	**0,04**
15	-	-	-	-	-
16	0,17	0,04	-	-	-
17	-	-	0,04	0,04	0,04
18	-	-	-	-	-
19	0,23	0,05	0,05	0,05	0,04
20	-	-	-	-	-
21	0,26	0,06	-	-	-
22	-	-	-	-	-
23	-	-	-	-	-
24	-	-	0,07	0,06	0,06
25	-	-	-	-	-
26	0,32	0,08	0,07	0,07	0,07
27	-	-	-	-	-
28	0,34	0,09	0,08	0,08	0,08

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 35 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 55.189, datado de 20/07/2009

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)		
	120574 Pedra de Mão Rosa Amazônia Mineração + CP II -Z-32–Nassau	120575 Pedra de Mão Cinza Amazônia Mineração + CP II -Z-32–Nassau	120576 Pedra de mão Jazida Monte Alegre + CP II -Z-32–Nassau
1	-	-	-
2	-	-	-
3	0,01	0,01	0,01
4	-	-	-
5	0,02	0,02	0,01
6	-	-	-
7	0,03	0,03	0,01
8	-	-	-
9	-	-	-
10	0,04	0,04	0,01
11	-	-	-
12	0,06	0,06	0,02
13	-	-	-
14	**0,07**	**0,08**	**0,02**
15	-	-	-
16	-	-	-
17	0,10	0,10	0,02
18	-	-	-
19	0,12	0,10	0,02
20	-	-	-
21	-	-	-
22	-	-	-
23	-	-	-
24	0,15	0,15	0,02
25	-	-	-
26	0,16	0,16	0,03
27	-	-	-
28	0,18	0,18	0,04

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 36 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 59.875, datado de 20/01/2010

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)		
	127.352 Brita 1 Jazida Arco-Íris + CP II -Z-32–Nassau	127.353 Brita 1 Britamazon/Capital + CP II -Z-32–Nassau	127.356 Pedra de mão Ita Mineração + CP II -Z-32–Nassau
1	-	-	-
2	0,02	0,02	0,02
3	-	-	-
4	-	-	-
5	0,03	0,02	0,02
6	-	-	-
7	0,03	0,02	0,02
8	-	-	-
9	0,04	0,03	0,03
10	-	-	-
11	-	-	-
12	0,05	0,04	0,04
13	-	-	-
14	**0,06**	**0,04**	**0,04**
15	-	-	-
16	0,08	0,05	0,05
17	-	-	-
18	-	-	-
19	0,09	0,05	0,05
20	-	-	-
21	0,09	0,06	0,05
22	-	-	-
23	-	-	-
24	-	-	-
25	-	-	-
26	0,11	0,06	0,06
27	-	-	-
28	0,12	0,07	0,07

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

Tabela 37 - Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina – NBR 15577-5:2008, segundo relatório de ensaio nº 58.517, datado de 29/06/2009

Idade de Cura agressiva (dias) (*)	Variações dimensionais médias (%)	
	125.641 Brita 1 Mineradora Figueiredo + CP II -Z-32–Nassau	125.642 Pedra de mão cinza Mineradora Figueiredo + CP II -Z-32–Nassau
1	-	-
2	-	-
3	0,01	0,01
4	-	-
5	0,03	0,04
6	-	-
7	0,04	0,06
8	-	-
9	-	-
10	-	-
11	0,04	0,08
12	0,04	0,09
13	-	-
14	**0,05**	**0,11**
15	-	-
16	-	-
17	-	-
18	0,07	0,14
19	0,07	0,14
20	-	-
21	0,09	0,17
22	-	-
23	-	-
24	0,10	0,19
25	-	-
26	0,10	0,21
27	-	-
28	0,10	0,21

- = leitura não realizada

(*) Para conhecer a idade do ensaio desde a moldagem acrescentar 2 dias

(Fonte: CONSTRUÇÕES E COMÉRCIO CAMARGO CORRÊA S.A.)

3.3.3 Considerações Finais

As considerações finais dos ensaios disponibilizados pela empresa Construções e Comércio Camargo Corrêa S/A e realizados pela Associação Brasileira de Cimento Portland de acordo com as prescrições da NBR 15577-4:2009, conforme relatório de ensaio nº 55.189, datado de 20/07/2009, são as seguintes:

> Todas as amostras de agregado quando combinadas com o cimento CP II-Z-32 – Nassau apresentaram valores de expansão inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina, exceto a amostra 120.569.
>
> Diferentemente, para a amostra 120.569, quando combinada com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, apresentou valor de expansão acima do especificado pela NBR 15577-1:2008, mostrando que a combinação especificamente ensaiada não é adequada, ou seja, o agregado é potencialmente reativo e o cimento não é apropriado para inibir a expansão, a níveis aceitáveis prescritos pela norma.

Entretanto, as considerações finais do relatório de ensaio nº 59.875, datado de 20/01/2010, são as seguintes:

> As amostras rocha quando combinadas com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, enviado pelo cliente, apresentaram expansão média inferior a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina. Esses resultados permitem afirmar que as combinações especificamente ensaiadas apresentam característica favorável ao emprego em obras de Construção Civil, com baixos riscos de manifestações patológicas referentes à reação álcali-agregado, quando empregada em ambientes propícios ao aparecimento desse tipo de reação.

E, ainda, as considerações finais do relatório de ensaio nº 58.517, datado de 29/06/2009, são as seguintes:

> As amostras de rocha, quando combinadas com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, apresentaram valores de expansão inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina.
>
> Diferentemente, a amostra de rocha 125.642, quando combinada com o cimento CP II-Z-32 – Nassau, apresentou valor de expansão superior a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina, mostrando que a combinação especificamente

ensaiada não é adequada, ou seja, o agregado é potencialmente reativo e o cimento não é apropriado para inibir a expansão, a níveis aceitáveis prescritos pela norma.



Figura 5 – Brita da região de Moura, no município de Barcelos, fornecida pela empresa Britamazon/Capital, uma das selecionadas para utilização nesta pesquisa (amostra 1AG)

As amostras dos agregados graúdos pré-selecionados para esta pesquisa, conforme o item 4.1.2 Seleção do Agregado Graúdo, foram denominadas 1AG, 2AG e 3AG. A Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., ensaiou, para verificação da reatividade frente aos álcalis do concreto, todos os agregados graúdos das mesmas jazidas das amostras coletadas para esta pesquisa. Dessa forma, a amostra nº 127.353 foi coletada na mesma jazida da amostra 1AG, enquanto a amostra nº 127.356 foi coletada na mesma jazida da amostra 2AG, e a amostra nº 112.617 foi coletada na mesma jazida da amostra 3AG, conforme avaliação nº 1 desta pesquisa.

Além das amostras oriundas das mesmas jazidas das amostras 1AG e 2AG terem obtido resultados de expansão com valores idênticos e, ainda, dentro dos limites para serem consideradas inócuas, com relação à reatividade frente aos álcalis do concreto, conforme

ensaios realizados pela Construções e Comércio Camargo Corrêa S.A., tanto pela NBR 15577-4:2009, como pela NBR 15577-5:2008, suas jazidas localizam-se na mesma região (Moura), no município de Barcelos, ou seja, possuem a mesma distância de transporte até a cidade de Manaus. Portanto, os agregados graúdos das amostras 1AG e 2AG (da mesma jazida das amostras nº 127.353 e nº 125.640, respectivamente) tiveram preferência para emprego nos concretos desta pesquisa, por apresentar resultados mais baixos de expansão, em relação aos demais obtidos, de acordo com a NBR 15577-4:2009, com utilização do cimento CP V-ARI, e com a NBR 15577-5:2008, quando combinada com o cimento CP II-Z-32 – Nassau.

Observou-se, ainda, que o ensaio para determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, com utilização do cimento CP V-ARI, comprovadamente não inibidor da reação álcali-agregado, e de acordo com a NBR 15577-4:2009, conforme resultados apresentados no Apêndice, apresentou, para as amostras nº 112.617, nº112.618 e nº 112.619 (compostas por seixo das regiões de Japurá, Iriporanã e Arapuanã, respectivamente), valores de expansão de 0,50%, 0,32% e 0,65%, respectivamente, aos 28 dias de cura, em solução alcalina, indicando que os agregados dessas amostras são potencialmente reativos, uma vez que os valores de expansão obtidos nessa idade superam o limite de 0,19%. Por esse motivo, resolveu-se não empregar, nos concretos produzidos, agregados da amostra 3AG, composta por seixos provenientes do município de Japurá. Além disso, a jazida da amostra 3AG localiza-se no município de Japurá, que é mais distante, em relação a Manaus, do que o município de Barcelos, onde se localizam as jazidas das amostras 2AG e 3AG.

4 Adições Minerais

4.1 Ficha Técnica da Sílica Ativa em Pó Silmix

SEÇÃO 1 – IDENTIFICAÇÃO DO PRODUTO E DA EMPRESA

- ✓ *NOME DO PRODUTO: SILMIX®*
- ✓ *NOME DA EMPRESA: Dow Corning Metais do Pará Indústria e Comércio Ltda.*

SEÇÃO 2 – COMPOSIÇÃO E INFORMAÇÃO SOBRE INGREDIENTES:

- ✓ *COMPOSIÇÃO: Sílica amorfa; óxido de ferro, cálcio, alumínio, magnésio, sódio e potássio; carbono e umidade.*
- ✓ *SINÔNIMOS; Sílica ativa, sílica fume, microssílica, sílica amorfa, pó de dióxido de silício, sílica fume condensada, sílica volatilizada.*
- ✓ *UTILIZAÇÃO: Uso em cimento Portland, concreto, argamassa e pasta de cimento Portland.*

SUBSTÂNCIA	*CAS (1)*	*COMPOSIÇÃO QUÍMICA (%)*	*OSHA – PEL-TWA (2) (mg/m³)*	*ACGIH – TLV-TWA (3) (mg/m³)*
Silica Amorfa (SiO_2)	*69012-64-2*	*≥ 85,0*	-	*2*
Silica Cristalina (SiO_2)	*14808-60-7*	*≤ 0,5*	*3*	*0,05*
Óxido de sódio (Na_2O)	*1313-59-3*	*≤ 1,5*	-	-
Carbono total (C)	*1333-86-4*	*≤ 6,0*	*3,5*	*3,5*
Umidade (H_2O)	-	*≤ 3,0*	-	-

(1) CAS: Chemical Abstract Service Registry Number;
(2) OSHA - PEL: Occupational Safety e Health Administration – Permissible Exposure Limits.
(3) ACGIH – TLV-TWA: American Conference Of Governmental Industrial Hygienists - Thershold Limit Value-Time Weighted Average exposure concentration for a conventional 8-hour (TLV, PEL) workday and a 40-hour workweek. (ver Seção 16)

...

SEÇÃO 9 – PROPRIEDADES FÍSICO-QUÍMICAS:

Estado físico (CNTP)	*Sólido*
Diâmetro médio	*0,40 µm*
Resíduo na peneira 45 µm	*≤ 10,0%*
Aparência	*Pó de dimensões micrométricas*
Cor	*Cinza claro e cinza escuro dependendo do teor de sílica*
Odor	*Sem odor*
pH	*≤ 10,0*
Ponto de fusão	*1550 – 1570° C*
Ponto de fulgor	*Não aplicável*
Perda ao Fogo	*≤ 6%*
Densidade aparente	*150 – 700 kg/m³*
Solubilidade	*Insolúvel em água e Solúvel em HF e KOH ou NaOH*
Área especifica B.E.T.	*≥ 15.000 e ≤ 30.000 m²/kg*
Limite de explosividade	*Não aplicável*

SEÇÃO 10 – ESTABILIDADE E REATIVIDADE:

- ✓ *Estabilidade: O produto é um material estável.*
- ✓ *Reatividade: O produto e solúvel em álcalis (KOH e NaOH) e reage com ácido fluorídrico (HF) formando gás tóxico (SiF4).*

...

SEÇÃO 12 – INFORMAÇÕES ECOLÓGICAS:

- ✓ *O produto é caracterizado como não perigoso ao meio ambiente.*

...

SEÇÃO 14 – INFORMAÇÕES SOBRE TRANSPORTE:

- ✓ *O produto não se enquadra como perigoso.*
- ✓ *Recomendações especiais: não transportar em conjunto com substâncias descritas na Seção 10.*

SEÇÃO 15 – REGULAMENTAÇÕES:

- ✓ *Não há regulamentação aplicável para este produto.*
- ✓ *Normas utilizadas, ver Seção 16.*

SEÇÃO 16 – OUTRAS INFORMAÇÕES:

- ✓ *CAS: Número de registro de substância no Sistema de Classificação Codificada de Substâncias Químicas (Chemical Abstract Service).*
- ✓ *OSHA - PEL: Segurança Ocupacional e Administração da Saúde – Limite de Exposição Permissível.*
- ✓ *ACGIH – TLV-TWA: Conferência Americana Governamental da Higiene Industrial – Valores Limites de Exposição – Média Ponderada pelo Tempo: Valor Limite de exposição do profissional a uma concentração média ponderada pelo tempo de uma jornada normal de 8 horas diárias e 40 horas semanais, onde o profissional pode estar repetidamente exposto, dia após dia, sem sofrer efeitos adversos a sua saúde.*
- ✓ *Este produto deve ser armazenado e manuseado de acordo com as boas praticas de higiene industrial e em conformidade com qualquer regulamento legal. A informação aqui contida está baseada no atual estado do nosso conhecimento e pretende descrever nosso produto do ponto de vista das exigências de segurança. Ela não deve ser tomada como garantia de propriedades específicas. Desde que o uso atual por outros esteja além do nosso controle e de responsabilidade do usuário determinar a segurança, toxidade e adequação para seu próprio uso do produto descrito nesta FISPQ.*

4.2 Ficha Técnica da Sílica Ativa em Suspensão Centrilit Fume S

PROPRIEDADES:

- ✓ *Aumenta a densidade do concreto*
- ✓ *Aumenta a resistência do concreto*
- ✓ *Aumenta a proporção entre as resistências a flexão e compressão*
- ✓ *Aumenta a resistência contra a corrosão*
- ✓ *Aumenta a resistência química*
- ✓ *Aumenta a resistência à abrasão*

ÁREAS DE APLICAÇÃO:

- ✓ *Concreto de alto desempenho*
- ✓ *Concreto pré-moldado*
- ✓ *Concreto bombeável*
- ✓ *Concreto com alta resistência química*

MÉTODO DE ATUAÇÃO:

- ✓ *Centrilit Fume S é uma suspensão estável de partículas de sílica ativa dispersas em água. As partículas de sílica ativa são 50 a 100 vezes menores do que os grãos de cimento e preenchem os vazios entre os grãos, aumentando o grau de empacotamento da dispersão.*
- ✓ *Centrilit Fume S reage com os subprodutos de cálcio formados após a hidratação do cimento formando silicatos de cálcio hidratados, produzindo assim um concreto muito denso. Com isto, as resistências e a proteção contra corrosão do concreto podem ser aumentadas substancialmente.*
- ✓ *O concreto pode ser bombeado mais facilmente devido a maior coesão. A aderência ao substrato e a armadura também é melhorada.*
- ✓ *Centrilit Fume S é inofensivo a água potável.*

MISTURA:

- ✓ *Centrilit Fume S é fornecido pronto para o uso. Considerar na elaboração do traço um teor de sólidos de 50%, ou seja, 50% em peso do Centrilit Fume S é sílica ativa e os outros 50% é a água, que deve ser descontado da água de amassamento.*
- ✓ *Para a obtenção da dosagem ideal, recomendamos que sejam determinadas as condições de uso e posteriormente realizados testes de desempenho.*

- ✓ *Os demais procedimentos para a dosagem, lançamento e cura do concreto devem ser coerentes com as boas práticas de concretagem.*

- ✓ *Recomendamos que testes preliminares sejam executados antes da utilização em grande escala.*

DADOS TÉCNICOS – CENTRILIT FUME S:

Características	*Unidade*	*Valor*	*Observações*
Densidade	*g/cm³*	*1,38*	
Dosagem máxima	*%*	*20*	*Sobre o peso do cimento*
Teor de sólidos	*%*	*50 ± 2*	

CARACTERÍSTICAS – CENTRILIT FUME S:

Tipo de produto	*Sílica ativa em suspensão*
Estado	*Líquido*
Cor	*Cinza*
Armazenagem	*Armazenar os tambores em local seco, coberto e arejado. Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro os reservatórios instalados em local previamente definido.*
Validade	*12 meses a partir da data de fabricação*
Embalagens	*Balde de 20 kg* *Tambor de 270 kg*
Descarte	*Para a preservação do meio ambiente, favor, esvaziar completamente as embalagens.*



Figura 6 – Sílica ativa em pó, Silmix

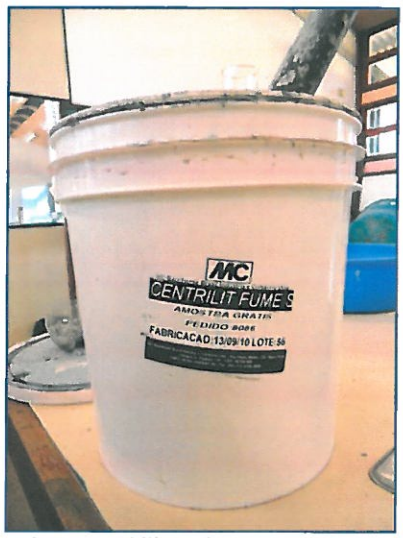


Figura 7 – Sílica ativa em suspensão, Centrilit Fume S

4.3 Ficha Técnica do Xypex Admix C-500 NF

PROPRIEDADES:

- ✓ *Resiste a pressões hidrostáticas positivas e negativas*
- ✓ *Torna-se parte integrante do concreto*
- ✓ *Alta resistência a substâncias agressivas – pH 3 a 11 (contato permanente) e pH 2 a 12 (contato temporário)*
- ✓ *Sela microfissuras de até 0,4 mm*
- ✓ *Permite a respiração do concreto*
- ✓ *Não tóxico*
- ✓ *Melhores custos de aplicação em comparação a outros métodos*
- ✓ *Sistema permanente*
- ✓ *Deve ser adicionado ao concreto no momento da dosagem, portanto, não está sujeito as restrições climáticas*
- ✓ *Aumenta a flexibilidade no cronograma da construção*

ÁREAS DE APLICAÇÃO:

- ✓ *Reservatórios, estações de tratamento de água e esgoto e piscinas*
- ✓ *Túneis e sistemas de Metrô, câmaras subterrâneas, fundações, estacionamentos e pré-moldados. Concreto de alto desempenho*

DESCRIÇÃO DO PRODUTO:

- ✓ *Xypex Admix C-500 NF é um aditivo único para impermeabilização, proteção e melhoria da qualidade do concreto. Embalado na forma de pó, XYPEX ADMIX C-500 NF consiste em uma mistura de cimento Portland, sílica e diversas substâncias químicas ativas. Quando adicionado ao concreto, as substâncias ativas reagem com a umidade do concreto fresco e com os subprodutos da reação de hidratação do cimento, causando uma reação catalítica. Esta reação gera uma formação cristalina insolúvel nos poros e capilaridades do concreto tornando-o permanentemente selado contra a penetração da água ou substâncias agressivas de qualquer direção e também protegido contra a deterioração mesmo em condições ambientais severas.*

PROCEDIMENTO PARA O USO:

- ✓ *Xypex Admix C-500 NF deve ser adicionado ao concreto no momento da sua dosagem e mistura. A sequência dos procedimentos para a adição varia dependendo do tipo de operação e equipamentos utilizados no canteiro de obra ou usina.*

1. *Concreto Usinado – Operação de Dosagem a seco Adicione no caminhão-betoneira Xypex Admix C-500 NF juntamente com 150 a 250 kg de agregado e 60 a 70% da água. Em seguida, misture por 3 minutos para assegurar que o Admix C-500 NF esteja bem distribuído dentro da água de amassamento. A seguir, adicione o restante do material e continue a mistura de acordo com as práticas padrão.*

2. *Concreto Usinado – Operação de Dosagem Úmida Misture Xypex Admix C-500 NF com a água de amassamento para formar uma pasta bem fluida (por exemplo de 6 a 9 kg de pó misturados com 10 litros de água) e carregue a caçamba do caminhão-betoneira. A seguir, o agregado, cimento e a água devem ser dosados e misturados de acordo com as práticas padrões, levando em conta a quantidade de água já colocada dentro do caminhão. Após a dosagem, misture o concreto por pelo menos 5 minutos para assegurar uma distribuição homogênea do Admix C-500 NF.*

3. *Concreto Preparado em Obra – Operação com Betoneira Adicione Xypex Admix C-500 NF, a brita e a areia e misture por 3 minutos antes de adicionar o cimento e a água. O processo de mistura deve ser feito de acordo com as práticas padrões.*

- ✓ *Nota: É importante se obter uma mistura homogênea do Xypex Admix C-500 NF dentro do concreto. Para garantir uma mistura homogênea e uma boa dispersão, evite adicionar o produto diretamente ao concreto fresco.*

DOSAGEM:

- ✓ *A dosagem recomendada do XYPEX ADMIX C-500 NF é de 1,0 a 1,5% do peso de cimento. Para aumentar a resistência química, otimizar a performance do concreto ou atender a solicitações e condições de projetos específicos, por favor, consulte o nosso departamento técnico para assistência na determinação da dosagem apropriada.*

TEMPO DE PEGA E RESISTÊNCIA:

- ✓ *O tempo de pega do concreto normalmente é influenciado pela composição química e física de seus ingredientes, temperatura do concreto e as condições climáticas. Xypex Admix C-500 NF é formulado especificamente para atender as modernas práticas do concreto que incorpora adições como cinzas volantes e escórias. Para a maioria das dosagens de concretos aditivados com Xypex Admix C-500 NF, são esperados efeitos mínimos ou nenhum efeito no seu tempo de pega.*

✓ *Concretos produzidos com Xypex Admix C-500 NF podem desenvolver resistências iniciais e finais maiores que o concreto comum. Recomendamos que testes sejam executados sob as condições de cada projeto para se determinar o tempo de pega e a resistência do concreto.*

LIMITAÇÕES:

✓ *No momento da dosagem do Xypex Admix C-500 NF, a temperatura do ambiente deve estar acima de 4°C.*

ASSISTÊNCIA TÉCNICA:

✓ *Para informações mais detalhadas sobre métodos de aplicação alternativos ou referentes a compatibilidade do tratamento XYPEX com outros produtos e tecnologias, por favor, consulte o Manual de Aplicação XYPEX ou o nosso departamento técnico.*

PRECAUÇÃO:

✓ *Xypex Admix C-500 NF é alcalino e como outros produtos cimentíceos pode causar irritação na pele e nos olhos. Durante o manuseio, recomendamos o uso de roupas e equipamentos de proteção adequados. Instruções para evitar e tratar estes problemas estão claramente detalhados em todas as embalagens. Também mantemos uma ficha técnica de segurança com informações atualizadas sobre segurança e saúde para a proteção dos nossos funcionários e clientes. Caso seja necessário, por favor, consulte o nosso departamento técnico para obter uma cópia desta ficha técnica antes de usar ou armazenar o produto.*

DADOS TÉCNICOS – XYPEX ADMIX C-500 NF:

Características	*Unidade*	*Valor*	*Observações*
Densidade	*g/cm³*	*1,10*	*Argamassa seca*
Dosagem	*%*	*1,0 a 1,5*	*Do peso do cimento*

CARACTERÍSTICAS – XYPEX ADMIX C-500 NF:

Tipo de produto	*Impermeabilização e Proteção*
Estado	*Pó*
Cor	*Cinza*
Armazenagem	*Armazenar em local seco, coberto e arejado.*
Validade	*12 meses a partir da data de fabricação*
Embalagens	*Sacos de 25 kg*
Descarte	*Para a preservação do meio ambiente, favor, esvaziar completamente as embalagens.*

5 Aditivos Superplastificantes

5.1 Fichas Técnicas dos Aditivos Superplastificantes

5.1.1 Ficha Técnica do Aditivo Superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB

DESCRIÇÃO DO PRODUTO:

- ✓ *Sika ViscoCrete 3535 CB é um aditivo líquido de pega normal de terceira geração para indústria de pré-moldados, concretos de alta resistência inicial, concreto de alto desempenho (CAD) e concreto autoadensável (CAA). Atende aos requisitos da norma EB 1763 (Tipo SP).*

USOS:

- ✓ *Sika ViscoCrete 3535 CB permite uma alta taxa de redução de água, mantendo uma excelente fluidez e uma ótima coesão da massa, permitindo a confecção dos concretos de alto desempenho (CAD). Sika ViscoCrete 3535 CB é usado para os seguintes tipos de concreto:*
  - ➢ *Concretos com elevada redução na água de amassamento;*
  - ➢ *Baixa relação água/cimento (a/c);*
  - ➢ *Concretos de alto desempenho (CAD);*
  - ➢ *Pré-moldados;*
  - ➢ *Concreto dosado em central;*
  - ➢ *Pavimentos;*
  - ➢ *Concretagem de peças esbeltas e densamente armadas;*
  - ➢ *Concreto bombeado;*
  - ➢ *Concreto aparente.*

CARACTERÍSTICAS / VANTAGENS:

- ✓ *Sika ViscoCrete 3535 CB atua por diferentes mecanismos, através dos efeitos de adsorção superficial e separação estérica nas partículas do cimento, e no processo de hidratação. As seguintes propriedades são obtidas:*
  - ➢ *Extremo poder redutor de água, resultando em altas resistências à compressão;*
  - ➢ *Excelente fluidez, resultando em grandes reduções nos custos de lançamento e adensamento do concreto;*
  - ➢ *Reduz retrações e fissuras no concreto;*

- *Possibilita a redução ou eliminação da cura a vapor;*
- *Reduz a taxa de carbonatação do concreto;*
- *Concreto fluido com mínimo relação a/c sem segregação e exsudação;*
- *Melhora a aderência e a textura da superfície do concreto;*
- *Aumenta a impermeabilidade e durabilidade do concreto;*
- *Não contém adição de cloretos.*

DADOS DO PRODUTO:

Forma	*Líquido*
Aspecto / Cor	*Castanho claro*
Embalagem	*Tambor de 200 litros, Granel e Container de 1000 litros.*

ESTOCAGEM - CONDIÇÕES DE ESTOCAGEM / VALIDADE:

✓ *12 meses a partir da data de produção se estocado apropriadamente, nas embalagens originais e intactas, em temperaturas entre +5°C e +35°C. Protegido da luz direta do sol e do gelo.*

DADOS TÉCNICOS:

Composição básica	*Solução de policarboxilato em meio aquoso*
Densidade	*~ 1,1 kg/ litro*
pH	*4,5 ± 1*
Efeito na Pega	*Abaixo do teor de saturação não retarda a pega*
Efeito da super dosagem	*Poderá haver exsudação*

INFORMAÇÃO DO SISTEMA:

1. DETALHES DA APLICAÇÃO:

- *Sika ViscoCrete 3535 CB é adicionado na água de amassamento ou diretamente na mistura de concreto fresco. Nunca adicionar Sika ViscoCrete® 3535 CB com os componentes secos do concreto (cimento e agregados).*
- *Para um melhor desempenho, recomenda-se um tempo de mistura de no mínimo 3 minutos. A adição de água para o acerto da consistência só deverá ser efetuada depois de decorridos 2/3 do tempo de mistura especificado, de forma a evitar adição em excesso de água. Este tempo poderá variar em função do tipo de equipamento de mistura a ser utilizado. Com o uso de Sika ViscoCrete 3535 CB são obtidos concretos de alta qualidade e excelente acabamento. Os padrões e regras de boas práticas de concretagem (produção, lançamento e cura) devem ser observados para os concretos produzidos com Sika ViscoCrete 3535 CB.*

- *Importante: Para produção de concreto fluido e concreto de alto desempenho (CAD) com Sika ViscoCrete 3535 CB poderá ser necessário ajustar o traço do concreto para um bom desempenho.*

2. ***CONSUMO / DOSAGEM:***

- *Concreto plástico: De 0,5 a 1,0% sobre o peso do cimento (0,5 a 1,0kg para cada 100kg de cimento Portland).*
- *Concreto fluido ou autoadensável: De 1,1 a 1,5% sobre o peso do cimento (1,1 a 1,5 kg para cada 100kg de cimento Portland).*
- *A dosagem ótima deverá ser determinada através de ensaios experimentais com o traço e os materiais da obra, podendo a mesma está fora da faixa indicativa acima.*

3. ***COMPATIBILIDADE:***

- *Sika ViscoCrete 3535 CB pode ser combinado com os seguintes produtos Sika:*
- *Sika Pump, Sika Ferrogard 901, Sika Aer, plastificantes e polifuncionais da linha Plastiment, Plastimixer e Sikament. Recomendam-se ensaios de compatibilidade com os produtos acima para determinar o efeito no traço.*

4. ***BASE DOS VALORES:***

- *Todos os dados técnicos aqui contidos são baseados em testes de laboratórios. Medidas de valores em condições reais podem variar devido a condições fora de nosso controle.*

INFORMAÇÕES DE SEGURANÇA E ECOLOGIA:

- ✓ *Para maiores informações sobre manuseio, estocagem e disposição dos resíduos consulte a versão mais recente de nossa Ficha de Segurança do Material que contém os dados disponíveis, das propriedades físicas, de ecologia, de toxidade, e outros dados de segurança pertinentes.*

NOTA LEGAL:

- ✓ *As informações e em particular as recomendações relacionadas com a aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas de boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as diferenças no estado do material, das superfícies, e das condições de aplicação no campo, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um determinado fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de quaisquer recomendações por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser*

observados. Todas as encomendas aceitas estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os usuários deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que solicitadas.

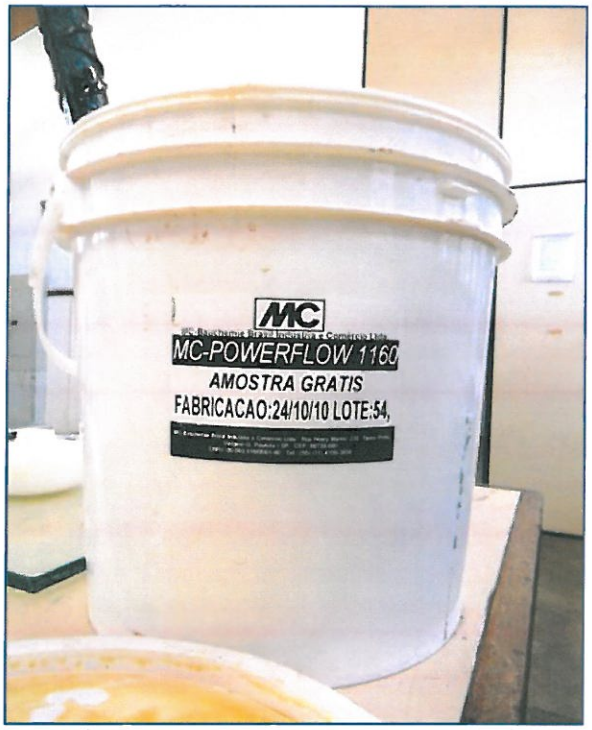


Figura 8 – Aditivo SP, MC-PowerFlow 1160

5.1.2 Ficha Técnica dos Aditivos Superplastificantes MC-PowerFlow 1159 e MC-PowerFlow 1160

PROPRIEDADES:

- ✓ *Grande redução na quantidade de água*
- ✓ *Dosagens econômicas*
- ✓ *Alta resistência inicial*
- ✓ *Excelente qualidade das superfícies em concreto*

ÁREAS DE APLICAÇÃO:

- ✓ *Pré-moldados*
- ✓ *Concreto autoadensável*
- ✓ *Concreto com alta resistência a agentes agressivos*
- ✓ *Concreto aparente*
- ✓ *Concreto de alto desempenho*
- ✓ *Concreto de alta fluidez*
- ✓ *Concreto usinado*

APLICAÇÃO:

- ✓ *MC-PowerFlow 1159 (1160) é um superplastificante sintético baseado na nova tecnologia de polímeros policarboxilatos (PCE) desenvolvida pela MC. Em função da melhoria na resistência inicial o MC-PowerFlow 1159 (1160) é especialmente adequado para o uso em fábricas de concreto pré-moldado e na produção de elementos protendidos.*
- ✓ *Seu específico mecanismo de funcionamento torna possível a produção de concretos com conteúdos de água extremamente baixos e concretos de alto desempenho com dosagens econômicas.*
- ✓ *Através da manutenção do conteúdo de água podem-se produzir concretos com diversas consistências.*
- ✓ *A combinação especial de diversos agentes ativos permite a produção de concretos homogêneos e sem segregação. Desta maneira, a utilização do MC-PowerFlow 1159 (1160) resulta em concretos com acabamento de alta qualidade reduzindo os trabalhos posteriores para melhorar a superfície e a aparência.*

- ✓ *MC-PowerFlow 1159 (1160) pode ser utilizado em conjunto com outros aditivos da MC. Por favor, peça pelos serviços do nosso departamento de tecnologia de concreto para orientação sobre as melhores combinações.*

- ✓ *MC-PowerFlow 1159 (1160) deve ser adicionado ao concreto durante o processo de mistura. Sua adição é mais efetiva quando feita junto à água do traço. O tempo de mistura deve ser suficiente para permitir a total dispersão do aditivo e seu efeito plastificante.*

- ✓ *No caso de dosagens em caminhões betoneira na obra, por favor, siga corretamente as orientações e recomendações para a adição e mistura.*

DADOS TÉCNICOS - MC-POWERFLOW 1159 (1160):

Característica	*Unidade*	*Valor*	*Comentários*
Densidade	*g / cm³*	*1,06*	
Dosagem Recomendada	*%*	*0,2 a 5,0*	*Sobre o peso do cimento*
Max. teor de cloreto	*%*	*< 0,10*	
Max. conteúdo alcalino	*%*	*< 1,0*	

CARACTERÍSTICAS - MC-POWERFLOW 1159 (1160):

Tipo de produto	*Superplastificante*
Estado	*Líquido*
Cor	*Marrom*
Armazenagem	*Armazenar os tambores em local seco, coberto e arejado.* *Para entregas a granel o produto deve ser mantido dentro dos reservatórios instalados em local previamente definidos*
Validade	*12 meses a partir da data de fabricação*
Embalagens	*Tambor de 200 kg* *Granel*
Descarte	*Para a preservação do meio ambiente, favor esvaziar completamente as embalagens*

superplastificante EN 934-2: T3.1/3.2

5.1.3 Ficha Técnica do Aditivo Superplastificante MC-PowerFlow 1102

A ficha técnica do aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 não foi publicada ainda pela MC-Bauchemie Brasil Indústria e Comércio Ltda., por se tratar de um novo produto, ainda não lançado para venda no mercado. Entretanto, sabe-se que a referida ficha deverá ser muito similar às dos aditivos MC-PowerFlow 1159 e MC-PowerFlow 1160, considerando que há também, segundo o fabricante, similaridade entre suas composições químicas e suas demais características.

5.2 Resultado dos Ensaios com os Aditivos Superplastificantes

5.2.1 Resultado dos Ensaios com o Sika ViscoCrete 3535 CB

Os resultados dos ensaios do funil de Marsh realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB são apresentados na tabela 38.

Tabela 38 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Tempo para Escoar 500 ml de Pasta (s)
0,50	12,91	36,87	1,43	23,97	702,28	230,00
0,62	16,00	45,72	1,77	29,72	696,53	159,00
0,74	19,10	54,57	2,11	35,47	690,78	95,00
0,84	21,68	61,94	2,40	40,26	685,99	34,68
0,86	22,20	63,42	2,46	41,22	685,03	28,22
0,88	22,71	64,89	2,51	42,18	684,07	22,15
0,90	23,23	66,37	2,57	43,14	683,11	20,03
0,92	23,75	67,84	2,63	44,10	682,15	25,64
0,94	24,26	69,32	2,69	45,06	681,19	26,94
0,98	25,29	72,27	2,80	46,97	679,28	27,84
1,20	30,97	88,49	3,43	57,52	668,73	31,62
1,50	38,72	110,61	4,29	71,90	654,35	32,34

Os resultados dos ensaios do minicone de Kantro realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB são apresentados na tabela 39.

Tabela 39 - Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante Sika ViscoCrete 3535 CB

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Diâmetro com 1 minuto (cm)	Diâmetro Máximo (cm)
0,50	12,91	36,87	1,43	23,97	702,28	18,00	18,50
0,62	16,00	45,72	1,77	29,72	696,53	18,50	19,00
0,74	19,10	54,57	2,11	35,47	690,78	20,00	21,00
0,84	21,68	61,94	2,40	40,26	685,99	21,00	22,50
0,86	22,20	63,42	2,46	41,22	685,03	22,00	23,50
0,88	22,71	64,89	2,51	42,18	684,07	23,00	24,50
0,90	23,23	66,37	2,57	43,14	683,11	23,50	25,00
0,92	23,75	67,84	2,63	44,10	682,15	23,00	24,50
0,94	24,26	69,32	2,69	45,06	681,19	22,80	24,00
0,98	25,29	72,27	2,80	46,97	679,28	22,60	23,80
1,20	30,97	88,49	3,43	57,52	668,73	22,40	23,60
1,50	38,72	110,61	4,29	71,90	654,35	22,20	23,40

5.2.2 Resultado dos Ensaios com o MC-PowerFlow 1159

Os resultados dos ensaios do funil de Marsh realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159 são apresentados na tabela 40.

Tabela 40 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Tempo para Escoar 500 ml de Pasta (s)
0,60	15,49	51,62	2,00	36,13	690,12	52,72
0,84	21,68	72,27	2,80	50,59	675,66	47,50
0,86	22,20	73,99	2,87	51,79	674,46	46,80
0,88	22,71	75,71	2,93	53,00	673,25	45,10
0,90	23,23	77,43	3,00	54,20	672,05	44,53
0,92	23,75	79,15	3,07	55,41	670,84	44,43
1,20	30,97	103,24	4,00	72,27	653,98	44,38
1,50	38,72	129,05	5,00	90,34	635,92	44,34

Os resultados dos ensaios do minicone de Kantro realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159 são apresentados na tabela 41.

Tabela 41 - Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1159

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Diâmetro com 1 minuto (cm)	Diâmetro Máximo (cm)
0,60	15,49	51,62	2,00	36,13	690,12	15,00	15,20
0,84	21,68	72,27	2,80	50,59	675,66	15,30	15,50
0,86	22,20	73,99	2,87	51,79	674,46	16,00	16,25
0,88	22,71	75,71	2,93	53,00	673,25	17,00	17,30
0,90	23,23	77,43	3,00	54,20	672,05	17,20	17,50
0,92	23,75	79,15	3,07	55,41	670,84	17,50	17,70
1,20	30,97	103,24	4,00	72,27	653,98	17,75	17,85
1,50	38,72	129,05	5,00	90,34	635,92	17,90	18,00

5.2.3 Resultado dos Ensaios com o MC-PowerFlow 1160

Os resultados dos ensaios do funil de Marsh realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1160 são apresentados na tabela 42.

Tabela 42 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1160

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Tempo para Escoar 500 ml de Pasta (s)
0,70%	18,07	60,22	2,33%	42,16	684,09	53,28
0,80%	20,65	68,83	2,67%	48,18	678,07	47,78
0,88%	22,71	75,71	2,93%	53,00	673,25	42,41
0,92%	23,75	79,15	3,07%	55,41	670,84	40,18
0,96%	24,78	82,59	3,20%	57,81	668,44	39,76
1,02%	26,33	87,75	3,40%	61,43	664,82	39,31
1,08%	27,87	92,92	3,60%	65,04	661,21	38,95
1,20%	30,97	103,24	4,00%	72,27	653,98	38,84

Os resultados dos ensaios do minicone de Kantro realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1160 são apresentados na tabela 43.

Tabela 43 - Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1160

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Diâmetro com 1 minuto (cm)	Diâmetro Máximo (cm)
0,70%	18,07	60,22	2,33%	42,16	684,09	16,75	17,50
0,80%	20,65	68,83	2,67%	48,18	678,07	17,65	18,50
0,88%	22,71	75,71	2,93%	53,00	673,25	18,05	19,00
0,92%	23,75	79,15	3,07%	55,41	670,84	18,30	19,30
0,96%	24,78	82,59	3,20%	57,81	668,44	18,65	19,70
1,02%	26,33	87,75	3,40%	61,43	664,82	19,30	20,10
1,08%	27,87	92,92	3,60%	65,04	661,21	19,75	20,45
1,20%	30,97	103,24	4,00%	72,27	653,98	19,80	20,50

5.2.4 Resultado dos Ensaios com o MC-PowerFlow 1102

Os resultados dos ensaios do funil de Marsh realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 são apresentados na tabela 44.

Tabela 44 – Resultados dos ensaios do funil de Marsh em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Tempo para Escoar 500 ml de Pasta (s)
0,70%	18,07	60,22	2,33%	42,16	684,09	46,22
0,88%	22,71	75,71	2,93%	53,00	673,25	45,53
0,92%	23,75	79,15	3,07%	55,41	670,84	44,52
0,96%	24,78	82,59	3,20%	57,81	668,44	41,76
1,00%	25,81	86,03	3,33%	60,22	666,03	40,36
1,04%	26,84	89,47	3,47%	62,63	663,62	37,90
1,08%	27,87	92,92	3,60%	65,04	661,21	30,63
1,20%	30,97	103,24	4,00%	72,27	653,98	29,95
1,40%	36,13	120,45	4,67%	84,31	641,94	29,13
1,45%	37,42	124,75	4,83%	87,32	638,93	29,84
1,50%	38,72	129,05	5,00%	90,34	635,92	30,55
1,55%	40,01	133,35	5,17%	93,35	632,90	37,24

Os resultados dos ensaios do minicone de Kantro realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102 são apresentados na tabela 45.

Tabela 45 - Ensaio do minicone de Kantro em pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivo superplastificante MC-PowerFlow 1102

Relação sp/c (%)	Parte Sólida do Aditivo (g)	Peso Total do Aditivo (g)	Relação p/c (%)	Água do Aditivo (g)	Água a Adicionar (g)	Diâmetro com 1 minuto (cm)	Diâmetro Máximo (cm)
0,70%	18,07	60,22	2,33%	42,16	684,09	18,00	18,20
0,88%	22,71	75,71	2,93%	53,00	673,25	19,00	19,25
0,92%	23,75	79,15	3,07%	55,41	670,84	19,50	19,80
0,96%	24,78	82,59	3,20%	57,81	668,44	19,80	20,30
1,00%	25,81	86,03	3,33%	60,22	666,03	20,00	20,60
1,04%	26,84	89,47	3,47%	62,63	663,62	20,50	21,10
1,08%	27,87	92,92	3,60%	65,04	661,21	21,50	22,50
1,20%	30,97	103,24	4,00%	72,27	653,98	22,00	23,00
1,40%	36,13	120,45	4,67%	84,31	641,94	23,20	24,75
1,45%	37,42	124,75	4,83%	87,32	638,93	22,40	23,65
1,50%	38,72	129,05	5,00%	90,34	635,92	21,60	22,85
1,55%	40,01	133,35	5,17%	93,35	632,90	21,30	22,50

5.2.5 Resumo dos Resultados dos Ensaios e dos Pontos de Saturação

O resumo dos resultados dos ensaios realizados com pastas produzidas com cimento CP II-Z-32 e aditivos superplastificantes são apresentados nas tabelas 46 e 47.

Tabela 46 - Resumo dos resultados dos ensaios do funil de Marsh

Característica	Sika ViscoCrete 3535 CB	MC-PowerFlow 1159	MC-PowerFlow 1160	MC-PowerFlow 1102
Relação sp/c no ponto de saturação	0,90%	0,92%	0,92%	1,40%
Tempo de escoamento de 500 ml no ponto de saturação	20,03 s	44,43 s	40,18 s	29,13 s
Tendência do gráfico a partir do partir do ponto de saturação	Tempo de escoamento passou a aumentar	Tempo de escoamento estabilizou-se com pequenos decréscimos	Tempo de escoamento estabilizou-se com pequenos decréscimos	Tempo de escoamento passou a aumentar

Tabela 47 - Resumo dos resultados dos ensaios do miniabatimento de Kantro

Característica	Sika ViscoCrete 3535 CB	MC-PowerFlow 1159	MC-PowerFlow 1160	MC-PowerFlow 1102
Relação sp/c no ponto de saturação	0,90%	0,92%	0,92%	1,40%
Diâmetro de espraiamento médio medido com um minuto	23,50 cm	17,50 cm	18,30 cm	23,20 cm
Diâmetro de espraiamento médio máximo	25,00 cm	17,70 cm	19,30 cm	24,75 cm
Diferença entre os diâmetros de espraiamento com um minuto e máximo (em cm e %)	1,50 cm (6,38%)	0,20 cm (1,14%)	1,00 cm (5,46%)	1,55 cm (6,68%)
Tendência do gráfico a partir do partir do ponto de saturação	Espraiamento passou a diminuir	Espraiamento estabilizou-se com pequenos acréscimos	Espraiamento estabilizou-se com pequenos acréscimos	Espraiamento passou a diminuir