LEANDRO FRANCISCO MORETTI SANCHEZ

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS MÉTODOS DE ENSAIO NA AVALIAÇÃO DAS REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da USP para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil

São Paulo
2008

LEANDRO FRANCISCO MORETTI SANCHEZ

CONTRIBUIÇÃO AO ESTUDO DOS MÉTODOS DE ENSAIO NA AVALIAÇÃO DAS REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETOS

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Engenharia Civil da USP para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil

Área de Concentração:
Departamento de Engenharia de Construção Civil (PCC)

Orientador: Prof. Paulo Helene

São Paulo
2008

“Ao engenheiro do povo, cientista da vida, Sr. Francisco Sanchez Pascoal, meu querido avô, esteja onde estiver; pois suas habilidades intelectuais e morais permanecem em minha mente, encorajando-me a seguir em frente. Saudades”.

“Ao grande engenheiro, mestre, melhor amigo e pai, Sr. Francisco Giampietro Sanchez, pelo apoio incondicional”.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, gostaria de agradecer a casa “Irmão Brogotá”, particularmente ao seu idealizador Sr. Cláudio Sérgio Infanti, onde semanalmente são formados MSc’s e Phd’s na arte da caridade e do amor ao próximo. Sem eles, eu não seria quem sou.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. Paulo Helene, pelo apoio durante todo o período de trabalho, pela visão de sucesso do projeto e por ter me dado a oportunidade de participar dessa pesquisa.

Ao meu co-orientador, mestre, chefe e amigo Prof. Dr. Selmo Kuperman, pela ajuda, preocupação e por todas as oportunidades profissionais e pessoais a mim concedidas.

Ao Dr. Yushiro Kihara por ter aberto as portas da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland) para meus estudos, pelas críticas construtivas e incentivo ao trabalho e por todas os ensinamentos concedidos.

À ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), particularmente ao eng° MSc. Flávio Munhoz e ao geólogo Marcelo Pecchio pela ajuda, confiança e amizade durante todo trabalho.

Aos meus grandes amigos do laboratório de concreto e argamassa da ABCP: Rubens, José Cícero, Lucas, Macedo, Cláudio, Edgar e Alice, pelos momentos que passamos juntos; da confecção do concreto à queda pra segunda divisão.

Ao Prof. Dr. José Roberto Cardoso, vice-diretor da Escola Politécnica, por todo o incentivo na fase onde tudo ainda parecia nebuloso para mim, e pela grande amizade familiar ao longo dos anos.

Ao engº Flávio Salles da CESP, pelo apoio, fornecimento de materiais, discussões técnicas e amizade durante os últimos anos.

À CESP (Companhia Energética de São Paulo), e a todos os técnicos de laboratório que lá se encontram, por ter me capacitado a participar deste projeto.

À Dr. Nicole Hasparyk pelo apoio, amizade, ensinamentos e pela contribuição neste trabalho.

À Furnas Centrais Elétricas, particularmente ao engº MSc. Alexandre Castro, pelos ensinamentos e pela ajuda no tratamento estatístico de meus dados.

À Escola Politécnica da Universidade de São Paulo por ter me dado a oportunidade de realizar dois grandes sonhos: ser seu aluno e conseguir realizar o mestrado.

À Escola de Engenharia Mauá e ao Colégio Rio Branco, por terem me dado embasamento para a realização desse sonho.

À todos os funcionários do laboratório de concreto da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, particularmente ao Reginaldo e Adílson, pelo apoio e colaboração durante o projeto.

Gostaria de agradecer a Tecomat, particularmente ao eng° MSc. Tibério Andrade pelo fornecimento de materiais para a pesquisa e, acima de tudo, pela grande amizade que fizemos durante os últimos anos.

À construtora Cunha Braga e seus funcionários, principalmente o Sr. Vicente, o Sr. Donosor de Oliveira Neto, e o Sr. João Nunes, pelos ensinamentos de vida, por toda a ajuda com a locomoção e montagem dos equipamentos e, acima de tudo, pelo grande apreço que tenho por eles.

À THE pela elaboração do aparelho (resistência e termostato) que regulava o equipamento de banho-maria e por termos raciocinado juntos para o desenvolvimento de um equipamento não tão “nobre”, mas que atendesse a necessidade.

À Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo fornecimento de uma estufa ventilada para a confecção dos ensaios e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo apoio financeiro durante grande parte desta pesquisa.

Aos colegas da antiga sala “Olimpo”, agora ”Asteróide” e companheiros das disciplinas de mestrado: Marcos Mitre, Tiago Mendes, Marcelo Medeiros, Maurício Garcia, Ricardo Alencar, Atabírio, Fernanda Wanderley, Fernando Montija, Ricardo Telles, Paulo Barbosa, Silvia Giacobbe, Patrícia Silva e Carlos Britez pela grande amizade ao longo dos últimos anos.

Gostaria de agradecer imensamente às três mulheres de minha vida: Salete, Lizandra e Diana, respectivamente mãe, irmã e noiva. A primeira é meu exemplo, minha luz, meu porto seguro; a segunda é exemplo de luta, de coragem, de genialidade. A terceira é o amor da minha vida, minha companheira, meu equilíbrio, meu sonho, minha família. Sem elas, nada seria possível.

Ao meu pai, por todo o incentivo, por ter sempre acreditado em mim, mas acima de tudo, por todos os ensinamentos distribuídos através de conversas ao longo de todos esses anos. Muitas das coisas que acredito, pode ter certeza, aprendi no banco de trás de um Voyage branco, a caminho do Colégio Rio Branco.

Aos meus avós, Francisco Sanchez Pascoal, D. Nancielza e Santina Moretti, os iniciadores de tudo. Gostaria de relembrar que o sucesso da nossa geração é fruto da magnífica e exemplar vida que eles tiveram.

À Prof. de Física do colégio Rio Branco, Dr. Virgínia Simões Cortês, pois através de algumas palavras, ela redirecionou o meu futuro.

Ao Prof. de Matemática Aplicada Aguinaldo Prandini Ricieri, que após ensinar muitas derivadas simples e parciais, integrou a semente do conhecimento no coração de todos os seus alunos. Saudades daquele tempo no n° 596 da Tamandaré.

Gostaria de agradecer a todos de minha família e aos meus amigos, pois estes são indiretamente colaboradores deste trabalho.

À Deus, por ter me dado a oportunidade de realizar um sonho.

“Pesquisar é sonhar, imaginar, idealizar. É buscar incessantemente o desconhecido, o desabitado, o obstruído. É cansar, de tanto lutar e nada encontrar, e por muitos e muitos instantes fraquejar; e finalmente, é acabar sendo encontrado, por aquilo que jamais imaginou procurar”.

Leandro Sanchez

“Não é importante quem sou, não é importante aonde vou.
Se vou pelo meu caminho, no caminho certo estou“.

Lizandra Sanchez

SANCHEZ, L. F. M. **Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregados em concretos.** São Paulo, 2008. 170 p. Dissertação de mestrado – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

RESUMO

Muitas estruturas e elementos estruturais de concreto vêm sofrendo nas últimas décadas reações químicas deletérias do tipo álcali-agregado (RAA) no Brasil e no mundo. Essas reações geram expansões que podem comprometer a capacidade portante da estrutura, assim como o seu desempenho em serviço e sua durabilidade.

Diagnosticar uma estrutura deteriorada pela RAA “in loco” é um assunto ainda pouco estudado, mas perfeitamente possível. Propor uma solução em termos de recuperação e/ou reforço é difícil e geralmente tem custo muito elevado, correndo-se o risco de que a solução, na maioria das vezes, seja ineficiente ou parcial.

Até os dias atuais, não existe um consenso no meio técnico-científico no que tange a recuperação de estruturas afetadas por tal manifestação deletéria, devendo ser cada caso analisado de maneira única. No entanto, é consenso no meio técnico-científico que o ideal para combater a RAA é a prevenção. Para isto, torna-se necessário o desenvolvimento e a utilização de métodos experimentais, que possam de maneira antecipada detectar o risco da eventual futura reação deletéria.

Este trabalho estuda os principais e mais utilizados métodos de ensaio para a análise de agregados e de combinações cimento/agregados em laboratório, fazendo ao seu final, uma análise crítica no que tange a eficiência e confiabilidade de cada um deles. Para o presente estudo, são utilizados seis agregados encontrados no Brasil, com quatro litologias diferentes (dois granitos, dois basaltos, um milonito e um quartzito).

Entre os ensaios estudados, podem ser citados os métodos AMBT, (método acelerado de barras de argamassa), CPT (método dos prismas de concreto), ACPT (método acelerado de prismas de concreto) e ACPST (método acelerado de prismas de concreto imerso em solução), além de análises petrográficas através do microscópio ótico.

Além da análise comparativa entre métodos de ensaio existentes, esta dissertação propõe ao meio técnico um novo método de ensaio, denominado ABCPT (método acelerado brasileiro de prismas de concreto). Este método foi desenvolvido com o intuito de possuir a confiabilidade de resposta do método CPT e a agilidade do ensaio ACPST.

Os resultados demonstram que todos os métodos de ensaio realizados em concreto (CPT, ACPT, ACPST e ABCPT) possuem grande correlação entre si, podendo ser utilizado qualquer um deles para classificação da reatividade potencial de agregados em laboratório. Já o ensaio de barras de argamassa (AMBT) apresenta incongruências na análise e classificação de agregados quando comparado com os métodos realizados em concreto e a análise petrográfica. Portanto, os parâmetros que envolvem o ensaio como suas condições de armazenamento, limites, etc., precisam ser repensados e aprimorados.

Palavras chave: Reação álcali-agregado. Métodos de ensaio. AMBT (método acelerado de barras de argamassa). CPT (método de prismas de concreto). ACPT (método acelerado de prismas de concreto). ABCPT (método acelerado brasileiro de prismas de concreto). ACPST (método acelerado de prismas de concreto imerso em solução).

SANCHEZ, L. F. M. **Contribution to the study of test methods in assessing alkali-aggregate reactions in concrete** São Paulo, 2008. 170 p. Master of Science Thesis – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo.

ABSTRACT

Many concrete structures have been suffering from alkali-aggregate reactions (AAR) since the last decades in Brazil and around the world. The reactions generate expansions that could compromise the strength of a concrete structure as well as its performance in service and its durability.

Nowadays, it is completely possible to detect AAR in the field, but repair and reinforce a damaged structure is difficult, very expensive and in most cases inefficient or partial.

There is no consensus in the market on how to repair and reinforce damaged structures. However, there is a consensus that the best way to face the problem is the prevention.

This work studies the main test methods used to analyze aggregates and the combinations cement/aggregates in the laboratory and finally comparing them. In this work six Brazilian aggregates with four different lithologies (two granites, two basalts, one granite-gneiss and one quartzite) were used.

Among the test methods studied were AMBT (accelerated mortar bar test), CPT (concrete prism test), ACPT (accelerated concrete prism test), ACPST (accelerated concrete prism soaked test) and petrographic analysis.

Beyond the comparison among used tests, this work presents the attempt to develop a new accelerated test method. The test was called ABCPT (accelerated Brazilian concrete prism test), and it was developed with the aim of being as reliable as CPT and as fast as the ACPST.

The results show that all concrete test methods (CPT, ACPT, ACPST and ABCPT) have good correlation among them, and anyone can be used to classify and analyze aggregates in the laboratory. On the other hand, the AMBT test method has showed different classifications for the same aggregates when compared to the concrete test methods and petrographic analysis. Therefore, its parameters need to be rethought and improved.

Keywords: Alkali-aggregate reaction. Test methods. AMBT (accelerated mortar bar test). CPT (concrete prism test). ACPT (accelerated concrete prism test). ABCPT (accelerated Brazilian concrete prism test). ACPST (accelerated concrete prism soaked test).

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fatores necessários para ocorrência da reação álcali-agregado (RAA). 31
Figura 2. Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas (TURRIZIANI, 1986 apud HASPARYK, 2005). 33
Figura 3. Fotomicrografia de um poro de concreto preenchido com gel (PECCHIO, KIHARA, BATTAGIN, ANDRADE, 2006). 34
Figura 4. Risco de ocorrência da reação em função da relação entre o teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento no concreto (OBERHOLSTER, VAN AARDT & BRANDT, 1983 apud HASPARYK, 1999). 37
Figura 5. Teor péssimo de material reativo (HOBBS, 1988 apud HASPARYK, 1999). 38
Figura 6. Umidade necessária para ocorrência da RAA (POOLE, 1992 apud MUNHOZ, 2007). 39
Figura 7. Efeito de cintamento (confinamento) na expansão provocada pela RAA (FOURNIER & BERUBÉ, 2000). 43
Figura 8. Quadro fissuratório ocasionado pela RAA (ANDRADE, 2006). 44
Figura 9. Exsudação do produto de reação (HASPARYK, DAL MOLIN, MONTEIRO, 2006). 45
Figura 10. Quadro fissuratório gerado pela RAA em um bloco de concreto (ACI COMMITEE 221, 1998). 46
Figura 11. Estudo da temperatura para utilização do ensaio acelerado (NBRI). 55
Figura 12. Estudo da concentração da solução para utilização do ensaio acelerado (NBRI). 56
Figura 13. Curva de expansão no tempo do método MBT (ASTM C 227) e AMBT (NBRI) (OBERHOLSTER & DAVIES, 1985). 57
Figura 14. Correlação entre o método MBT (ASTM C 227) e o AMBT (NBRI) para três tipos diferentes de agregados. 57
Figura 15. Utilização de granulometrias diferentes quando da utilização do método acelerado de barras de argamassa (AMBT) (BELLEW, FOURNIER & LU, 2006). 59
Figura 16. Variação da expansão para vários tipos de agregados e com um mesmo cimento, para uma variação da relação a/c (FOURNIER & BERUBÉ 1991). 61
Figura 17. Variação da expansão de barras de argamassa para um mesmo agregado, através da variação da concentração da solução (FOURNIER & BERUBÉ 1991). 62
Figura 18. Variação da expansão com a variação da temperatura no ensaio de barra de argamassa (FOURNIER & BERUBÉ, 1991). 62
Figura 19. Correlação entre os métodos ASTM C 1260 e ASTM C 1293 para 22 tipos de agregados chineses (LEE, LIU & WANG, 2004). 63

Figura 20. Estudo de limites e datas do método AMBT (HOOTON & ROGERS, 1993). 64
Figura 21. Análise comparativa com 11 agregados de diferentes partes do mundo entre o método ASTM C 1260 e o método ASTM C 1293 (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006). 65
Figura 22. Análise comparativa entre os métodos ASTM C 1260 e ASTM C 1293 (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006). 65
Figura 23. Variação da concentração alcalina na película de água do ensaio ASTM C 1293 com o passar do tempo (THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA 2006). 71
Figura 24. Corpos de prova cobertos com capa de plástico para a Inibição da lixiviação (RIVARD, BERUBÉ, OLLIVER & BALLIVY, 2003). 71
Figura 25. Análise comparativa entre prismas de concreto confeccionados em laboratório contendo adição alcalina e blocos confeccionados em campo sem adição alcalina (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006). 72
Figura 26. Expansões do método CPT com a utilização de cimentos de baixo e alto teores alcalinos, com e sem adição de NaOH na água de amassamento (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006). 72
Figura 27. Variação da expansão de agregado canadense (Spratt Limestone) quando da utilização de areias inócuas de espécies diferentes (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006). 73
Figura 28. Variação da Expansão de agregado canadense (Sudbury) quando da utilização de areias inócuas de espécies diferentes (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006). 73
Figura 29. Recipientes de plástico e câmara úmida a 38 ± 2° C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, SHEHATA, FOLLIARD, THOMAS, BAXTER, 2004)..... 74
Figura 30. Recipiente utilizado para o CPT (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 74
Figura 31. Latas de Aço Inox para armazenar prismas de concreto a 38 ± 2º C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 75
Figura 32. Recipiente que desempenha o papel de banho-maria nas latas que armazenam prismas de concreto a 38 ± 2° C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 75
Figura 33. Estufa que armazena recipientes de plástico a 38 ± 2° C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 75

Figura 34. Correlação entre o CPT e o ACPT após vários estudos de muitos pesquisadores (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 77
Figura 35. Expansão do agregado Spratt Limestone (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 78
Figura 36. Expansão do agregado Sudbury Gravel (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 78
Figura 37. Concentração de álcalis na película de água do ensaio de prismas de concreto proveniente da lixiviação (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 79
Figura 38. Variação da expansão de prismas de concreto (Contendo Spratt Limestone como Agregado Graúdo) através da variação do tipo da areia inócua no método ACPT (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006). 80
Figura 39. Variação da expansão de prismas de concreto (Contendo Agregado de Sudbury como Agregado Graúdo) através da variação do tipo da areia inócua no método ACPT (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006). 80
Figura 40. Comparação entre o método CPT a 1 ano e o método ACPT a 1 mês (LEE, LIU & WANG, 2004). 82
Figura 41. Comparação entre o método CPT a 1 ano e o método ACPST aos 3 meses (LEE, LIU & WANG, 2004)..... 82
Figura 42. Estudo da correlação (ACPST e CPT) com o tempo (LEE, LIU & WANG, 2004). 83
Figura 43. Comparação entre 10 agregados oriundos do Canadá, EUA e China, utilizando o método CPT a 1 ano e o CMBT a 1 mês (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006). 84
Figura 44. Fluxograma de ensaios executados..... 90
Figura 45. Granito de Embu das Artes. 92
Figura 46. Basalto de Birigui. 93
Figura 47. Quartzito de Ilha Solteira..... 94
Figura 48. Granito - gnaisse (milonito) de Recife. 95
Figura 49. Análise petrográfica do granito de Embu das Artes..... 95
Figura 50. Análise petrográfica do basalto de Americana. 96
Figura 51. Análise petrográfica do basalto de Birigui. 96
Figura 52. Análise petrográfica do milonito de Recife. 96
Figura 53. Análise petrográfica do granito de Recife. 97
Figura 54. Foto das barras de argamassa utilizadas no método AMBT. 98
Figura 55. Detalhe do recipiente de aço inox. 98
Figura 56. Detalhe das estufas utilizadas para armazenamento do recipiente de aço inox. . 99

Figura 57. Recipiente de armazenamento e imersão das barras em soda. 99
Figura 58. Leitura de expansão das barras de argamassa através do relógio comparador. 100
Figura 59. Haste de medida do comprimento efetivo. 103
Figura 60. Colocação da haste entre pinos. 103
Figura 61. Medição do comprimento da haste (comprimento efetivo entre pinos). 103
Figura 62. Formas utilizadas no ensaio CPT 104
Figura 63. Separação do agregado miúdo para concretagem. 104
Figura 64. Agregado graúdo para concretagem (granito - Embu das Artes). 104
Figura 65. Recipiente para confecção do concreto. 105
Figura 66. Desforma do corpo de prova. 106
Figura 67. Prisma de concreto utilizado no CPT de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm. 106
Figura 68. Leitura inicial do prisma de concreto em relógio comparador (precisão de milésimo de milímetro). 106
Figura 69. Suporte para encaixe dos corpos de prova. 107
Figura 70. Corpos de prova encaixados no suporte. 107
Figura 71. Recipiente de armazenamento em estufa controlada a 38°C. 107
Figura 72. Foto interna do recipiente de armazenamento contendo os corpos de prova. 108
Figura 73. Aparelho de banho-maria para realização do método ACPT. 109
Figura 74. Foto dos prismas utilizados no método ACPT. 109
Figura 75. Foto da leitura inicial dos prismas. 109
Figura 76. Armazenamento dos prismas de concreto no recipiente de banho-maria. 110
Figura 77. Recipiente de armazenamento interno fechado. 110
Figura 78. Caixa d água coberta com isopor. 110
Figura 79. Estufa utilizada no ensaio. 111
Figura 80. Recipiente de polietileno utilizado para armazenar os corpos de prova dentro da estufa ventilada. 111
Figura 81. Prismas dentro do recipiente de Polietileno. 112
Figura 82. Recipiente de armazenamento do ensaio ABCPT. 113
Figura 83. Prismas de concreto imersos em solução (ABCPT). 113
Figura 84. Variação da média das expansões ao longo do tempo no método AMBT. 116
Figura 85. Variação das expansões ao longo do tempo no método AMBT. Estudo da variação do traço e sua influência na expansão com o agregado granito de Embu. 118
Figura 86. Variação das expansões ao longo do tempo no método AMBT. Estudo da variação do traço e sua influência na expansão com o agregado quartzito de Ilha Solteira. 119

Figura 87. Variação das expansões ao longo do tempo no método AMBT. Estudo da variação da granulometria e sua influência na expansão com o agregado granito de Recife. 120
Figura 88. Curvas de expansão dos agregados estudados pelo método CPT. 121
Figura 89. Expansões obtidas ao longo do tempo pelo método ACPT (banho-maria)..... 122
Figura 90. Expansões obtidas ao longo do tempo pelo método ACPT (estufa ventilada)... 124
Figura 91. Expansões através do tempo do Método ACPST. 125
Figura 92. Expansões através do tempo do método ABCPT. 126
Figura 93. Análise comparativa aos 90 dias entre ensaios ACPT realizados em equipamento de estufa ventilada e banho-maria. 131
Figura 94. Análise comparativa aos 120 dias entre ensaios ACPT realizados em equipamento de estufa ventilada e banho-maria..... 131
Figura 95. Análise comparativa entre os métodos CPT (12 meses) e ACPT (3 meses ou 90 dias)..... 132
Figura 96. Análise comparativa entre os métodos CPT (12 meses) e ACPT (4 meses ou 120 dias)..... 133
Figura 97. Análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e AMBT (14 dias em solução agressiva). 134
Figura 98. Análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e AMBT (28 dias em solução agressiva). 134
Figura 99. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão), e o método ACPST (aos 28 dias) de imersão. 136
Figura 100. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 28 dias de imersão), e o método ACPST (aos 28 dias) de imersão. 137
Figura 101. Análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e ACPST (28 dias em solução agressiva). 138
Figura 102. Análise comparativa entre os ensaios CPT (1 ano) e ABCPT (28 dias ou 1 mês). 139
Figura 103. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão) e ACPT (aos 90 dias). 140
Figura 104. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão) e ACPT (aos 120 dias). 141
Figura 105. Análise Comparativa entre os Métodos AMBT (aos 28 dias de imersão) e ACPT (aos 84 dias). 141
Figura 106. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão) e ABCPT (aos 28 dias de imersão). 142

Figura 107. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 28 dias de imersão) e ABCPT (aos 28 dias de imersão). 143
Figura 108. Análise comparativa entre os métodos ABCPT (aos 28 dias de imersão) e ACPT (aos 90 dias). 144
Figura 109. Análise comparativa entre os métodos ABCPT (aos 28 dias de imersão) e ACPT (aos 120 dias). 145
Figura 110. Expansão dos prismas em cada método de concreto estudado. 147
Figura 111. Expansão dos prismas confeccionados com cada agregado testado. 148
Figura 112. Fluxograma de classificação de agregados. 152
Figura 113. Escolha da relação a/c e a respectiva resistência à compressão. 160
Figura 114. Resistência do equipamento de banho-maria. 165
Figura 115. Caixa de controle de temperatura (com termostato ajustado e disjuntor). 166
Figura 116. Bomba utilizada para rotação da água. 166
Figura 117. Suporte para encaixe dos corpos de prova. 166
Figura 118. Fio da bomba e termômetro do termostato (esquerda inferior). 167

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Relação de ensaios de laboratório para prevenção da RAA (KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO, 2005). 48
Tabela 2. Índice de Deterioração (GRATTAN-BELLEY &DANAY, 1992). 52
Tabela 3. Frações granulométricas do agregado. 53
Tabela 4. Adaptações adotadas em diferentes países do mundo quando do uso do método AMBT (NBRI), (BELLEW, 1997). 66
Tabela 5. Frações granulométricas do agregado graúdo. 69
Tabela 6. Conclusões dos diversos pesquisadores para limites e períodos de análise do ACPT (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004). 76
Tabela 7. Índice de Reatividade potencial (IRP) (KIHARA, SBRIGHI, PECCHIO, 2006)..... 88
Tabela 8. Teor de álcalis solúveis e totais do cimento padrão. 97
Tabela 9. Caracterização físico - mecânica do cimento padrão. 98
Tabela 10. Traços utilizados no método AMBT modificado..... 101
Tabela 11. Porcentagem de agregados em função da granulometria. 102
Tabela 12. Traços (kg) para 1m^{3}de concreto de cada amostra. 102
Tabela 13. Traço (kg) necessário para concretar três prismas (7,5 x 7,5 x 28,5 cm) de cada amostra..... 102
Tabela 14. Características mineralógicas do granito – Embu das Artes. 114
Tabela 15. Características mineralógicas do basalto – Americana. 114
Tabela 16. Características mineralógicas do basalto – Birigui. 114
Tabela 17. Características mineralógicas do milonito – Recife. 115
Tabela 18. Características mineralógicas do granito – Recife. 115
Tabela 19. Características mineralógicas do quartzito – Ilha Solteira. 115
Tabela 20. Tabela resumo da análise petrográfica para os agregados pesquisados. 115
Tabela 21. Porcentagem de expansão das barras de argamassa aos 14 e 28 dias em solução agressiva. 116
Tabela 22. Resumo da classificação dos agregados através do ensaio AMBT preconizado pela ASTM C 1260. 117
Tabela 23. Reatividade dos agregados segundo as principais normas utilizadas. 118
Tabela 24. Resumo da classificação dos agregados através do ensaio CPT preconizado pela ASTM C 1293. 122
Tabela 25. Resumo da classificação dos agregados através do ensaio ACPT. 123
Tabela 26. Resumo das expansões dos prismas de concreto através do ACPT em estufa ventilada. 125

Tabela 27. Reatividade dos agregados segundo a ACPST..... 126
Tabela 28. Reatividade dos agregados segundo a ACPST..... 127
Tabela 29. IPR – granito de Embu das Artes. 128
Tabela 30. IPR – granito de Recife. 128
Tabela 31. IPR – milonito de Recife. 128
Tabela 32. Classificação geral dos agregados..... 129
Tabela 33. Agrupamento dos ensaios realizados em concreto. 146
Tabela 34. Comportamento dos agregados analisados. 148
Tabela 35. Agregados utilizados na pesquisa. 160
Tabela 36. Consumo de água por m^3 de concreto. 161
Tabela 37. Cálculo do módulo de finura da areia. 161
Tabela 38. Volume de estado compactado seco de agregado graúdo. 162
Tabela 39. Volume de agregado miúdo dos traços. 162
Tabela 40. Consumo de agregado miúdo dos traços. 163
Tabela 41. Teor de argamassa dos traços. 163
Tabela 42. Traços em massa das seis amostras. 163
Tabela 43. Traços em kg para 0,006 m^3 de concreto (volume necessário para concretar 3 formas de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm)..... 163
Tabela 44. Agregados graúdos e suas respectivas porcentagens retidas em massa para os seis traços. 164
Tabela 45. Agregados miúdos e suas respectivas porcentagens retidas em massa para os seis traços. 164

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCPT - Método acelerado brasileiro de prismas de concreto.

ACPST - Método acelerado de prismas de concreto imerso em solução.

ACPT - Método acelerado de prismas de concreto.

AMBT - Método acelerado de barras de argamassa.

CAA - Cimento com alto teor de álcalis.

CBA - Cimento com baixo teor de álcalis.

CMBT - Método das microbarras de concreto.

CPT - Método de prismas de concreto.

ELS - Estado limite de serviço.

ELU - Estado limite último.

IRP - Índice de reatividade potencial.

MBT - Método de barras de argamassa.

MEV - Microscopia eletrônica de varredura.

NBRI - National Building Research Institute.

RAA - Reação álcali-agregado.

RAC - Reação álcali-carbonato.

RAS - Reação álcali-sílica.

RASS - Reação álcali-silicato.

UR - Umidade relativa.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 22

1.1 Justificativas da pesquisa 22
1.2 Centros de pesquisa no Brasil e no exterior 23
1.3 Objetivos da pesquisa 24
1.3.1 Objetivos gerais 24
1.3.2 Objetivos complementares 24
1.4 Conteúdo da dissertação 25

2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) 26

2.1 Histórico 26
2.2 Os álcalis do cimento Portland 27
2.3 Os agregados para concreto 27
2.4 Conceituação da reação álcali-agregado (RAA) 30
2.5 Reação álcali-sílica (RAS) 31
2.6 Reação álcali-silicato (RASS) 32
2.7 Reação álcali-carbonato (RAC) 32
2.8 Química da reação 32
2.8.1 Reação álcali-sílica (RAS) e álcali silicato (RASS) 32
2.8.2 Reação álcali carbonato (RAC) 34
2.9 Influência da reação nas propriedades do concreto 35

3 FATORES QUE INTERFEREM NA REAÇÃO 36

3.1 Fatores que podem acelerar a reação 36
3.1.1 Teor de álcalis do cimento e do concreto 36
3.1.2 Grau de reatividade e consumo de agregados utilizados no concreto 37
3.1.3 Granulometria e deformação dos agregados 39
3.1.4 Ação do meio ambiente 39
3.1.5 Relação a/c e cura do concreto 40
3.2 Fatores que podem inibir a reação 40
3.2.1 Características do concreto 40
3.2.2 Taxa de armadura do concreto 40
3.2.3 Adição mineral e escória de alto forno 41
3.2.4 Adições químicas (sais de lítio) 42
3.2.5 Carbonatação 42
3.2.6 Umidade relativa e temperatura 42
3.2.7 Cintamento / confinamento 42

4 AVALIAÇÃO E DIGNÓSTICO DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA 44

4.1 Indicadores de ocorrência 44
4.2 Mecanismo de formação de fissuras 45
4.3 Avaliação da manifestação patológica em campo 46
4.3.1 Observação por contraste de imagens 47
4.3.2 Monitoramento de estruturas 47
4.4 Avaliação da manifestação patológica em laboratório 48
4.4.1 Análise petrográfica 49
4.4.2 Método Osipov 50
4.4.3 Método químico 50
4.4.4 Método das rochas carbonáticas 51
4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV) 51
4.4.6 Determinação do índice de deterioração do concreto 52
4.4.7 Método das barras de argamassa (MBT) 53
4.4.8 Avaliação da eficiência de materiais pozolânicos 54
4.4.9 Método acelerado das barras de argamassa (AMBT) 55

4.4.9.1 Histórico e desenvolvimento do ensaio 55
4.4.9.2 Introdução e procedimento operacional 58
4.4.9.3 Parâmetros que podem influenciar o ensaio 58
4.4.10 Avaliação acelerada da eficiência de materiais pozolânicos 67
4.4.11 Método dos prismas de concreto (CPT) 67
4.4.11.1 Histórico e desenvolvimento do ensaio 67
4.4.11.2 Procedimento operacional na avaliação da reação álcali-sílica (RAS) 68
4.4.11.3 Procedimento operacional na avaliação da reação álcali-carbonato (RAC) 70
4.4.11.4 Parâmetros que podem influenciar o ensaio 70
4.4.12 Método acelerado de prismas de concreto (ACPT) 76
4.4.12.1 Histórico e desenvolvimento do ensaio 76
4.4.12.2 Parâmetros que podem influenciar o ensaio 79
4.4.13 Método acelerado de prismas de concreto imersos em solução (ACPST) 81
4.4.13.1 Histórico, desenvolvimento do ensaio e procedimento operacional 81
4.4.14 Método das microbarras de concreto (CMBT) 83
4.4.14.1 Histórico, desenvolvimento do ensaio e procedimento operacional 83
4.4.15 Ensaio de autoclave acelerado 84
4.4.15.1 Histórico e procedimento operacional 84
4.5 Método proposto 85
4.5.1 Método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT) 85
4.5.1.1 Histórico e procedimento operacional 85
4.6 Análise de risco da ocorrência da reação 87
4.6.1 Índice de reatividade potencial (IRP) 87

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL 89

5.1 Discussão, motivação e escolha dos métodos na pesquisa 89
5.2 Amostras escolhidas para análise 90
5.2.1 Granito - Embu das Artes 90
5.2.2 Basaltos - Americana e Birigui 91
5.2.3 Milonito e Granito - Recife 91
5.2.4 Quartzito (Ilha Solteira) 91
5.3 Características litológicas das amostras utilizadas 91
5.3.1 Granitos 91
5.3.2 Basaltos 92
5.3.3 Seixos (Quartzitos) 93
5.3.4 Gnaisses 94
5.4 Análise petrográfica 95
5.5 Ensaios realizados com o método AMBT 97
5.5.1 Ensaio padrão 97
5.5.2 Ensaios propostos 100
5.6 Ensaios realizados com o método CPT 101
5.6.1 Ensaio padrão 101
5.7 Ensaios realizados com o método ACPT 108
5.7.1 Ensaio padrão com a utilização de equipamento de banho-maria 108
5.7.2 Ensaio padrão com a utilização de estufa ventilada 111
5.8 Ensaios realizados com o método ACPST 112
5.8.1 Método ACPST segundo LEE, LIU & WANG (2004) 112
5.9 Ensaios realizados com o método ABCPT 113

6 APRECIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS 114

6.1 Análise petrográfica 114
6.2 Resultados do método AMBT 116
6.2.1 Resultado das amostras com o emprego do método padrão 116
6.2.2 Variação do traço da argamassa 118
6.3 Resultados do método CPT 121
6.3.1 Resultado das amostras 121
6.4 Resultados do método ACPT 122
6.4.1 Resultado das amostras a 60° C com a utilização de equipamento de banho-maria. 122
6.4.2 Resultado das amostras à 60°C com a utilização de estufa ventilada 123

6.5 Resultados do método ACPST 125
6.6 Resultados do método ABCPT 126
6.7 Análise de risco: cálculo do índice IRP 127
6.8 Classificação geral dos agregados 129

7 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS 130

7.1 Correlação entre métodos 130
7.1.1 Influência do tipo de equipamento: ACPT a 60° C (banho-maria) X ACPT a 60°C (estufa ventilada) 130
7.1.2 CPT X ACPT (estufa ventilada) 132
7.1.3 CPT X AMBT 134
7.1.4 AMBT X ACPST 135
7.1.5 CPT X ACPST 138
7.1.6 CPT X ABCPT 138
7.1.7 AMBT X ACPT (estufa ventilada) 139
7.1.8 AMBT X ABCPT 142
7.1.9 ACPT (estufa ventilada) X ABCPT 143
7.2 Tratamento estatístico dos dados 145

8 CONCLUSÕES E PROPOSIÇÃO DE ESTUDOS 150

8.1 Conclusões 150
8.2 Transferências ao meio (trabalhos publicados e em fase de avaliação) 152
8.3 Proposta de estudos a serem realizados 153
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 154
ANEXO I – DOSAGEM DOS PRISMAS DE CONCRETO 159
ANEXO II – CONFECÇÃO DE EQUIPAMENTO DE BANHO MARIA 165

1 INTRODUÇÃO

1.1 Justificativas da pesquisa

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação altamente deletéria para estruturas/elementos estruturais de concreto simples, armado ou protendido. Até os dias atuais, não existe uma solução em termos proteção, recuperação e/ou reforço que seja consenso no meio técnico/científico. Todas as soluções estudadas e desenvolvidas por engenheiros e pesquisadores para a terapia de estruturas/elementos estruturais deteriorados são altamente custosas, paliativas e na maioria das vezes ineficientes.

Após longos anos de estudos, já é consenso no meio técnico/científico que a solução ideal para combater a RAA é a prevenção e, para que isto seja possível, torna-se necessário o estudo e o desenvolvimento de métodos de ensaio que possam de maneira antecipada detectar a futura reação deletéria.

Existem alguns métodos de ensaio que podem ser utilizados para este fim, dentre estes, podem ser citados os métodos AMBT (método acelerado de barras de argamassa), CPT (método de prismas de concreto), ACPT (método acelerado de prismas de concreto), ACPST (método acelerado de prismas de concreto imerso em solução) e a análise petrográfica.

Dentre os métodos citados, apenas a análise petrográfica, o AMBT e o CPT são ensaios normatizados, sendo os demais ainda apenas especulativos.

A análise petrográfica consiste na análise e classificação dos minerais constituintes de um dado agregado. Apesar de ser extremamente importante para a elucidação da sua potencial reatividade, esta atua de maneira muito mais qualitativa do que quantitativa, devendo sempre ser complementada por outro método de ensaio.

O método CPT consiste na avaliação de agregados através de prismas de concreto armazenados a 38ºC em ambiente de umidade relativa igual a 100%. É o método de ensaio mais confiável existente na atualidade, não tendo sido encontrado nenhum agregado que apresentasse distorção de classificação quando comparado com seu comportamento em campo. No entanto, devido ao seu período de análise (1 ano), este ensaio torna-se praticamente inviável para uso em obras correntes.

O método AMBT consiste na avaliação de agregados através de barras de argamassa imersas em solução alcalina (NaOH-1N) a 80ºC. É o ensaio que mais vem sendo utilizado para a classificação prévia de agregados no Brasil e no mundo, devido à rápida resposta que o mesmo oferece (16 dias), além de sua fácil execução. No entanto, este ensaio vem demonstrando certa inconfiabilidade, pois têm sido encontrados resultados falso-negativos (agregados classificados como inócuos pelo ensaio e que ocasionaram efeitos deletérios em campo) e falso-positivos (agregados classificados como reativos pelo ensaio e que desempenharam bom comportamento em campo).

Alguns pesquisadores creditam tal fato ao ambiente do ensaio extremamente agressivo (NaOH – 1N à 80ºC), o que segundo estes, não representa de maneira fiel as condições de campo. Outros acreditam que o comportamento expansivo do agregado quando analisado em argamassa não é o mesmo quando analisado em concreto, pois segundo estes, a granulometria, a britagem e o traço influenciam no comportamento expansivo do agregado.

Os ensaios ACPT e ACPST são ensaios que foram desenvolvidos a partir do CPT, sem ainda um número muito grande de resultados e, portanto, necessitam de maior comprovação para a sua utilização corrente em laboratórios.

Como demonstra o cenário previamente descrito, é extremamente importante o estudo dos métodos de ensaio existentes (de modo que possa ser conhecida a eficiência de cada um destes, além dos seus eventuais desvios e fatores intervenientes), além do desenvolvimento de novos métodos de ensaio que consigam de maneira rápida e confiável, analisar e classificar agregados mediante a sua potencial reatividade em laboratório.

1.2 Centros de pesquisa no Brasil e no exterior

Como muitas estruturas de concreto vêm sofrendo efeitos deletérios provenientes da RAA no mundo (gerando custos altíssimos para governos e iniciativa privada, além de gerar insegurança para quem convive com estruturas deterioradas) muitos são os centros de pesquisa e instituições que vêm estudando tal assunto tanto na prevenção, como na recuperação.

No exterior, podem ser citados Corps of Engineers (E.U.A), Portland Cement Association (E.U.A), American Concrete Institute (E.U.A), University of Texas

(E.U.A), University of Califórnia (E.U.A), CANMET (Canadá), Laval University (Canadá), Sherbrooke University (Canadá), École Nationale des Ponts e Chaussées (França), Beijing Institute of Building Materials Research (China), Norwegian University of Science and Technology (Noruega), The Institution of Structural Engineers (UK), dentre outros, como exemplos de centros de pesquisa e instituições que estudam a RAA.

No Brasil, CESP (Companhia Energética de São Paulo), IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), Furnas Centrais Elétricas S.A., ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e a Universidade Federal do Rio Grande do Sul são as principais instituições e centros de pesquisa de estudo da RAA.

1.3 Objetivos da pesquisa

1.3.1 Objetivos gerais

Esta dissertação tem como objetivo geral estudar os principais e os mais freqüentes métodos utilizados para o diagnóstico preventivo da RAA, no que tange a reação álcali-sílica e álcali-silicato, como a análise petrográfica, o AMBT, o CPT, o ACPT e o ACPST, de tal modo que possa ser conhecida a eficiência de cada um destes, além dos seus eventuais desvios e fatores intervenientes.

Outro objetivo deste trabalho é a proposição ao meio técnico de um novo método de ensaio denominado ABCPT (método acelerado brasileiro de prismas de concreto).

1.3.2 Objetivos complementares

- Estudar e verificar a influência de alguns parâmetros inerentes ao ensaio, na expansão das barras de argamassa através do método AMBT.
- Testar o conceito de “análise de risco” quando da utilização de agregados em estruturas de concreto através do índice de reatividade potencial (IRP).

1.4 Conteúdo da dissertação

Basicamente o trabalho está dividido em oito capítulos. O primeiro capítulo é introdutório e descreve as justificativas da pesquisa, assim como os objetivos e o seu conteúdo.

O segundo capítulo é composto pela revisão bibliográfica do estado da arte da reação álcali-agregado (RAA). Neste capítulo, é apresentado o histórico da manifestação deletéria, assim como os tipos de reação, a química do processo e a variação das propriedades que esta provoca em elementos de concreto.

O capítulo três trata dos fatores que interferem na RAA, contribuindo ou mitigando a sua ocorrência.

No quarto capítulo, são apresentados indicadores da ocorrência da reação, o mecanismo de formação de fissuras, e os métodos de avaliação da RAA em campo e em laboratório. É apresentado também neste capítulo o conceito de análise de risco.

O quinto capítulo é composto pela descrição do programa experimental, das amostras e do procedimento operacional de todos os métodos testados.

No sexto capítulo é feita a discussão dos resultados provenientes dos métodos de ensaio realizados, assim como dos resultados do desempenho em campo dos agregados testados. Há também uma investigação sobre a eficiência e a confiabilidade de cada método de ensaio e finalmente é demonstrada uma tabela global, com a classificação proveniente de todos os ensaios.

O capítulo sete apresenta a análise comparativa entre os métodos de ensaio confeccionados, e o último capítulo (oitavo), apresenta as conclusões do trabalho, assim como sugestões para estudos futuros.

2 REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA)

2.1 Histórico

Desde 1930 são registradas anomalias em estruturas e elementos estruturais de concreto devido à reação álcali-agregado (RAA), muito embora por muito tempo, o meio técnico tenha considerado os agregados como materiais inertes (SILVA, 2007).

A primeira referência às expansões e conseqüentemente deteriorações ocasionadas pela reação álcali-agregado é creditada a HOLDEN (1935) do Instituto Politécnico da Virgínia (USA). Entretanto, STANTON (1940), estudioso do tema, publicou seu trabalho concluindo que certos componentes dos agregados e os hidróxidos alcalinos liberados pelo cimento durante sua hidratação eram a causa da fissuração exacerbada de algumas estruturas de concreto na Califórnia.

Esse trabalho, além de ter sido à base do método de barras de argamassa (MBT), despertou o meio científico, que passou a publicar artigos relacionados ao tema, apresentando os mecanismos de deterioração, assim como evidências dessa reação deletéria “in loco”.

Entretanto, entre meados de 1950 e 1960 o interesse pelo problema virtualmente desapareceu, voltando a ser estudado na década de 70, onde começaram a surgir com freqüência relatos de anomalias em estruturas de vários países. Desde então, e até os dias atuais, o assunto tem sido tratado de maneira muito mais rigorosa.

No Brasil, a CESP foi a primeira empresa a descobrir que suas estruturas de concreto poderiam vir a sofrer de RAA, tendo tomado medidas mitigadoras para que o fenômeno deletério não se manifestasse na Usina Hidrelétrica Jupiá e nas construídas na mesma época, bem como em todas as outras que se seguiram (KUPERMAN et al., 2005 apud SILVA, 2007).

Os primeiros registros que abordavam o assunto aconteceram através de Gitahy e Ruiz (1963), pesquisadores do IPT, (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), em um trabalho cujo tema era “Reação expansiva álcali-agregado em concretos”, e mencionava as ações mitigadoras a serem executadas, assim como os riscos de aparecimento de tal manifestação deletéria (PAULON, 1981).

Desde então, mais de 20 casos de barragens afetadas pela RAA já foram relatados no Brasil. Dentre estas, destacam-se a barragem Apolônio Sales (Moxotó, situada entre os estados da Bahia e Alagoas), as barragens de Billings/Pedras (estado de São Paulo), barragem de Furnas (estado de Minas Gerais), barragem Joanes (estado da Bahia) além da ponte Paulo Guerra (cidade do Recife) (SILVA, 2007). Nesta mesma cidade, desde o ano de 2005, foram descobertos mais de oito casos confirmados de blocos de fundação de edifícios residenciais deteriorados pela RAA, gerando grande preocupação no meio técnico (ANDRADE, 2006).

2.2 Os álcalis do cimento Portland

Os álcalis são do ponto de vista químico, os elementos que pertencem à primeira coluna da tabela periódica, estando presentes no cimento apenas os componentes sódio e potássio. Estes provêm das matérias primas utilizadas para sua confecção como feldspatos, micas e minerais argilosos contidos no calcário e argila (PAULON, 1981).

A partir da hidratação do cimento, os álcalis reagem com íons hidroxila (que por sua vez são provenientes da cal formada como um dos produtos da hidratação dos silicatos de cálcio), e contidos nos poros do concreto, contribuem para elevar seu pH (tornando-o alcalino).

2.3 Os agregados para concreto

Os agregados utilizados para a confecção do concreto constituem-se basicamente de rochas, que podem ser uniminerálicas (contendo apenas um tipo de mineral) ou pluriminerálicas (contendo mais de um tipo de mineral).

Conforme a sua gênese (modo de origem), as rochas podem ser reconhecidas em três grandes grupos, a saber:

- **Rochas Ígneas:** Formam-se pela solidificação de magmas, (material rochoso, de composição predominantemente silicática, fundido a altas temperaturas e originado em grandes profundidades), assim, são também chamadas de rochas magmáticas. As rochas ígneas ou magmáticas representam cerca de 80% em volume da crosta terrestre, tanto nos continentes como nas bacias oceânicas. Estas rochas são muito

utilizadas como agregados na construção civil devido as suas propriedades mecânicas.

- **Rochas Sedimentares:** Formam-se a partir de sedimentos. Estes sedimentos são materiais provenientes da desagregação por agentes físicos e químicos (como ação do ar, ventos, águas de chuva, de rios e mares, oscilações de temperatura e pressão, etc.) de toda e qualquer rocha exposta à superfície (na interface litosfera / hidrosfera ou litosfera / atmosfera). Esta desagregação recebe o nome de intemperismo. O material desagregado é transportado por meio de água, vento ou gelo, ou mesmo pela ação da gravidade, e finalmente acumula-se nas bacias de sedimentação. Nestas regiões, através de processos como a compactação e a cimentação, originam as rochas sedimentares. Estas rochas representam algo em torno de 5% em volumes de crosta terrestre, no entanto, recobrem cerca de três quartos de sua superfície na forma de uma fina película tanto no assoalho oceânico como nas plataformas continentais.
- **Rochas Metamórficas**: São as rochas que se formam mediante a atuação do metamorfismo: um conjunto de processos que ocorre quando uma rocha (ígnea, sedimentar ou metamórfica) é submetida a variações nas condições de pressão e temperatura, promovendo transformações na sua composição mineralógica, textura e estrutura, de modo a adaptá-la às novas condições físico-químicas reinantes à sua volta, sem que haja fusão. As rochas metamórficas constituem cerca de 15% em volume da crosta terrestre.

Basicamente, os minerais formadores das rochas são os silicatos (como os feldspatos, o quartzo, as micas, os piroxênios, as olivinas, etc). Além dos silicatos, os carbonatos (como a calcita e a dolomita) podem eventualmente formar as rochas, se bem que as mesmas ocorrem em quantidades significativamente inferiores às demais rochas da crosta terrestre. As demais classes minerais são bem menos freqüentes e ocorrem nas rochas em quantidades subordinadas.

Existem diversos minerais que podem ser considerados potencialmente reativos a RAS, RASS e a RAC, sendo os principais (ACI COMMITEE 221, 1998):

- **Opala –** Tanto sozinha como componente de rocha é provavelmente o material natural mais reativo à reação álcali-sílica (RAS). A opala é uma

forma de sílica hidratada que ocorre sem estrutura interna cristalina definida (amorfa). Sua composição pode ser descrita como $SiO_2.nH_2O$, sendo que a porcentagem de água pode chegar até a 20%, sendo mais comum entre 3 e 9 %.

- **Calcedônia –** A calcedônia pode ser descrita como uma variedade criptocristalina do quartzo, da classe fibrosa. O termo criptocristalino refere-se à textura que consiste de cristais extremamente pequenos, sendo difícil de serem reconhecidos e distinguidos separadamente no microscópio comum. O termo fibroso refere-se às fibras microscópicas do quartzo. Pode ser encontrada com freqüência depositada a partir de soluções aquosas em cavidades de rochas, revestindo-as ou preenchendo-as.
- **Quartzo –** Conhecido como sílica cristalina, é composto basicamente de silício, SiO_2 na forma tetraédrica, ligada a quatro oxigênios formando uma rede tridimensional. Em termos macroscópicos, o quartzo cristalino normalmente não é reativo. No entanto, existem indicações de que o quartzo deformado pode, tendo certas irregularidades ou inclusões presentes, ser lentamente reativo e expansivo, dado tempo suficiente de exposição à ambientes alcalinos. Microscopicamente, quartzos podem ser altamente reativos. Quartzos altamente fraturados encontrados em quartzitos e gnaisses, além dos quartzos tencionados podem ser considerados reativos.
- **Cristobalita –** Poliformo do SiO_2, grupo da sílica. É encontrado em cristais octaédricos de rochas vulcânicas ácidas (ricas em sílica).
- **Tridimita –** Poliformo do SiO_2, grupo da sílica. É um mineral que em elevadas temperaturas possui estrutura hexagonal, podendo transformar-se em cristobalita e, em temperaturas mais baixas, a estrutura é ortorrômbica, podendo transformar-se em quartzo. É encontrada como micro-partícula em rochas ígneas e como um poroso e cristalino agregado.
- **Palagonita –** Vidro vulcânico alterado, encontrado em rochas formadas por processos vulcânicos como material intersticial.

- **Clorofeíta –** Mineralóide relacionado com a composição química da clorita (silicato hidratado de magnésio, ferro e cálcio). Ocorre nos basaltos toleíticos, preenchendo os espaços entre as ripas de feldspatos, como pseudomorfos da olivina ou em veios de amígdalas.
- **Calcita –** Mineral pertencente à classe dos carbonatos, constituído de carbonato de cálcio $CaCO_3$. Polimorfo trigonal de aragonita e vaterita, principal constituinte dos calcários.
- **Dolomita –** Mineral pertencente à classe dos carbonatos, constituído de carbonato de cálcio e magnésio – $CaMg(CO_3)_2$. Constituinte essencial dos dolomitos. Possui características comuns à calcita, porém é mais denso.

2.4 Conceituação da reação álcali-agregado (RAA)

A reação álcali-agregado (RAA) é um dos fenômenos mais deletérios que pode acontecer em estruturas de concreto. Este fenômeno consiste basicamente em uma reação química entre alguns minerais constituintes dos agregados utilizados no concreto e os hidróxidos alcalinos que estão dissolvidos na solução de seus poros

Segundo DIAMOND (1989, apud FOURNIER & BERUBÉ , 2000), sabe-se que os microporos da matriz de concreto no estado endurecido têm elevada alcalinidade, (pH ≥ 12,5), consistindo principalmente de hidróxidos alcalinos dissolvidos (K^+, Na^+, OH^-), com alguns elementos em menor quantidade (Ca^{+2}, SO_4^{-2}). Algumas fases minerais dos agregados graúdos e miúdos utilizados na confecção de concretos são quimicamente instáveis em ambientes de elevado pH e reagem de maneira deletéria com os íons alcalinos provenientes do cimento, gerando expansões internas, fissuras, perda de funcionalidade e durabilidade.

Para a ocorrência da reação, faz-se necessária à presença de alguns componentes, sendo:

- Agregado reativo;
- Umidade Suficiente (≥ 80 a 85%);
- Alta concentração de hidróxidos alcalinos (Na^+, K^+, OH^-) nos poros do concreto.

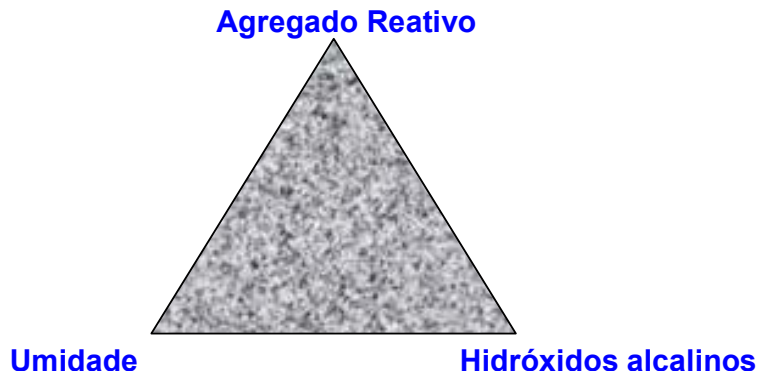

Figura 1. Fatores necessários para ocorrência da reação álcali-agregado (RAA).

A concentração e distribuição dos componentes citados acima, além da temperatura ambiente, têm significante influência na taxa de reação e no seu efeito deletério ocasionado (ACI COMMITEE 221, 1998).

Pode-se dividir a reação álcali-agregado em três principais tipos:

- Reação Álcali-Sílica (RAS);
- Reação Álcali-Silicato (RASS);
- Reação Álcali-Carbonato (RAC).

Algumas estruturas, devido às suas condições de exposição, são mais suscetíveis ao desenvolvimento da RAA. Dentre estas, pode ser citadas barragens, pavimentos de concreto, blocos de fundação e eventuais elementos de concreto (vigas, pilares, lajes, etc.), que estejam expostos à umidade.

Durante muito tempo, acreditava-se que a RAA era muito lenta, manifestando-se apenas em idades bastante avançadas (15 a 25 anos). No entanto ANDRADE (2006) constatou a existência de fissuração intensa em blocos de fundação pertencentes a edificações recentes (apenas três anos) na região de Recife/PE/Brasil.

2.5 Reação álcali-sílica (RAS)

É a reação que ocorre entre a sílica amorfa ou certos tipos de vidros naturais (vulcânicos) e artificiais e os íons hidroxilas provenientes da dissociação dos hidróxidos alcalinos.

Segundo FARNY e KOSMATKA (1997), a RAS é a reação mais comumente observada no mundo. O produto da RAS consiste em um gel silicato-alcalino (sílico-cálcico-potássico [C-S-K-H], ou sílico-cálcico-sódico, [C-Na-S-H]) que ao absorver

água aumenta de volume e, caso este gel seja confinado pela matriz do concreto, sua expansão implicará na introdução de tensões internas que eventualmente poderão fissurar o elemento de concreto.

2.6 Reação álcali-silicato (RASS)

Segundo KIHARA (1986), este tipo de reação ocorre entre os álcalis do cimento e os silicatos existentes nos feldspatos, folhetos argilosos e certas rochas sedimentares (argilitos, siltitos e grauvacas), metamórficas (ardósias, filitos, quartzitos, xistos) e magmáticas (granitos). A RASS ocorre fundamentalmente de maneira mais lenta que a RAS, devido aos minerais estarem mais disseminados em seu retículo cristalino.

Assim como na RAS, o produto (gel) formado pela RASS gera uma aderência muito baixa agregado/matriz, podendo ainda expandir em caso de contato com água e sendo assim, ocasionar fissuração no concreto.

2.7 Reação álcali-carbonato (RAC)

A RAC acontece quando da presença de calcários dolomíticos em contato com os álcalis do cimento, e diferentemente da RAS e RASS tem produtos finais menores em volume do que os produtos reagentes (SILVEIRA, 2005).

Segundo OZOL (1994), apenas uma reação proveniente da RAC é conhecida. Esta reação consiste na desdolomitização da dolomita.

Segundo FOURNIER (2000), um dos primeiros casos vistos de RAC no mundo foi ao final da década de 50 em Ontário, Canadá. Até os dias atuais não foi verificado no Brasil nenhum caso de sua ocorrência.

2.8 Química da reação

2.8.1 Reação álcali-sílica (RAS) e álcali silicato (RASS)

Os mecanismos da reação álcali-sílica e sua conseqüente expansão têm estado sobre investigação desde 1940.

Segundo GLASSER e TAYLOR (1992, 1997 apud HASPARYK, 2005), os álcalis (sódio e potássio), encontram-se no cimento na forma de sulfatos (solúveis)

ou incorporados nas fases silicatos e aluminatos do clínquer (insolúveis), mas também podem ser fornecidos por fontes externas, como soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4), cloreto de sódio (NaCl), adições minerais ou mesmo agregados. Tanto os álcalis solúveis quanto os insolúveis podem participar da reação.

O primeiro estágio da reação é definido como sendo do tipo ácido-base no qual o grupo silano (Si-OH), presente na superfície da sílica é atacado pelos íons hidroxila (OH^-), liberando água. Os cátions presentes no meio são atraídos se associando à estrutura deste grupo, desbalanceado negativamente pelo SiO^-, formando um gel sílico-alcalino (Figura 2)(GLASSER 1992 apud HASPARYK, 2005):

$$Si\text{-}OH + OH^- \Rightarrow SiO^- + H_2O \qquad (1)$$

$$SiO^- + Na \Rightarrow Si\text{-}ONa \qquad (2)$$

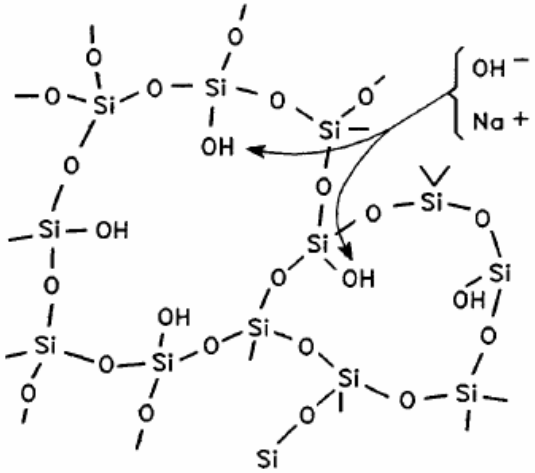

Figura 2. Neutralização das ligações do grupo silanol pelas hidroxilas (TURRIZIANI, 1986 apud HASPARYK, 2005).

Segundo TAYLOR (1997 apud HASPARYK, 2005), as cargas negativas são balanceadas pelos cátions presentes (sódio e potássio) formando o gel da RAA. No entanto, este gel pode também incorporar íons de Ca^{2+}, tendo então composição química variável e indefinida.

O gel silicato-alcalino formado é hidrófilo e, ao absorver água, aumenta de volume, gerando pressões suficientes para ocasionar o fissuramento do concreto (POOLE 1992 apud HASPARYK, 2005). A Figura 3 demonstra a presença do gel no poro do concreto.

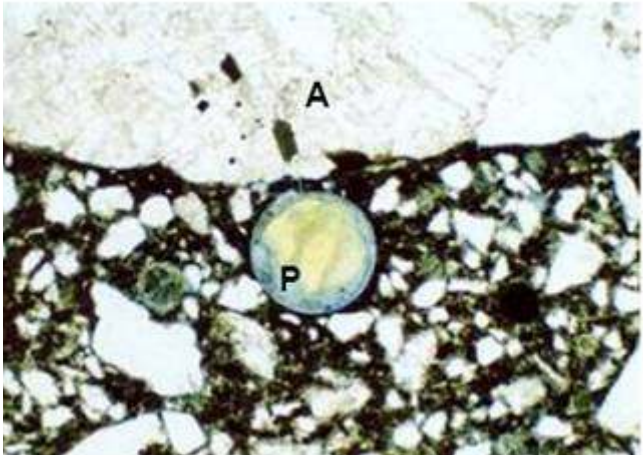

Figura 3. Fotomicrografia de um poro de concreto preenchido com gel (PECCHIO, KIHARA, BATTAGIN, ANDRADE, 2006).

2.8.2 Reação álcali carbonato (RAC)

Existem diversos processos que podem gerar a reação álcali-carbonato. No entanto, o único processo conhecido é a desdolomitização da dolomita (FOURNIER & BERUBÉ, 2000). Este processo pode ser descrito por:

$$CaMg(CO_3)_2 + 2(Na,K)OH \rightarrow Mg(OH)_2 + CaCO_3 + (Na,K)_2CO_3 \qquad (3)$$

dolomita + hidróxidos alcalinos → brucita + calcita + carbonatos alcalinos

Nesta reação, as fissuras são originadas pela reação individual das partículas de agregados graúdos (calcários), podendo ser ocasionadas por um dos três processos abaixo:

- Pressões hidráulicas ocasionadas pela migração de moléculas de água e íons alcalinos nos espaços restritos da matriz da calcita;
- Adsorção dos íons alcalinos e moléculas de água nas superfícies ativas dos minerais argilosos ao redor dos grãos da dolomita;
- Crescimento e rearranjo dos produtos da desdolomitização (brucita e calcita).

Os carbonatos alcalinos podem ainda reagir com a portlandita na matriz de concreto regenerando os hidróxidos alcalinos na solução dos poros (FOURNIER & BERUBÉ, 2000):

$$(Na,K)_2CO_3 + Ca(OH)_2 \rightarrow CaCO_3 + 2(Na,K)OH \qquad (4)$$

carbonatos alcalinos + portlandita → calcita + hidróxidos alcalinos

2.9 Influência da reação nas propriedades do concreto

As expansões provocadas pela RAA podem comprometer seriamente um dado elemento estrutural de concreto, assim como toda a estrutura, tanto do ponto de vista de estabilidade (ELU), quanto de utilização e durabilidade (ELS).

Segundo SWAMY (2004), considerável perda em torno de 25 a 30% em termos de módulo de elasticidade pode ser vista em estruturas de concreto que sofram de RAS.

Segundo MARZOUK & LANGDON (2003), elementos de concreto convencional deteriorados pela RAA podem ter uma queda de resistência à compressão de 20 a 30%, enquanto o módulo de elasticidade pode cair em até 80%. Elementos de concreto de alta resistência aparentemente não apresentam variações significativas de resistência à compressão e módulo de elasticidade.

Segundo Castro et al, (1997 apud SILVA 2007), a resistência à compressão, a resistência à tração, o coeficiente de Poisson e a massa específica são propriedades que não variam significativamente em um determinado elemento de concreto quando deteriorado pela RAA. No entanto, o módulo de elasticidade apresenta bastante diferença quando um mesmo elemento é comparado são e deteriorado.

Segundo HASPARYK (2005), o módulo de elasticidade de um elemento de concreto deteriorado pela RAA é mais afetado do que sua resistência à compressão. Existe inclusive um ponto “ótimo” onde a formação de gel colmata os poros do concreto, tornando-o mais resistente. Acima deste ponto, a microfissuração ocasionada pela expansão da matriz reduzirá a resistência do elemento.

3 FATORES QUE INTERFEREM NA REAÇÃO

3.1 Fatores que podem acelerar a reação

3.1.1 Teor de álcalis do cimento e do concreto

O teor de álcalis do cimento tem influência direta na RAA (STANTON 1940, 1942). Este normalmente é medido em relação ao teor de óxido de sódio e potássio (Na_2O e K_2O) e é expresso como equivalente alcalino em sódio, segundo a expressão:

$$Na_2O_e = \%Na_2O + 0{,}658 * (\%K_2O) \qquad (5)$$

Atualmente não se acredita mais em um “teor limite” de álcalis no cimento (a partir do qual a reação se torna suscetível) tendo sido adotado o conceito de “teor de álcalis por m^3 de concreto”.

Sabe-se que a concentração alcalina de um concreto é dependente de vários fatores (PAULON, 1981):

- O teor de álcalis do cimento;
- Suplemento alcalino promovido pelas circunvizinhanças (como os agregados);
- Consumo de cimento por m^3 de concreto;
- Consumo de água por m^3 de concreto.

Embora ainda não exista consenso de um teor limite de álcalis por m^3 de concreto, alguns autores desenvolveram estudos que vêm sendo utilizados em diversos países.

Segundo SCANDIUZZI et. al. (2001), em estudos na África do Sul foram estabelecidos os seguintes parâmetros:

- Acima de 3,8 kg/m^3 de equivalente alcalino (Na_2O_e), ocorrem reações;
- Entre 1,8 kg/m^3 e 3,8 kg/m^3 de equivalente alcalino (Na_2O_e), podem ocorrer reações;
- Abaixo de 1,8 kg/m3 de equivalente alcalino em sódio (Na_2O_e), não ocorrem reações.

A Figura 4 traduz os parâmetros acima de maneira gráfica.

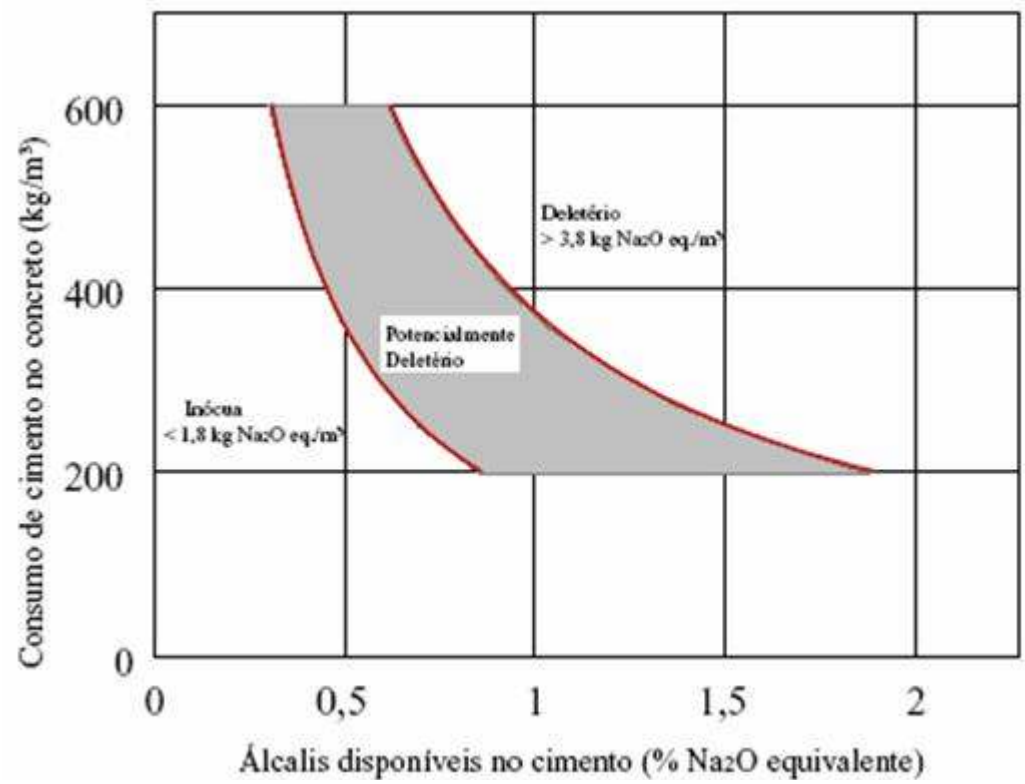

Figura 4. Risco de ocorrência da reação em função da relação entre o teor de álcalis do cimento e o consumo de cimento no concreto (OBERHOLSTER, VAN AARDT & BRANDT, 1983 apud HASPARYK, 1999).

Segundo BERUBÉ (2000), limitar o teor de álcalis do concreto em 3 kg/ m^3 é considerada uma eficiente maneira de minimizar a RAA. Isto pode ser conseguido pela utilização de cimento com baixo teor alcalino, pela utilização de um baixo consumo de cimento no concreto ou ainda pela substituição de parte do cimento por adições ativas ou inertes.

3.1.2 Grau de reatividade e consumo de agregados utilizados no concreto

De maneira geral, quanto mais reativo é o agregado, mais deletéria será a manifestação em elementos de concreto.

Segundo FARNY e KOSMATKA (1997), a reatividade dos agregados é função do tipo e da forma dos constituintes, assim como de seus elementos químicos. Minerais de sílica cristalinos tendem a ser mais estáveis, embora os minerais de sílica amorfos tendem a ser mais reativos.

Segundo FOURNIER (2000), o nível de reatividade dos agregados aumenta com:

- A quantidade de partículas reativas contidas nos agregados;

- A diminuição das partículas dos agregados.

Segundo BERUBÉ e DORION (2000), alguns agregados como vidros vulcânicos, areias do mar não lavadas, feldspatos e micas, ou ainda fases minerais presentes nos agregados podem acrescentar quantidades significativas de álcalis nos poros do concreto.

Ensaios realizados por VIVIAN (1951, apud HASPARYK 1999), demonstraram que quanto maior o consumo de agregados reativos (e conseqüentemente de sílica reativa) maior a reação deletéria. No entanto, existe um valor denominado de "teor péssimo" onde, a partir dele, um maior consumo de agregados acarretará uma diminuição da expansão.

Para explicação do fenômeno, HOBBS (1988), propôs uma figura, dividida em quatro regiões. Na região denominada "A", ocorre reação sem ocorrência de fissuração. Na região "B", existe excesso de álcalis, o que ocasiona expansão do concreto no estado endurecido (gerando fissuração). Na região denominada "C", a reação ainda ocorre gerando fissuração, no entanto, o teor de sílica supera o de álcalis. Na região "D" o excesso de sílica consome rapidamente os álcalis reduzindo sua concentração ou consumindo-os completamente sem causar danos (HASPARYK, 1999).

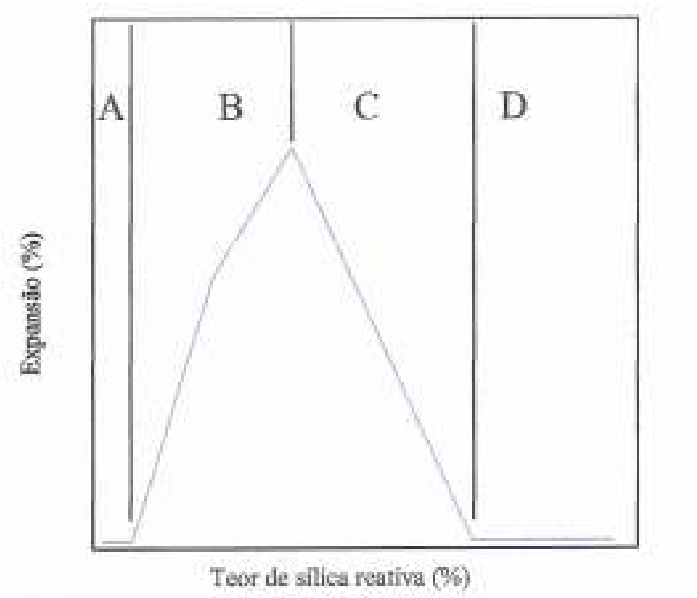

Figura 5. Teor péssimo de material reativo (HOBBS, 1988 apud HASPARYK, 1999).

3.1.3 Granulometria e deformação dos agregados

A diminuição das partículas, em geral, tende a aumentar a reação (devido ao aumento da superfície específica do agregado) (FOURNIER, 2000; GRATTAN-BELLEW, 1996).

Segundo VIVIAN (1951, apud HASPARYK), quando a granulometria do agregado é muito fina, este não ocasiona expansão deletéria. Partículas de maior dimensão, se reagidas completamente, produzem maior expansão do que partículas de menor dimensão.

3.1.4 Ação do meio ambiente

A umidade é considerada como condição essencial para a expansão em todos os tipos de RAA. Entretanto, para maiores temperaturas, necessita-se de menor umidade para que a reação aconteça.

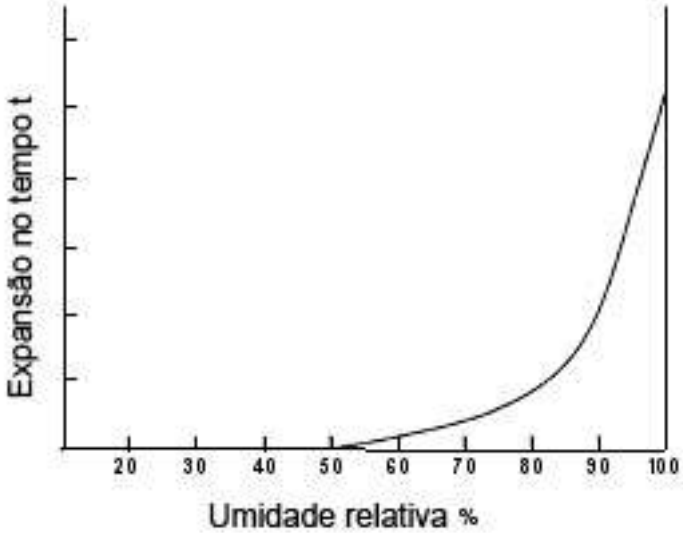

Figura 6. Umidade necessária para ocorrência da RAA (POOLE, 1992 apud MUNHOZ, 2007).

Segundo STARK (1991), estruturas de concreto expostas ao meio ambiente ou em contato direto com o solo, geralmente irão apresentar suficiente umidade interna para promover a RAS e/ou a RASS e conseqüentemente gerar expansão.

Segundo FARNY e KOSMATKA (1997), ciclos repetidos de secagem e molhagem podem criar picos localizados de concentração alcalina, facilitando a ocorrência da reação.

3.1.5 Relação a/c e cura do concreto

Concretos com relação a/c alta (alta permeabilidade) permitem a entrada de umidade de maneira mais acentuada, aumentando o potencial da expansão provocada pela RAA (FOURNIER e BÉRUBÉ, 2000).

Elementos de concreto curados adequadamente têm menos suscetibilidade a RAA, pois através deste processo, microfissuras podem ser inibidas (FOURNIER e BÉRUBÉ, 2000).

3.2 Fatores que podem inibir a reação

3.2.1 Características do concreto

Concretos porosos, com grande quantidade de vazios, podem inibir a expansão, deixando lugar suficiente para os produtos da reação, no entanto, para que faça efeito, torna-se necessária uma porosidade de pelo menos 8% do volume (PAULON, 1981).

Segundo ACI COMMITEE 221 (1998), o emprego de aditivos incorporadores de ar ao concreto pode reduzir o seu grau de expansão.

Segundo FOURNIER (2000), uma baixa permeabilidade do concreto está relacionada com uma baixa relação a/c, que por sua vez confere uma baixa porosidade ao concreto. Esta baixa porosidade torna o ingresso da umidade externa mais difícil, inibindo ou dificultando a ocorrência da RAA.

3.2.2 Taxa de armadura do concreto

A RAA provoca expansões e conseqüentemente tensões de tração nos elementos de concreto e, sendo este material não resistente a tal tipo de esforço, um quadro generalizado de fissuração é desenvolvido. A utilização de maiores taxas de armadura nos elementos de concreto pode absorver parte da tensão provocada pela RAA e conseqüentemente mitigar, alterar ou até inibir a formação do quadro fissuratório.

Segundo FOURNIER (2000), armaduras ativas e passivas além de outras restrições, podem reduzir significantemente as reações da expansão de um elemento de concreto reduzindo ou até inibindo o aparecimento de fissuras.

3.2.3 Adição mineral e escória de alto forno

Segundo PAULON (1981), a adição de escória de alto forno ao clínquer pode alterar ou até mesmo inibir a produção da reação expansiva, dependendo da porcentagem de escória presente no cimento e de sua reatividade.

Segundo MEHTA e MONTEIRO (1994), pode-se reduzir a expansão do concreto através da incorporação de 25 a 30% de fíller calcário ou qualquer outro tipo de agregado não reativo.

Segundo DIAMOND (1996), a adição de sílica ativa ao concreto pode contribuir para a mitigação da RAA, no entanto, em alguns casos, esta adição pode ser maléfica, pois muito embora sua adição reduza os hidróxidos alcalinos das soluções dos poros do concreto, a sílica ativa pode possuir partículas maiores (40 – 100 μm ou 100 – 800 μm) que podem agir como agregados reativos.

Segundo FARNY e KOSMATKA (1997), as pozolanas exercem influência em todos os tipos de RAA, porém na RAS e RASS a expansão pode ser completamente evitada com substituições de parte do cimento por pozolana adequada. Para real efetividade, no entanto, é preciso estudo da quantidade e do tipo de pozolana necessários para cada ocasião.

Segundo SHAYAN (2004), a incorporação de cinza volante de boa qualidade no concreto pode inibir completamente uma eventual expansão causada pela RAA.

Segundo MUNHOZ (2007), através de ensaios desenvolvidos, pode-se constatar que a sílica ativa é a adição mais eficiente na mitigação das reações álcali-silicato e álcali-sílica, seguida pelo metacaulim e cinza volante. A escória de alto-forno é a menos eficiente, sendo necessária à adição de teores até seis vezes maiores do que de sílica ativa para se alcançar o mesmo grau de eficiência.

Segundo MUNHOZ (2007), muito embora a expansão inicial de um dado agregado seja muito maior (o dobro, por exemplo) do que de outro, (segundo o método ASTM C 1260 - aos 14 dias de cura em solução alcalina) não necessariamente deverá ser utilizado o dobro de adição para se inibir a reação do agregado mais reativo. Existem eficiências de mitigação diferentes para agregados de reatividades diferentes, devendo ser realizado um estudado caso a caso, através de ensaios laboratoriais.

3.2.4 Adições químicas (sais de lítio)

STARK (1992), verificou que sais de lítio (LiF e Li_2CO_3), acima de certos teores, podem prevenir expansões ocasionadas pela RAA quando incorporados ao ambiente da reação.

PREZZI et al. (1995), FURNAS (1997), e PREZZI, MONTEIRO & SPOSITO (1998), estudaram diversos compostos químicos na mitigação da RAA, dentre estes: NaOH, KOH, LiOH, NaCl, KCl, LiCl, $Ca(OH)_2$, $CaCl_2$, $MgCl_2$, $AlCl_3$, Na_2CO_3, Li_2CO_3 e K_2CO_3. Os resultados indicaram que os hidróxidos e carbonatos de lítio têm capacidade de reduzir a reação deletéria a níveis muito baixos.

3.2.5 Carbonatação

Segundo GASKIN (1947, apud KIHARA, 1997), a expansão de uma estrutura devido a RAA pode ser mitigada quando exposta em ambiente rico em CO_2.

Segundo KIHARA (1997), a pré-carbonatação de elementos de concreto favorece a redução de sua expansão devido a RAA.

3.2.6 Umidade relativa e temperatura

Para a ocorrência da RAA em um elemento de concreto, faz-se necessário que a umidade relativa da região onde este se encontra seja de pelo menos de 80%. No entanto, estruturas de concreto confeccionadas com agregados altamente reativos em ambientes contendo umidade relativa inferior ao valor citado acima, podem apresentar manifestações deletérias (FOURNIER & BERUBÉ, 2000).

Quanto maior a temperatura ambiente, menor a umidade relativa necessária para a ocorrência da reação deletéria (FOURNIER & BERUBÉ, 2000).

3.2.7 Cintamento / confinamento

Segundo FOURNIER & BERUBÉ (2000), sabe-se que a RAA causa tensões de tração nos elementos de concreto da ordem de 2 a 8.6 MPa, no entanto, na média, giram em torno de 4 MPa. Forças externas que gerem tensões de compressão nos elementos deteriorados acima dos valores citados podem impedir e/ou mitigar a reação.

Segundo HELENE (2005), confinamentos externos da ordem de aproximadamente 8 MPa (sempre com válvula de escape), podem ser suficientes para inibir a RAA.

Segundo FOURNIER & BERUBÉ (2000), elementos estruturais de concreto que apresentem deterioração por RAA podem ser restringidos através de cintamento (confinamento), e, sendo assim, a reação expansiva e a conseqüente formação de fissuras pode ser controlada de maneira satisfatória.

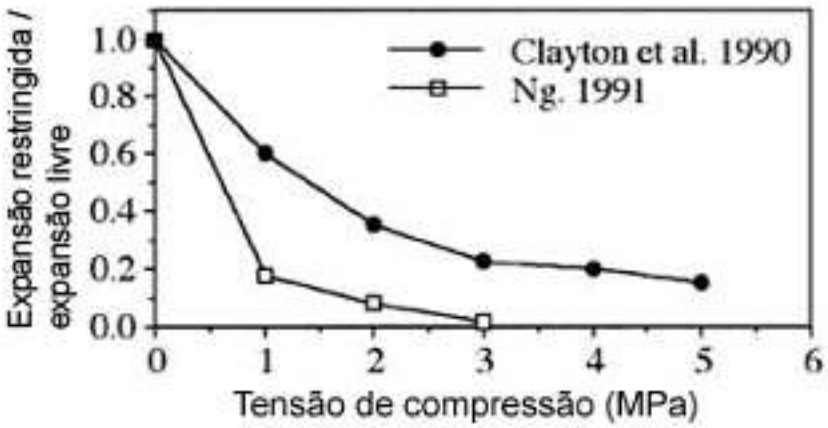

Figura 7. Efeito de cintamento (confinamento) na expansão provocada pela RAA (FOURNIER & BERUBÉ, 2000).

4 AVALIAÇÃO E DIGNÓSTICO DA MANIFESTAÇÃO PATOLÓGICA

4.1 Indicadores de ocorrência

As manifestações patológicas mais evidentes de um elemento de concreto deteriorado pela reação álcali-agregado são:

- Quadro fissuratório (em forma de mapa);
- Deslocamentos / deformações de elementos estruturais.

Normalmente, em estruturas de concreto simples, não armadas nem carregadas, as fissuras provenientes da RAA são aleatórias nas regiões de tração ou de baixa compressão (< 7 MPa), com aberturas desde 0,1mm até 10 mm e raramente maiores que 50 mm (PIRES COBRINHO & GALVÃO, 2006).

Figura 8. Quadro fissuratório ocasionado pela RAA (ANDRADE, 2006).

Segundo KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO (2005), a única evidência inquestionável da RAA é a presença do gel resultante da reação deletéria, não sendo apenas o quadro fissuratório (em forma de mapa) um sinal definitivo no diagnóstico do elemento de concreto.

Em estágios iniciais da reação, ou sob condições onde pequenas quantidades de gel são formadas, a RAA pode não ser detectada a olho nu, devendo ser detectada pela presença de especialista através de análise microscópica.

Figura 9. Exsudação do produto de reação (HASPARYK, DAL MOLIN, MONTEIRO, 2006).

A RAA pode diminuir tanto a capacidade portante de uma estrutura/elemento estrutural de concreto (influenciando seu ELU) quanto a sua funcionalidade e durabilidade (influenciando seu ELS) (FOURNIER & BERUBÉ, 2000).

Devido à deterioração da RAA ocorrer de maneira lenta, a possibilidade de colapso sem aviso prévio, de uma estrutura/elemento estrutural deteriorado é pequena (FARNY e KOSMATKA, 1997).

4.2 Mecanismo de formação de fissuras

Muito pouco se conhece sobre o real mecanismo de fissuração e o tempo necessário para o aparecimento de um quadro fissuratório (em campo) de elementos de concreto armado ou protendido, em carga, afetados pela reação álcali-agregado. Isto acontece devido a dois principais motivos, sendo o primeiro a natureza heterogênea do concreto como material de construção e o segundo o não conhecimento real da cinética da reação deletéria.

Segundo HOBBS (1998, apud HASPARYK 2005), as duas principais teorias propostas para explicar os mecanismos de expansão do gel proveniente da reação álcali-sílica (RAS), são as teorias da pressão osmótica (desenvolvida por Hansen), e da adsorção (desenvolvida por Vivian).

Segundo DIAMOND (1975, apud HASPARYK, 2005), evidências indicam que as expansões são ocasionadas por pressões mecânicas exercidas pelos produtos de reação no estado sólido ou semi-sólido, levando a formação e a conseqüente abertura de fissuras.

A partir de observações de elementos de concreto em campo, podem ser obtidas algumas conclusões a respeito de seus quadros fissuratórios gerados pela RAA.

Para elementos como lajes, vigas ou blocos, onde a maior deformação acontecerá na direção da menor restrição (direção vertical), fissuras tendem a se apresentar perpendiculares a esta direção (direção horizontal).

Segundo (ACI COMMITEE 221, 1998), o inchamento do gel devido à absorção de água, produz tensões de tração na matriz do concreto, que por sua vez, conduzem a formação de microfissuras no elemento. Sendo a menor restrição na direção perpendicular à superfície, as fissuras tendem a se alinhar de maneira subparalela à superfície, como pode-se verificar na Figura 10 abaixo.

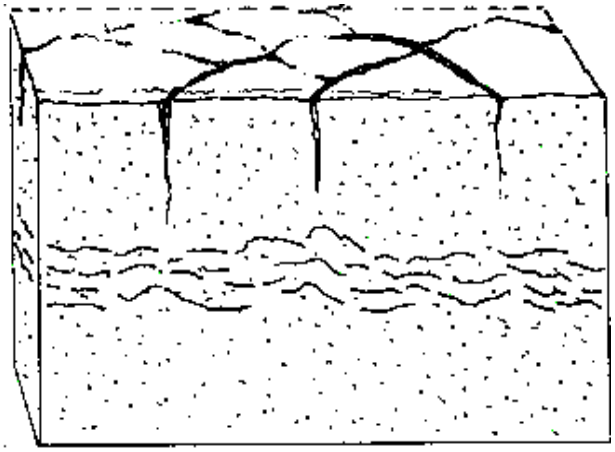

Figura 10. Quadro fissuratório gerado pela RAA em um bloco de concreto (ACI COMMITEE 221, 1998).

Como uma maior expansão acontece na superfície do elemento (devido a um menor confinamento) ocorre neste ponto uma alta tensão de tração. Esta por sua vez é aliviada pela formação de fissuras relativamente largas, perpendiculares à superfície. Visto por cima, estas fissuras tendem a acontecer em um padrão poligonal que é a base do termo “fissuração em mapa”.

4.3 Avaliação da manifestação patológica em campo

Geralmente, o diagnóstico da ocorrência da RAA consiste inicialmente em uma inspeção em campo na tentativa de detecção de sintomas visuais, como fissuras, desplacamentos, expansão, presença de gel e etc. (KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO, 2005).

Segundo HASPARYK (1999), após inspeção em campo, podem ser feitas investigações da existência de produtos da reação por contraste de imagens, assim como o monitoramento das estruturas (no intuito de verificar a ocorrência de deslocamentos/deformações nos elementos).

4.3.1 Observação por contraste de imagens

A observação em campo através de contraste de imagens envolve a utilização de um aparelho denominado Spectroline. Este aparelho fornece evidências da RAA através de imagens com luz ultravioleta (UV). O procedimento de utilização deste método consiste na limpeza e lixamento da superfície analisada, seguido de aplicação de acetato de uranila.

Através da visualização da imagem na presença de luz ultravioleta, podem ser evidenciados os produtos da reação, pela alteração da cor do concreto para verde e amarelo de maneira fluorescente (HASPARYK, 1999 apud GOULART et al. 1998).

Outra técnica que pode ser utilizada na identificação da RAA “in loco” por contraste de imagens (sendo mais confiável e ecológico que o método do acetato de uranila) é o método das manchas, com aplicação de cobaltonitrito de sódio.

Trata-se de um método desenvolvido pelos pesquisadores Guthrie e Carey de Los Alamos National Laboratory, nos EUA. Consiste em colocar alguns produtos químicos (soluções aquosas saturadas de cobaltonitrito de sódio e compostos de rodamina), em contato com a superfície de concreto que se deseja avaliar. Se o gel estiver presente ocorrerá uma reação com estes reagentes, que o colorem. O resultado pode ser visto em poucos minutos, sob luz natural (KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO, 2005).

Segundo POWERS (1999), tanto o método de acetato de uranila quanto o método das manchas não são extremamente confiáveis, devendo sempre ser seguidos de avaliações em laboratório.

4.3.2 Monitoramento de estruturas

Uma maneira de se acompanhar o comportamento de estruturas deterioradas pela RAA para que medidas paliativas possam ser tomadas quando necessário é o monitoramento de estruturas.

Normalmente a instrumentação de estruturas de concreto envolve a instalação de marcos geodésicos (para a medição de deslocamentos das estruturas), medidores de distância relativa de alta precisão (pinos de convergência / divergência, para monitoramento de deslocamentos com correção de temperatura), medições triortogonais (para medição de deslocamentos de juntas) e extensômetros de haste (para medição de deformações no interior de estruturas) (HASPARYK, 1999 apud GOULART et al. 1998).

4.4 Avaliação da manifestação patológica em laboratório

O diagnóstico da RAA em campo é custoso, difícil e muitas vezes inconfiável. Portanto, técnicas de avaliação da manifestação deletéria em laboratório foram estudadas e desenvolvidas.

Nas décadas de 1940 e 1950 foram desenvolvidos diversos métodos de ensaio para a identificação de reações álcali-agregado. No entanto, novos métodos tomaram grande impulso a partir da década de 1990, talvez em função da grande quantidade de casos de RAA que surgiram em todo o mundo (KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO, 2005).

A Tabela 1, adaptada de Touma, Fowler e Carrasquillo apresenta uma relação de ensaios de laboratório desenvolvidos no mundo, sendo muitos deles úteis, e outros ineficazes (KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO, 2005).

Tabela 1. Relação de ensaios de laboratório para prevenção da RAA (KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO, 2005).

Tipo de Método	Duração do Ensaio
Método Petrográfico	
- ASTM C295	≥ 1 dia
Método Químico	
- ASTM C289 e ASTM C289 modificado	2 a 3 dias
- Método de dissolução (Alemanha)	1 dia
- Teste da célula osmótica	< 40 dias
- Teste da pasta de gel	≥ 1 semana
- Método da retração química	1 dia

Tipo de Método	Duração do Ensaio
Métodos das Barras de Argamassa	
- ASTM C227	6 meses / 1 ano
- AFNOR P 18-585, CCA	6 meses
- Método Dinamarquês Acelerado	5 meses
- Métodos acelerados: NBRI, ASTM 1260, RILEM TC 106-2	2 semanas
- Método da autoclave (China, Japão, Canadá, etc.).	≥ 3 dias
Métodos de Prismas de Concreto	
- ASTM 1293, CAN/CSA A 23.2-14 A , BSI 812, RILEM TC 106-3	1 ano
- ASTM 1293 acelerado	3 meses
- AFNOR P 18-587	8 meses
- Método Sul-Africano	21 a 24 dias
- CCA	6 meses
- Método Acelerado de Quebec	1 mês

Faz-se necessária, a partir do exposto acima, a discussão e o estudo mais aprofundado dos principais e mais utilizados métodos de laboratório, de modo que a eficiência e confiabilidade de cada um deles sejam avaliadas. São eles:

4.4.1 Análise petrográfica

Fornece importantes informações através de análise visual e microscopia estereoscópica. Esta análise é preconizada pelas normas ASTM C 295(1990) e ASTM C 856 (1995), respectivamente para agregados e concretos.

Segundo HASPARYK (1999), a investigação ocorre através do microscópio polarizador de luz transmitida, e é fundamentada na observação de lâminas delgadas, com cerca de 30 µm de espessura, confeccionadas com amostras de agregados ou concretos que serão futuramente estudados.

No caso de agregados, a investigação determina a sua descrição mineralógica, com ênfase na descrição dos minerais deletérios, textural e estrutural.

No caso de concretos, além de classificar os agregados, determina a ocorrência de microestruturas provenientes da RAA, tais como bordas de reação ao longo dos agregados, gel nos poros, presença de microfissuras causadas pela expansão do gel produto da reação, etc.

Apesar de ser uma análise bastante necessária tanto em agregados quanto em concretos, apenas a sua utilização para a caracterização da potencialidade reativa do agregado não é suficiente, pois existem diversos fatores que podem influir na reação (OBERHOLSTER, 1985).

Segundo KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO (2005), a análise petrográfica necessita ser feita quando da avaliação de um agregado, porém o maior problema que se encontra atualmente para a realização deste ensaio é a necessidade de petrógrafo experiente que não só analise os tipos de minerais presentes, mas que também possa classificar um dado agregado mediante a sua potencial reatividade.

4.4.2 Método Osipov

Este Método é também conhecido como método térmico. Foi desenvolvido pelo engenheiro Albert Osipov, do Institute Hidroproject de Moscou e consiste em submeter um agregado graúdo com dimensões entre 20 a 50 mm a uma temperatura de 1000°C durante 60 segundos (FURNAS, 1997).

O método baseia-se na premissa de que quando um agregado com fase mineralógica reativa é colocado em altas temperaturas, este se fragmenta dando indícios de sua potencialidade expansiva. Por outro lado, a não fragmentação do agregado não dá subsídios para conclusões finais do comportamento não reativo (FURNAS, 1997).

4.4.3 Método químico

Permite avaliar a reatividade potencial álcali-sílica de um agregado através da relação entre a concentração de sílica dissolvida e a redução da alcalinidade. As normas NBR 9774 e ASTM C 289 prescrevem este método.

Para a confecção do ensaio, deve ser utilizado agregado passante na peneira de 0,3 mm e retido na peneira de 0,15 mm. Esta fração é imersa em uma solução de NaOH - 1N à temperatura de 80°C por 24 horas. Após esta imersão, determina-se a sílica dissolvida pelo método gravimétrico ou por fotometria bem como a redução de alcalinidade da solução de NaOH. Com base nesses resultados, é possível correlacioná-los através de um gráfico que classifica a potencialidade do agregado em três níveis:

- Inócuo;
- Potencialmente Deletério;
- Deletério.

Segundo KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO (2005), a única vantagem do método é a de classificar de maneira muito rápida um dado agregado. Este método é considerado bom para agregados que possuem elevada reatividade. Entretanto, é falho na detecção de agregados que reagem lentamente tais como o granito-gnaisse, o quartzito e o xisto.

Segundo HASPARYK (1999), como o método químico não é totalmente confiável, seus resultados devem ser avaliados em conjunto com outros métodos.

4.4.4 Método das rochas carbonáticas

Este método avalia as características expansivas das rochas carbonáticas, tanto pela norma NBR 10340 quanto pela ASTM C 586.

Segundo HASPARYK (1999), a amostra consiste em um mini-testemunho cilíndrico de rocha, possuindo 9 mm de diâmetro e 35 mm de comprimento. No ensaio, a amostra é imersa em água destilada até que haja variação mínima de comprimento (abaixo de 0,02 %), quando faz-se a leitura de referência. Após a leitura, é feita a imersão do testemunho de rocha em solução de NaOH - 1 N sendo o recipiente de imersão selado e mantido a uma temperatura ambiente de 23 ± 2°C. Leituras posteriores são realizadas através do relógio comparador, nas idades de 7, 14, 21, 28 dias e a partir desta data em intervalos de 4 semanas. Caso o ensaio seja estendido até 1 ano, leituras devem ser realizadas a cada 12 semanas, devendo ser a solução substituída a cada 6 meses.

Segundo a ASTM C 586 (1992) expansão superior a 0,10 % é um indicativo da ocorrência da reação deletéria, já a NBR 10340 não fixa limites.

Este método é considerado como preliminar na análise de um agregado, e seus resultados devem ser sempre avaliados em conjunto com outros métodos de ensaio.

4.4.5 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Através deste método, amostras de concreto ou argamassa, além de testemunhos extraídos de estruturas podem ser avaliados. A análise começa visualmente através da lupa estereoscópica para marcação dos pontos de interesse a serem analisados. Em seguida, as amostras são analisadas através do MEV utilizando em conjunto a técnica de espectrometria de energia dispersiva,

possibilitando uma correlação entre as diversas morfologias características dos produtos encontrados e seus componentes químicos (HASPARYK, 1999).

O gel produto da reação é observado através do MEV principalmente pelas bordas das interfaces pasta/agregado em amostras polidas, no entanto, o mesmo pode ser observado nos poros das amostras, assim como disperso na argamassa, interfaces e/ou depositados nas fissuras dos agregados (HASPARYK, 1999).

A partir desta análise, pode-se verificar a deterioração da estrutura mediante a concentração de produtos e classificar os vários tipos de géis formados (KIHARA, 1988; KERRICK E HOOTON, 1992).

4.4.6 Determinação do índice de deterioração do concreto

O método tem por objetivo estabelecer um índice de deterioração do concreto (Di) devido à RAA. É determinado em superfícies polidas de testemunhos extraídos de estruturas de concreto a partir de cortes longitudinais.

Depois de cortados, a superfície da amostra é polida e uma malha quadrada de 15 mm de lado é imposta sobre a mesma, gerando aproximadamente 100 quadrados para serem examinados individualmente no microscópio estereoscópico (com aumento de 16 vezes). A partir da observação de todos os quadrados, determina-se a quantidade total de deterioração da amostra.

Pode-se atribuir um número total de defeitos, e por conseqüência, o fator de deterioração (Di) pode ser calculado. A Tabela 2 demonstra o índice de deterioração (GRATTAN-BELLEY &DANAY, 1992 apud HASPARYK 1999):

Tabela 2. Índice de Deterioração (GRATTAN-BELLEY &DANAY, 1992).

Tipo de deterioração	Fator de Multiplicação
Fissura do agregado	0,25
Fissura com gel no agregado graúdo	2,00
Descolamento entre a pasta e o agregado graúdo	3,00
Borda de reação em torno dos agregados	0,50
Fissura na pasta de cimento	2,0
Fissura com gel na pasta	4,0
Vazios preenchidos ou revestidos com gel	0,50

O autor cita alguns exemplos de índices de deterioração que não demonstram reatividade (Di = 17) para uma obra de 40 anos. No entanto, outro exemplo (barragem) também é citado, sendo considerado com reatividade (Di = 186). Muito

embora existam exemplos práticos, não é definido um valor limite de Di separando obras com e sem efeitos deletérios.

4.4.7 Método das barras de argamassa (MBT)

O método de barras de argamassa (MBT) preconizado pela ASTM C 227 foi primeiramente publicado em 1950 e é baseado no método de ensaio descrito por STANTON (1940).

Este método tem por objetivo avaliar a reação álcali-sílica através da variação do comprimento de barras feitas de argamassa armazenadas em recipiente hermeticamente fechado, com atmosfera de vapor de água a uma temperatura de 38° C. As normas NBR 9773 e ASTM C 227 prescrevem o método. O agregado empregado deve ser preparado segundo as frações granulométricas descritas na Tabela 3:

Tabela 3. Frações granulométricas do agregado.

ABNT (Nº)	Material Retido entre Peneiras	Porcentagem em Massa (%)
8	4,8 a 2,4 mm	10
16	2,4 a 1,2 mm	25
30	1,2 a 0,6 mm	25
50	0,6 a 0,3 mm	25
100	0,3 a 0,15 mm	15

O ensaio consiste na confecção de quatro barras de argamassa de dimensões 25 x 25 x 285 mm no traço 1: 2,25, utilizando um cimento com elevado equivalente alcalino ou o cimento que será utilizado “in loco”.

Depois de moldadas, as barras são desformadas após 24 horas, onde são feitas as suas leituras iniciais. Leituras subseqüentes devem ser realizadas aos 14 dias, e 1, 2, 3, 4, 6, 9 e 12 meses. Alguns pesquisadores e estudiosos do tema sugerem que leituras sejam feitas sempre a cada 14 dias, durante todo o período de ensaio.

Os resultados são expressos em porcentagem de expansão e representam a diferença entre o comprimento na idade analisada e o comprimento inicial da barra de argamassa, dividido pelo seu comprimento efetivo. Para obter-se o valor final, é feita a média da expansão das quatro barras analisadas.

Segundo a ASTM C 33 (1993), expansões que excederem 0,05 % aos três meses, ou 0,10 % aos 6 meses são consideradas excessivas, podendo produzir expansões nocivas.

Segundo KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO (2005), a vantagem deste ensaio consiste no seu baixo custo, no entanto, seu longo prazo de análise somado ao fato de sua inconfiabilidade de resposta geram grandes desvantagens.

Segundo KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO (2005), as razões para a ocorrência desta inconfiabilidade são:

- O método não detecta agregados lentamente reativos;
- Ocorre excessiva lixiviação dos álcalis contidos nas barras de argamassa;
- Ocorre redução irreal da granulometria dos agregados;

Segundo BERUBÉ & FRENETE (1994), muitos são os fatores que podem distorcer o método de barras de argamassa preconizado pela ASTM C 227, como a relação a/c, o teor de álcalis do cimento e suas condições de armazenamento.

Este ensaio foi muito utilizado no passado, mas atualmente não tem sido, devido a alguns agregados lentamente reativos, como alguns tipos de gnaisses, argilitos, quartzitos, grauvacas, não reagirem com os álcalis do cimento nestas condições (THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA 2006).

4.4.8 Avaliação da eficiência de materiais pozolânicos

Os métodos NBR 12651 e ASTM C 441 analisam a eficiência do uso de material pozolânico na prevenção de expansões excessivas ocasionadas pela RAA.

São realizados testes através da confecção de barras de argamassa de 25 x 25 x 285 mm utilizando o vidro pirex (material altamente reativo) como agregado e, sendo adotado o cimento utilizado na obra.

Existem dois tipos de ensaio, sendo o primeiro o de avaliação da adição de materiais mitigadores da reação, onde uma adição (como um material pozolânico) é adicionada às barras de argamassa para controle da reação deletéria (HASPARYK, 1999).

O segundo tipo de ensaio é o de controle da expansibilidade do cimento, sendo testada a mistura cimento/vidro pirex. O procedimento operacional é realizado de acordo com o método MBT preconizado pela ASTM C 227 e NBR9773 (HASPARYK, 1999).

4.4.9 Método acelerado das barras de argamassa (AMBT)

4.4.9.1 Histórico e desenvolvimento do ensaio

O método acelerado de barras de argamassa (AMBT) foi desenvolvido por OBERHOLSTER & DAVIES (1986) no NBRI (National Building Research Institute), sendo atualmente o método mais difundido e utilizado no Brasil e no mundo. Existem muitas normas que preconizam o método AMBT, sendo a mais comum a norma americana ASTM C 1260.

A tentativa de desenvolvimento de um método acelerado começou quando VAN AARDT & VISSER (1982, apud OBERHOLSTER & DAVIES, 1985), baseados no trabalho de CHATTERJI, propuseram que o ensaio de barras de argamassa (MBT) fosse acelerado a partir da imersão das barras em solução alcalina (NaOH – 1N) a 80°C.

Para que este método de ensaio fosse desenvolvido, era preciso que um estudo de temperatura e de concentração de solução fosse realizado. Para isto, os autores ensaiaram amostras de agregados sob temperaturas que variavam de 40°C a 90°C, onde puderam comprovar que 80°C ocorria à máxima expansão. Da mesma maneira, foram novamente ensaiadas amostras de agregados em soluções com NaOH-0,25 N , NaOH-0,5 N, NaOH-1N, NaOH-1,75 N, NaOH-2N e NaOH-4N, sendo a solução de NaOH-1N a que forneceu a maior expansão nas barras aos 12 dias . A Figura 11 e Figura 12 demonstram graficamente os resultados do estudo.

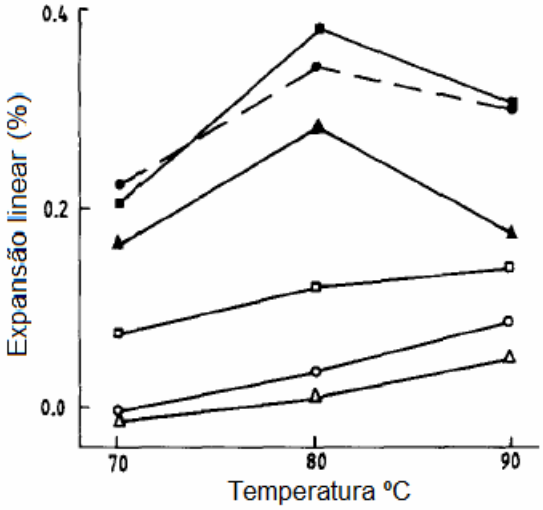

Figura 11. Estudo da temperatura para utilização do ensaio acelerado (NBRI).

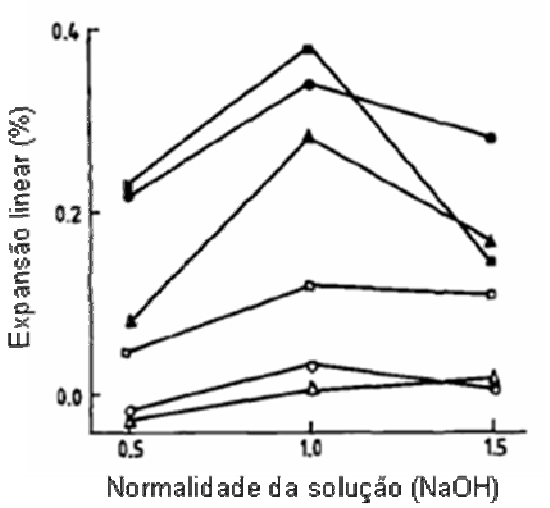

Figura 12. Estudo da concentração da solução para utilização do ensaio acelerado (NBRI).

OBERHOLSTER & DAVIES (1985), baseados no trabalho de VAN AARDT & VISSER, investigaram 28 tipos de agregados quartzosos e dois agregados de referência (sabidamente inócuos), comparando as respostas do ensaio acelerado proposto, com a dos ensaios de barras de argamassa (MBT), e de prismas de concreto (CPT). A partir deste estudo, critérios de limite e período de análise foram desenvolvidos.

Na tentativa de se estudar o período de análise, OBERHOLSTER E DAVIES estudaram o comportamento expansivo de um agregado mediante os métodos MBT e AMBT proposto (NBRI). A Figura 13 demonstra a tendência expansiva deste agregado.

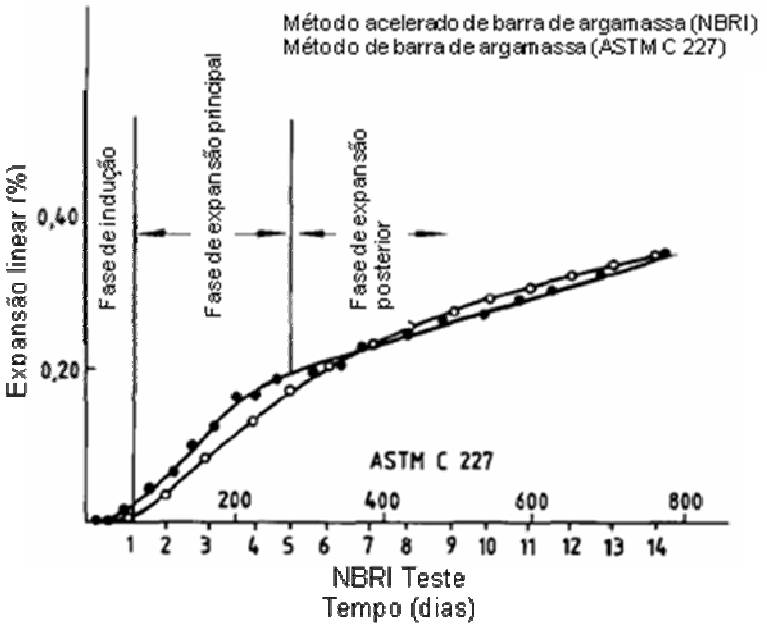

Figura 13. Curva de expansão no tempo do método MBT (ASTM C 227) e AMBT (NBRI) (OBERHOLSTER & DAVIES, 1985).

Os autores perceberam que aos 12 dias, as curvas de expansão praticamente se sobrepunham e nesta data, as barras de argamassa já tinham passado as três principais fases de expansão. Optou-se, portanto, pela escolha desta data para classificação do comportamento dos agregados.

Para definir limites, OBERHOLSTER & DAVIES, verificaram a correlação do método AMBT (NBRI) com o método MBT.

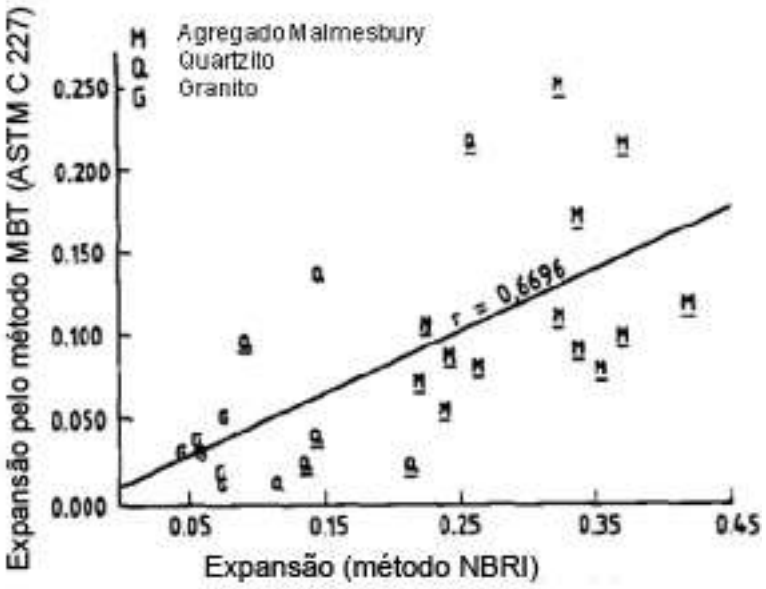

Figura 14. Correlação entre o método MBT (ASTM C 227) e o AMBT (NBRI) para três tipos diferentes de agregados.

Mesmo com uma correlação baixa (66%), os autores, adotando a regressão demonstrada (y = 0,37 x + 0,008) e, utilizando o valor limite do método MBT (0,05%), concluíram que agregados com expansões maiores do que 0,11% aos 12 dias de ensaio acelerado poderiam ser classificados como reativos.

4.4.9.2 Introdução e procedimento operacional

Possuindo o mesmo princípio do método das barras de argamassa (MBT), o ensaio torna-se acelerado quando após 24 hs de imersão em água a 80° C, as barras são depositadas em solução de hidróxido de sódio (NaOH-1N) a uma temperatura também de 80° C durante pelo menos 14 dias.

Da mesma maneira que o MBT, devem ser confeccionadas três barras de argamassa de traço 1: 2,25 com relação a/c de 0,47 em massa. Os resultados são expressos em porcentagem de expansão, sendo o valor médio das três barras apresentado como resposta do ensaio em uma determinada idade.

Segundo a ASTM C 1260, o ensaio pode ser interpretado através dos seguintes limites de expansão:

- Expansões inferiores a 0,10% aos 16 dias de ensaio (ou 14 dias em solução agressiva) indicam um comportamento inócuo do agregado.
- Expansões iguais ou superiores a 0,10% e inferiores a 0,20 % aos 16 dias de ensaio (ou 14 dias em solução agressiva) indicam um comportamento potencialmente reativo do agregado.
- Expansões iguais ou superiores a 0,20% aos 16 dias de ensaio (ou 14 dias em solução agressiva) indicam um comportamento reativo do agregado.

4.4.9.3 Parâmetros que podem influenciar o ensaio

Existem diversos parâmetros intrínsecos ao AMBT que podem influenciar a classificação de agregados, como teor de álcalis e finura do cimento, britagem e granulometria do agregado, características das barras de argamassa (traço, relação a/c, etc.), e algumas condições de armazenamento (umidade relativa do ambiente, cura dos corpos de prova, ocorrência de lixiviação dos corpos de prova e etc.).

Granulometria e textura dos agregados

Sabe-se que a granulometria do agregado utilizado na argamassa do ensaio AMBT é um fator fundamental na sua classificação. Diversos estudos foram realizados com o intuito de verificar qual a melhor classificação granulométrica que poderia ser feita para um agregado, de modo que a argamassa confeccionada apresentasse maior expansão, e de modo que esta argamassa representasse de maneira fiel o concreto utilizado “in loco”. A Figura 15 demonstra alguns resultados do estudo.

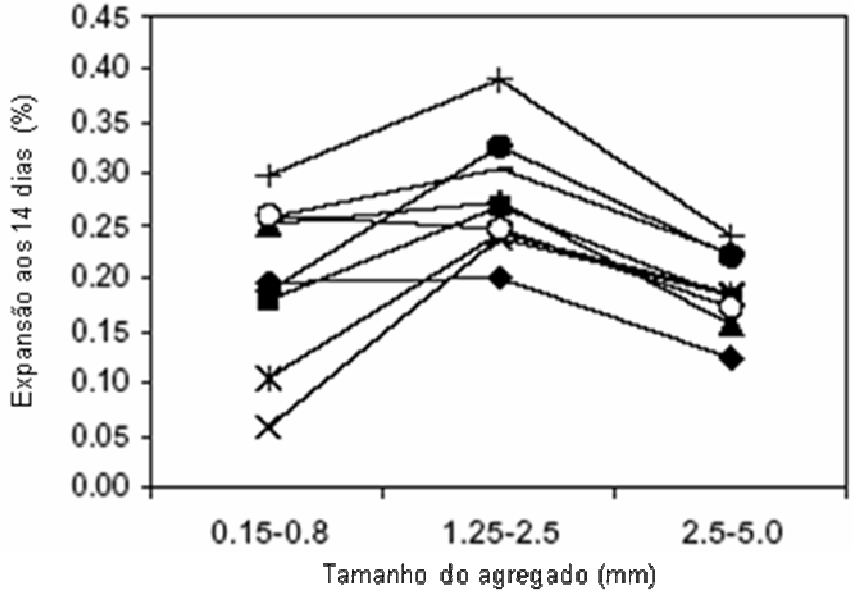

Figura 15. Utilização de granulometrias diferentes quando da utilização do método acelerado de barras de argamassa (AMBT) (BELLEW, FOURNIER & LU, 2006).

Através da figura, pode-se perceber que quando um agregado é classificado entre 1,25 mm e 2,5 mm, as barras de argamassa obtêm maior expansão (BELLEW, FOURNIER & LU, 2006).

Segundo LU et al. apud FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, (2006), quando a granulometria dos agregados utilizados encontram-se entre 1,25 mm e 2,5 mm, além de se obter uma maior expansão das barras de argamassa, obtém-se uma melhor correlação com o método de prismas de concreto.

Da mesma maneira que a granulometria, sabe-se que a textura é um fator muito importante, quando da análise da reatividade de um dado agregado. Deve-se,

portanto, ter cuidado quando da britagem, de forma que o agregado continue apresentando as mesmas condições texturais do material que será utilizado em campo (BELLEW, FOURNIER & LU, 2006).

Teor de álcalis e finura do cimento

Existem basicamente duas frentes de pensamento quando o assunto é a influência da finura do cimento e do teor de álcalis na expansão das barras de argamassa pelo método AMBT.

Segundo LEE, LIU & WANG (2004), o teor de álcalis do cimento tem efeito desprezível na expansão das barras de argamassa, devido à sua pequena seção transversal, assim como devido a solução fornecer quantidade alcalina excessiva para a ocorrência da reação.

Segundo FOURNIER & BERUBÉ (1991), o teor de álcalis do cimento pode variar a expansão das barras de argamassa, entretanto, essa variação não fornece nenhum grande efeito que possa mudar significativamente o seu comportamento expansivo. A finura do cimento, ao contrário, sempre ocasiona uma maior expansão das barras de argamassa, sendo este sim um fator significativo.

Segundo HASPARYK, MUNHOZ, SANCHEZ, SALLES e HAMASSAKI (2007), tanto o teor de álcalis quanto a finura do cimento podem variar de maneira significativa a expansão das barras de argamassa pelo método AMBT, devendo ser utilizado um cimento padrão para a confecção dos ensaios. Este pensamento é o mesmo de BELLEW (1997).

Muito embora não exista consenso nesse sentido, a utilização de um cimento padrão faria com que esse problema não ocorresse, e uma maior confiabilidade no método fosse adquirida.

Características das barras de argamassa

Segundo FOURNIER & BERUBÉ (1991), a variação das características da argamassa podem influenciar o comportamento reativo de agregados pelo método AMBT.

Quanto pior a argamassa, maior sua porosidade e permeabilidade, e sendo assim, mais facilitada torna-se a entrada dos íons alcalinos, gerando uma maior expansão; no entanto, em uma taxa cada vez menor (FOURNIER & BERUBÉ, 1991). A Figura 16 demonstra esta variação.

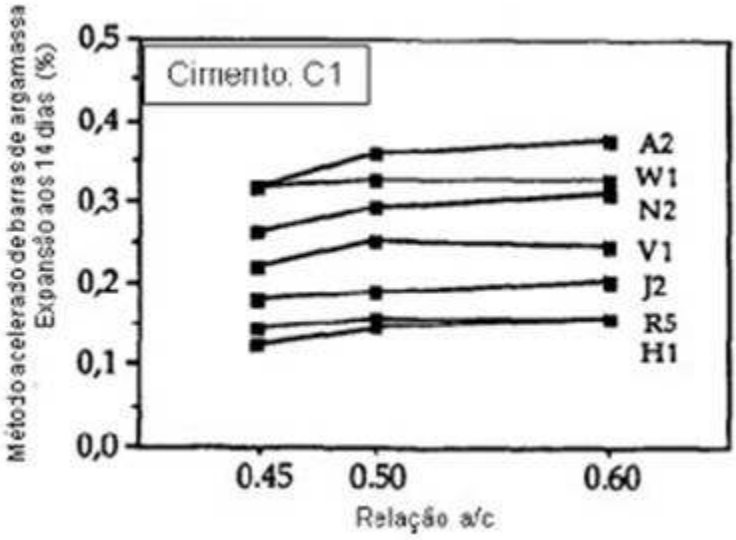

Figura 16. Variação da expansão para vários tipos de agregados e com um mesmo cimento, para uma variação da relação a/c (FOURNIER & BERUBÉ 1991).

Condições de armazenamento e cura

Segundo FOURNIER & BERUBÉ (1991), a alteração nas condições iniciais de cura, ou seja, a troca da cura imersa em água a 80° C, por cura a 100% de umidade relativa a 23°C, com subseqüente imersão das barras em solução a 80° C, parecem não ter significante efeito na expansão; pelo contrário, a cura imersa em água a 80° C provoca uma diluição dos álcalis do cimento, fazendo com que as barras de argamassa apresentem expansões menores até os sete dias de cura em solução agressiva.

Segundo FOURNIER & BERUBÉ (1991), quanto maior a concentração da solução, maior a expansão das barras de argamassa. A Figura 17 demonstra tal fato.

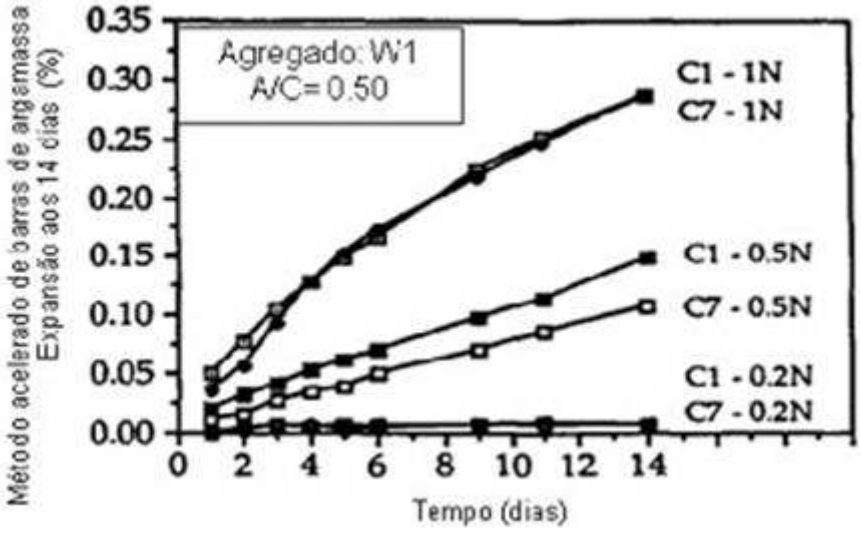

Figura 17. Variação da expansão de barras de argamassa para um mesmo agregado, através da variação da concentração da solução (FOURNIER & BERUBÉ 1991).

Assim como a concentração, quanto maior a temperatura, maior será a expansão nas barras de argamassa (FOURNIER & BERUBÉ, 1991).

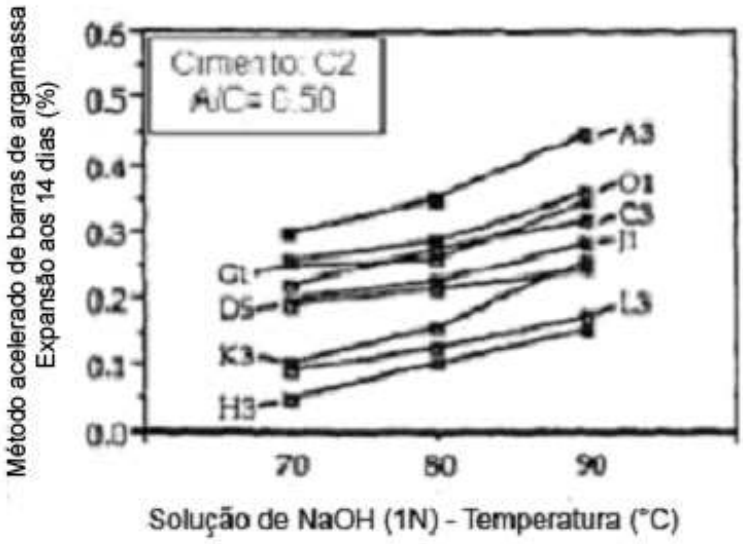

Figura 18. Variação da expansão com a variação da temperatura no ensaio de barra de argamassa (FOURNIER & BERUBÉ, 1991).

Limites, datas e confiabilidade do ensaio

Ainda não existe um consenso no que tange a limites e períodos de análise para agregados mediante o AMBT.

Segundo LEE, LIU & WANG (2004), o método AMBT é muito rigoroso, podendo penalizar agregados que possuem desempenho em campo satisfatório.

Para agregados que se encontram na China, expansões acima de 0,40% aos 16 dias deveriam ser indicativos de comportamento reativo. Expansões entre 0,20% e 0,40% deveriam ser indicativos de comportamento potencialmente reativo, e expansões menores do que 0,20% aos 16 dias, deveriam ser indicativos de comportamento inócuo.

Para agregados que se encontram na China, essa mudança de limites inclusive deixa o ensaio com uma correlação maior com o método de prismas de concreto (CPT).

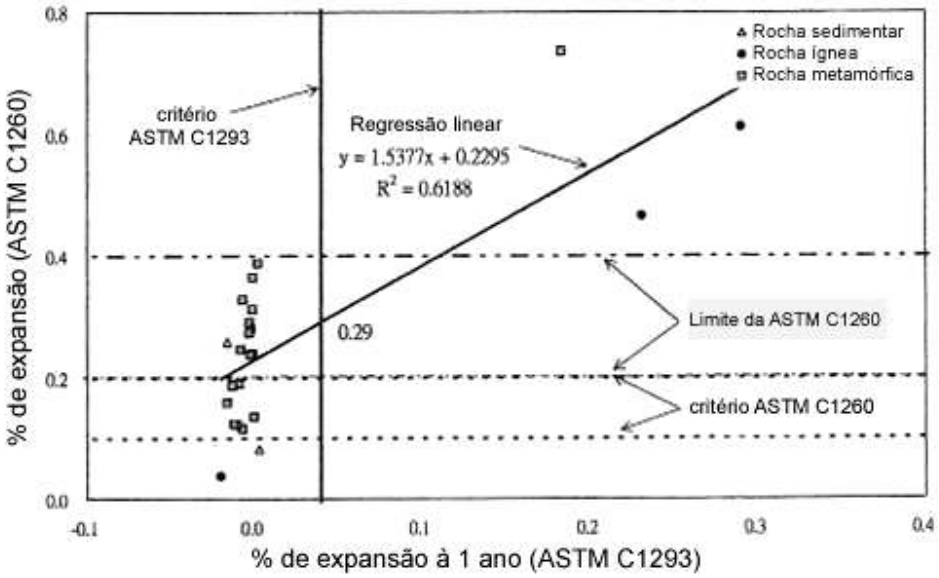

Figura 19. Correlação entre os métodos ASTM C 1260 e ASTM C 1293 para 22 tipos de agregados chineses (LEE, LIU & WANG, 2004).

Segundo HOOTON & ROGERS (1993), o limite de 0,15% aos 14 dias e 0,33% aos 28 dias são efetivos e confiáveis na classificação de agregados situados no Canadá.

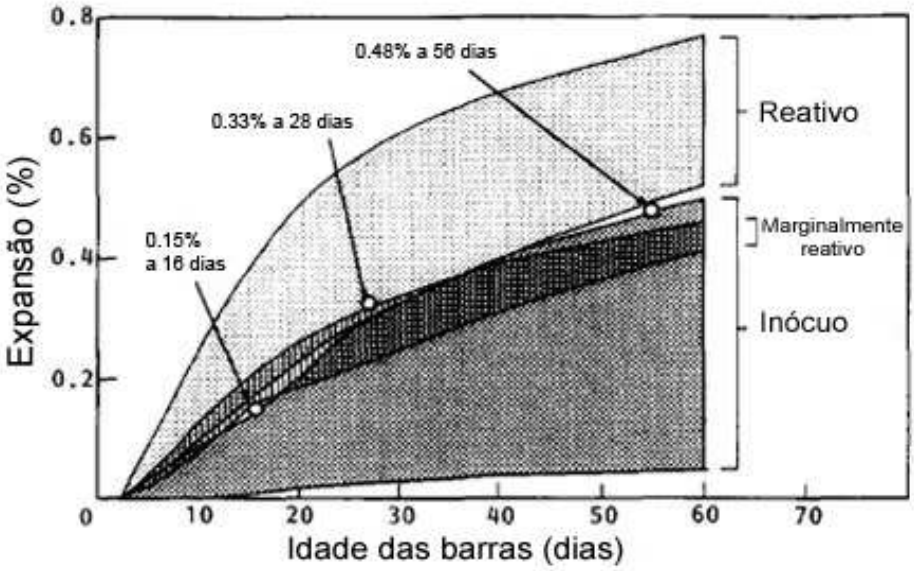

Figura 20. Estudo de limites e datas do método AMBT (HOOTON & ROGERS, 1993).

Segundo SHAYAN (2001), para agregados que se situam na Austrália, valores de expansão das barras de argamassa inferiores a 0,1% aos 10 dias, indicam comportamento não reativo do agregado. Expansões maiores ou iguais a 0,1% aos 10 dias indicam comportamento reativo do agregado. Expansões menores do que 0,1% aos 10 dias e maiores ou iguais a 0,1% aos 21 dias, indicam comportamento lentamente reativo do agregado.

Segundo FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER (2006), o ambiente proporcionado pelo ensaio AMBT é bastante agressivo (NaOH-1N a 80° C), e sendo assim, o limite de distinção entre agregados reativos e não reativos, situa-se entre 0,08% e 0,20% (dependendo da região onde se situam os agregados). No entanto, o valor de 0,15% aos 16 dias aparenta ser bastante razoável para todas as localidades.

Segundo FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER (2006), a verificação da confiabilidade do método AMBT é feita através de sua comparação com o ensaio de prismas de concreto (CPT). Normalmente, o método AMBT é mais agressivo do que o CPT para um dado agregado, portanto, a taxa de reatividade de um mesmo agregado através dos dois ensaios não é a mesma, o que gera uma correlação muito baixa entre eles. A Figura 21 demonstra uma análise comparativa feita com 11 agregados de diferentes partes do mundo.

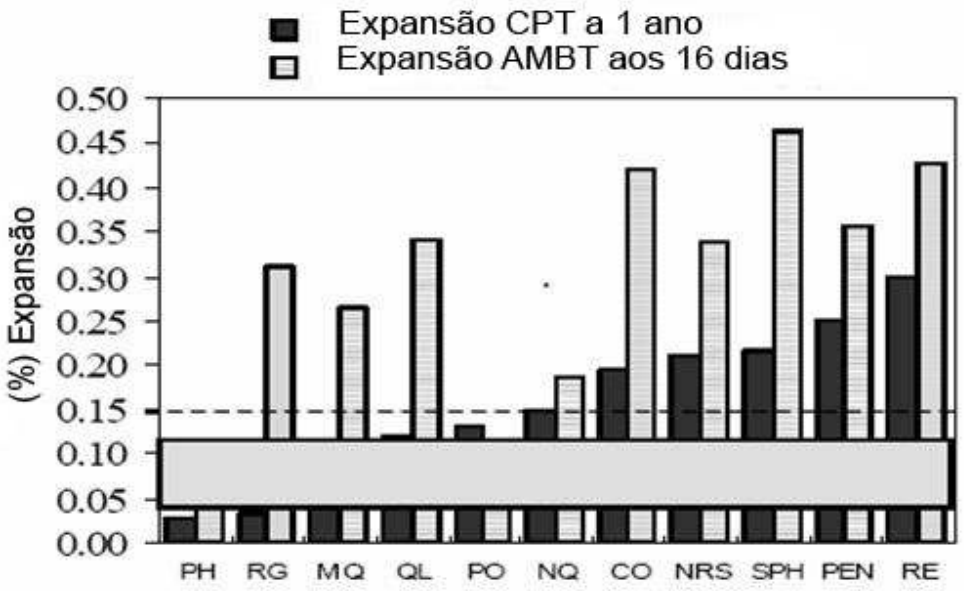

Figura 21. Análise comparativa com 11 agregados de diferentes partes do mundo entre o método ASTM C 1260 e o método ASTM C 1293 (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006).

Entrando mais a fundo no mérito da questão, FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER (2006), através da análise de vários agregados, puderam concluir que: quando da utilização do AMBT, pode-se ter dois tipos de erros de classificação; falso-negativos e falso-positivos.

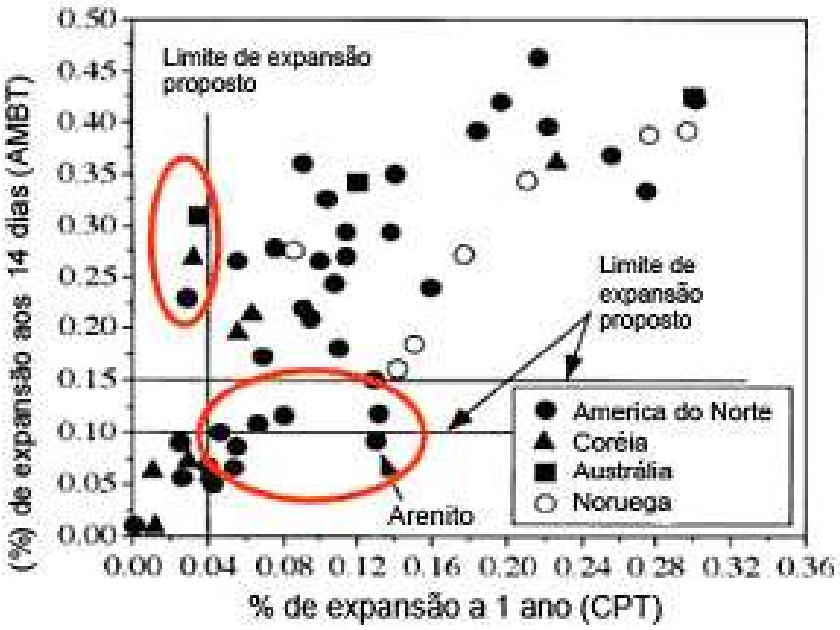

Figura 22. Análise comparativa entre os métodos ASTM C 1260 e ASTM C 1293 (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006).

Os “falso-positivos” (esquerda superior – agregados reativos mediante o AMBT e inócuos mediante o CPT) impediriam a utilização de agregados de bom comportamento em campo, e a utilização de agregados “falso-negativos” (direita inferior – agregados inócuos mediante o AMBT e reativos mediante o CPT) ocasionaria a utilização de agregados potencialmente deletérios (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006).

Segundo BELLEW (1997), devido à agressividade do meio ambiente ocasionada no emprego do AMBT, este ensaio não pode ser utilizado para rejeitar agregados, podendo ser utilizado somente para aceitá-los.

Segundo KUPERMAN, SALLES, PÍNFARI & CARNEIRO (2005), a inconfiabilidade do método levou a American Association of State Highway and Transportation Officials (AASHTO) e o COMITÊ 221 do American Concrete Institute (ACI) a proporem uma redução do valor limite de expansão deste teste de 0,10% para 0,08%.

Essa grande inconfiabilidade somada ao fato de países diferentes possuírem agregados com litologias diferentes (apresentando comportamentos expansivos diferentes), fez com que cada país adotasse um valor limite do método AMBT.

Tabela 4. Adaptações adotadas em diferentes países do mundo quando do uso do método AMBT (NBRI), (BELLEW, 1997).

Autor	País	Tempo de Armazenamento em NaOH à 80°C	Limites de Expansão (%)
Oberholster e Davies	África do Sul	12	0,11
Berra et al.	Itália	12	0,11
Shayan et al.	Austrália	10 – 22	0,10
Hooton e Rogers	Canadá – CSA A23. 2-25A	14	0,15
-	USA - ASTM C 1260	14	0,10
Wigum e Lindgard	Noruega	14	0,15
Batic et al.	Argentina	28	-

Além do limite, outro assunto ainda bastante discutido é o período (tempo) em que o agregado deve ser ensaiado. Diversos pesquisadores (no Brasil e em outros países como o Canadá) têm observado que o ensaio deveria ser levado até os 30 dias, de modo que os agregados lentamente reativos pudessem ser detectados. Outros estudiosos acreditam que o resultado poderia ser lido aos 16 dias, no entanto, o valor que caracteriza a reatividade do agregado deveria ser diminuído.

No Brasil, o comitê de estudos da norma brasileira CB-18/ABNT, optou por levar o ensaio até os 30 dias, acreditando que agregados lentamente reativos teriam

mais tempo para apresentar comportamento expansivo. O valor limite adotado para separar comportamentos potencialmente deletérios e potencialmente inócuos aos 30 dias foi de 0,19%.

É válido ressaltar que atualmente já existe o conhecimento de estruturas de concreto deterioradas pela RAA (principalmente barragens, devido ao seu ambiente favorável, como por ex.: Paulo Afonso I, II, III, IV), que tiveram seus agregados testados pela ASTM C 1260 apresentando resultados expansivos menores do que 0,19% aos 30 dias de ensaio. No entanto, os integrantes do CB-18/ABNT preferiram adotar inicialmente este valor, para que os agregados, em sua maioria, não fossem penalizados.

4.4.10 Avaliação acelerada da eficiência de materiais pozolânicos

Este método analisa a combinação cimento/agregado. Preconizada pela ASTM C 1567, trata-se do mesmo procedimento operacional do AMBT, incluindo moldagens, condições de armazenamento, cura e leituras. No entanto, podem ser adicionadas às barras de argamassa adições (material pozolânico ou escória de alto forno), no intuito de testar a mitigação da reação.

Sua grande vantagem está no fato de analisar com eficiência a introdução de adições minerais no controle da RAA. O método não pode ser utilizado quando da adição de compostos de lítio.

4.4.11 Método dos prismas de concreto (CPT)

4.4.11.1 Histórico e desenvolvimento do ensaio

Segundo THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA (2006), o método CPT foi desenvolvido devido à inconfiabilidade transmitida pelo método MBT preconizado pela ASTM C 227.

Inicialmente, corpos de prova prismáticos de concreto com consumo de cimento de 310 kg/ m^3 eram confeccionados e armazenados em câmaras úmidas à 23°C. A expansão que limitava o comportamento reativo do agregado era de 0,020% aos 84 dias.

No entanto, o teste foi sendo calibrado para que o comportamento dos corpos de prova em laboratório fosse similar ao comportamento em campo de estruturas de

concreto confeccionadas com o mesmo agregado. Em 1994 foi desenvolvido e adotado o procedimento que é utilizado até hoje.

Corpos de prova de concreto são confeccionados possuindo consumo de cimento de 420 kg/ m^3 e um equivalente alcalino de 1,25 % Na_2O_e (conseguido pela introdução de NaOH à água de amassamento), totalizando um teor de álcalis de 5,25 kg/m^3.

Essa adição alcalina é realizada devido à necessidade de maiores teores alcalinos para iniciar expansão em prismas de concreto (em laboratório) quando comparado com estruturas reais.

O método apresenta o valor limite de 0,04% a 1 ano, devendo o ensaio ser levado até 2 anos quando do emprego de adições minerais.

O CPT vem demonstrando grande confiabilidade. Até hoje, não foram encontrados agregados considerados inócuos pelo ensaio que demonstraram efeitos deletérios em campo (THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA 2006).

Para alguns agregados lentamente reativos, a utilização da expansão limite de 0,04% a 1 ano pode gerar alguma dificuldade de classificação, pois alguns agregados encontram-se marginais ao limite nesta idade (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006).

O método CPT divide-se em dois segmentos: avaliação da reação álcali-sílica e avaliação da reação álcali-carbonato.

4.4.11.2 Procedimento operacional na avaliação da reação álcali-sílica (RAS)

O método CPT tem como referência a norma canadense CSA. A23. 2-14A e americana ASTM C 1293 e permite a avaliação da potencialidade reativa de um dado agregado frente à RAS, através da variação do comprimento de prismas de concreto.

Em caso de análise do agregado miúdo, deve-se utilizar um agregado graúdo não reativo. Por outro lado, se o agregado graúdo for testado, o agregado miúdo utilizado para confeccionar o concreto deve ser inócuo.

O agregado graúdo deve possuir dimensão máxima de 19 mm e ser previamente analisado mediante análise petrográfica (ASTM C 295). O volume de

agregado graúdo utilizado neste método representa 70 % do volume do concreto no estado compactado seco. Este deve ser graduado nas frações mediante a Tabela 5:

Tabela 5. Frações granulométricas do agregado graúdo.

Tamanho da Peneira		
Passante	**Retido**	**Massa (%)**
19 mm	12,5 mm	33
12,5 mm	9,5 mm	33
9,5 mm	4,75 mm	33

A relação a/c utilizada deve estar entre 0,42 e 0,45 em massa. O cimento deve possuir 0,9 % ± 0,1 % de equivalente alcalino (% Na_2O + 0,658 x % K_2O) e seu consumo por m^3 de concreto deve ser de 420 kg/m^3 ± 10 kg/m^3. Com o objetivo de aumentar o equivalente alcalino para um teor de 1,25 % (em massa de cimento), deve ser adicionado NaOH na água de amassamento.

Para realização do ensaio, são confeccionados três corpos de prova prismáticos de concreto de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm. A cura, armazenamento e remoção dos moldes dos prismas devem ser feitos de acordo com a ASTM C 157.

A primeira leitura é feita logo após a desmoldagem dos prismas (após 24 horas em câmara úmida). Em seguida os prismas são armazenados em recipiente especial (que permite umidade relativa de 100%), permanecendo a uma temperatura de 38 ± 2°C durante um ano.

Subseqüentes leituras devem ser feitas a 7, 28 e 56 dias, bem como a 3, 6, 9 e 12 meses. Alguns pesquisadores e estudiosos acreditam que leituras devam ser feitas a cada 14 dias ao longo de um ano para melhor relato das taxas de expansão dos corpos de prova, e para que eventuais problemas durante o ensaio possam ser detectados.

Antes de cada leitura, os corpos de prova devem ser retirados do recipiente de armazenamento e depositados em câmara úmida com umidade relativa superior a 95 % por 16 ± 4 hs. A câmara úmida deve ter temperatura de 23 ± 1,7°C.

Os resultados são expressos em porcentagem de expansão. Segundo a ASTM C 1293, expansões a 1 ano iguais ou maiores a 0,04 % indicam o comportamento deletério do agregado.

4.4.11.3 Procedimento operacional na avaliação da reação álcali-carbonato (RAC)

Este método tem como norma de referência a ASTM C 1105 e permite avaliar a potencial reatividade de rochas carbonáticas pela variação do comprimento de prismas de concreto.

Devem ser preparados 6 prismas de concreto de dimensão 7,5 x 7,5 x 28,5 cm. Se não houver qualquer especificação quanto à dosagem, deve-se seguir a especificação ASTM C 233 (HASPARYK, 1999). A cura, o armazenamento e a desmoldagem dos corpos de prova prismáticos devem seguir a especificação ASTM C 157.

Os prismas são mantidos em câmara úmida, conforme a ASTM C 511, porém sem a imersão em água. Leituras devem ser feitas aos 7, 28 e 56 dias, assim como a 3, 6, 9 e 12 meses. Os resultados são expressos como porcentagem de expansão, como a média de 6 corpos de prova.

Expansões iguais ou superiores a 0,015 % aos 3 meses, ou 0,025 % aos 6 meses, ou ainda 0,03 % a um ano, indicam comportamento deletério do agregado (ASTM C 1105 apud HASPARYK, 1999).

4.4.11.4 Parâmetros que podem influenciar o ensaio

Existem alguns parâmetros do método CPT que podem influenciar a classificação de agregados, como a lixiviação de corpos de prova, o teor de álcalis equivalente do concreto, a utilização de diferentes agregados miúdos (mesmo sendo inócuos), o tipo do recipiente de armazenamento, o período de armazenamento dos corpos de prova antes da leitura, e etc.

Lixiviação dos corpos de prova

As diferenças de expansão laboratório/campo (através do CPT) para concretos confeccionados com um mesmo agregado deve-se a lixiviação. Muito embora no caso de prismas de concreto o problema de lixiviação seja menor que no caso de barras de argamassa (devido a uma maior seção transversal dos prismas), este problema, “teoricamente”, pode ocasionar a distorção da resposta do ensaio (THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA, 2006).

A Figura 23 apresenta a clara variação da concentração alcalina na água do recipiente de armazenamento, devido à lixiviação.

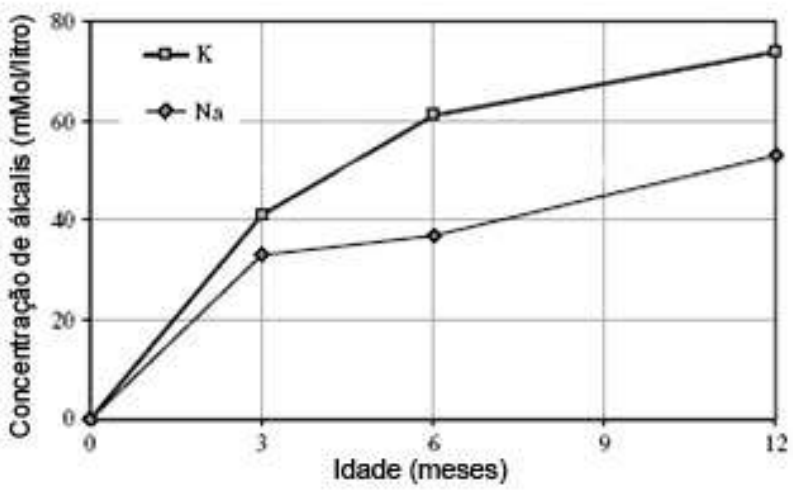

Figura 23. Variação da concentração alcalina na película de água do ensaio ASTM C 1293 com o passar do tempo (THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA 2006).

Segundo RIVARD, BERUBÉ, OLLIVER & BALLIVY (2003), algumas medidas para tentar minimizar a lixiviação podem ser tomadas como a cobertura dos corpos de prova com capa de plástico.

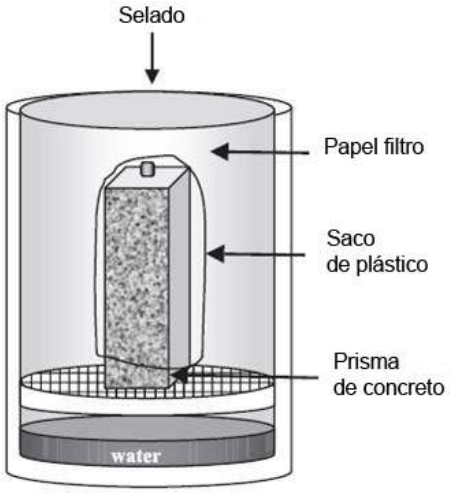

Figura 24. Corpos de prova cobertos com capa de plástico para a Inibição da lixiviação (RIVARD, BERUBÉ, OLLIVER & BALLIVY, 2003).

Teor de álcalis do sistema

Segundo THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA (2006), devido à lixiviação, o ensaio CPT necessita de adição alcalina na água de amassamento para que a resposta da expansão de um dado agregado a um ano de ensaio seja equivalente a concretos confeccionados em campo com este mesmo

agregado. A Figura 25 demonstra a análise comparativa de concretos confeccionados e armazenados em campo e em laboratório.

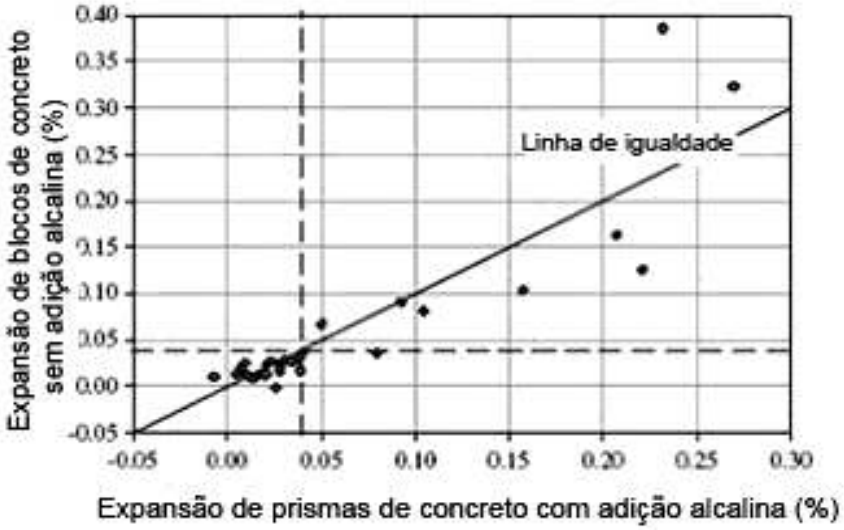

Figura 25. Análise comparativa entre prismas de concreto confeccionados em laboratório contendo adição alcalina e blocos confeccionados em campo sem adição alcalina (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006).

No ensaio CPT, quanto maior o teor de álcalis do cimento, maior a expansão dos prismas. A Figura 26 demonstra a análise comparativa de concretos utilizados no ensaio CPT contendo diferentes cimentos; cimento de baixo teor de álcalis (CBA) e cimento com alto teor de álcalis (CAA), com e sem adição de NaOH na água de amassamento. Para este estudo, foram utilizados os agregados Su, Al, Ed, Sp, Sl e Con que se encontram no Canadá (THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA (2006).

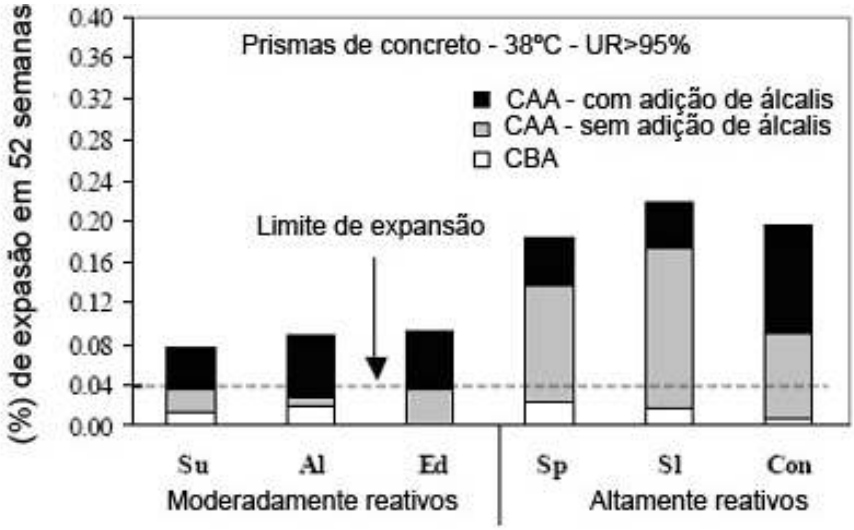

Figura 26. Expansões do método CPT com a utilização de cimentos de baixo e alto teores alcalinos, com e sem adição de NaOH na água de amassamento (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006).

Portanto, para que ensaios possam ter confiabilidade, torna-se necessária à utilização de cimento “padrão” com equivalente alcalino de 0,90 ± 0,10% além da introdução de NaOH na água de amassamento para ter-se um equivalente alcalino de 1,25% em relação a massa de cimento.

Utilização de diferentes agregados miúdos

Segundo FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER (2006), a natureza da areia (mesmo sendo não reativa) pode modificar a taxa da expansão de um mesmo agregado graúdo. A Figura 27 e Figura 28 demonstram tal fato.

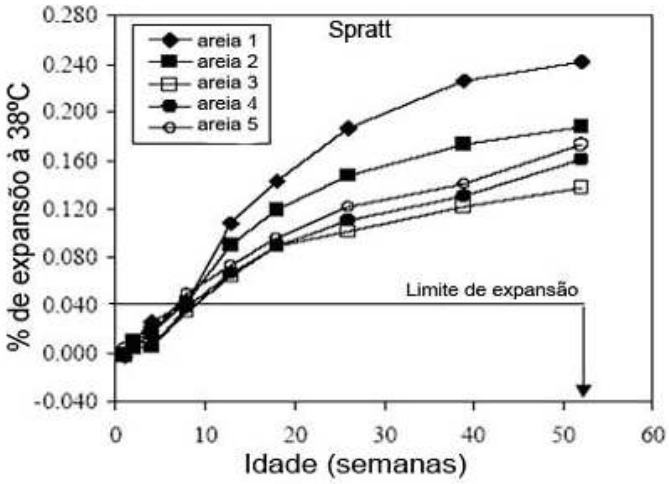

Figura 27. Variação da expansão de agregado canadense (Spratt Limestone) quando da utilização de areias inócuas de espécies diferentes (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006).

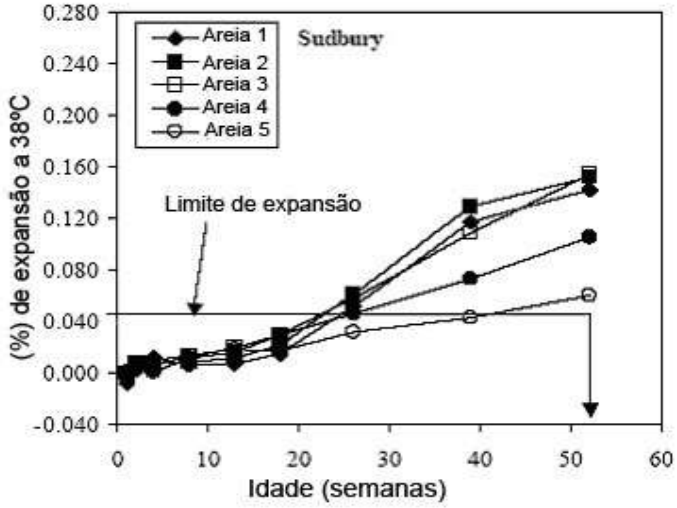

Figura 28. Variação da Expansão de agregado canadense (Sudbury) quando da utilização de areias inócuas de espécies diferentes (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD, IDEKER, 2006).

FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER (2006), propõem a padronização do agregado miúdo, de modo que este não ocasione distorção do ensaio.

Recipiente de armazenamento adequado

Vários tipos de recipientes podem ser utilizados para o armazenamento dos prismas de concreto. Seguem alguns recipientes recomendados (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Figura 29. Recipientes de plástico e câmara úmida a 38 ± 2° C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, SHEHATA, FOLLIARD, THOMAS, BAXTER, 2004).

Figura 30. Recipiente utilizado para o CPT (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Figura 31. Latas de Aço Inox para armazenar prismas de concreto a 38 ± 2º C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Figura 32. Recipiente que desempenha o papel de banho-maria nas latas que armazenam prismas de concreto a 38 ± 2° C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Figura 33. Estufa que armazena recipientes de plástico a 38 ± 2° C (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

4.4.12 Método acelerado de prismas de concreto (ACPT)

4.4.12.1 Histórico e desenvolvimento do ensaio

RANC & DEBRAY (1992), propuseram acelerar a taxa de expansão no método de prismas de concreto (pelo aumento da temperatura a 60° C), e com isso, diminuir a duração do ensaio.

A partir dos estudos de RANC & DEBRAY, diversos pesquisadores como TREMBLAY et al., MURDOCK e BLANCHETTE, TOUMA et al. e DE GROSBOIS E FONTAINE, acreditando no potencial deste ensaio, testaram agregados de muitas localidades, no intuito de que limites de classificação de agregados e períodos de análise fossem encontrados. Estes estudos geraram a seguinte tabela:

Tabela 6. Conclusões dos diversos pesquisadores para limites e períodos de análise do ACPT (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Autores	Limite de referência (CPT)	Limite proposto a 60°C
Ranc e Debray (1992)	0.04% exp. aos 8 meses (38°C)	0.015% a 4 semanas, ou 0.08% a 8 semanas
Bolotte (1992)	0.04% exp. aos 8 meses (38°C)	0.024% a 8semanas
Murdock e Blanchette (1994)	0.04% exp. aos 12 meses (38°C)	0.02% a 8semanas, ou 0.03% a 13 semanas
De Grosbois e Fontaine (2000)	0.04% exp. aos 12 meses (38°C)	• 0.04% a 13 semanas para agregados carbonáticos • 0.025% a 13 semanas para agregados ígneos e metamórficos
Touma et al. (2001)	0.04% exp. aos 12 meses (38°C)	0.04% a 13semanas

Compilando todos estes resultados testados pelos pesquisadores citados anteriormente, FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER (2004), perceberam (empiricamente) que existia uma correlação bastante interessante entre os métodos CPT e ACPT aos três meses (Figura 34).

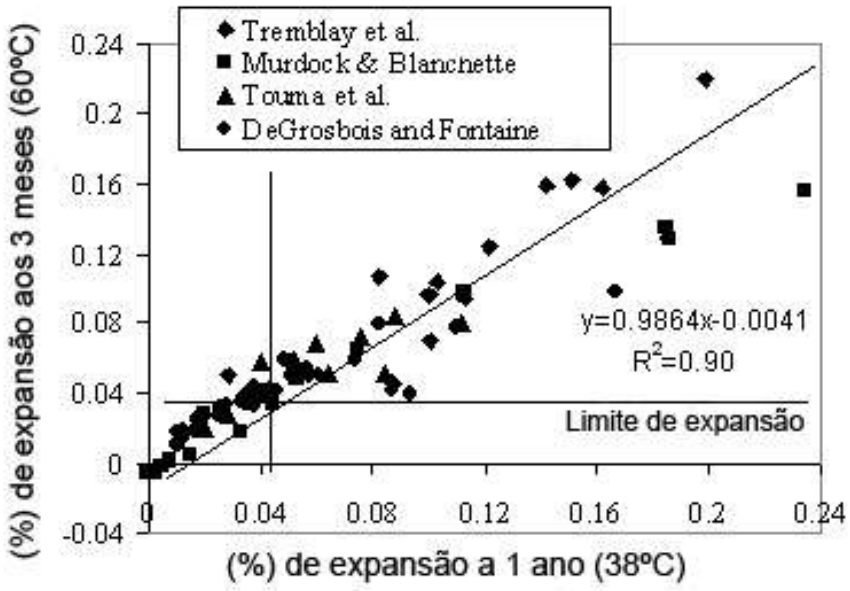

Figura 34. Correlação entre o CPT e o ACPT após vários estudos de muitos pesquisadores (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Através da regressão linear da equação exposta acima, (y = 0,9864x – 0,0041), uma expansão de 0,04% a 1 ano e 38° C, corresponde a uma expansão de 0,03% aos três meses e 60° C. No entanto, em 13 semanas, o mesmo diagnóstico do CPT (0,04% a 1 ano) poderia ser conseguido através do ACPT (0,04% a 13 semanas) , para 95% dos casos (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Com os limites e datas definidos, estes pesquisadores propuseram um programa interlaborarial (entre cinco laboratórios) onde dois agregados de conhecido comportamento (Spratt Limestone e o Sudbury Gravel) pudessem ser testados com o propósito de ser verificada a reprodutibilidade e a repetitividade do ensaio ACPT. A Figura 35 e Figura 36 demonstram que estes dois parâmetros foram atingidos.

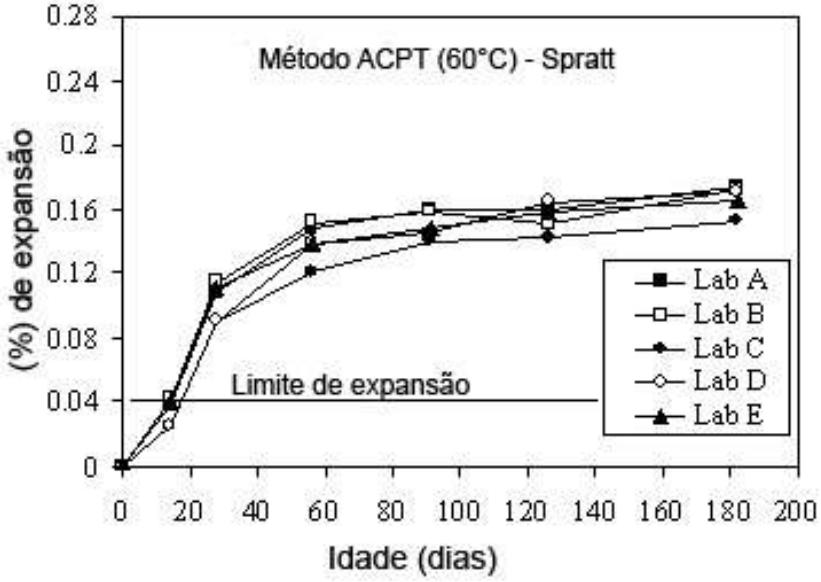

Figura 35. Expansão do agregado Spratt Limestone (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

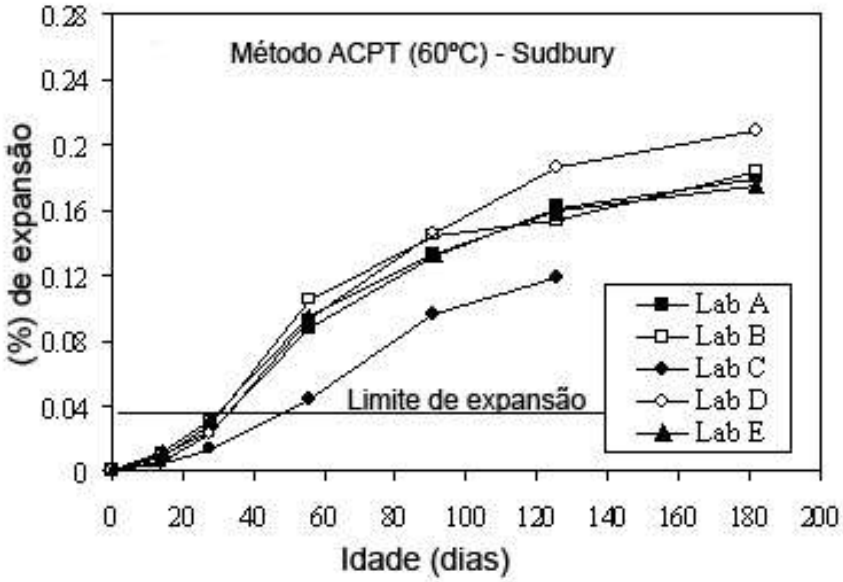

Figura 36. Expansão do agregado Sudbury Gravel (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Embora atualmente existam muitas pesquisas (no mundo inteiro) sobre o método ACPT e o ensaio venha se mostrando com bastante potencial, este ainda não foi normatizado (THOMAS, FOURNIER, FOLLIARD, IDEKER & SHEHATA 2006).

4.4.12.2 Parâmetros que podem influenciar o ensaio

Basicamente, os parâmetros que podem influenciar o CPT, podem também influenciar as respostas no método ACPT.

Lixiviação dos corpos de prova

Como a temperatura de ensaio é maior no método ACPT, pode-se ter uma maior lixiviação dos corpos de prova do que no método CPT.

FOLLIARD et al. (2004, apud FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004), atentam à comunidade científica sobre o perigo da lixiviação no método ACPT. Segundo o autor, a lixiviação é tanto maior quanto maior a temperatura.

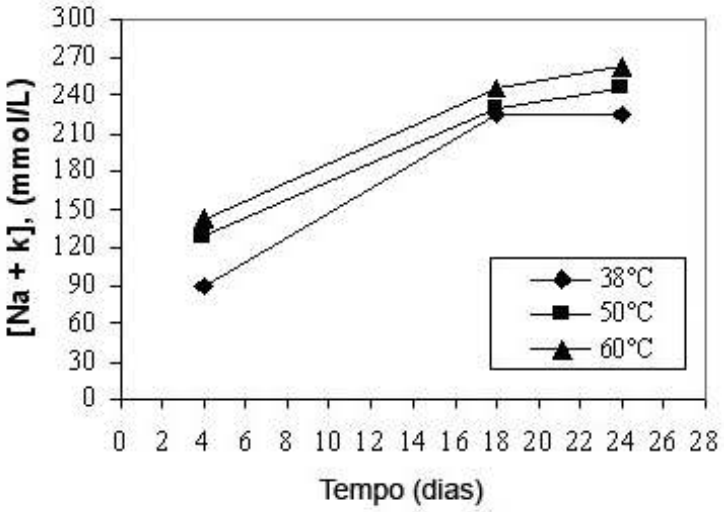

Figura 37. Concentração de álcalis na película de água do ensaio de prismas de concreto proveniente da lixiviação (FOURNIER, CHEVRIER, GROSBOIS, LISELLA, SHEHATA, FOLLIARD, IDEKER, THOMAS, BAXTER, 2004).

Utilização de diferentes agregados miúdos

Assim como no CPT, o tipo da areia (mesmo sendo não reativa) utilizada no ensaio tem um papel significativo na expansão do agregado graúdo. Em caso de agregados muito reativos, esta diferença não irá representar nenhuma distorção na classificação dos agregados, muito embora, para agregados moderadamente ou lentamente reativos, este parâmetro pode distorcer sua classificação (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006). A Figura 38 e Figura 39 demonstram tal fato:

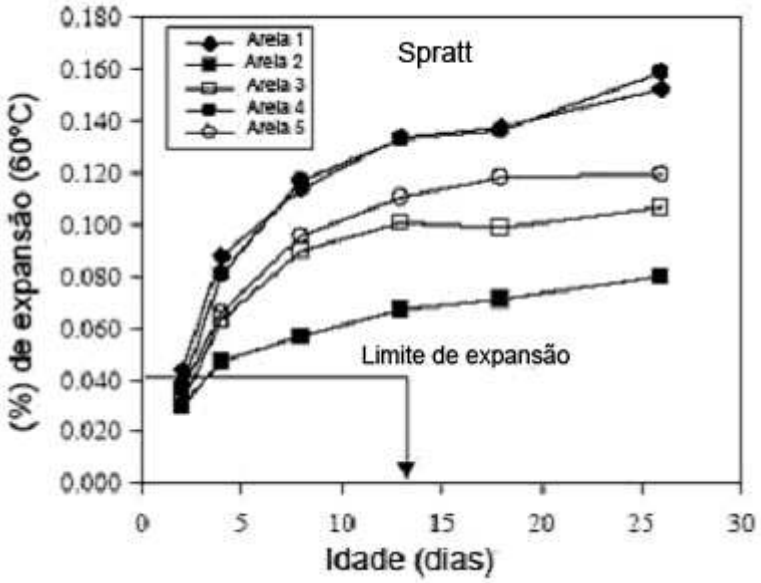

Figura 38. Variação da expansão de prismas de concreto (Contendo Spratt Limestone como Agregado Graúdo) através da variação do tipo da areia inócua no método ACPT (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006).

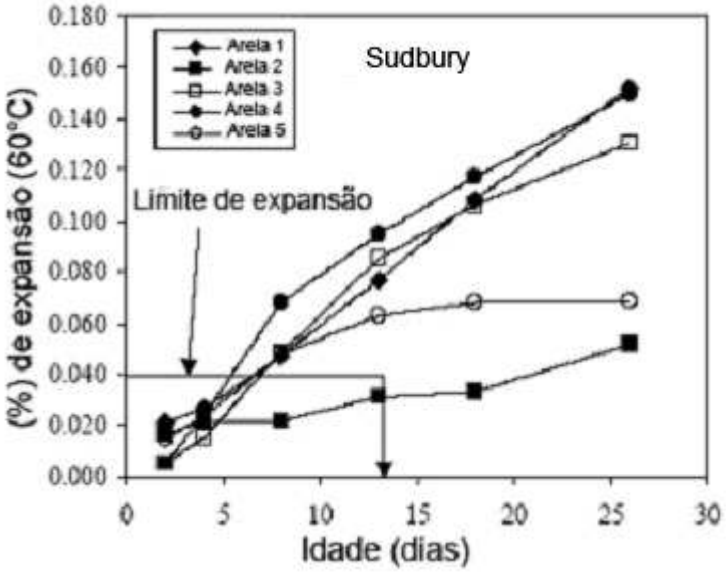

Figura 39. Variação da expansão de prismas de concreto (Contendo Agregado de Sudbury como Agregado Graúdo) através da variação do tipo da areia inócua no método ACPT (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006).

Recipientes de Armazenamento

Os mesmos recipientes de armazenamento que podem ser utilizados para desenvolvimento do CPT podem também servir para a realização do ACPT. Apenas deve-se ter cuidado para que o material utilizado como recipiente de armazenamento resista à temperatura de 60° C.

4.4.13 Método acelerado de prismas de concreto imersos em solução (ACPST)

4.4.13.1 Histórico, desenvolvimento do ensaio e procedimento operacional

Diversos pesquisadores no mundo inteiro vêm estudando métodos alternativos ao ACPT que possam de maneira mais rápida classificar um agregado mediante a sua reatividade, além de tentar limitar o problema da lixiviação que ocorre freqüentemente no ACPT.

Existe uma corrente de pesquisadores que estuda a imersão de prismas (semelhantes aos confeccionados nos métodos CPT e ACPT) em solução de NaOH a 80°C (BERUBÉ, FRENETTE, 2003).

SHAYAN et al., elaboraram um ensaio onde os corpos de prova são confeccionados de maneira equivalente ao CPT, (no entanto, o cimento deve possuir um equivalente alcalino (Na_2O_e) de 1,35%) sendo desmoldados após 24 horas e curados em câmara úmida durante três dias. Após este período, os corpos de prova são imersos em NaOH-1N. O autor adotou o período de 14 dias para análise dos prismas, sendo o limite de 0,062% o escolhido para a classificação do potencial reativo de agregados (LEE, LIU & WANG 2004).

BERUBÉ & FRENETTE (2003), estudaram prismas de concreto de acordo com o CPT imersos a 80°C em soluções de NaCl e NaOH, assim como imersos em água e apenas expostos à umidade relativa de 100%. Os autores concluíram com o estudo que:

- Em 1 mês, prismas de concreto imersos em NaOH já podem ser avaliados e sendo assim os agregados já podem ser classificados mediante a sua potencial reatividade;
- A diluição dos íons alcalinos ocorrida nos primas de concreto imersos em água faz com que suas expansões sejam menores em qualquer idade analisada;
- Prismas imersos em NaCl podem gerar formação de cloroaluminatos (mecanismo expansivo), podendo superestimar a expansão deletéria proveniente da RAA.

LEE, LIU & WANG (2004), desenvolveram um método acelerado de prismas de concreto a 80° C. Neste ensaio, os corpos de prova foram dosados de acordo com o método CPT (ASTM C 1293), no entanto, o ambiente de armazenamento,

assim como o procedimento operacional, foram feitos de acordo com o método AMBT (ASTM C 1260). Os autores denominaram o método de ACPST.

Os resultados deste ensaio realizados com 22 agregados que se encontram na China foram comparados com o método CPT. Tentativas de correlação do ensaio acelerado foram feitas a 1 mês e aos 3 meses. Os respectivos limites para estas idades foram estabelecidos como sendo 0,15 % e 0,20 % respectivamente. A Figura 40 e Figura 41 mostram a correlação entre os dois métodos:

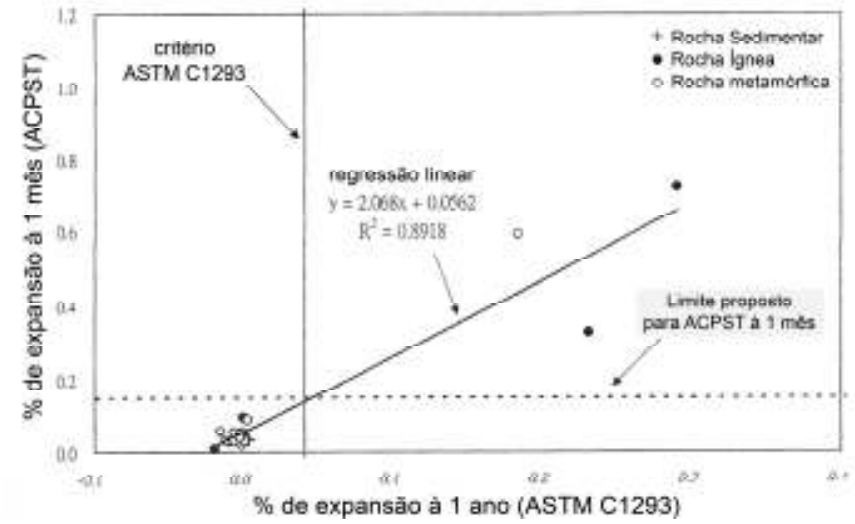

Figura 40. Comparação entre o método CPT a 1 ano e o método ACPT a 1 mês (LEE, LIU & WANG, 2004).

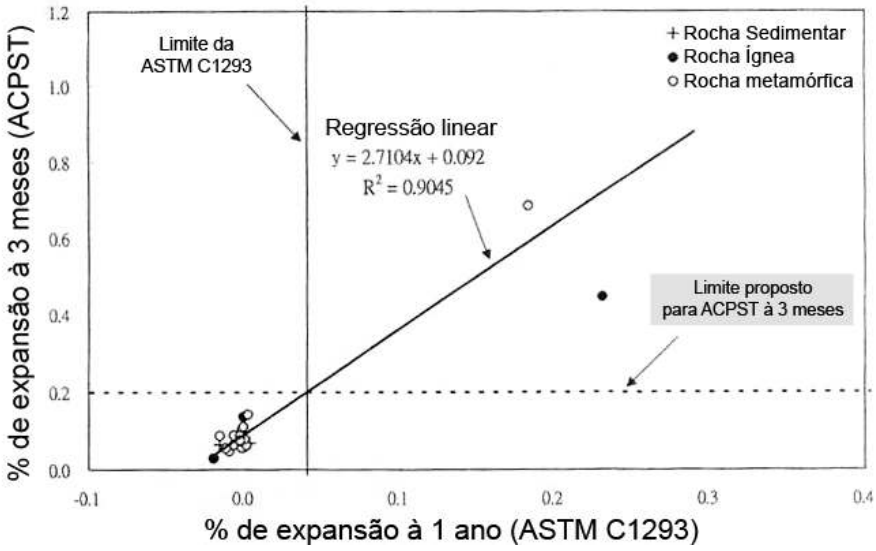

Figura 41. Comparação entre o método CPT a 1 ano e o método ACPST aos 3 meses (LEE, LIU & WANG, 2004).

Pode-se perceber através dos gráficos que a correlação aos 3 meses é excelente, muito embora a correlação a 1 mês seja bastante razoável.

Tentando fixar o período de análise e o limite de classificação do ensaio, LEE, LIU & WANG (2004), estudaram a variação da correlação do ACPST com o CPT através do tempo (Figura 42).

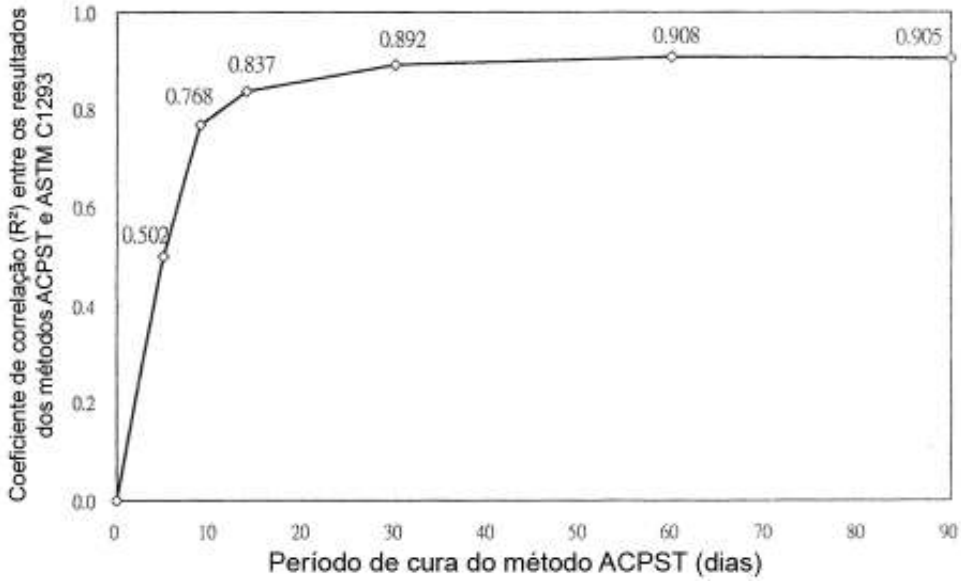

Figura 42. Estudo da correlação (ACPST e CPT) com o tempo (LEE, LIU & WANG, 2004).

A partir desta análise, pode-se perceber que o ensaio proposto por LEE, LIU & WANG (2004) já aos 14 dias apresenta uma boa correlação com o ensaio CPT. No entanto, os autores acreditam que a análise e classificação do agregado a 1 mês seja mais confiável, pois nesta data o ensaio tem um coeficiente de correlação próximo a 90%.

4.4.14 Método das microbarras de concreto (CMBT)

4.4.14.1 Histórico, desenvolvimento do ensaio e procedimento operacional

O método das microbarras de concreto foi proposto por Xu et al. (2000, apud FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006), para avaliar a potencial reatividade de agregados frente à reação álcali-sílica (RAS).

Este ensaio é similar ao método AMBT preconizado pela ASTM C 1260 exceto o tamanho da barra (40 x 40 x 160 mm). O agregado é classificado como passante na peneira de 10 mm e retido na peneira de 5 mm. O traço das microbarras é de 1:1 (cimento: agregado) com relação a/c de 0,30. O período de

ensaio é de 30 dias, sendo os corpos de prova imersos em NaOH-1N a 80° C. O limite de expansão entre agregados reativos e não reativos aos 30 dias é de 0,1%.

A Figura 43, demonstra a comparação entre o CPT e o CMBT com dez agregados que se encontram no Canadá, EUA e China.

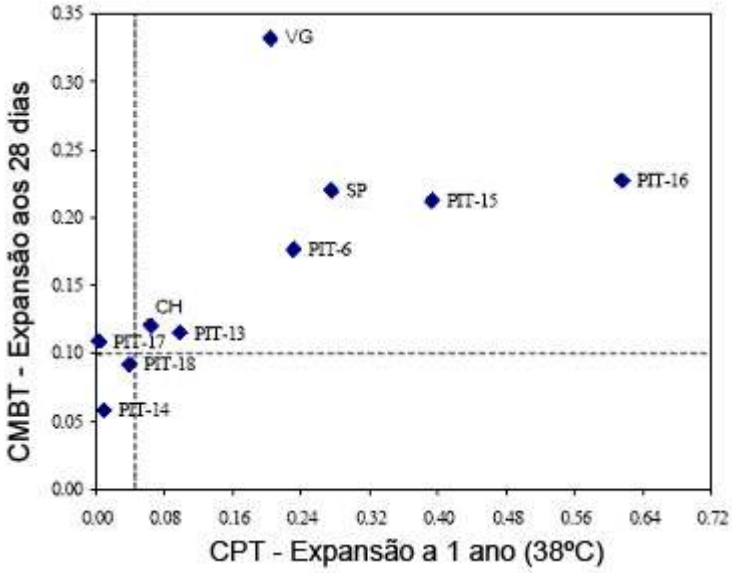

Figura 43. Comparação entre 10 agregados oriundos do Canadá, EUA e China, utilizando o método CPT a 1 ano e o CMBT a 1 mês (FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006).

BELEW et al. (2004, apud FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER, 2006), testaram este método com uma larga gama de agregados carbonáticos e silicosos oriundos de vários países no laboratório de CANMET. Os resultados demonstraram uma razoável correlação entre os métodos CMBT e CPT com ambos os tipos de agregados.

4.4.15 Ensaio de autoclave acelerado

4.4.15.1 Histórico e procedimento operacional

Segundo HASPARYK (1999), este procedimento foi definido no Japão por TAMURA (1989), e posteriormente foi aperfeiçoado na França por SALOMON, GALLIAS & CAUDE (1993).

O método prescreve as diretrizes para avaliar a potencialidade reativa em argamassas submetidas a condições de temperatura e pressão (autoclave). São moldadas três barras de argamassas de dimensões de 40 x 40 x 160 mm, na

proporção cimento/agregado de 1:2 em massa, utilizando uma relação a/c igual a 0,50.

O equivalente alcalino expresso em % de Na_2O_{eq} deve ser elevado a 4% através da adição de NaOH à água de amassamento. As barras são introduzidas no equipamento de autoclave contendo água a uma temperatura de 127° C durante 5 hs.

Após o ensaio, são analisados parâmetros como a variação dimensional, variação de massa, resistência à flexão, resistência à compressão, variação da velocidade de propagação do som e variação do módulo de elasticidade dinâmico.

Em relação ao parâmetro dimensional, são consideradas as seguintes condições:

- Para valores iguais ou superiores a 0,30 %, o agregado é considerado deletério.
- Para valores inferiores a 0,15 %, o agregado é considerado inócuo.
- Para valores entre 0,15 % e 0,30 %, o agregado é considerado potencialmente reativo.

Em relação aos outros parâmetros, o agregado é considerado inócuo quando nenhuma fissura aparente for observada, quando a variação da velocidade do som for inferior a 5 % e quando a variação do módulo de elasticidade dinâmico for inferior a 15 %.

Segundo BELLEW (1997), ensaios de autoclave em barras de argamassa desenvolvidas por NISHIBAYASHI, TAMURA & FOURNIER mostraram correlações consideráveis com testes feitos pelo método NBRI, no entanto, seu alto custo (equipamentos caros) somado a falta de experiência na execução do método, faz com que este mereça um maior treinamento antes do seu uso corrente.

4.5 Método proposto

4.5.1 Método acelerado brasileiro de prismas de concreto (ABCPT)

4.5.1.1 Histórico e procedimento operacional

O método ABCPT foi proposto pelo próprio autor e é baseado em termos de dosagem e confecção dos prismas no método CPT, sendo seu procedimento

operacional similar ao do AMBT, exceto pela concentração da solução e pela cura, que não é feita em água a 80° C e sim em câmara úmida a 23°C durante as primeiras 24 horas.

A concentração da solução alcalina foi escolhida a partir da tentativa de não ocorrência de difusão entre o meio externo (solução) e o meio interno (prismas), fato este que ocorre tanto quando da imersão de prismas de concreto em água, quanto em solução NaOH-1 N. Não havendo difusão, o ensaio é acelerado apenas pela temperatura (80°C).

Para que não haja difusão, a concentração alcalina equivalente interna Na_2O_{ei} tem que ser igual ou muito próxima à concentração alcalina externa Na_2O_{ee}. O procedimento de cálculo utilizado para que isto ocorresse foi o seguinte:

Como os prismas possuem em seu interior 1,25% de Na_2O_e, a solução deve ter também um total de 1,25% de equivalente alcalino. Portanto em:

100 ml de água → 1,25% de Equivalente alcalino.

Logo, em um litro, haverá 12,5 gramas de NaOH. Sendo a valência da hidroxila igual a 1 (OH^{-1}), o hidróxido de sódio tem a “molaridade” igual a “normalidade”.

Como:

40g em 1 litro → 1M = 1N

12,5 g em 1 litro → x

x = 0,3125 N.

Corpos de prova são moldados e permanecem em câmara úmida durante as primeiras 24 horas. Após a desmoldagem, é feita a leitura inicial e os corpos de provam são imersos em solução alcalina de 0,3125 N durante 1 mês. Leituras semanais devem ser feitas e as respostas são dadas como % de expansão. Expansões iguais ou maiores a 0,04 % a 1 mês indicam um comportamento reativo do agregado.

4.6 Análise de risco da ocorrência da reação

4.6.1 Índice de reatividade potencial (IRP)

Sabe-se que muitos são os fatores que podem influir no desenvolvimento da RAA (como reatividade do agregado, condições de exposição, tipo e consumo de cimento, etc.). Portanto, apenas a utilização de ensaios laboratoriais para classificar um “concreto” como potencialmente reativo ou potencialmente inócuo, significa não abranger o problema de maneira holística e por muitas vezes correta. Surge com isso o conceito de análise de risco.

Rodrigues et al. (1997), propuseram um índice (IRP) que levasse em conta não só as características deletérias do agregado, mas também as condições de aplicação do concreto confeccionado com este agregado (levando em conta a análise de risco).

O IRP realiza a análise da suscetibilidade de agregados granitóides (granitos, gnaisses e migmatitos) frente à reação álcali-agregado, fundamentando-se nos seguintes parâmetros (KIHARA, SBRIGHI e PECCHIO, 2006):

- Ensaio de expansão segundo a ASTM C 1260 nas idades de 14 e 28 dias.
- Microscópicos (ângulo de extinção ondulante, conteúdo de quartzo microgranular, ocorrência de microfissuramento e granulação média da matriz).
- Teor de álcalis solúveis no cimento.
- Tipos de obra.
- Condições ambientais.

A Tabela 7 demonstra como efetuar o cálculo do IRP através de pontuações a serem consideradas em cada parâmetro.

Tabela 7. Índice de Reatividade potencial (IRP) (KIHARA, SBRIGHI, PECCHIO, 2006).

Parâmetros (A)	Condições		
ASTM 1260 – 14 dias	<0,10 (0)	>0,10 e <0,20 (2)	>0,20 (3)
ASTM 1260 – 28 dias	-	<0,20 (0)	>0,20 (3)
Ângulo Extinção Ondulante	<15º (0)	15 a 30º (1)	>30º (2)
% de quartzo microgranular	<5% (1)	5 a 15% (2)	>15% (3)
Granulação da Matriz	>1mm (0)	1 a 0,2 mm (1)	<0,20mm (2)
Microfissuramento	Ausente ou fraco (0)	Moderado (1)	Forte (2)
Teor de Álcalis Solúveis do Cimento (%)	-	<0,4% (3)	>0,4% (3)
Tipo de Obra (B)	Não Hidráulico (0)	Parcialmente (1)	Hidráulica (2)
Condições Ambientais (C)	Quente/seco-frio/seco (0)	Moderado/úmido (1)	Quente/úmido (2)
IRP = A*(B+C)			

A partir das pontuações consideradas, podem ser considerados os seguintes limites:

- IRP > 20: Agregado Reativo.
- IRP 12 - 20: Agregado Potencialmente Reativo.
- IRP ≤ 12: Agregado Inócuo.

O IRP mostra uma boa correlação com amostras de concreto extraídas de estruturas afetadas pela reação, tornando-se uma ferramenta bastante promissora no que tange a modelos de previsão da reação (KIHARA, SBRIGHI e PECCHIO, 2006).

5 PROGRAMA EXPERIMENTAL

5.1 Discussão, motivação e escolha dos métodos na pesquisa

A melhor solução técnico/econômica para se combater a reação álcali-agregado (RAA) é a prevenção e, sendo assim, torna-se necessário o desenvolvimento e o aprimoramento de métodos laboratoriais que consigam de uma maneira eficaz, analisar e classificar agregados de maneira prévia a sua utilização.

Segundo SWAMY (1992), diversos métodos foram pesquisados e desenvolvidos através dos anos para testar a potencial reatividade de agregados e da combinação cimento/agregados em laboratório. No entanto, muitos dos principais métodos utilizados pelo meio técnico/científico têm se mostrado não totalmente confiáveis, apresentando alguns resultados contraditórios laboratório/campo.

Dentre estes, pode ser citado o método AMBT que analisa a potencialidade deletéria do agregado e da combinação cimento/agregado, através de barras de argamassa. Especialistas no assunto acreditam que sua utilização torna a análise não totalmente “real” e confiável, apresentando distorções de comportamento, quando da utilização dos mesmos agregados em concretos. Sendo assim, torna-se necessária à discussão da confiabilidade deste método, assim como o estudo de alguns parâmetros que possam ocasionar divergências laboratório/campo.

Como visto na revisão bibliográfica, o ensaio de prisma de concreto (CPT) é o método mais confiável e que representa de maneira mais fiel às condições que o agregado irá encontrar em campo. No entanto, seu tempo de duração (1 ano) inviabiliza quase que totalmente sua utilização em obras correntes. Este método foi desenvolvido com o intuito de que as respostas provenientes dos outros métodos acelerados (em concreto e em argamassa) fossem calibradas e comparadas com as suas.

Dentre os métodos acelerados em concreto (ainda não normatizados) que demonstram grande potencial de utilização, encontram-se os métodos ACPT (3 meses), ACPST (1 mês) e ABCPT (1 mês). Como ainda não foram normatizados e acreditando na sua potencialidade, torna-se interessante a realização dos três ensaios, para que conclusões possam ser tomadas e parâmetros possam ser ajustados.

Foram, de maneira paralela, realizadas análises petrográficas com o intuito de detectar os minerais potencialmente reativos contidos nas amostras. Como resumo, o fluxograma abaixo apresenta os ensaios que foram realizados:

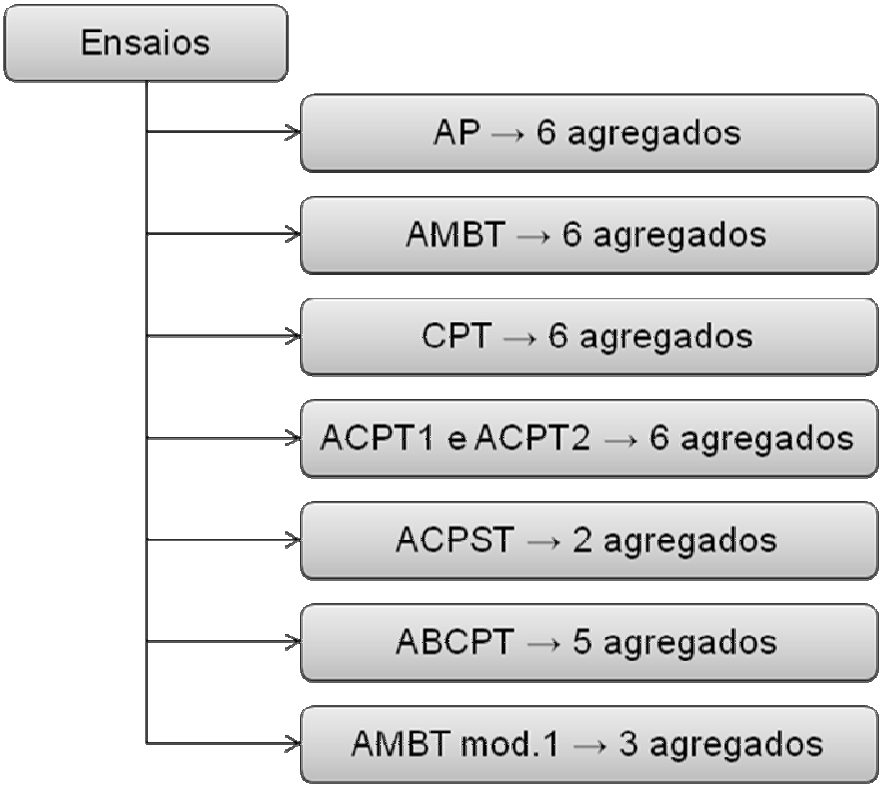

Figura 44. Fluxograma de ensaios executados

5.2 Amostras escolhidas para análise

Para a pesquisa em questão, foram utilizadas seis amostras, retiradas de localidades diversas do Brasil. São elas:

5.2.1 Granito - Embu das Artes

O granito de Embu das Artes foi utilizado como agregado padrão, pois através de análise prévia pelo método AMBT (preconizado pela ASTM C 1260), foi classificado como inócuo.

5.2.2 Basaltos - Americana e Birigui

Os basaltos de Americana e Birigui foram escolhidos devido a curiosidade somada a necessidade da análise de basaltos (normalmente reativos) no estado de São Paulo.

5.2.3 Milonito e Granito - Recife

O milonito foi escolhido devido ao danoso desempenho em campo demonstrado em obras correntes (particularmente em blocos de concreto) na cidade do Recife. Já o granito (amostra retirada de outra pedreira da mesma região) foi escolhido devido a suspeita de sua reatividade em obras antigas no Recife.

5.2.4 Quartzito (Ilha Solteira)

O quartzito é tido como um agregado altamente reativo segundo o laboratório da CESP de Ilha Solteira tendo sido utilizado em estudos prévios à construção da UHE Jupiá.

5.3 Características litológicas das amostras utilizadas

5.3.1 Granitos

O nome Granito começou a ser utilizado a partir do século XVI. Deriva do latim “granitum” e faz referência à textura granulada da rocha. São as rochas mais abundantes da crosta terrestre, especialmente na crosta continental.

O granito é uma rocha magmática (intrusiva), rica em sílica e alumínio, com mais de 56% de SiO_2.

Os componentes mineralógicos essenciais do granito são o quartzo, o ortoclásio e o microclínio (feldspato potássico), a albita-oligo-clássica e a biotita (mica).

Como outras rochas ricas em sílica, o granito tem cor clara (branca, cinza, rosada, amarelada, esverdeada, vermelha). Sua tonalidade depende do feldspato potássico presente. Normalmente é branca, mas também pode ser rosada ou vermelha se contiver hematita (óxidos de ferro) em formas de finíssimas lâminas

distribuídas uniformemente. A Figura 45 mostra a foto de um granito utilizado na pesquisa.

Figura 45. Granito de Embu das Artes.

O granito exibe estrutura massiva e textura granular (com todos os componentes bem cristalizados), e com o tamanho do grão de fino a médio. São muito utilizados na construção civil, tanto como agregados para concreto, assim como em acabamentos de edificações.

5.3.2 Basaltos

O basalto é uma rocha magmática. Seu nome é muito antigo, talvez de origem egípcia e sua cor é escura.

Possui um conteúdo de sílica inferior a 52%. Tem cor em geral escura, do cinza ao negro, devido à riqueza em minerais de ferro e magnésio. A Figura 46 mostra um dos basaltos utilizados na pesquisa.

Figura 46. Basalto de Birigui.

A textura dos basaltos pode variar desde a microlítica (formada por cristais de dimensões muito pequenas), até a porfirítica, com grandes cristais de plagioclásios, piroxênio e olivina imersos em uma pasta microcristalina que, às vezes, possui bastante vidro vulcânico (material não cristalino).

Os componentes essenciais dos basaltos são os plagioclásios e os piroxênios. São demasiadamente utilizados na construção civil, pela sua grande resistência aos agentes atmosféricos.

5.3.3 Seixos (Quartzitos)

O quartzito é uma rocha metamórfica cujo nome alude ao seu componente mais abundante: o quartzo. Geralmente se associa a uma mica muscovita. A presença destes dois minerais determina a cor clara desta rocha e o seu brilho característico. Trata-se de um tipo litológico bastante difundido que pode assumir denominações locais segundo sua composição.

Figura 47. Quartzito de Ilha Solteira.

Seu principal constituinte é o quartzo, no entanto, pode também possuir os seguintes minerais: moscovita, biotita, clorita, ortoclásio, microclina, albita, apatita, zircão, pirita, magnetita, ilmenita, etc.

5.3.4 Gnaisses

O gnaisse comumente é cinza ou rosa, porém sua característica mais impressionante é a estrutura que alterna faixas paralelas escuras e claras. O nome desta rocha vem do alemão “gneiss”, mas basicamente deveria ser “gneista”, vocabulário nórdico antigo que significa “emitir centelhas”.

É produto do mais elevado grau possível do metamorfismo, ou seja, se a temperatura e pressão a que as rochas se submetessem fossem mais altas, elas teriam derretido e se tornado formações magmáticas. Basicamente formam-se a temperaturas de cerca de 700° C e pressões da zona de 6 quilobars (6000 vezes maior que a pressão atmosférica).

Os componentes mineralógicos essenciais do gnaisse são feldspatos, mica e quartzo. O gnaisse pode conter vários minerais acessórios, dependendo das condições de formação. Os mais importantes são: apatita (fluorfosfato de cálcio), epídoto (silicato de cálcio e alumínio e/ou ferro), granada (silicatos cúbicos de cálcio e ferro ou alumínio e cromo), hornblenda (aluminossilicato de cálcio e magnésio ou ferro), ilmenita (titanato ferroso), magnetita (óxido de ferro), monazita (fosfato de cério e outros metais), pirita (sulfeto de ferro), pirrotita (sulfeto de ferro), e titanita

(silicato de titânio e cálcio). A Figura 48 mostra o granito-gnaisse (milonito) utilizado na pesquisa.

Figura 48. Granito - gnaisse (milonito) de Recife.

5.4 Análise petrográfica

Foi realizada na ABCP, a análise petrográfica das seis amostras citadas anteriormente, para que as características mineralógicas das rochas (agregados) fossem descobertas. O procedimento operacional seguido foi de acordo com o método ASTM C 295. As figuras a seguir demonstram as fotos tiradas e algumas fases minerais encontradas nos agregados durante as análises.

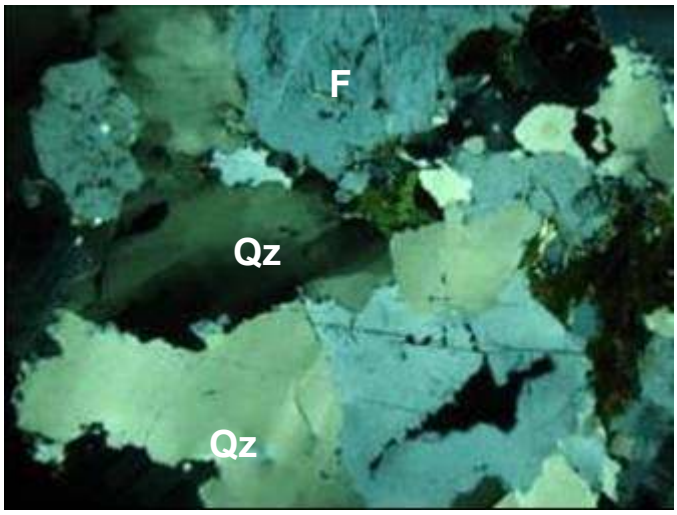

Figura 49. Análise petrográfica do granito de Embu das Artes.

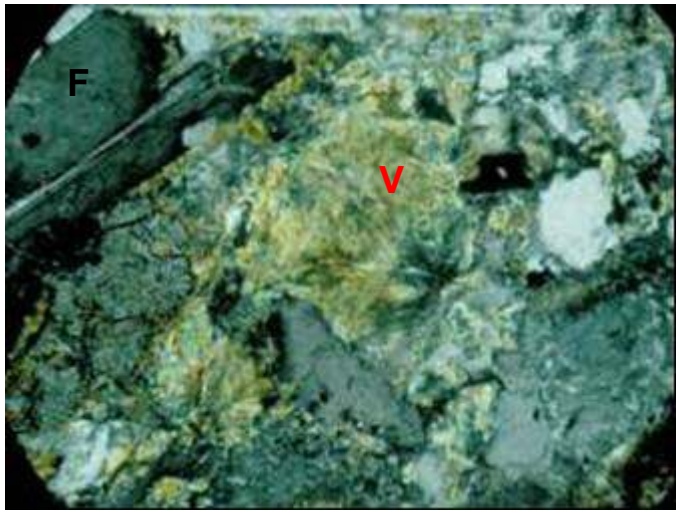

Figura 50. Análise petrográfica do basalto de Americana.

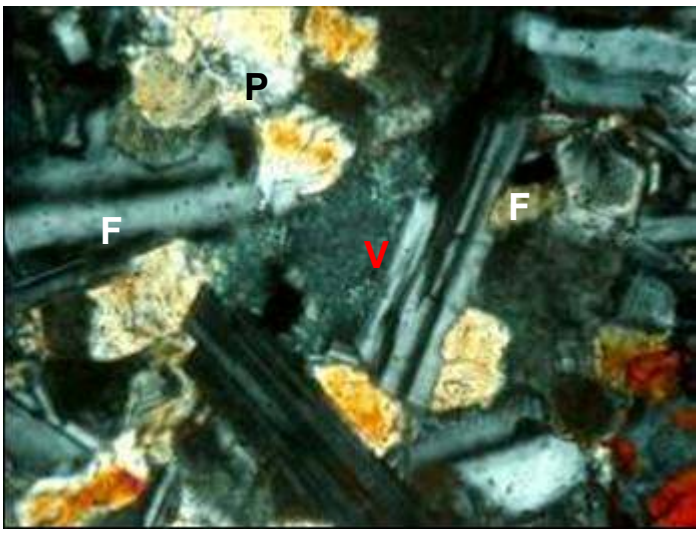

Figura 51. Análise petrográfica do basalto de Birigui.

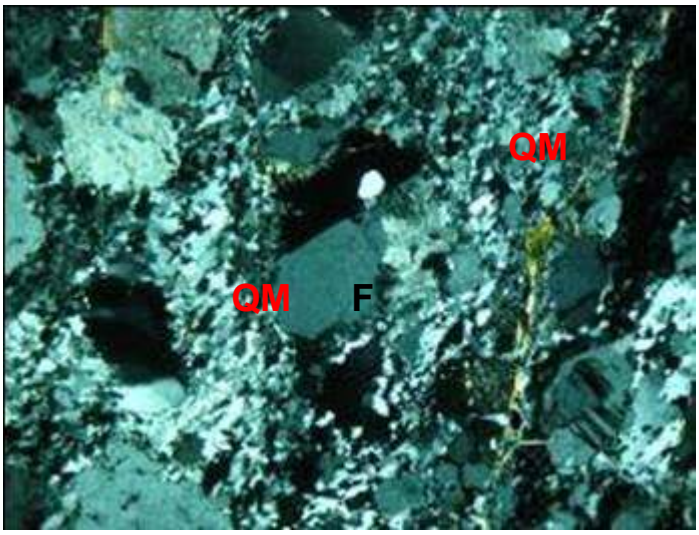

Figura 52. Análise petrográfica do milonito de Recife.

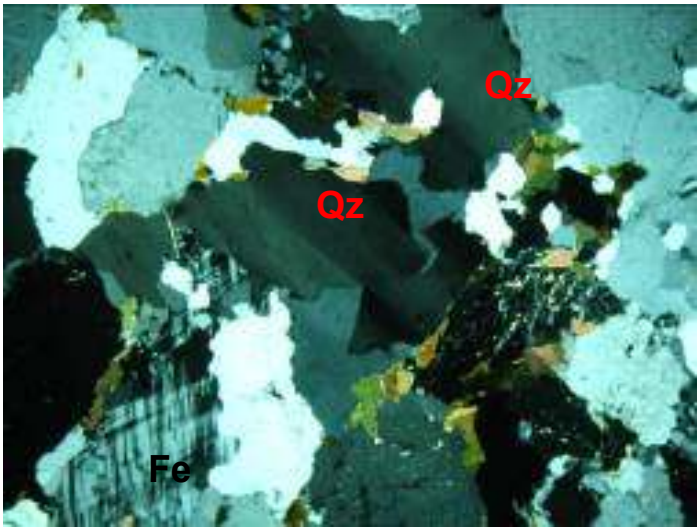

Figura 53. Análise petrográfica do granito de Recife.

5.5 Ensaios realizados com o método AMBT

5.5.1 Ensaio padrão

Com a utilização das seis amostras propostas para o trabalho, foi realizado o método AMBT padrão segundo a ASTM C 1260 (cujo procedimento operacional já foi mencionado anteriormente de maneira sucinta). Para análise do procedimento operacional na íntegra, consultar diretamente a ASTM C 1260-05 a.

Basicamente foram confeccionadas três barras de argamassa de traço 1: 2,25; 0,47 utilizando a granulometria preconizada pela norma. O cimento utilizado foi um cimento "padrão" estipulado pela Comissão de Estudos que está desenvolvendo a normatização brasileira do método acelerado de barras de argamassa (AMBT). Este cimento atende aos requisitos prescritos pela norma ASTM C 1260.

Tabela 8. Teor de álcalis solúveis e totais do cimento padrão.

Ensaios	Métodos de Ensaio	Resultados % Massa
Óxido de Sódio Total – Na_2O	NBR NM 17/04	0,26
Óxido de Potássio Total – K_2O	NBR NM 17/04	0,90
Óxido de Sódio Solúvel - Na_2O	ASTM C 114/05	0,10
Óxido de Potássio Solúvel – K_2O	ASTM C 114/05	0,70
Equivalente Alcalino Total em Na_2O		0,85
Equivalente Alcalino Solúvel em Na_2O		0,56
Equivalente Alcalino em Na_2O [% Na_2O + (0,658 x % K_2O)]		

Tabela 9. Caracterização físico - mecânica do cimento padrão.

	Métodos de Ensaio	Resultados	Limites da NBR 5733/91
Expansibilidade em Autoclave (%)	ASTM C 151/05	0,10	<0,20

Após a tomada do comprimento efetivo das barras (distância entre pinos), três barras de argamassa com cada agregado foram moldadas (em formas de 2,5 x 2,5 x 28,5 cm) e curadas em câmara úmida a uma temperatura de 23 ± 2° C por 24 horas. Depois deste prazo, as barras de argamassa foram desformadas e colocadas em um recipiente de aço inox contendo água a 80° C onde permaneceram por mais 24 horas. A Figura 54 abaixo ilustra as barras de argamassa após serem desmoldadas.

Figura 54. **Foto das barras de argamassa utilizadas no método AMBT.**

Figura 55. Detalhe do recipiente de aço inox.

Figura 56. Detalhe das estufas utilizadas para armazenamento do recipiente de aço inox.

Após a cura em água a 80° C, as barras de argamassa foram removidas do recipiente para realização da leitura inicial. Com a leitura inicial realizada, as barras foram novamente imersas em outro recipiente de aço inox, contendo solução de soda (NaOH-1N) a 80° C. O recipiente foi então colocado em estufa ventilada, permanecendo dentro dela por 28 dias.

Figura 57. Recipiente de armazenamento e imersão das barras em soda.

Leituras diárias (na mesma hora do dia) foram realizadas durante os 28 dias em que as barras ficaram imersas em soda (exceto finais de semana).

Figura 58. Leitura de expansão das barras de argamassa através do relógio comparador.

5.5.2 Ensaios propostos

Estudo da variação do traço e da granulometria da argamassa

Como visto anteriormente, o método AMBT apresenta outros fatores que podem distorcer a resposta do ensaio, gerando distorções de comportamento laboratório/campo para um mesmo agregado, como o traço, a relação a/c e a granulometria do agregado utilizado no ensaio.

O traço da argamassa (1: 2,25; 0,47) é considerado muito pobre por alguns pesquisadores, principalmente para um ensaio onde uma argamassa é confeccionada para representar o concreto que será utilizado na obra. Segundo HELENE, dado o concreto mais comum que existe de traço 1: 2: 3; 0,5 (sendo respectivamente cimento, areia, brita e relação a/c) o seu respectivo traço de argamassa seria 1: 2: 0,5, ou seja, uma argamassa mais rica do que a preconizada pela norma ASTM C 1260.

A relação a/c de 0,47 é considerada baixa para a argamassa (quando comparada com a maioria dos concretos utilizados em obras correntes) tornando o material pouco poroso e conseqüentemente menos suscetível ao ataque alcalino nas primeiras idades. Já em idades mais avançadas, em caso de penetração dos álcalis, a baixa porosidade da matriz poderia ocasionar um menor espaço para a acomodação do produto da reação e a conseqüente formação de um quadro fissuratório maior do que em matrizes mais porosas.

Como para a realização do ensaio o agregado tem que ser moído, a classificação granulométrica do material torna-se um fator que pode variar a resposta do ensaio. Sabe-se que com a diminuição do tamanho, sua superfície específica é aumentada, e sendo assim, o agregado torna-se mais suscetível a desenvolver a RAA. No entanto, pesquisadores acreditam que na lavagem e britagem, minerais reativos podem ser perdidos, tornando o material diferente do que será utilizado na obra. Desta maneira, seria mais interessante utilizar um agregado com uma granulometria maior.

Partindo dos princípios citados anteriormente, um ensaio com a utilização de seis novos traços foi realizado, sendo dois traços (confeccionados com o granito de Embu e o quartzito de Ilha Solteira) mais ricos do que o preconizado pela norma (ASTM C 1260), dois traços (confeccionados com o granito de Embu e Quartzito de Ilha Solteira) com uma maior relação a/c do que o preconizado pela norma (ASTM C 1260) e dois traços (confeccionados com o granito de Recife) com granulometria superior e inferior a preconizada pela ASTM C 1260. A Tabela 10 mostra os traços utilizados.

Tabela 10. Traços utilizados no método AMBT modificado

Agregado	Variação	Traços	Cimento (g)	Agregado (g)	Água (g)
Granito - Embu	Traço	1: 1,88; 0,47	489	919	230
Granito - Embu	a/c	1: 2,25; 0,55	431	969	237
Granito - Recife	Granulometria	1: 2,25; 0,47	440	990	206,8
Granito - Recife	Granulometria	1: 2,25; 0,47	440	990	206,8
Quartzito – Ilha Solteira	Traço	1: 1,82; 0,47	498	906	234
Quartzito – Ilha Solteira	a/c	1: 2,25; 0,55	431	969	237

Para efeito de comparação, foram utilizados traços que tivessem sua parcela de argamassa equivalente aos prismas de concreto confeccionados com os mesmos agregados no método CPT.

5.6 Ensaios realizados com o método CPT

5.6.1 Ensaio padrão

O método CPT preconizado a ASTM C 1293 foi realizado com as seis amostras escolhidas para o estudo. De maneira sucinta, o procedimento operacional

já foi mencionado anteriormente. Para visualização do procedimento na íntegra, consultar diretamente a ASTM C 1293-06.

Para realização do ensaio, utilizou-se cimento padrão (o mesmo utilizado no ensaio AMBT) e areia IPT como agregado miúdo. Como procedimentos de dosagem, a norma (ASTM C 1293-06) preconiza como características necessárias do traço de concreto o consumo de cimento (420 kg/m^3), uma faixa de relação a/c (0,42 a 0,45 em massa), além da seguinte consideração: "o volume de agregado graúdo em relação ao concreto em estado compactado seco deve ser de 70 ± 2 %". O procedimento de dosagem foi realizado através do método ACI/ABCP.

Tabela 11. Porcentagem de agregados em função da granulometria.

Granulometria dos Agregados (mm)	Porcentagem (%)
12,5	33
9,5	33
4,8	33

Tabela 12. Traços (kg) para 1m^{3}de concreto de cada amostra.

1 m^3	c	a	p	água
1	420	793,15	1050	189
2	420	1016,36	1050	189
3	420	1005,53	1050	189
4	420	774,89	1050	189
5	420	774,89	1050	189
6	420	764,74	1050	189

Nota: c – cimento; a – areia; p – pedra

Tabela 13. Traço (kg) necessário para concretar três prismas (7,5 x 7,5 x 28,5 cm) de cada amostra.

0,006 (m^3)	c	a	p	água
1	2,52	4,76	6,3	1,134
2	2,52	6,10	6,3	1,134
3	2,52	6,03	6,3	1,134
4	2,52	4,65	6,3	1,134
5	2,52	4,65	6,3	1,134
6	2,52	4,59	6,3	1,134

Após a realização da dosagem, o comprimento efetivo das formas (distância entre pinos) foi medido. Este procedimento foi feito através da haste de medida e paquímetro.

Figura 59. Haste de medida do comprimento efetivo.

Figura 60. Colocação da haste entre pinos.

Figura 61. Medição do comprimento da haste (comprimento efetivo entre pinos).

Figura 62. Formas utilizadas no ensaio CPT

Com o comprimento efetivo, efetua-se a concretagem dos prismas. Foram concretados três prismas contendo cada agregado.

Figura 63. Separação do agregado miúdo para concretagem.

Figura 64. Agregado graúdo para concretagem (granito - Embu das Artes).

Foi adicionado NaOH à água de amassamento de modo que o equivalente alcalino do cimento fosse igual a 1,25% (valor preconizado pela norma). Para isto, efetuou-se o seguinte procedimento:

Para 6 litros de concreto (volume necessário para a concretagem de três corpos de prova), tem-se 2520 gramas de cimento. Possuindo o cimento padrão um equivalente alcalino (Na_2O_e) de 0,85%, tem-se:

$$2520 * 0,85\% = 21,42 \text{ g de álcalis}$$

Como para obter-se 1,25% de Na_2O_e tem-se que ter:

$$1,25\% * 2520 = 31,5 \text{ g de álcalis}$$

Torna-se necessária a adição de 10,08 gramas de Na_2O_e. Sendo o fator de correção de Na_2O_e para NaOH de 1,291, logo:

$$1,291 * 10,08 = 13,00 \text{ g de NaOH}$$

A moldagem foi executada à mão, pois não existia nenhuma betoneira que pudesse confeccionar tão pouco material (6 litros por amostra).

Os prismas foram adensados em mesa vibratória (tipo 1001-MVC, marca ASTECMA e freqüência de 60 Hz) em duas camadas, permanecendo sob a mesa 20 segundos no adensamento de cada camada.

Figura 65. Recipiente para confecção do concreto.

Após a moldagem, os corpos de prova permaneceram durante 24hs em câmara úmida. Depois deste período, foram desmoldados e a leitura inicial (primeira

medida do corpo de prova), foi tomada através da utilização de relógio comparador com precisão na casa do milésimo de milímetro.

Figura 66. Desforma do corpo de prova.

Figura 67. Prisma de concreto utilizado no CPT de dimensões 7,5 x 7,5 x 28,5 cm.

Figura 68. Leitura inicial do prisma de concreto em relógio comparador (precisão de milésimo de milímetro).

Após a desforma e a leitura inicial, os prismas foram armazenados em recipiente a 38° C (sendo encaixados em suportes). O recipiente de armazenamento continha uma película de água em seu fundo que permanecia com a distância de 1 cm dos prismas.

Figura 69. Suporte para encaixe dos corpos de prova.

Figura 70. Corpos de prova encaixados no suporte.

Figura 71. Recipiente de armazenamento em estufa controlada a 38°C.

Figura 72. Foto interna do recipiente de armazenamento contendo os corpos de prova.

Leituras de expansão subseqüentes foram feitas aos 7, 14 e 28 dias. A partir do primeiro mês, leituras quinzenais foram realizadas até os 6 meses. A partir desta data, optou-se pela realização de leituras mensais até 1 ano (360 dias). Antes de cada leitura, os corpos de prova foram retirados do recipiente de armazenamento e colocados em câmara úmida por um período de 16 ± 4 hs.

5.7 Ensaios realizados com o método ACPT

5.7.1 Ensaio padrão com a utilização de equipamento de banho-maria

A geometria dos prismas, o procedimento de dosagem, moldagem, desforma e cura são rigorosamente iguais ao método CPT, no entanto, o ambiente de armazenamento destes prismas se dá a 60° C, sendo o período de análise de três meses.

Como recipiente de armazenamento, foi desenvolvido um aparelho de banho-maria que possuía um sistema de resistência e termostato e, de maneira ininterrupta, mantinha a temperatura ambiente a 60°C ± 2° C.

Figura 73. Aparelho de banho-maria para realização do método ACPT.

Foram moldados corpos de prova com as seis amostras utilizadas tanto no método CPT, quanto no método AMBT, para futura comparação.

Figura 74. Foto dos prismas utilizados no método ACPT.

Figura 75. Foto da leitura inicial dos prismas.

Os 18 prismas foram armazenados durante um período de cinco meses, sendo o ensaio inicialmente preconizado para durar três meses.

Figura 76. Armazenamento dos prismas de concreto no recipiente de banho-maria.

Figura 77. Recipiente de armazenamento interno fechado.

Na tentativa de evitar muita perda de temperatura entre os recipientes e o meio (o que ocasionava um intenso trabalho da resistência e do termostato) a caixa d água externa foi coberta com isopor.

Figura 78. Caixa d água coberta com isopor.

Corpos de prova que obtiveram uma média de expansão aos 3 meses igual ou maior do que 0,04 %, foram considerados como contendo agregados reativos frente aos álcalis do cimento.

5.7.2 Ensaio padrão com a utilização de estufa ventilada

Para a confirmação dos resultados das amostras analisadas através do método ACPT com a utilização de equipamento de banho-maria, foram confeccionados mais 18 corpos de prova (três prismas com cada tipo de agregado), de modo que estes pudessem ser novamente avaliados agora em uma estufa ventilada, com ambiente “teoricamente” mais controlado.

Figura 79. Estufa utilizada no ensaio.

Adotou-se o mesmo procedimento operacional do ensaio feito com equipamento de banho-maria, no entanto, como recipiente de armazenamento dos corpos de prova dentro da estufa (assim como no método CPT) adotou-se um recipiente de polietileno.

Figura 80. Recipiente de polietileno utilizado para armazenar os corpos de prova dentro da estufa ventilada.

Figura 81. Prismas dentro do recipiente de Polietileno.

5.8 Ensaios realizados com o método ACPST

5.8.1 Método ACPST segundo LEE, LIU & WANG (2004)

Baseado no trabalho proposto por LEE, LIU & WANG (2004), decidiu-se realizar o ensaio ACPST utilizando dois tipos de agregados (o quartzito de Ilha Solteira e o basalto de Americana). Estes dois agregados foram escolhidos, pois quando testados pelo método ACPT e AMBT apresentaram resultados contraditórios.

Como a classificação desses agregados quando confeccionados em concreto ou argamassa foi contraditória, a confecção do ACPST proporciona o conhecimento se a granulometria, a geometria e a característica do material (concreto ou argamassa) alteram ou não o comportamento expansivo do agregado (já que exceto estes parâmetros, seu procedimento operacional é equivalente ao AMBT).

Outro parâmetro que pode ser avaliado é a sensibilidade do agregado em altas temperaturas, fato este que, segundo muitos estudiosos, inviabiliza ensaios de reatividade álcali-agregado a temperaturas próximas a 80°C.

Dois corpos de prova de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm foram confeccionados com o quartzito de Ilha Solteira e o basalto de Americana (mediante dosagem similar ao método CPT). Após a confecção, os prismas foram submetidos a um procedimento operacional similar ao método AMBT durante 28 dias.

5.9 Ensaios realizados com o método ABCPT

Com o intuito de confirmar a eficiência do método que está sendo proposto nesta dissertação, decidiu-se realizar o ensaio ABCPT utilizando cinco tipos de agregados (exceto o granito de Recife, por falta de material).

Foram confeccionados dois corpos de prova de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm com os cinco tipos de agregados (granito de Embu das Artes, basalto de Birigui, milonito de Recife, quartzito de Ilha solteira e basalto de Americana) mediante dosagem similar ao método CPT. Após a confecção, os prismas foram armazenados por 24 horas em câmara úmida, sendo depois deste período desformados e imersos em solução de NaOH-0,3125 N.

Os prismas permaneceram imersos em solução durante 28 dias. Leituras semanais foram realizadas.

Figura 82. Recipiente de armazenamento do ensaio ABCPT.

Figura 83. Prismas de concreto imersos em solução (ABCPT)

6 APRECIAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

6.1 Análise petrográfica

As tabelas abaixo mostram os resultados da análise petrográfica realizada com os seis agregados estudados.

Tabela 14. Características mineralógicas do granito – Embu das Artes.

Características Microscópicas		
Mineralogia	Principal	quartzo, feldspato (plagioclásio – microclásio), mica
	Subordinada	titanita, opacos, clorita, sericita e epidoto
	Reativa / Deletéria	quartzo com extinção ondulante, quartzo fino recristalizado
Estrutura		maciça
Textura		granoblástica
Granulação		média
Alteração		pouco alterada com feldspatos sericitizados
Deformação do Agregado		pouco deformado
Tipo de Rocha		metamórfica
Classificação Petrográfica		granito Gnaisse
Reatividade Potencial		**potencialmente reativo**

Obs. Quartzo mirmequitico, plagioclásio deformado são sinais claros de deformação.

Tabela 15. Características mineralógicas do basalto – Americana.

Características Microscópicas		
Mineralogia	Principal	plagioclásio e Piroxênio
	Subordinada	opacos, material intersticial fibroso, apatita, carbonato e clorita
	Reativa / Deletéria	material intersticial esverdeado e fibroso (clorofeita vidro devitrificado)
Estrutura		maciça
Textura		intersertal
Granulação		fina
Alteração		não alterado
Deformação do Agregado		não deformado
Tipo de Rocha		ígnea
Classificação Petrográfica		basalto
Reatividade Potencial		**potencialmente reativo**

Tabela 16. Características mineralógicas do basalto – Birigui.

Características Microscópicas		
Mineralogia	Principal	plagioclásio e Piroxênio
	Subordinada	olivina e opacos.
	Reativa / Deletéria	material intersticial microcristalino, esverdeado fibro radiado (clorofeita e vidro devitrificado)
Estrutura		maciça
Textura		intersertal
Granulação		muito fina
Alteração		não alterado
Deformação do Agregado		não deformado
Tipo de Rocha		ígnea
Classificação Petrográfica		basalto
Reatividade Potencial		**potencialmente reativo**

Tabela 17. Características mineralógicas do milonito – Recife.

Características Microscópicas		
Mineralogia	Principal	quartzo, feldspato, mica.
	Subordinada	clorita, epidoto, zircão, opacos.
	Reativa / Deletéria	quartzo microcristalino, quartzo recristalizado fino, raros quartzo com extinção ondulante
Estrutura		maciça a pouco foliada
Textura		milonitica
Granulação		média fina
Alteração		pouco alterado
Deformação do Agregado		deformado
Tipo de Rocha		metamórfica
Classificação Petrográfica		milonito
Reatividade Potencial		**reativo**

Tabela 18. Características mineralógicas do granito – Recife.

Características Microscópicas		
Mineralogia	Principal	quartzo, feldspato (plagioclásio e microclínio), mica (biotita)
	Subordinada	opacos, muscovita e sericita
	Reativa / Deletéria	quartzo com extinção ondulante, quartzo fino recristalizado
Estrutura		maciça
Textura		granoblástica
Granulação		média
Alteração		pouco alterado
Deformação do Agregado		pouco deformado
Tipo de Rocha		metamórfica
Classificação Petrográfica		granito gnaisse
Reatividade Potencial		**potencialmente reativo**

Obs. Quartzo mirmequítico e estrutura em flame.

Tabela 19. Características mineralógicas do quartzito – Ilha Solteira.

Características Microscópicas		
Mineralogia	Principal	quartzo e fragmentos de rocha
	Reativa / Deletéria	quartzo micro cristalino (quartzito)
Grau de arredondamento		arredondado
Esfericidade		média a baixa
Alteração		pouco alterada
Deformação do Agregado		não deformado
Tipo de Rocha		sedimentar
Classificação Petrográfica		seixo rolado
Reatividade Potencial		**potencialmente reativo**

Fazendo uma tabela resumo com a reatividade potencial dos agregados tem-se:

Tabela 20. Tabela resumo da análise petrográfica para os agregados pesquisados.

Agregado	Reatividade Potencial
Granito - Embu das Artes	Potencialmente Reativo
Basalto - Americana	Potencialmente Reativo
Basalto - Birigui	Potencialmente Reativo
Milonito - Recife	Reativo
Granito Gnaisse II - Recife	Potencialmente Reativo
Quartzito –Ilha Solteira	Potencialmente Reativo

6.2 Resultados do método AMBT

6.2.1 Resultado das amostras com o emprego do método padrão

Após a confecção do ensaio, a expansão das barras de argamassa aos 14, 21 e 28 dias pode ser vista na Tabela 21.

Tabela 21. Porcentagem de expansão das barras de argamassa aos 14 e 28 dias em solução agressiva.

Idade em solução (dias)	Granito (Embu)	Basalto (Americana)	Basalto (Birigui)	Milonito (Recife)	Quartzito (Ilha Solteira)	Granito (Recife)
14 dias	0,05	0,11	0,02	0,22	0,07	0,05
21 dias	0,08	0,22	0,04	0,32	0,13	0,07
28 dias	0,10	0,28	0,04	0,39	0,20	0,08

Em termos gráficos, a expansão ao longo do tempo através do ensaio AMBT resulta em:

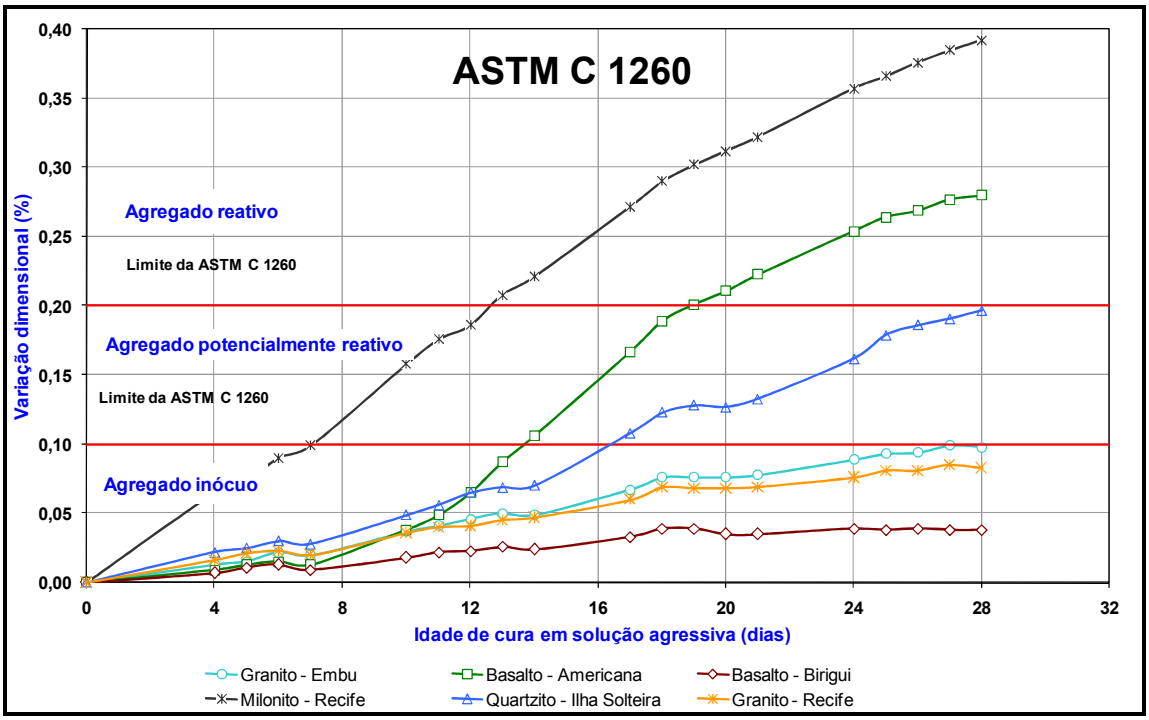

Figura 84. Variação da média das expansões ao longo do tempo no método AMBT.

Pode-se perceber, através dos resultados do gráfico que:

- **Granito - Embu das Artes:** É considerado inócuo segundo a ASTM C 1260, assim como a CSA.A23-25A e a Norma Australiana, pois apresenta o resultado de 0,05% de expansão aos 14 dias. No entanto, pode-se verificar que a curva de expansão das barras de argamassa é sempre

crescente, indicando alguma reatividade, muito embora em valores menores do que o proposto por todas as normas utilizadas. Caso a análise seja feita aos 28 dias, (como propõe o Comitê brasileiro do CB-18/ABNT) e, considerando o limite de 0,19 %, este agregado ainda assim seria classificado como inócuo.

- **Basalto - Americana:** É considerado como potencialmente reativo aos 14 dias segundo a ASTM C 1260, devendo então ser levado até os 28 dias. Aos 28 dias apresenta expansão de 0,28 %. Seria da mesma maneira considerado reativo pela norma brasileira. Segundo a norma australiana pode ser considerado como reativo aos 21 dias. No entanto, seria considerado inócuo através da CSA.A23-25A.
- **Basalto - Birigui:** Considerado inócuo por todas as normas.
- **Milonito - Recife:** Considerado reativo por todas as normas.
- **Quartzito - Ilha Solteira:** Aos 14 dias, considerado inócuo segundo a ASTM C 1260, assim como pela CSA.A23-25A. Aos 21 dias, seria considerado reativo segundo a norma australiana. Aos 28 dias, caso o agregado continuasse a ser analisado, este seria considerado como reativo segundo a proposição feita pelo CB-18/ABNT, demonstrando um grande crescimento entre 14 e 28 dias de imersão em soda.
- **Granito – Recife:** Considerado inócuo por todas as normas.

Uma tabela resumo pode ser feita contendo a reatividade dos agregados em relação ao período de análise.

Tabela 22. Resumo da classificação dos agregados através do ensaio AMBT preconizado pela ASTM C 1260.

Agregado	14 dias de imersão em NaOH – 1N
Granito – Embu das Artes	Inócuo
Basalto – Americana	Potencialmente reativo
Basalto – Birigui	Inócuo
Milonito – Recife	Reativo
Granito – Recife	Inócuo
Quartzito – Ilha Solteira	Inócuo

Analisando os resultados através das três principais normas vigentes e, considerando a proposição da comissão brasileira CB-18/ABNT tem-se:

Tabela 23. Reatividade dos agregados segundo as principais normas utilizadas.

Agregados	ASTM C 1260	CSA.A23-25A	CB-18	Norma Australiana
Granito – Embu das Artes	Inócuo	Inócuo	Inócuo	Inócuo
Basalto – Americana	Potencialmente reativo	Inócuo	Reativo	Reativo
Basalto – Birigui	Inócuo	Inócuo	Inócuo	Inócuo
Milonito – Recife	Reativo	Reativo	Reativo	Reativo
Granito – Recife	Inócuo	Inócuo	Inócuo	Inócuo
Quartzito – Ilha Solteira	Inócuo	Inócuo	Reativo	Reativo

6.2.2 Variação do traço da argamassa

As figuras abaixo demonstram a expansão média ao longo do tempo das barras de argamassa no estudo da influência das características da argamassa na expansão.

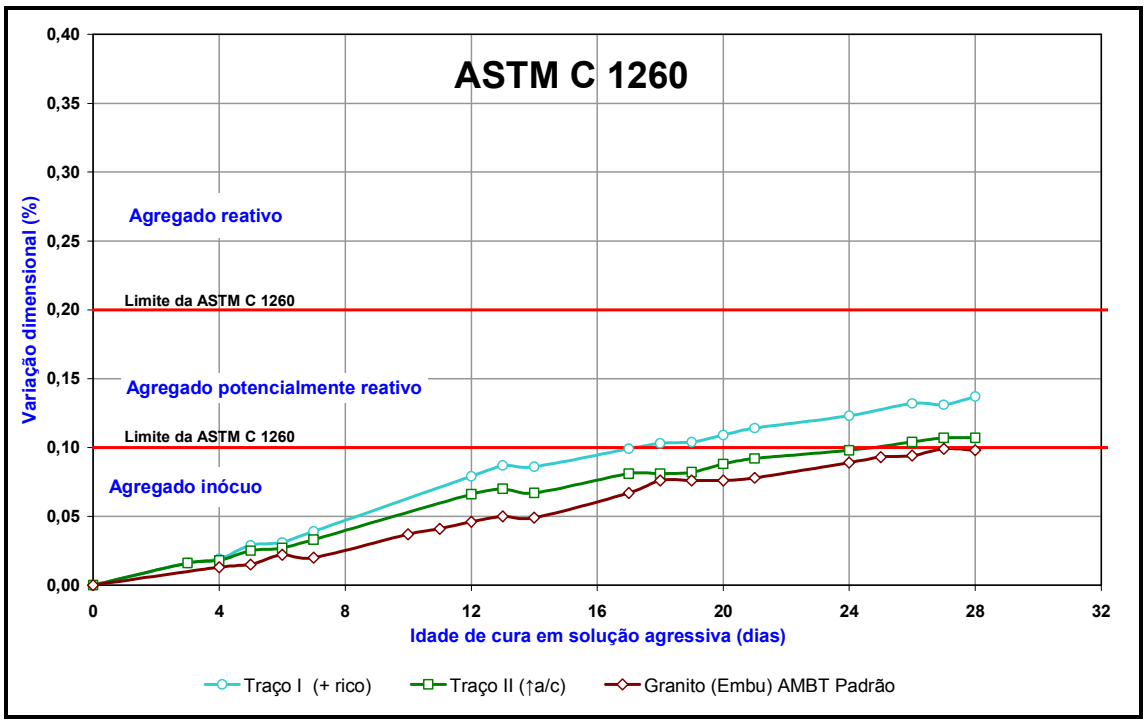

Figura 85. Variação das expansões ao longo do tempo no método AMBT. Estudo da variação do traço e sua influência na expansão com o agregado granito de Embu.

Pode-se perceber através do gráfico que:

- Quanto mais rico o traço, maior a expansão média das barras de argamassa em todas as idades. Este resultado já era esperado e através dele fica muito clara a necessidade da utilização de um traço em argamassa que represente o concreto que será utilizado em campo. Nesse caso particular, a utilização de um traço com teor de argamassa

equivalente aos prismas de concreto (moldados para o CPT) ainda não influenciaria a classificação do agregado granito de Embu aos 14 dias (segundo a ASTM C 1260).

- Quando uma maior relação a/c é utilizada (0,55 ao invés de 0,47), a expansão média das barras de argamassa é ligeiramente maior nas primeiras idades, não apresentando praticamente nenhuma diferença aos 28 dias. Aparentemente a relação a/c não é um fator de alta influência no ensaio.

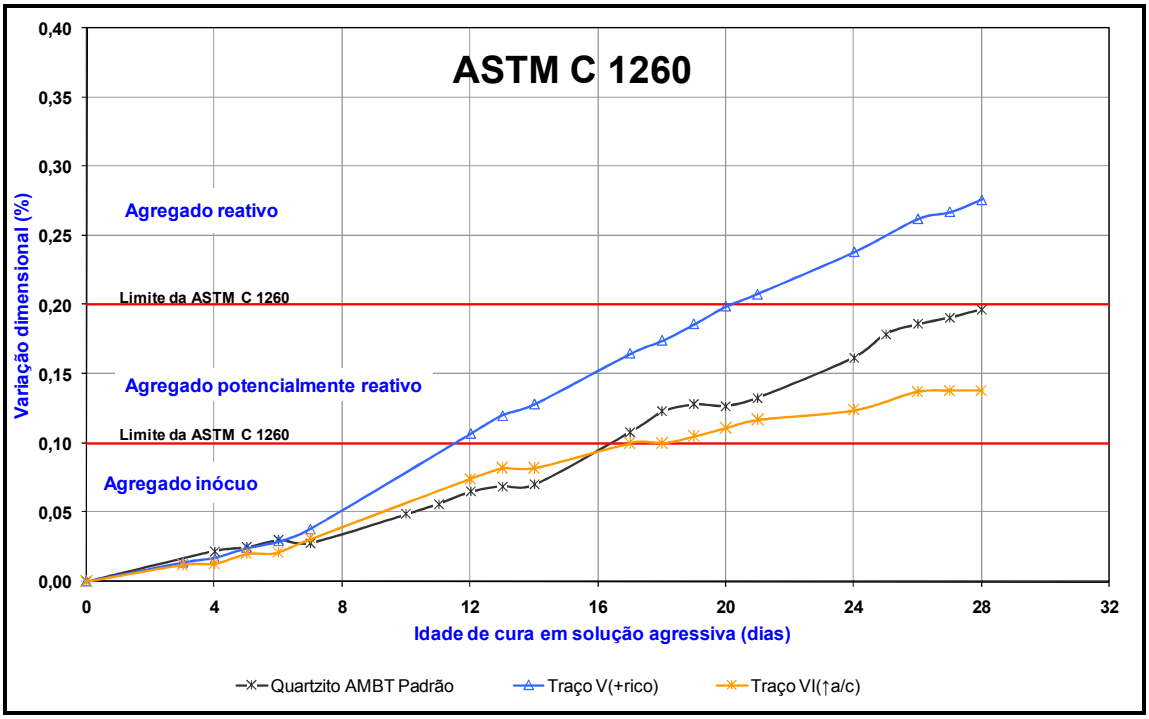

Figura 86. Variação das expansões ao longo do tempo no método AMBT. Estudo da variação do traço e sua influência na expansão com o agregado quartzito de Ilha Solteira.

Pode-se perceber através do gráfico que:

- Novamente quanto mais rico o traço, maior a expansão média das barras de argamassa em todas as idades. Nesse caso particular, a utilização de um traço com teor de argamassa equivalente aos prismas de concreto influenciaria a classificação do agregado quartzito de Ilha Solteira aos 14 dias e aos 28 dias, sendo classificado como potencialmente reativo pela ASTM C 1260.
- Quando uma maior relação a/c é utilizada (0,55 ao invés de 0,47), a expansão média das barras de argamassa é maior nas primeiras idades, sendo menor aos 28 dias. Este fenômeno pode ser explicado, pois nas

primeiras idades a maior porosidade da matriz permite um maior ingresso de íons alcalinos desencadeando mais rapidamente a reação. Já em idades mais avançadas, uma maior porosidade acomodará melhor os produtos de reação formados, gerando uma menor expansão. Novamente, aparentemente a relação a/c não é um fator de alta influência no ensaio.

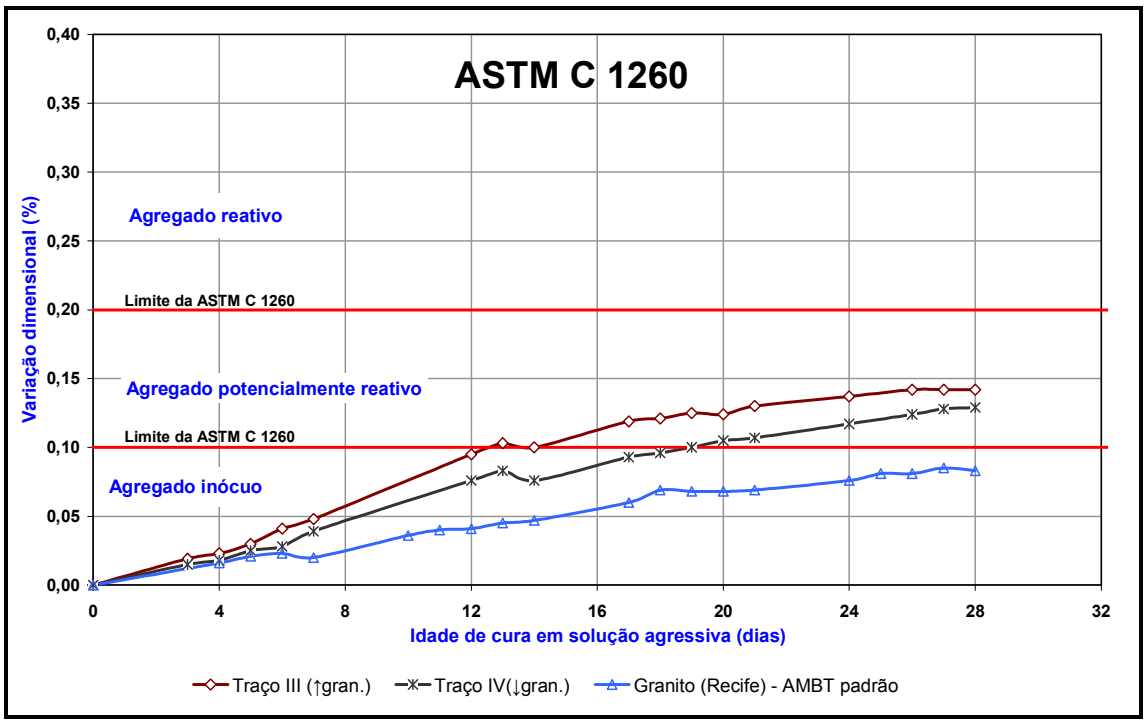

Figura 87. Variação das expansões ao longo do tempo no método AMBT. Estudo da variação da granulometria e sua influência na expansão com o agregado granito de Recife.

Pode-se perceber através do gráfico que:

- Quando uma granulometria maior do que a preconizada pela norma ASTM C 1260 é utilizada, maior a expansão das barras de argamassa em todas as idades. Este fenômeno pode ser explicado devido a uma possível perda de material quando do processo de britagem, fazendo com que um material com granulometria inferior tenha menos material reativo.
- Quando uma granulometria menor do que a preconizada pela norma ASTM C 1260 é utilizada, maior a expansão das barras de argamassa em todas as idades. Este fenômeno pode ser explicado devido ao aumento da superfície específica do agregado. Quando seus resultados são comparados com a barra de argamassa com granulometria superior a

preconizada pela ASTM C 1260, tem-se uma expansão menor em todas as idades. Possivelmente esse fenômeno ocorre devido à perda de material quando da britagem.

6.3 Resultados do método CPT

6.3.1 Resultado das amostras

A expansão ao longo do tempo através do ensaio CPT está apresentada na Figura 88.

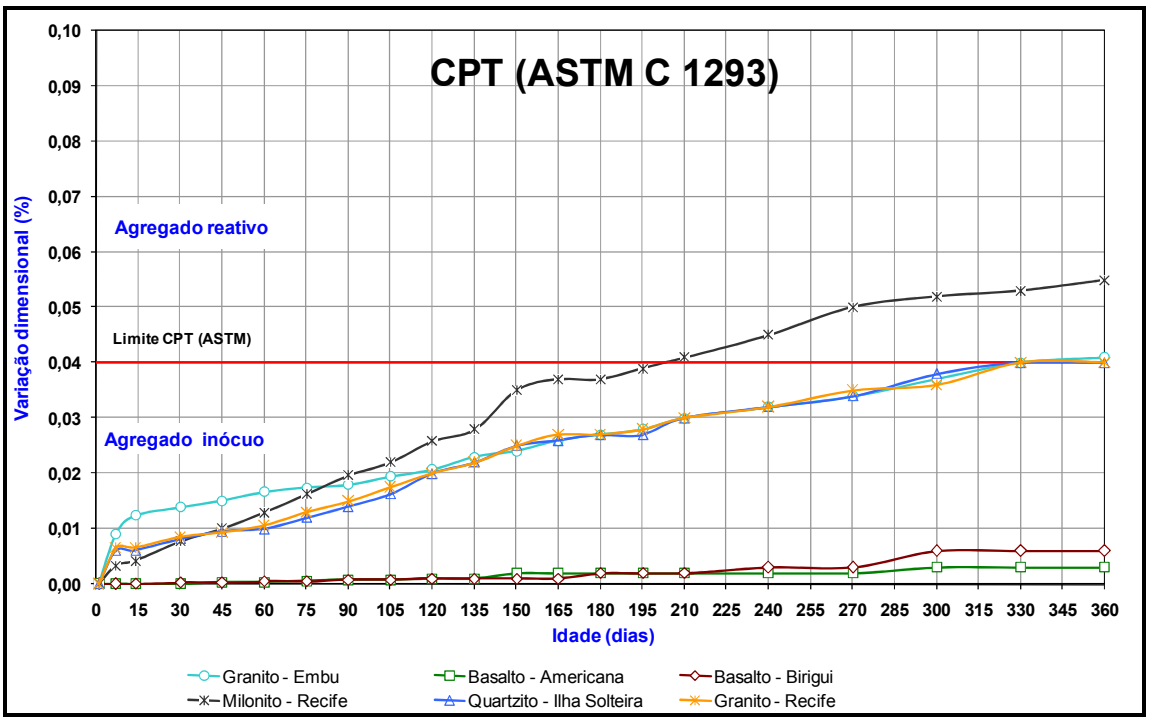

Figura 88. Curvas de expansão dos agregados estudados pelo método CPT.

Pode-se perceber através dos resultados do gráfico que:

- **Granito - Embu das Artes:** É considerado como reativo, apresentando uma expansão de 0,04% a 1 ano.
- **Basalto - Americana:** É considerado como inócuo a 1 ano.
- **Basalto - Birigui:** É considerado como inócuo a 1 ano.
- **Milonito - Recife:** É considerado como reativo a 1 ano.
- **Quartzito - Ilha Solteira:** É considerado como reativo, apresentando uma expansão de 0,04% a 1 ano.

- **Granito - Recife:** É considerado como reativo, apresentando uma expansão de 0,04% a 1 ano.

Uma tabela resumo pode ser feita contendo a reatividade dos agregados em relação ao período de análise (1 ano).

Tabela 24. Resumo da classificação dos agregados através do ensaio CPT preconizado pela ASTM C 1293.

Agregado	Idade (dias)
Granito – Embu das Artes	Reativo
Basalto – Americana	Inócuo
Basalto – Birigui	Inócuo
Milonito – Recife	Reativo
Granito – Recife	Reativo
Quartzito – Ilha Solteira	Reativo

6.4 Resultados do método ACPT

6.4.1 Resultado das amostras a 60° C com a utilização de equipamento de banho-maria.

A expansão ao longo do tempo através do ensaio ACPT está apresentada na Figura 89.

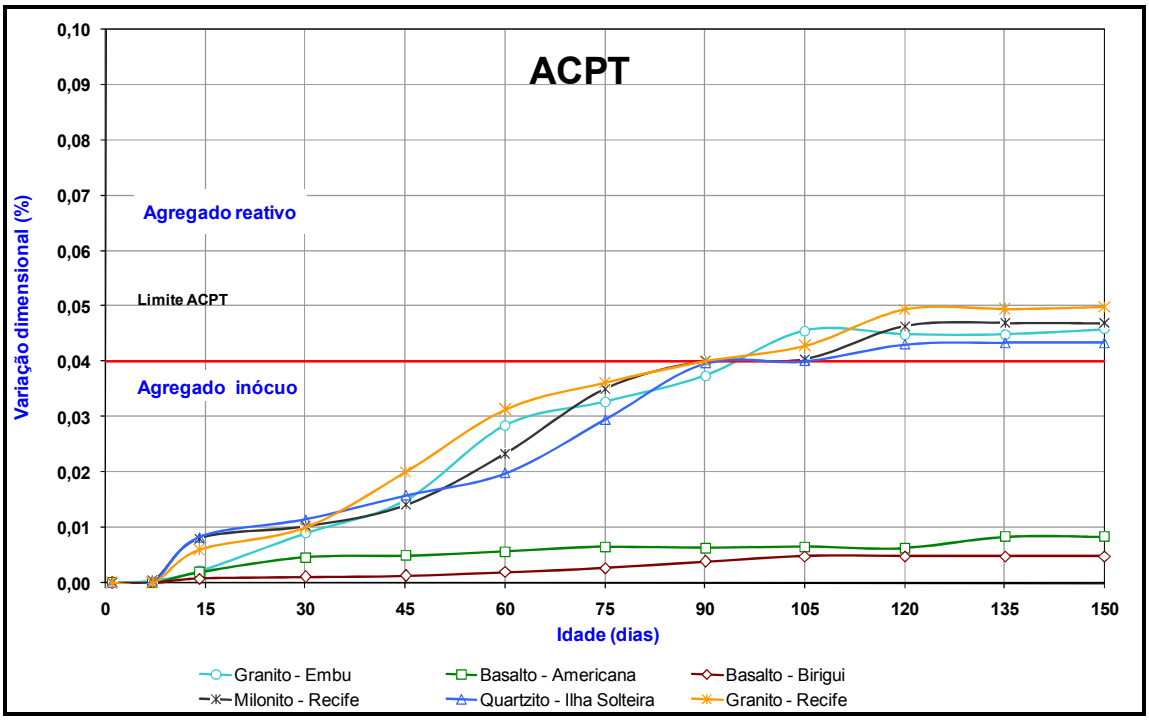

Figura 89. Expansões obtidas ao longo do tempo pelo método ACPT (banho-maria).

Através do gráfico, aos 90 dias, pode-se observar que:

- **Granito - Embu das Artes:** Considerado como agregado inócuo aos 90 dias. No entanto, este agregado apresentou expansão no limiar da classificação (0,038%). Portanto, devido à existente imprecisão de leitura, o comportamento deste agregado pode ser considerado como reativo.
- **Basaltos - Americana:** Considerado como agregado de comportamento inócuo.
- **Basalto - Birigui:** Considerado como agregado de comportamento inócuo.
- **Milonito - Recife:** Considerado como agregado de comportamento reativo.
- **Granito - Recife:** Considerado como agregado de comportamento reativo.
- **Quartzito - Ilha Solteira:** Considerado como agregado de comportamento reativo.

Pode-se perceber através do ensaio que o período de 90 dias para a classificação de agregados, tornou a expansão de muitos deles (principalmente os lentamente reativos) marginais ao limite de classificação. Portanto optou-se por prosseguir o ensaio até 5 meses.

Como é possível notar, a partir dos 4 meses, a taxa de expansão dos agregados torna-se praticamente nula, sendo uma boa data para análise e classificação de agregados mediante o ACPT. A Tabela 25 mostra o resumo da classificação dos agregados segundo o método ACPT.

Tabela 25. Resumo da classificação dos agregados através do ensaio ACPT.

Agregado	Expansão aos 90 dias	Expansão aos 120 dias
Granito – Embu das Artes	Inócuo (limiar Reativo)	Reativo
Basalto – Americana	Inócuo	Inócuo
Basalto – Birigui	Inócuo	Inócuo
Milonito – Recife	Reativo	Reativo
Granito – Recife	Reativo	Reativo
Quartzito – Ilha Solteira	Reativo	Reativo

6.4.2 Resultado das amostras à 60°C com a utilização de estufa ventilada

A expansão ao longo do tempo através do ensaio ACPT está apresentada na Figura 90.

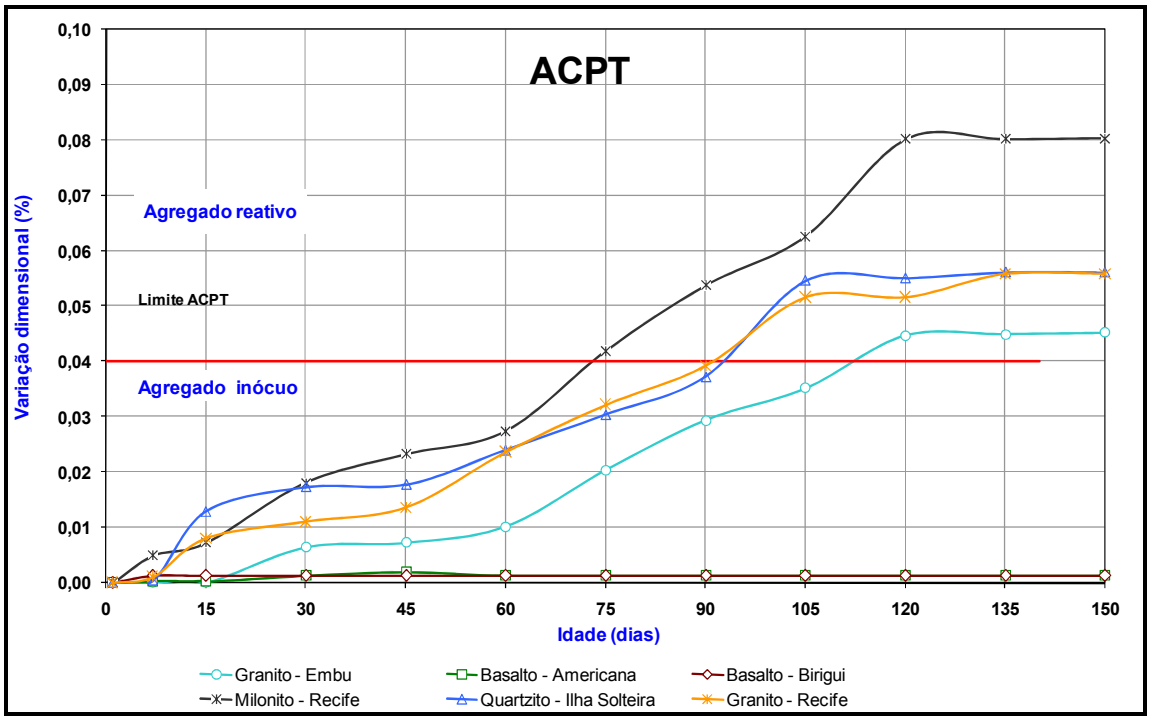

Figura 90. Expansões obtidas ao longo do tempo pelo método ACPT (estufa ventilada).

Pode-se perceber através do gráfico que:

- **Granito - Embu das Artes:** Aos 3 meses, ou seja, 90 dias, a expansão média dos prismas com este agregado encontra-se com aproximadamente 0,03% de expansão, sendo considerado inócuo. No entanto, este agregado apresenta uma tendência crescente de expansão, estando aos 4 meses (120 dias) com uma expansão acima de 0,04% (podendo ser considerado reativo nesta data).
- **Basalto - Americana:** Comportamento inócuo.
- **Basalto - Birigui:** Comportamento Inócuo.
- **Milonito - Recife:** Comportamento reativo.
- **Quartzito - Ilha Solteira:** Aos 90 dias, este agregado se apresenta com 0,037% de expansão, ou seja, está no limiar da classificação, devendo a favor da segurança ser classificado como reativo. Aos 4 meses, apresenta expansão ainda maior (superior a 0,05%).
- **Granito - Recife:** Aos 90 dias, este agregado se apresenta com 0,04% de expansão, sendo considerado reativo.

Pode-se perceber (assim como no equipamento de banho-maria) que os prismas de concreto com comportamento expansivo, apresentam-no até os 120 dias (4 meses), apresentando a partir daí uma taxa de expansão praticamente nula.

Parece, portanto, que esta data (120 dias) é bastante interessante quando da classificação de agregados através do ACPT. A tabela resumo abaixo apresenta a classificação dos agregados.

Tabela 26. Resumo das expansões dos prismas de concreto através do ACPT em estufa ventilada.

Agregado	Expansão aos 90 dias	Expansão aos 120 dias
Granito – Embu das Artes	Inócuo	Reativo
Basalto – Americana	Inócuo	Inócuo
Basalto – Birigui	Inócuo	Inócuo
Milonito – Recife	Reativo	Reativo
Granito – Recife	Reativo	Reativo
Quartzito – Ilha Solteira	Reativo	Reativo

6.5 Resultados do método ACPST

A expansão ao longo do tempo através do ensaio ACPST está apresentada na figura a seguir:

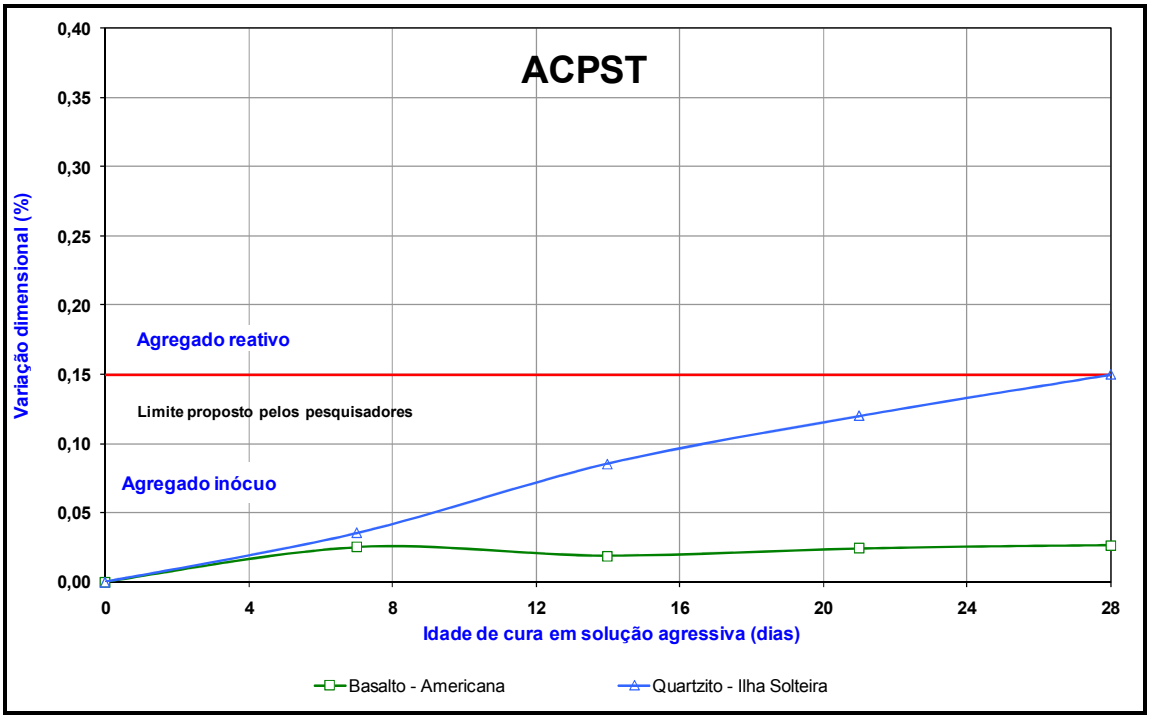

Figura 91. Expansões através do tempo do Método ACPST.

Pode-se perceber, através dos resultados do gráfico que:

- **Basalto - Americana:** É considerado como inócuo durante todo o período de análise.

- **Quartzito - Ilha Solteira:** Considerado como reativo quando analisado aos 28 dias.

Pode-se perceber que muito embora os agregados e o procedimento operacional sejam os mesmos, existe distorção na classificação de agregados quando o método AMBT é comparado ao ACPST. Essa distorção indica para a diferença de comportamento existente de agregados quando analisados em concretos ou argamassas.

Tabelando os resultados em função das três principais normas vigentes tem-se:

Tabela 27. Reatividade dos agregados segundo a ACPST.

Agregados	ACPST
Basalto – Americana	Inócuo
Quartzito –Ilha Solteira	Reativo

Para que o ensaio ACPST posse ser considerado realmente eficiente, torna-se necessária uma maior quantidade de ensaios, muito embora, este tenha se mostrado com bastante potencial.

6.6 Resultados do método ABCPT

Traduzindo os resultados graficamente tem-se:

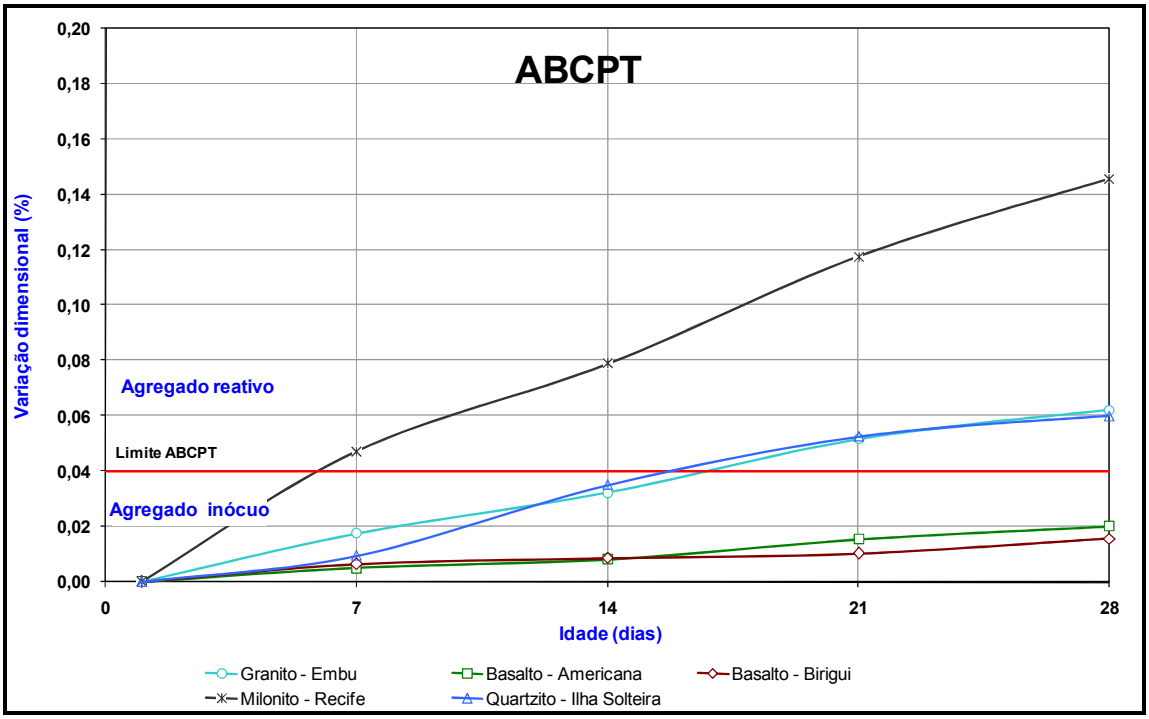

Figura 92. Expansões através do tempo do método ABCPT.

Pode-se perceber, através dos resultados do gráfico que:

- **Granito – Embu das Artes:** Considerado como reativo quando analisado aos 28 dias.
- **Basalto - Americana:** É considerado como inócuo durante todo o período de análise.
- **Basalto – Birigui:** É considerado como inócuo durante todo o período de análise.
- **Milonito – Recife:** É considerado como reativo aos 28 dias de ensaio.
- **Quartzito – Ilha Solteira:** Considerado como reativo quando analisado aos 28 dias.

É possível visualizar que aos 21 dias já seria possível a análise dos agregados estudados mediante este método. No entanto, levar o ensaio até aos 28 dias (do ponto de vista de segurança) torna-se mais confiável.

Tabela 28. Reatividade dos agregados segundo a ACPST.

Agregados	ABCPT
Granito – Embu	Reativo
Basalto – Americana	Inócuo
Basalto – Birigui	Inócuo
Milonito - Recife	Reativo
Quartzito – Ilha Solteira	Reativo

Para comprovação do método ABCPT, é necessária uma maior quantidade de ensaios, muito embora, assim como o ACPST, este tenha demonstrado bastante potencial.

6.7 Análise de risco: cálculo do índice IRP

O cálculo do IPR pode ser feito em agregados granitóides. No estudo em questão, portanto, é viável a análise dos granitos de Embu e Recife, assim como no milonito de Recife.

Como foi comentado anteriormente, para:

- IRP > 20: Agregado Reativo.
- IRP 12 - 20: Agregado Potencialmente Reativo.
- IRP ≤ 12: Agregado Inócuo.

Tabela 29. IPR – granito de Embu das Artes.

Parâmetros (A)	Pontuação (0 a 3 pontos)	
ASTM C 1260 (14 dias)	0,049	0
ASTM C 1260 (28 dias)	0,098	0
Ângulo de Extinção ondulante	27	1
% de quartzo microgranular	<5%	1
Granulação da matriz	> 1mm	0
Microfissuramento	fraco	0
Teor de álcalis solúveis do cimento (%)	>0,4	3
Tipo de Obra (B)	Hidráulica	3
Conds. Ambientais (C)	Quente/úmido	3
Índice de Reatividade Potencial (IRP)	A*(B+C) =	30 (Reativo)

Tabela 30. IPR – granito de Recife.

Parâmetros (A)	Pontuação (0 a 3 pontos)	
ASTM C 1260 (14 dias)	0,047	0
ASTM C 1260 (28 dias)	0,083	0
Ângulo de Extinção ondulante	20	1
% de quartzo microgranular	<5%	1
Granulação da matriz	>1 mm	0
Microfissuramento	fraco	0
Teor de álcalis solúveis do cimento (%)	>0,4%	3
Tipo de Obra (B)	Hidráulica	3
Conds. Ambientais (C)	Quente/úmido	3
Índice de Reatividade Potencial (IRP)	A*(B+C) =	30 (Reativo)

Tabela 31. IPR – milonito de Recife.

Parâmetros (A)	Pontuação	
ASTM C 1260 (14 dias)	0,221	3
ASTM C 1260 (28 dias)	0,392	3
Ângulo de Extinção ondulante	20	1
% de quartzo microgranular	>15	3
Granulação da matriz	<20	2
Microfissuramento	moderado	1
Teor de álcalis solúveis do cimento (%)	>0,4%	3
Tipo de Obra (B)	Hidráulica	3
Conds. Ambientais (C)	Quente/úmido	3
Índice de Reatividade Potencial (IRP)	A*(B+C) =	96 (Reativo)

Como pode-se verificar, em maior ou menor grau, todos os agregados estudados, desde que em ambientes propícios, podem desenvolver a RAA.

Fica claro (através do estudo do IRP, e conseqüentemente através da análise de risco que este índice proporciona), que a RAA é um fenômeno altamente complexo e dependente de diversos fatores, e não simplesmente da reatividade do agregado.

Logo, entender o contexto de aplicação de um concreto é altamente recomendável e necessário para que decisões possam ser tomadas.

6.8 Classificação geral dos agregados

A Tabela 32 apresenta a classificação geral dos agregados estudados.

Tabela 32. Classificação geral dos agregados

Ensaio	Granito – Embu das Artes	Basalto - Americana	Basalto - Birigui	Milonito - Recife	Quartzito – Ilha Solteira	Granito - Recife
AP	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo	Reativo	Potencialmente Reativo	Potencialmente Reativo
AMBT (ASTM C 1260)	Inócuo	Reativo	Inócuo	Reativo	Inócuo	Inócuo
CPT (ASTM C 1293)	Reativo	Inócuo	Inócuo	Reativo	Reativo	Reativo
ACPT (BM -120 dias)	Reativo	Inócuo	Inócuo	Reativo	Reativo	Reativo
ACPT (EV-120 dias)	Reativo	Inócuo	Inócuo	Reativo	Reativo	Reativo
ACPST (28 dias)	-	Inócuo	-	-	Reativo	-
ABCPT (28 dias)	Reativo	Inócuo	Inócuo	Reativo	Reativo	Reativo
Campo	-	-	-	Reativo	Reativo	-

7 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE MÉTODOS

7.1 Correlação entre métodos

Para a realização de análises comparativas entre métodos, foi proposto um gráfico de quatro quadrantes (onde o eixo das abscissas representa um primeiro método, e o eixo das ordenadas representa um segundo método). O primeiro e terceiro quadrantes são regiões de discórdia de classificação de agregados mediante dois métodos, ou seja, caso um agregado se encontre nestas regiões, significa que os dois ensaios que o testaram não o classificam da mesma maneira. Caso o agregado permaneça no segundo ou no quarto quadrante, existe boa correlação entre dois métodos analisados, ou seja, o agregado foi classificado equivalentemente mediante os dois ensaios.

Com o intuito de verificar a correlação existente entre todos os métodos de laboratório utilizados na pesquisa, foram realizadas as seguintes análises comparativas:

7.1.1 Influência do tipo de equipamento: ACPT a 60° C (banho-maria) X ACPT a 60°C (estufa ventilada)

Fazendo uma análise comparativa entre ensaios ACPT (aos 90 e 120 dias) tem-se:

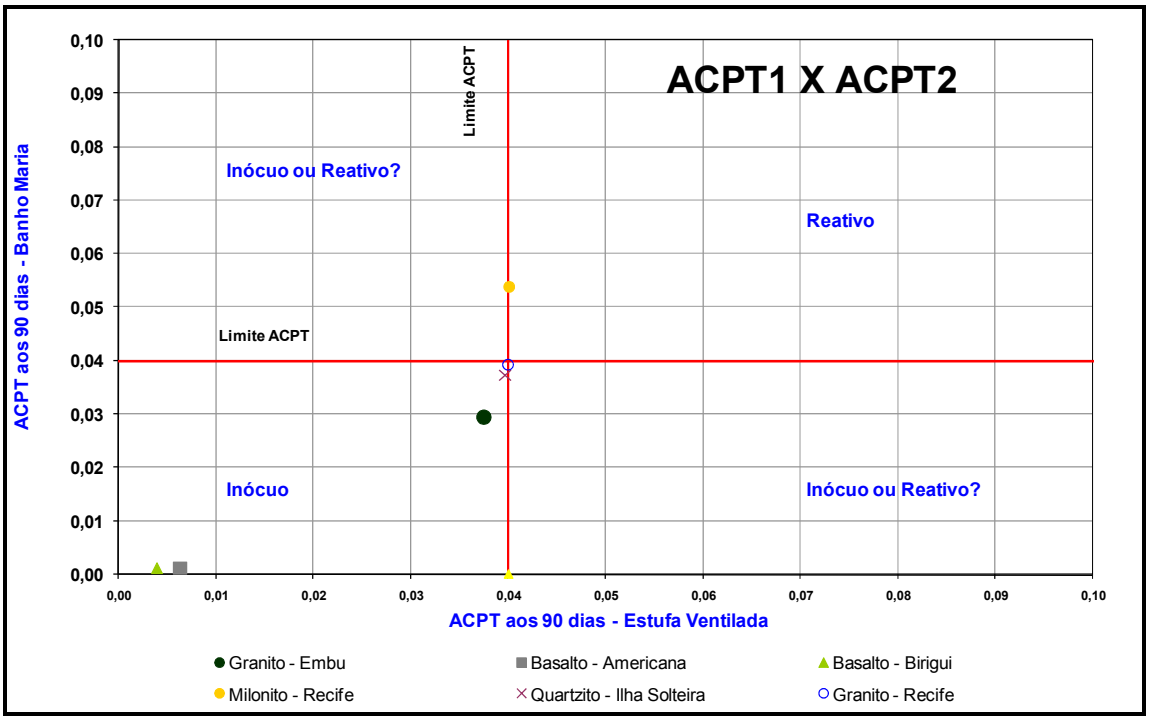

Figura 93. Análise comparativa aos 90 dias entre ensaios ACPT realizados em equipamento de estufa ventilada e banho-maria.

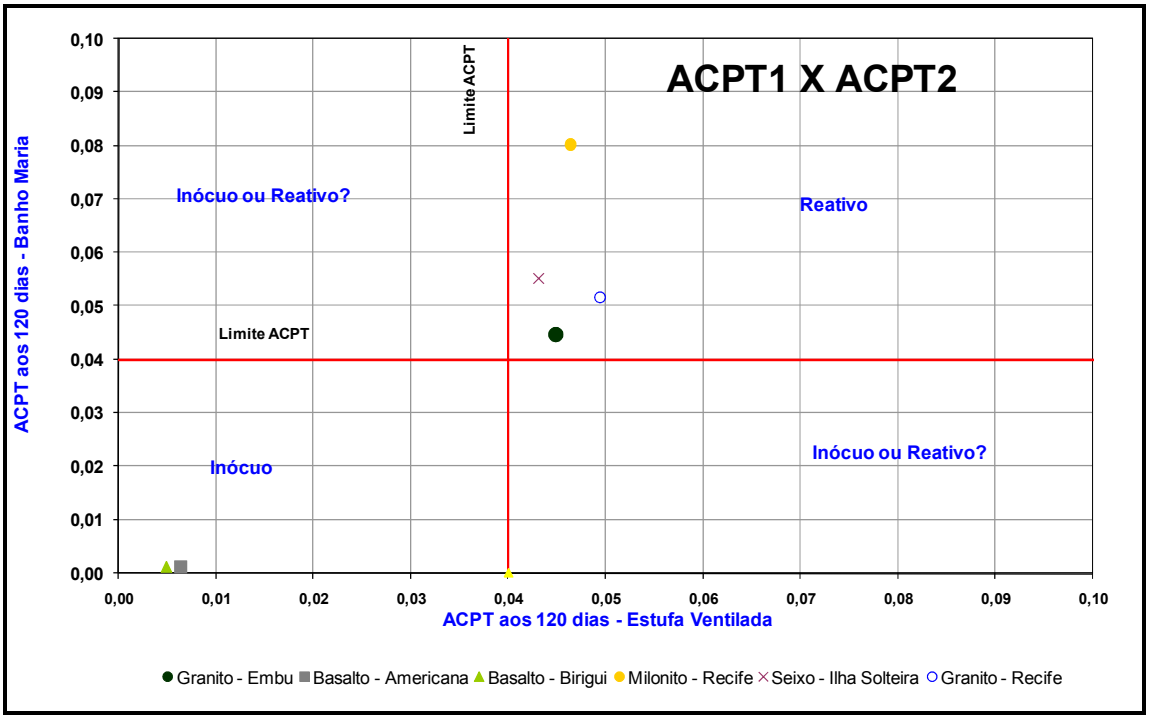

Figura 94. Análise comparativa aos 120 dias entre ensaios ACPT realizados em equipamento de estufa ventilada e banho-maria.

Pode-se perceber através dos gráficos acima que todos os agregados sem exceção seriam classificados equivalentemente em ambas as idades (90 e 120 dias), ou seja, muito embora os agregados quando analisados em equipamento

diferentes não tenham exatamente a mesma média de expansões, ambos os equipamentos podem ser considerados confiáveis na avaliação de reações RAA em prismas de concreto.

Considera-se mais confiável a análise através do método ACPT aos 4 meses de ensaio, pois aos 3 meses, agregados lentamente reativos estarão marginais ao limite de classificação proposto (0,04%).

Aos 5 meses, quando foi realizada a última leitura nos corpos de prova em ambos os equipamentos, os corpos de prova ensaiados na estufa ventilada demonstravam expansões maiores dos que os ensaiados em banho-maria.

Como a correlação entre os equipamentos foi muito boa e considerando que o equipamento de estufa ventilada tem um ambiente mais controlado para o ensaio, optou-se pela escolha do ACPT realizado em estufa para as demais correlações com outros métodos.

7.1.2 CPT X ACPT (estufa ventilada)

Fazendo uma análise comparativa entre os ensaios CPT (1 ano) e ACPT (90 dias) tem-se:

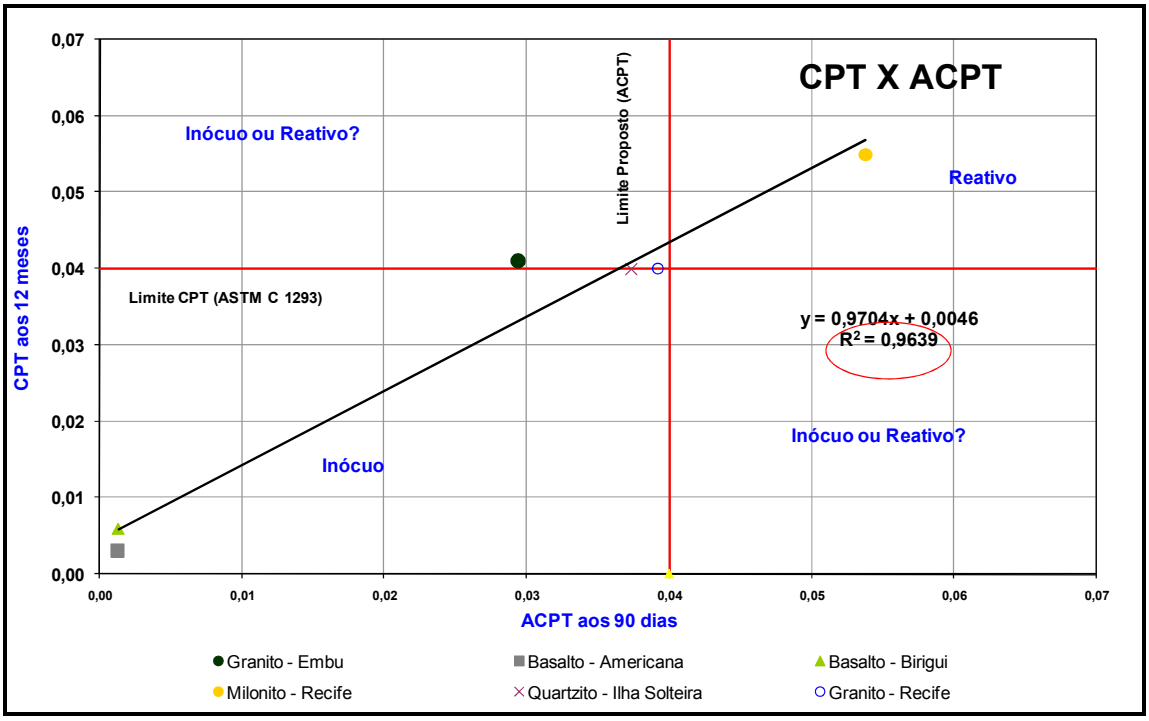

Figura 95. Análise comparativa entre os métodos CPT (12 meses) e ACPT (3 meses ou 90 dias).

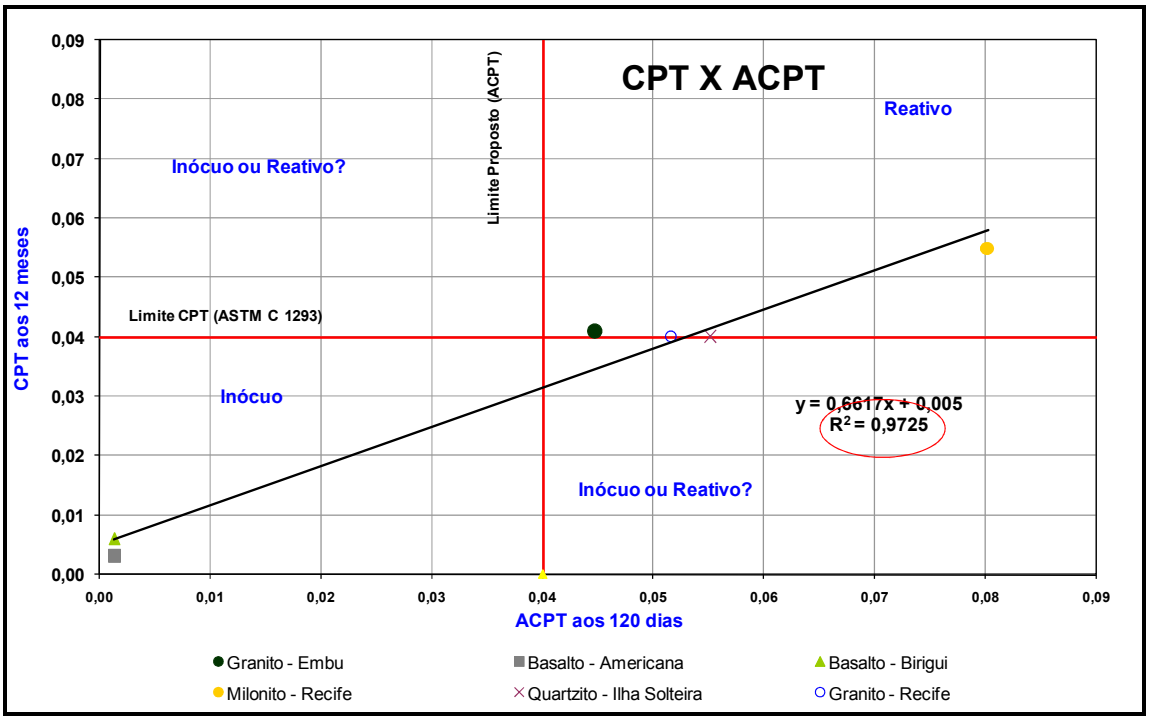

Figura 96. Análise comparativa entre os métodos CPT (12 meses) e ACPT (4 meses ou 120 dias).

Pode-se perceber através dos gráficos acima que o método CPT apresenta grande correlação com o método ACPT. Portanto, este último pode ser considerado um método com bastante potencial na avaliação da RAA.

Aos 90 dias (3 meses), o índice de correlação (R^2) entre ambos os métodos foi de 0,9639 (96,39%). Já aos 120 dias (4 meses) este índice foi ainda maior (0,9725 ou 97,25%).

Quando a análise e classificação de agregados através do método ACPT foi realizada aos 3 meses, alguns agregados (principalmente os lentamente reativos) estavam marginais ao limite de classificação. Isso resultou em uma grande dificuldade de análise, além de uma diferença sutil (de classificação) entre agregados quando comparados com a do método CPT.

Quando os agregados foram analisados aos 4 meses, os dois métodos classificaram os agregados da mesma maneira, e nesta idade, não houve maior dificuldade de classificação dos agregados mediante o método ACPT.

Levando em consideração o índice de correlação, assim como a facilidade de classificação, sugere-se que agregados sejam classificados através do método ACPT aos 4 meses ou 120 dias.

7.1.3 CPT X AMBT

Fazendo uma análise comparativa entre os ensaios CPT (1 ano) e AMBT (14 e 28 dias) tem-se:

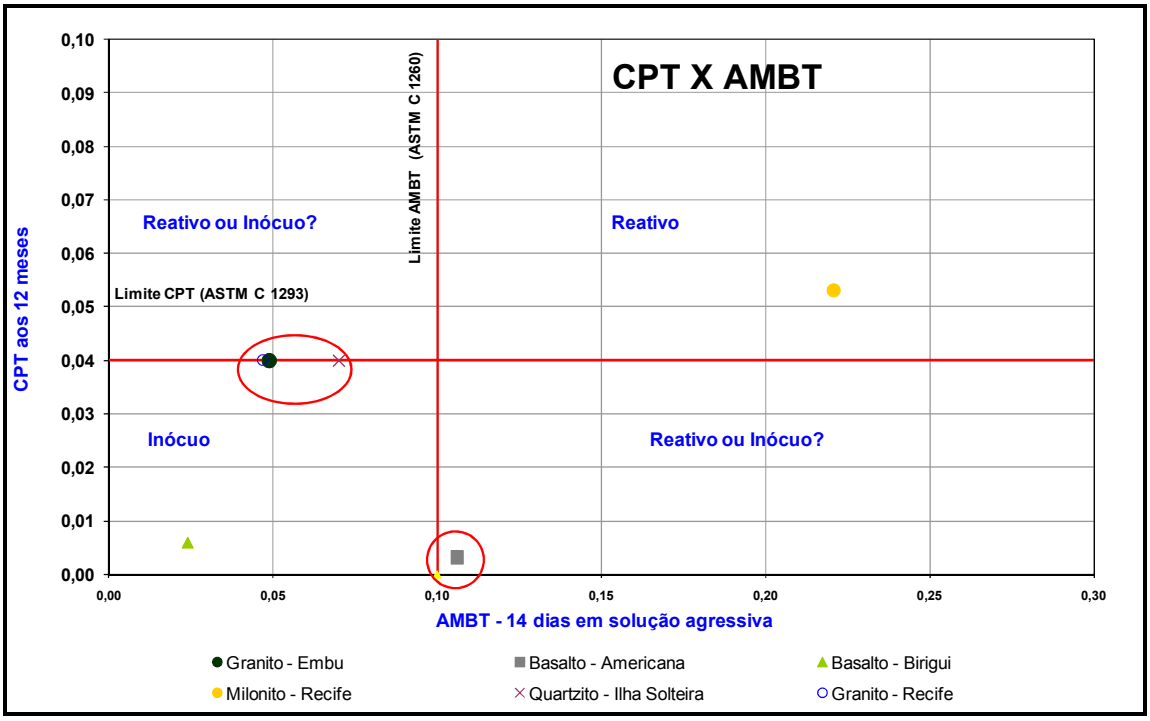

Figura 97. Análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e AMBT (14 dias em solução agressiva).

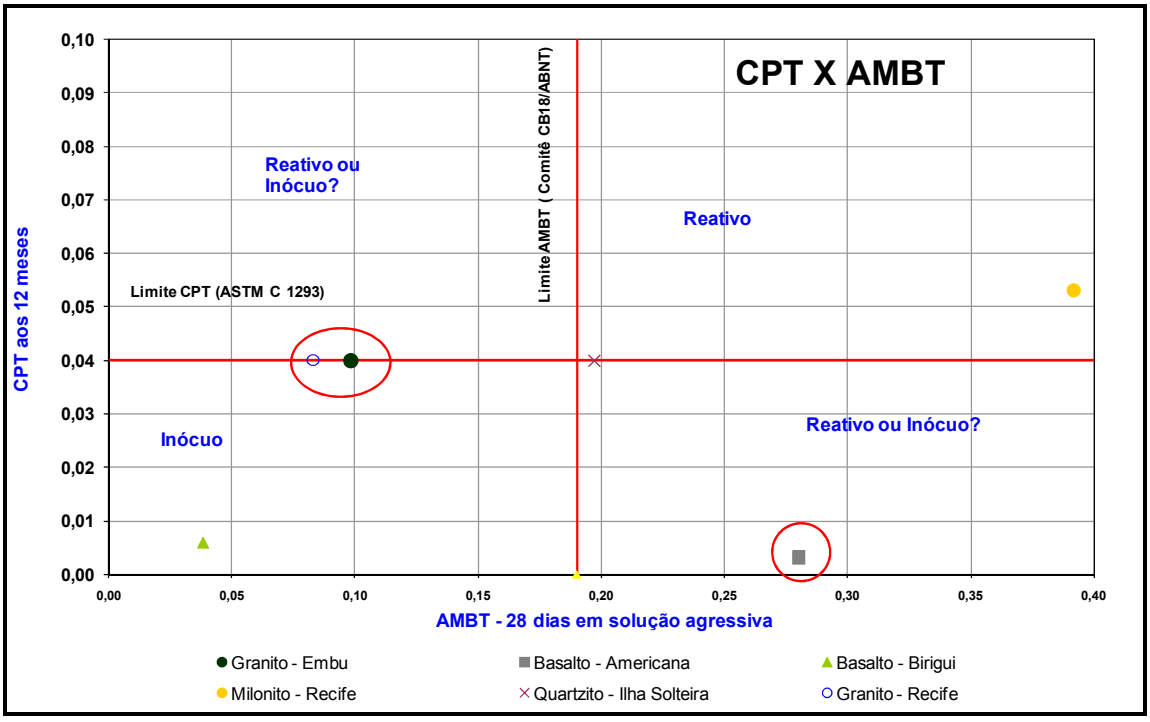

Figura 98. Análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e AMBT (28 dias em solução agressiva).

Através da análise dos gráficos, pode-se perceber que 4 em 6 agregados (66%) seriam classificados de maneira diferente caso fosse realizada análise comparativa entre o CPT a 1 ano e o AMBT aos 14 dias em solução agressiva (utilizados os valores preconizados pela ASTM C 1260). Aparentemente os ensaios apresentam fenômenos expansivos diferentes para o mesmo agregado, o que gera uma grande desconfiança na utilização dos métodos.

O método CPT (como levantado na revisão bibliográfica) é o método de ensaio laboratorial mais confiável existente na atualidade, não tendo sido visto até os dias atuais (em nenhuma localidade) agregados que foram classificados como inócuos pelo método e apresentaram desempenho insatisfatório em campo.

Por outro lado, já foi constatado que por vezes o método AMBT apresenta resultados expansivos de um dado agregado que não condiz com seu desempenho em obras de engenharia. Isto faz com que torne-se necessário o estudo e a calibração do método AMBT no que tange a limites e idades de análise de agregados que se encontram no Brasil. Principalmente porque o método AMBT sempre foi considerado um ensaio extremamente agressivo (normalmente classificando agregados de bom comportamento como reativos). No entanto, durante esta pesquisa, pode ser visto que o método (quando comparado com o CPT) tanto pode apresentar (para um mesmo agregado) expansões maiores quanto menores. Esta variação, que por muitas vezes prejudica agregados de bom comportamento, por outras não detecta agregados reativos tornando o ensaio inconsistente.

Quando o ensaio AMBT é levado aos 28 dias em solução agressiva e, utilizando o limite preconizado pelo Comitê CB-18/ABNT que está desenvolvendo a norma brasileira (0,19%), pode-se perceber que 3 em 6 agregados (50%) continuam a ser classificados de maneira diferente. Isto significa que muito embora a correlação entre métodos melhore aos 28 dias, esta melhora ainda não é suficiente e a confiabilidade do método ainda não pode ser considerada satisfatória.

7.1.4 AMBT X ACPST

Visto que o método AMBT não apresentou correlação desejável com o método CPT, decidiu-se através da realização do método ACPST (que tem basicamente o mesmo procedimento operacional do ensaio de barras de argamassa, no entanto, é realizado em prismas de concreto com dosagem equivalente a utilizada no método CPT), testar se o processo de britagem e a

granulometria utilizada nas barras de argamassa, assim como as diferentes características do material concreto/argamassa geram real influência na expansão deletéria.

Fazendo uma análise comparativa entre o ensaio AMBT aos 14 dias de imersão em soda (preconizado pela ASTM C 1260), versus o ensaio ACPST aos 28 dias tem-se:

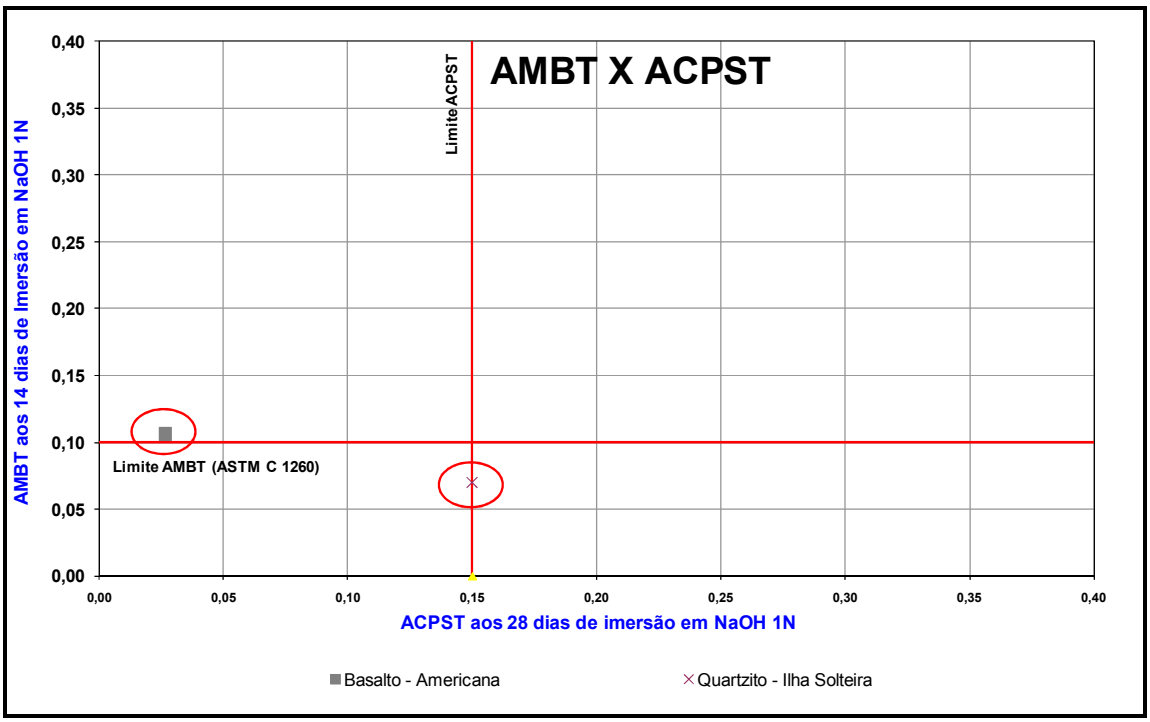

Figura 99. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão), e o método ACPST (aos 28 dias) de imersão.

Pode-se perceber que os dois agregados estudados seriam classificados de maneira diferente segundo os dois métodos. Através desta análise comparativa fica claro que a granulometria do agregado, assim como a geometria do prisma e as características do material (concreto ou argamassa) têm efeito significativo na expansão, pois para um mesmo ambiente houve comportamento expansivo completamente diferente de um mesmo agregado.

Análise do AMBT aos 28 dias e utilizando o limite adotado pelo Comitê do CB-18/ABNT tem-se:

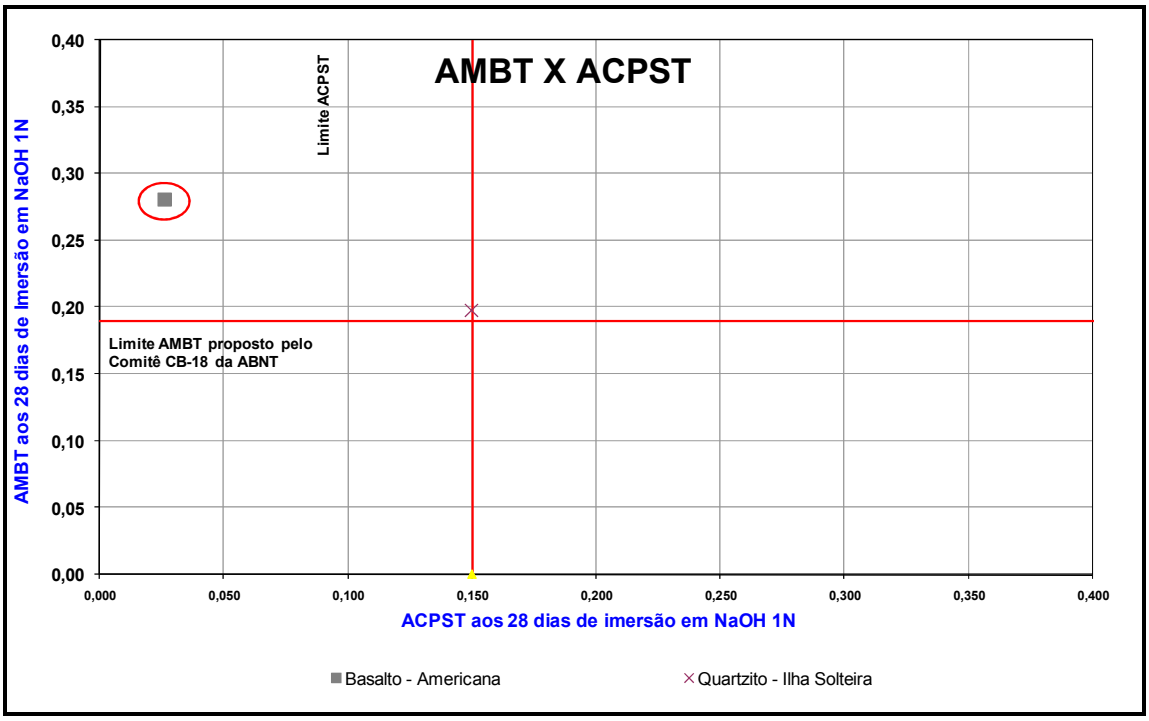

Figura 100. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 28 dias de imersão), e o método ACPST (aos 28 dias) de imersão.

O agregado quartzito de Ilha Solteira seria aos 28 dias classificado de maneira equivalente mediante os dois métodos. No entanto, o agregado basalto seria ainda classificado de maneira diferente.

Pode-se perceber que a diferença de comportamento ainda continua, comprovando a influência da variação da granulometria e das características do material (argamassa/concreto).

Após este ensaio, pode-se perceber que muito embora o método seja rápido, este não é extremamente confiável na análise de agregados, comportando características e parâmetros irreais e diferentes das obras correntes.

Muito embora o ACPST possua também um ambiente muito agressivo e também irreal, o fato de ser realizado em concreto torna o ensaio mais parecido com as condições encontradas em campo.

É válido ressaltar que durante pesquisa bibliográfica, alguns autores que testaram o método ACPST obtiveram pequenos desvios laboratório/campo, fato que não foi constatado na presente dissertação. Em primeira instância, o ensaio demonstrou ter bastante potencial.

7.1.5 CPT X ACPST

Fazendo uma análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e ACPST (28 dias) tem-se:

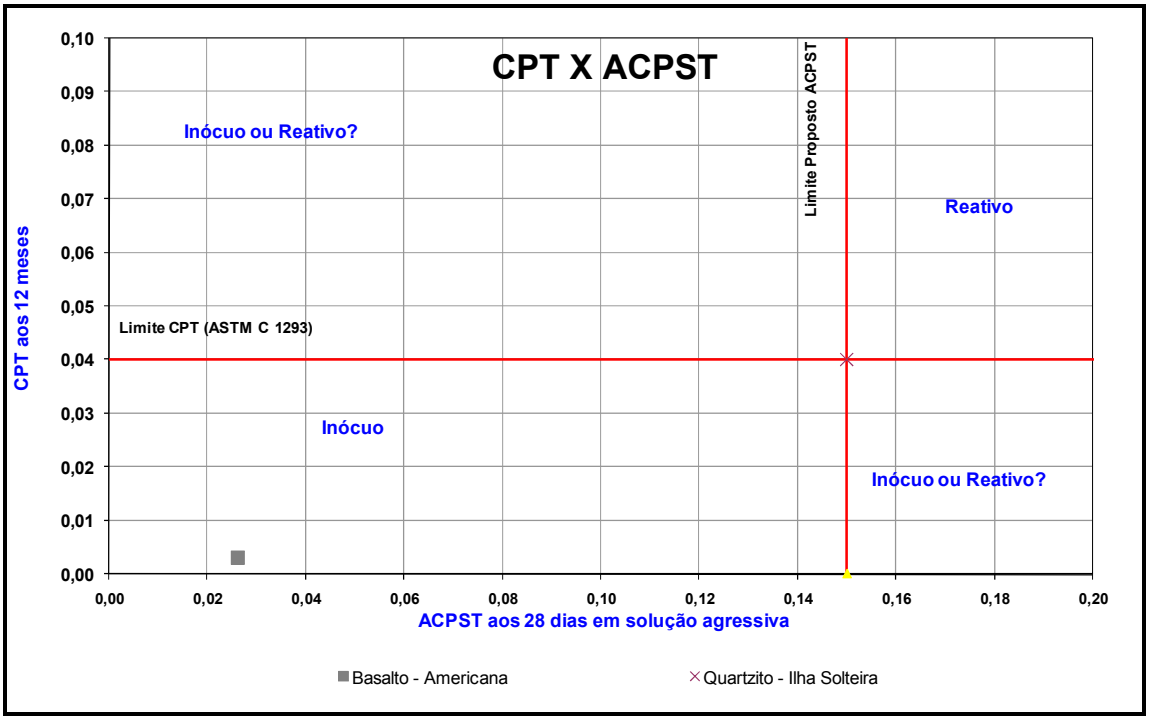

Figura 101. Análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e ACPST (28 dias em solução agressiva).

Após análise do gráfico acima, pode-se perceber que todos os agregados seriam classificados da mesma maneira se a classificação fosse feita através do CPT e ACPST respectivamente a 1 ano e 1 mês (28 dias), mostrando este último grande potencial.

Muito embora o método de ensaio ACPST seja bastante agressivo (assim como o AMBT), tendo sido encontradas na literatura situações de distorção de desempenho laboratório/campo para um mesmo agregado, este fato não pode ser comprovado no presente trabalho.

7.1.6 CPT X ABCPT

Fazendo uma análise comparativa entre os métodos CPT (1 ano) e ABCPT (28 dias) tem-se:

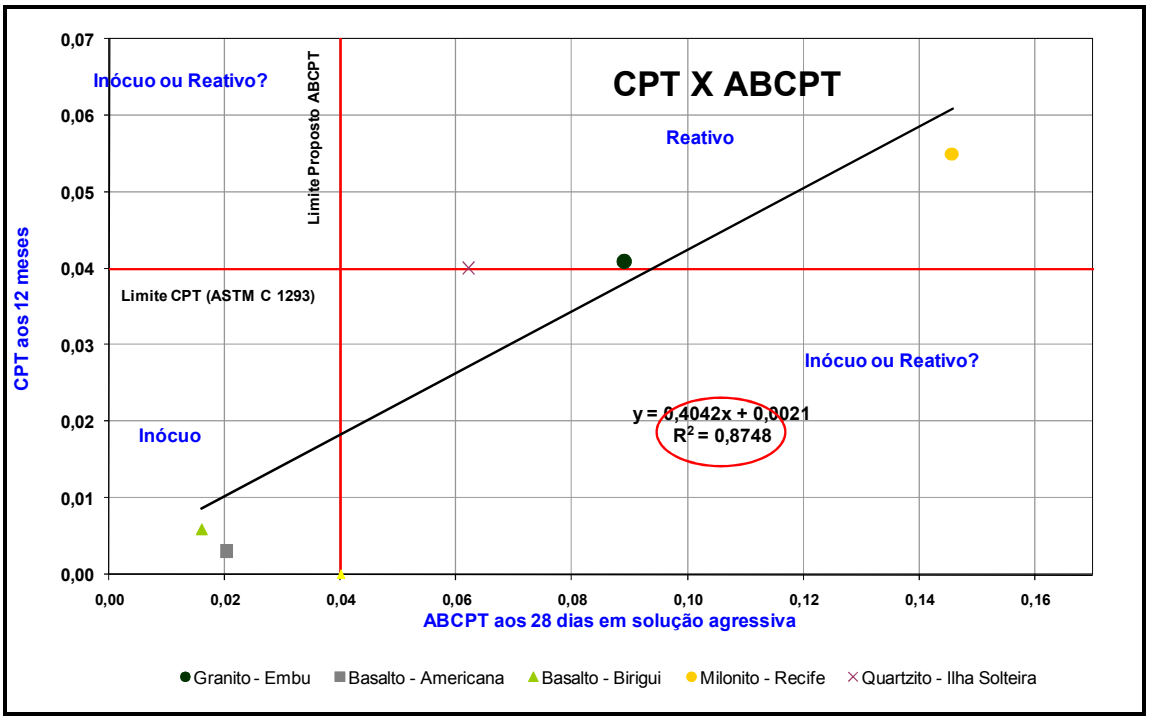

Figura 102. Análise comparativa entre os ensaios CPT (1 ano) e ABCPT (28 dias ou 1 mês).

Após análise do gráfico acima, pode-se perceber que todos os agregados seriam classificados da mesma maneira se a classificação fosse feita através do CPT e ABCPT respectivamente a 1 ano e 1 mês (28 dias), mostrando este último ensaio, bastante potencial.

A linha de tendência do ensaio também é bastante razoável (principalmente em se tratando de ensaios acelerados), tendo um coeficiente de correlação (R^2) de 0,8748 ou 87,48%.

Como o método de ensaio é extremamente recente, sugere-se que este seja testado com mais agregados para sua futura confirmação.

7.1.7 AMBT X ACPT (estufa ventilada)

Fazendo uma análise comparativa entre o ensaio AMBT aos 14 dias de imersão em soda (preconizado pela ASTM C 1260), versus o ensaio ACPT aos 90 dias tem-se:

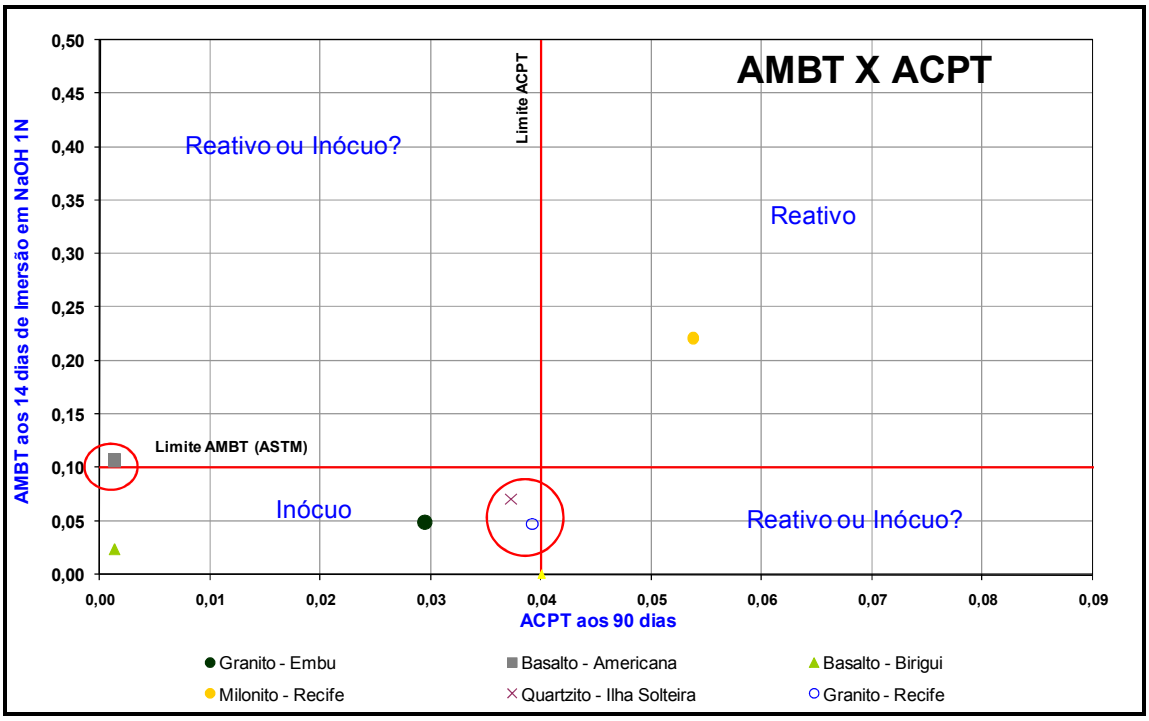

Figura 103. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão) e ACPT (aos 90 dias).

Pode-se perceber que três em seis agregados (basalto de Americana, quartzito de Ilha Solteira e granito de Recife - que pela proximidade ao limite foi classificado como reativo), são classificados de maneira diferente mediante os dois ensaios. Esta diferença de comportamento expansivo entre os dois ensaios torna-se ainda mais evidente quando o método ACPT é analisado aos 120 dias (sendo nesta data, 4 em 6 agregados classificados de maneira diferente).

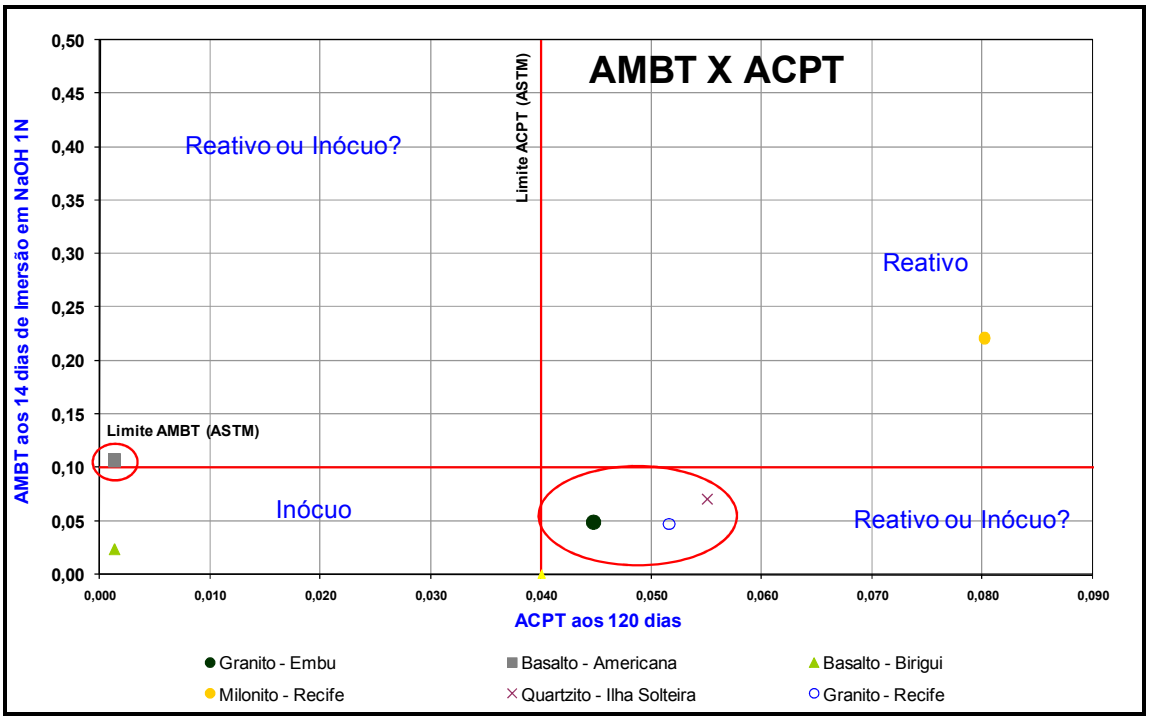

Figura 104. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão) e ACPT (aos 120 dias).

Levando o método AMBT aos 28 dias, (como propõe o Comitê CB-18/ABNT), e analisando o ACPT aos 120 dias, pode ser verificado que a diferença de classificação dos agregados diminui, mais ainda não simboliza uma eficiente correlação entre ensaios.

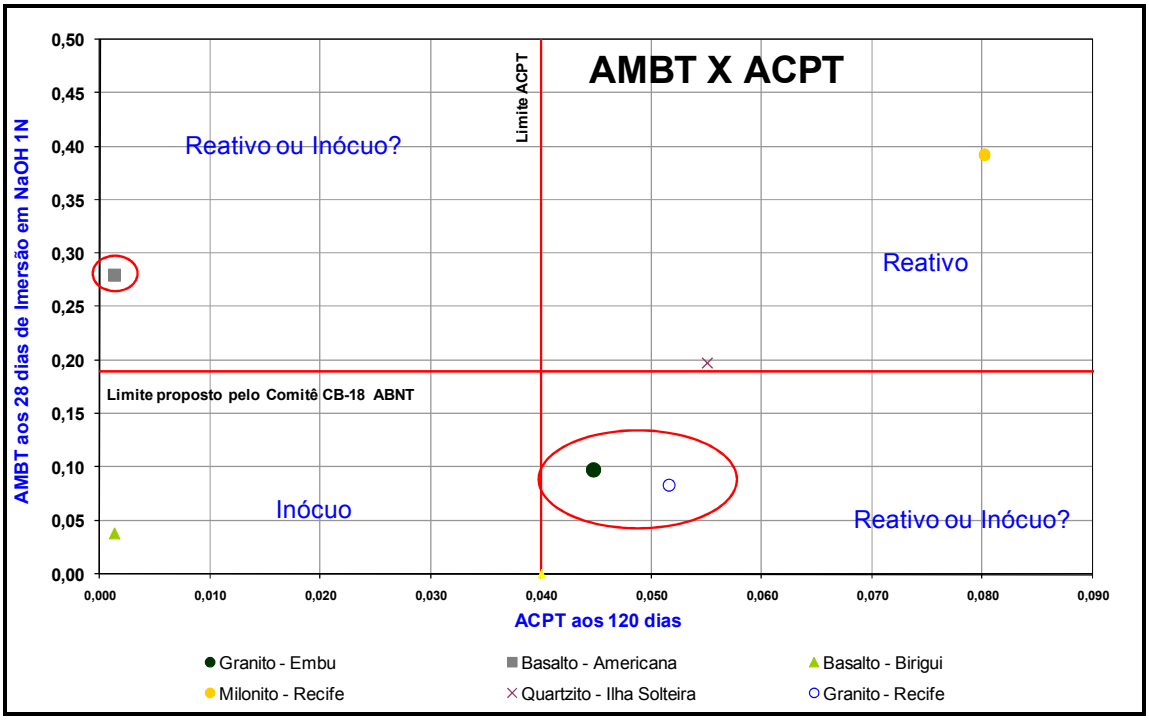

Figura 105. Análise Comparativa entre os Métodos AMBT (aos 28 dias de imersão) e ACPT (aos 84 dias).

7.1.8 AMBT X ABCPT

Fazendo uma análise comparativa entre o ensaio AMBT aos 14 dias de imersão em soda, versus o ensaio ABCPT aos 28 dias de imersão tem-se:

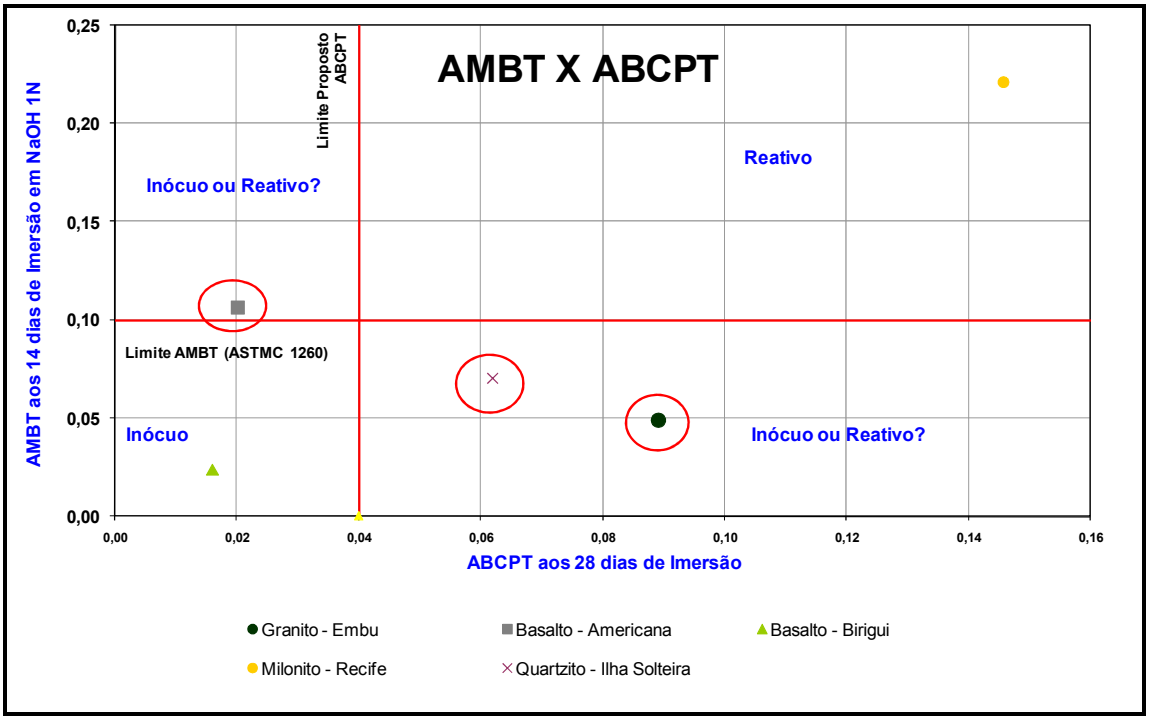

Figura 106. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 14 dias de imersão) e ABCPT (aos 28 dias de imersão).

Pode-se perceber que dentre os cinco agregados analisados, três seriam classificados de maneira diferente segundo os dois métodos, indicando uma diferença de comportamento expansivo dos agregados mediante os dois métodos.

Fazendo uma análise aos 28 dias de imersão em ambos os ensaios e adotando o limite proposto pelo Comitê do CB-18/ABNT tem-se:

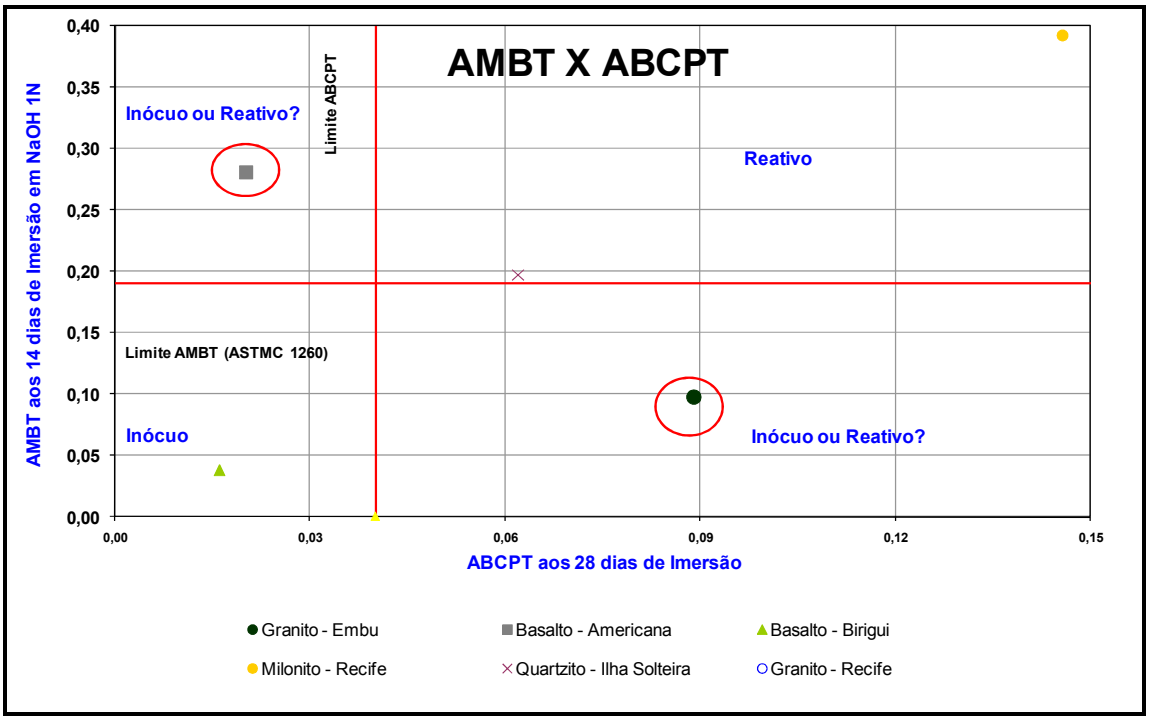

Figura 107. Análise comparativa entre os métodos AMBT (aos 28 dias de imersão) e ABCPT (aos 28 dias de imersão).

Quando os seis agregados são comparados aos 28 dias, três dos cinco agregados seriam classificados da mesma maneira, melhorando a correlação entre os ensaios, muito embora, não de maneira suficiente.

7.1.9 ACPT (estufa ventilada) X ABCPT

Fazendo uma análise comparativa entre o ensaio ACPT aos 90 dias versus o ensaio ABCPT aos 28 dias de imersão em soda tem se:

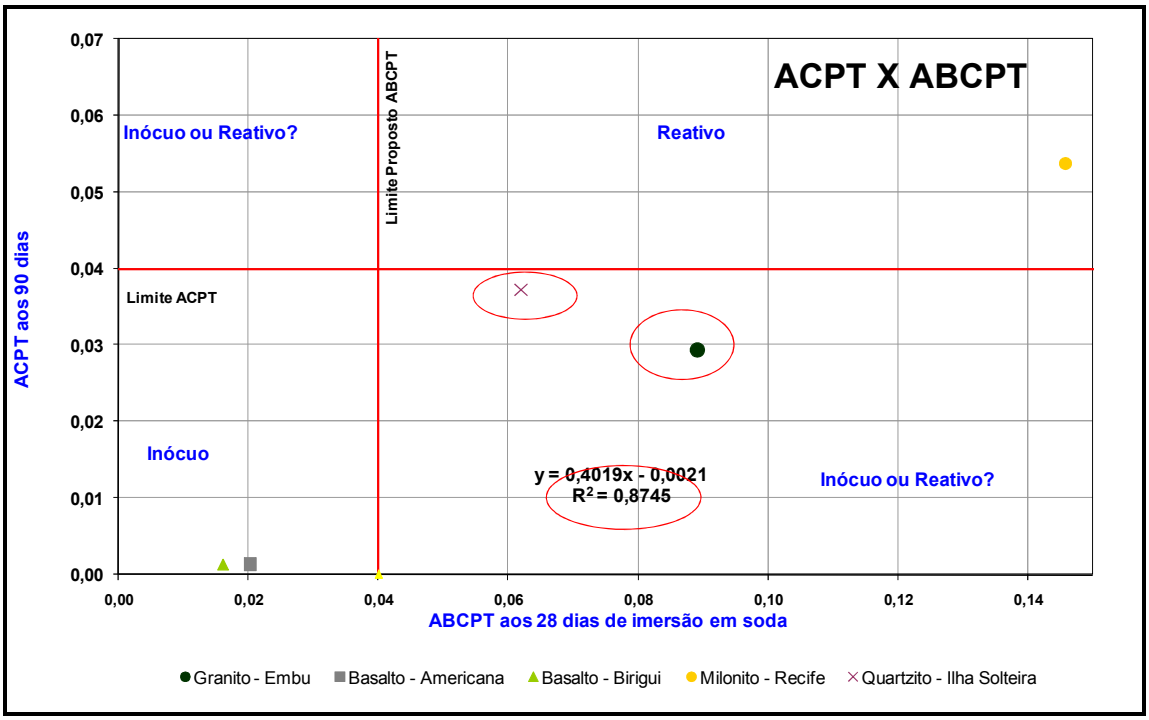

Figura 108. Análise comparativa entre os métodos ABCPT (aos 28 dias de imersão) e ACPT (aos 90 dias).

Pode-se perceber através da análise do gráfico que o coeficiente de correlação entre os métodos é muito bom quando o ACPT é analisado aos 90 dias (R^2=0,8745 ou 87%). No entanto, ainda nesta data, pode-se notar uma diferença (sutil) mais existente na classificação dos agregados.

Analisando o ACPT aos 120 dias tem-se:

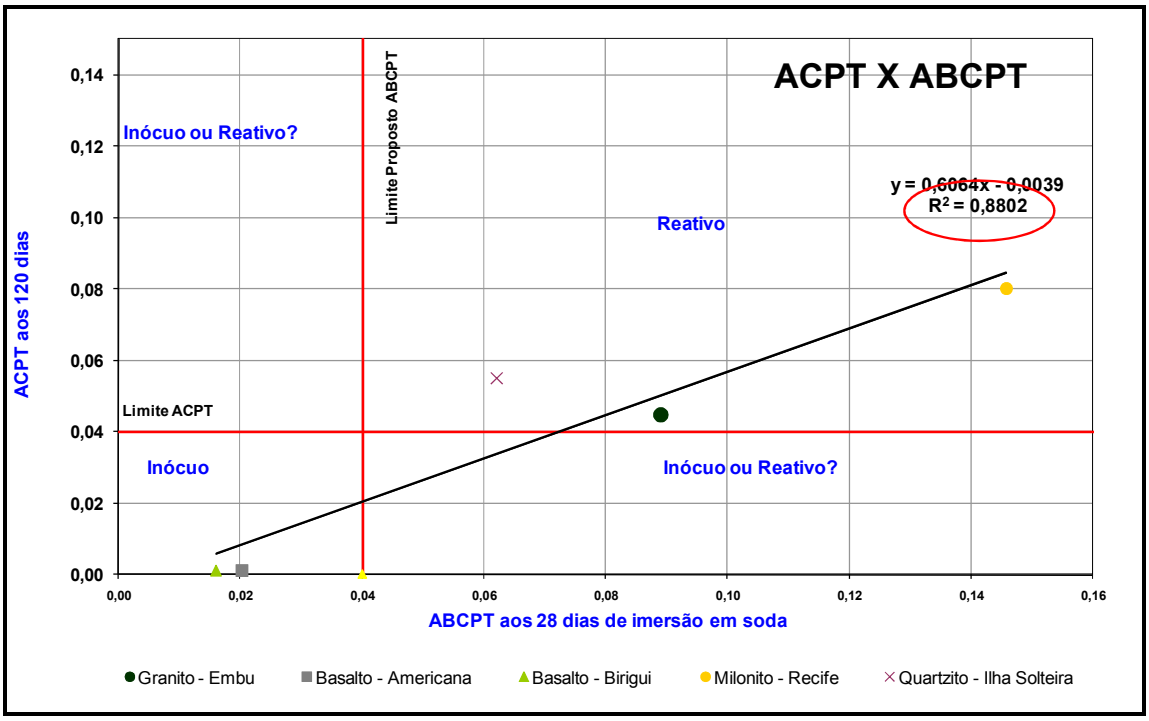

Figura 109. Análise comparativa entre os métodos ABCPT (aos 28 dias de imersão) e ACPT (aos 120 dias).

Quando o método ACPT é analisado aos 120 dias o coeficiente de correlação (R^2) mantém-se praticamente o mesmo (0,88 ou 88%) muito embora neste período todos os agregados sejam classificados da mesma maneira mediante os dois métodos.

As mesmas considerações valem para a análise comparativa entre os métodos ACPT e ACPST.

O método ABCPT, assim como os métodos ACPT e ACPST necessitam de mais estudos e mais experimentos, no entanto, todos estes métodos aparentam desenvolver fenômenos expansivos semelhantes ao método CPT, tendo grande potencial na utilização para a constatação prévia da RAA.

7.2 Tratamento estatístico dos dados

Após analisar e comparar métodos de ensaio do ponto de vista de “tomada de decisão” em engenharia seria interessante tratar os dados encontrados nos diversos métodos de maneira estatística, de modo que eventuais variâncias entre ensaios pudessem ser conhecidas, analisando e comparando os ensaios do ponto de vista “matemático”.

Para isto, foi realizado através da ANOVA um estudo de variâncias dos métodos laboratoriais estudados utilizando o software STATISTICA 7, com o intuito de avaliar a influência dos seguintes parâmetros na resposta dos ensaios realizados em concreto:

- Litologia do agregado;
- Método de ensaio;
- Litologia x Método de ensaio.

Implementando os valores de expansão (dos prismas contendo os agregados estudados) em cada ensaio realizado em concreto (em suas idades consideradas) no software STATISTICA 7 e, desconsiderando o ensaio ACPST (devido a este ensaio ter sido realizado apenas com duas amostras), foi concluído que os três parâmetros mencionados anteriormente (litologia, método de ensaio e litologia x método de ensaio) são significativos para a expansão dos prismas, ou seja, tanto o tipo de litologia, quanto o tipo de ensaio utilizado em concreto, quanto o produto litologia x tipo de ensaio, são significativos quando da análise e classificação da reatividade potencial de agregados em laboratório (do ponto de vista "matemático").

Dos métodos testados, através da análise de agrupamento, pode-se constatar que (Tabela 33):

Tabela 33. Agrupamento dos ensaios realizados em concreto.

Método	Tipo expansivo 1	Tipo expansivo 2	Tipo expansivo 3
CPT	X		
ACPT (EV)	X		
ACPT (BM)		X	
ABCPT			X

Os ensaios CPT e ACPT (realizados em estufa ventilada - EV) comportaram-se da mesma maneira, ou seja, obtiveram um "tipo de expansão semelhante". Este resultado é compatível com a correlação encontrada entre ensaios (96 a 97%). Pode-se dizer, portanto, que o ensaio ACPT poderia ser utilizado para substituir o CPT sem maiores problemas, tanto do ponto de vista de engenharia, quanto matemático.

O ensaio ACPT realizado em banho-maria (BM), apesar de ter apresentado um tipo de expansão diferente do ACPT (EV) e do CPT do ponto de vista

matemático, classificou os agregados testados de maneira equivalente, podendo este ensaio ser classificado como confiável para tomada de decisão em engenharia. O fato do método ter apresentado um tipo de expansão diferente, pode ter sido ocasionado devido a um menor controle do ambiente de ensaio promovido pelo tipo de equipamento.

O ensaio ABCPT apresentou um tipo de expansão diferente dos ensaios anteriores do ponto de vista matemático. No entanto, quando comparado com os demais, através do gráfico de quatro quadrantes, apresentou grande correlação, inclusive demonstrando índice de correlação (R^2) igual a 0,87 com o ensaio CPT (dito o mais confiável método na atualidade).

Muito embora o ABCPT tenha grande potencial e tenha classificado os agregados analisados da mesma maneira (não gerando problemas do ponto de vista de tomada de decisão em engenharia) segundo HASPARYK, uma eventual troca de tipo de cura durante as primeiras 24 horas (de cura em câmara úmida a 23º C por cura imersa a 80º C) poderia fazer com que o tipo expansivo se tornasse o mesmo dos ensaios CPT e ACPT (EV).

Os gráficos abaixo apresentam as expansões dos prismas confeccionados em todos os métodos estudados.

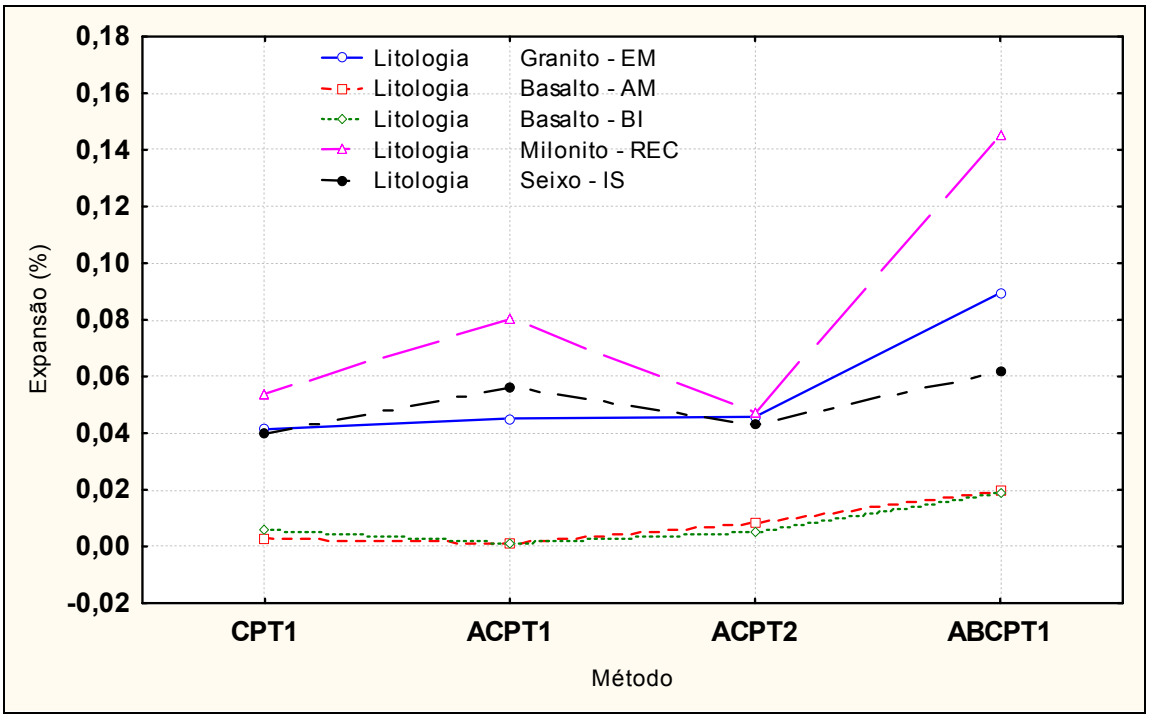

Figura 110. Expansão dos prismas em cada método de concreto estudado.

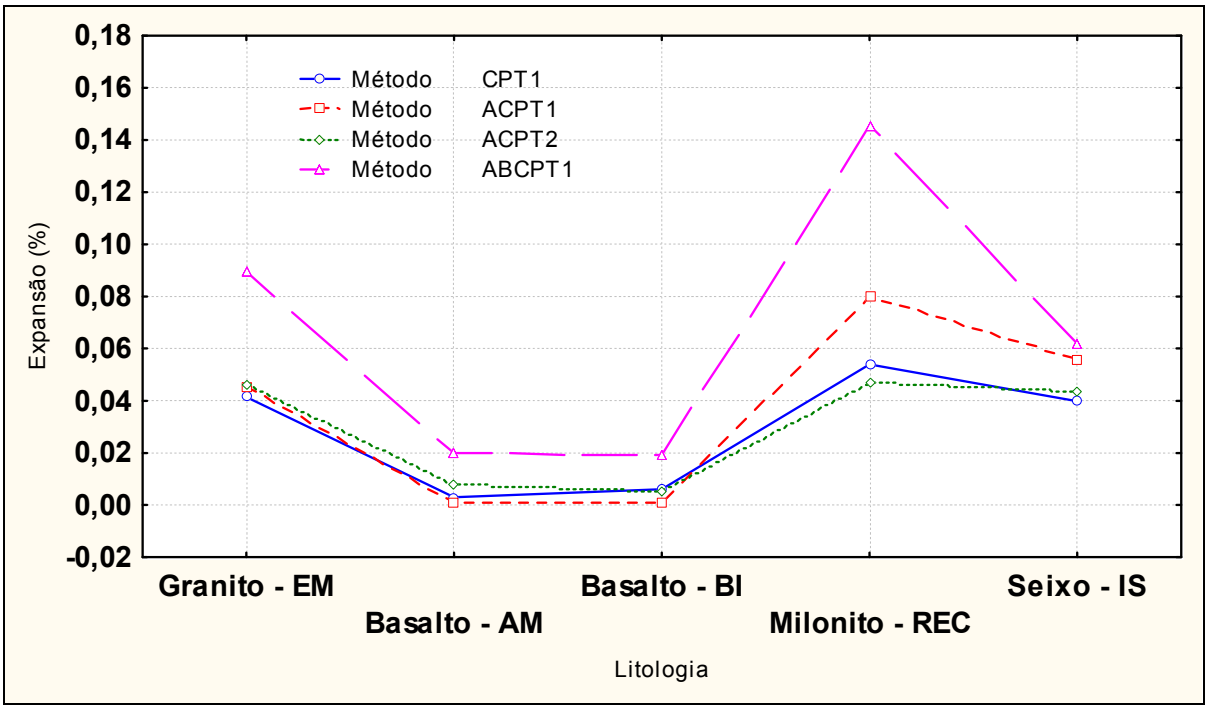

Figura 111. Expansão dos prismas confeccionados com cada agregado testado.

Torna-se fácil a partir da visualização das curvas expansivas dos prismas confeccionados com os agregados estudados, que embora com expansões diferentes, os agregados demonstraram comportamentos expansivos semelhantes (curvas praticamente paralelas) quando analisados por diferentes métodos de ensaio em concreto.

Quando uma análise global é requisitada e os quatro ensaios são comparados de maneira simultânea, estes apresentam coeficiente de correlação (R^2) igual 0,98 ou 98% (o que pode ser considerado excelente), indicando a capacidade de utilização de qualquer um destes na análise prévia de agregados em laboratório.

Quando apenas a expansão dos agregados é estudada (não levando em consideração o método de ensaio), é possível através do software dividir o comportamento expansivo dos mesmos (Tabela 34):

Tabela 34. Comportamento dos agregados analisados.

Agregados	Tipo de Expansão 1	Tipo de expansão 2	Tipo de expansão
Granito – Embu das Artes		X	
Basalto – Americana	X		
Basalto – Birigui	X		
Milonito recife			X
Quartzito		X	
Granito - Recife		X	

Assim como pela análise visual dos gráficos de ensaios realizados em concretos, a simulação de agrupamento demonstra que dentre os agregados analisados nesta dissertação, existem três comportamentos expansivos principais: os basaltos - com comportamento inócuo, os granitos e o quartzito - com comportamento lentamente reativo e o milonito - com comportamento reativo.

8 CONCLUSÕES E PROPOSIÇÃO DE ESTUDOS

8.1 Conclusões

Após confecção dos ensaios de análise petrográfica, CPT, AMBT, ACPT, ACPST, ABCPT, podem ser tiradas as seguintes conclusões:

1. A análise petrográfica não é conclusiva (quantitativa), sendo apenas indicativa (qualitativa) e deve ser sempre complementada com outro método de ensaio. No entanto, torna-se extremamente importante a realização desta análise, de modo que uma estimativa da potencial reatividade de um agregado possa ser feita.
2. O método AMBT é o método de ensaio mais utilizado e difundido em todo o mundo, principalmente pela agilidade de classificação de um agregado (16 dias). No entanto, os agregados analisados através deste método, (tanto se analisados aos 14 dias, quanto aos 28 dias de imersão em soda) apresentaram comportamentos expansivos diferentes do que quando analisados em ensaios realizados em concreto (CPT, ACPT, ABCPT e ACPST).
3. A correlação do ensaio AMBT (preconizado pela ASTM C 1260) com os demais ensaios realizados em concreto não foi satisfatória. Quando adotou-se o período e o limite de ensaio preconizados pela norma brasileira (CB18/ABNT), a correlação melhorou, mas não o suficiente.
4. Classificar e justificar a distorção dos resultados através do AMBT devido ao seu ambiente “agressivo” torna-se um erro, pois quando um mesmo agregado é analisado simultaneamente pelo AMBT e ACPST (possuindo o mesmo ambiente agressivo, no entanto sendo realizado em concreto), este apresenta comportamento expansivo distinto.
5. Um grande programa Interlaboratorial brasileiro deveria ser realizado, (com agregados com desempenho conhecido em campo), de modo que limites de expansão e períodos de análise pudessem ser reavaliados no ensaio AMBT.
6. Caso os parâmetros do AMBT não sejam reavaliados, torna-se necessário o estudo e a adoção de limites de expansão diferentes para litologias distintas.
7. O método acelerado ACPT (realizado em estufa ventilada) apresentou grande correlação (98%) com o ensaio CPT (considerado o método mais

confiável existente), tanto do ponto de vista matemático, quanto de engenharia, podendo ser utilizado para substituir o ensaio de longa duração sem maiores problemas.

8. Embora com maior variabilidade (do ponto de vista matemático, mas não de engenharia), o ensaio ACPT com equipamento de banho-maria é bastante viável e pode ser utilizado para análise e classificação de agregados em laboratório.

9. O ensaio ABCPT demonstra bastante potencial na análise de agregados em laboratório, sendo bastante rápido na sua classificação (28 dias). Torna-se necessária à utilização deste método com um maior número de agregados de modo que sua efetividade possa ser realmente constatada.

10. Os ensaios realizados em concreto demonstraram clara equivalência através da ANOVA, apresentando coeficiente de correlação (R^2) quando analisados simultaneamente igual a 0,98.

11. Quando uma tomada de decisão de engenharia necessita ser feita do ponto de vista da RAA, torna-se necessária à análise holística do problema. Muito embora necessite ser melhor calibrado, o índice IRP apresenta este conceito e em princípio, poderia ser sempre consultado nestes casos.

12. Propõe-se o seguinte fluxograma para classificação de agregados em laboratório:

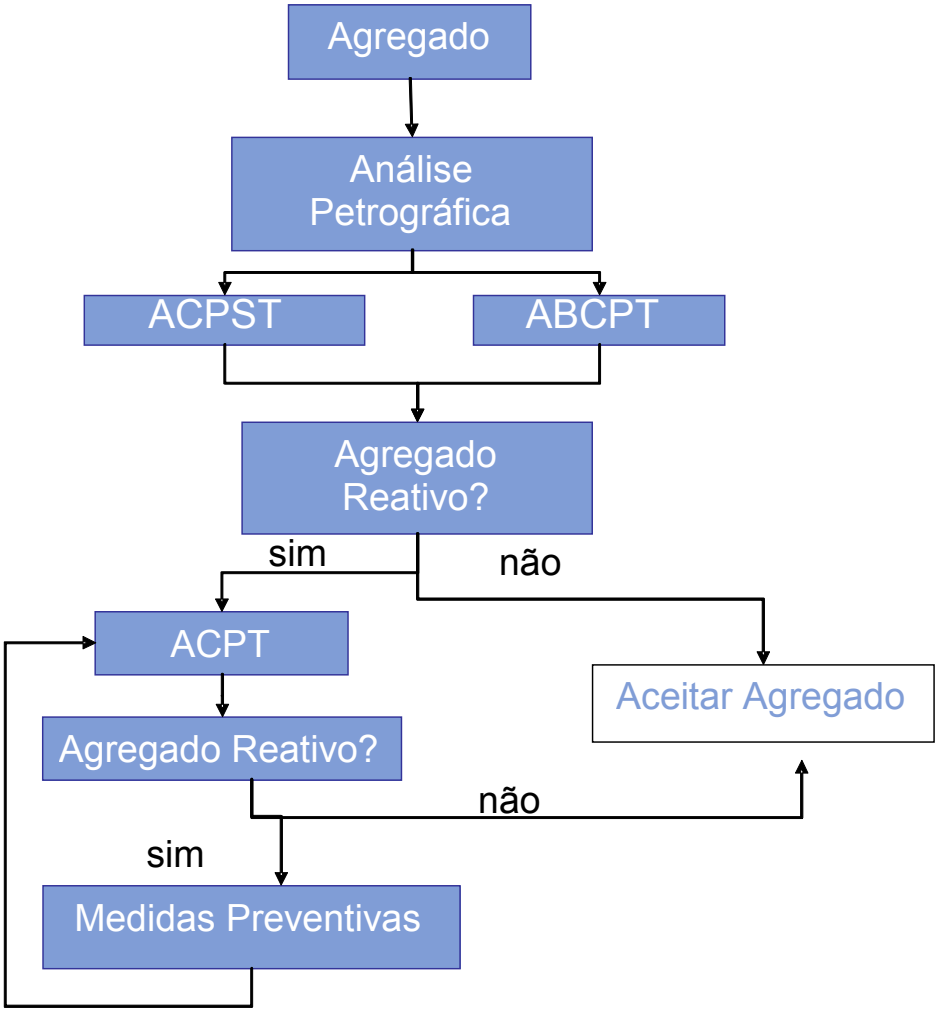

Figura 112. Fluxograma de classificação de agregados.

8.2 Transferências ao meio (trabalhos publicados e em fase de avaliação)

07/07 – Medidas preventivas para a Reação Álcali-Agregado no Concreto. Revista IBRACON, nº 46.

09/07 – Efeito dos Álcalis e da Finura do Cimento nas Expansões geradas pela Reação Álcali Agregado. Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON), Bento Gonçalves, setembro de 2007.

09/07 - Reação Álcali-Agregado: Análise comparativa entre o Método Acelerado de Barras de Argamassa (AMBT) e o Método Acelerado de Prismas de Concreto (ACPT). Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON), Bento Gonçalves, setembro de 2007.

06/08 - Trials to correlate the accelerated mortar bar test, the standard and the accelerated concrete prism tests. Congresso Internacional de Reação Álcali-Agregado (ICAAR), Noruega, junho de 2008.

09/08 - Reação Álcali-Agregado: Método acelerado brasileiro de prismas de concreto. Congresso Brasileiro do Concreto (IBRACON), Salvador, setembro de 2008.

11/08 – Surface protections to prevent alkali-aggregate reactions (AAR) Congresso Internacional de proteção, reparo, reforço e recuperação de estruturas de concreto (ICCRRR), África do Sul, novembro de 2008.

8.3 Proposta de estudos a serem realizados

- Realização de ensaios através do método ABCPT com um número maior de agregados.
- Realização de ensaios através do método ABCPT com modificação do tipo de cura inicial.
- Estudo das taxas de expansões de todos os ensaios realizados (em concreto e argamassa) com o intuito de serem discutidos limites e datas de análise para cada um deles.
- Estudo e desenvolvimento de limites diferentes para litologias distintas quando da utilização do método AMBT.
- Estudo das características da argamassa utilizada no ensaio AMBT, de modo a conseguir maior correlação com os ensaios em concreto.
- Levantamento completo de casos históricos brasileiros de RAA em campo e execução de ensaios com os agregados utilizados, visando calibrar melhor os vários métodos de ensaio existentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ÁGUAS, M.F.F.**Reação Álcali-Agregado** Comitê Brasileiro de Barragens.Goiânia, 2005.

ANDRADE, N.P.H.; GONÇALVES,I.N.; VEIGA, F.N. **RAA: A utilização da técnica da MEV na identificação de seus produtos**. VI Congresso Iberoamericano de Patologia das Construções. Porto Alegre, 1997. Cap.76, Vol. 1, p. 655-662.

ANDRADE, T. **Histórico de Casos de RAA Ocorridos Recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife.** RAA 2006 - II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, setembro de 2006 (Ibracon).

ASTM C 1260. **Standart Test Method for Potential Alkali Reactivity of Aggregates (Mortar Bar Method)**, 2005.

ÁVILA, J.I.S, MADUREIRA, E.L.**Conseqüências Deletérias do Efeito Expansivo da Reação Álcali-agregado em Elementos Estruturais de Concreto Armado.** RAA 2006 - II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, setembro de 2006 (Ibracon).

BARBOSA, F.R.;MONTEIRO, C.Q.;SOBRINHO,C.W.A.P. **Análise de reações álcali-agregado no maciço de uma barragem de gravidade de concreto.** VI Congresso Iberomamericano de Patologia das Construções, p.623-630. Porto Alegre, 1997.

BELLEW, G.P.E. **A Critical Review of Ultra Acelerated Tests for Alkali-Silica Reactivity.** Cement and Concrete Composites, vol. 19, p.403-414, 1997.

BERNARDES, H. M.; SOUZA, L.; SALLES, F. M. **Evolução de Deformações por RAA em Modelo Físico reduzido.** II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em estruturas de Concreto. Ibracon, Setembro, 2006.

BERUBÉ, M.A.; DORION J. F. **Distribution of Alkalies in Concrete structures affected by Alkali-Silica reactivity and contribution by aggregates.** 11ª ICARR – International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, p.139-148. Quebec, 2000.

BERUBÉ, M.A.; DORION J. F. **Measurement of the alkali content of concrete using hot water extraction.** 11ª ICARR – International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, p.159-168. Quebec, 2000.

BERUBÉ, M.A.; FRENETTE, J. **Testing Concrete for AAR in NaOH and NaCl solutions at 38°C and 80°C.** Cement and Concrete Composities, vol.16, pp. 189-198, 2003.

CÁNOVAS, M.F. **Patologia e Terapia do Concreto Armado**. São Paulo:Pini, 1988.

CARSE, A.; DUX, P.F.**Development of an Accelerated Test on Concrete Prisms to Determine Their Potential for Alkali-Silica Reaction.** Cement and Concrete Research, vol. 20, pp. 869-874, 1990.

COMITÊ BRASILEIRO DE BARRAGENS. **Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto.** Relatório Final, Goiânia, Dezembro de 1999.

DIAMOND, S. **Alkali-Silica Reactions.** 10ª ICARR – International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, p.3-15. Melbourne, 1996.

FARNY, J.A.; KOSMATKA, S.H. **Diagnosis and control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete.** (ACPA – American Concrete Pavement Association), 1997.

FOURNIER, B.; BERUBÉ, A.; **Alkali-Aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications**. Paper, Ottawa, 2000.

FOURNIER, B.; BERUBÉ, M.A. **Application of NBRI Accelerated Mortar Bar Test to Siliceous Carbonate Aggregates Produced in the St. Lawrence Lowlands – Part I (Quebec, Canada).** Cemente and Concrete Research, vol.21, pp.853-862, 1991.

FOURNIER, B.; BERUBÉ, M.A. **Application of NBRI Accelerated Mortar Bar Test to Siliceous Carbonate Aggregates Produced in the St. Lawrence Lowlands – Part II (Quebec, Canada).** Cemente and Concrete Research, vol.21, pp.1069-1082, 1991.

FOURNIER, B.; CHEVRIER, R.; GROSBOIS, M.; LISELLA, R.; SHEHATA, M.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; THOMAS, M.; BAXTER, S. **The Accelerated Concrete Prism Test (60°C): variability of the Test Method and Proposed Expansion Limits.** 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China, 2004.

FOURNIER,B.; NKINAMUBANZI, P.C.; LU, D.; THOMAS, M.D.A.; FOLLIARD, K.J.; IDEKER, J.H. **Evaluating Potential Alkali-Reactivity of Concrete Aggregates – How Reliable are the Current and New Test Methods?** II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em estruturas de Concreto. Ibracon, Setembro, 2006.

FURNAS. **Reatividade Potencial Álcali-Agregado.** Livro:Concretos: Massa, Estrutural e Compactado com Rolo, cap.17. São Paulo, Pini 1997.

GIBERGUES, A.C.; CYR, M. **Interpretation of Expansion Curves of Concrete Subjected to Accelerated Alkali-Aggregate reaction (AAR) Tests.** Cement and Concrete Research, vol.32, pp.691-700, 2001.

GRATTAN-BELLOW, P.E. **A critical review of accelerated AAR tests.** 10ª ICARR – International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, p.27-39. Melbourne, 1996.

GUDMUNDSON,G.;OLAFSON, H. **Alkali-sílica reactions anda sílica fume 20 years of experience in Iceland.** Cement and Concrete Research, v 29, p.1289-1297, 1999.

GUTHRIE, G.D. e CAREY, J.W. **A Geochemical Method for the Identification of ASR gel.** Los Alamos National Laboratory, TRB 991261, USA, (1998).

HASPARYK, N.P.; DAL MOLIM, D.C.C.; MONTEIRO, P.J.M. **Avaliação das propriedades Mecânicas e Análise da Microestrutura de Concretos Afetados pela RAA da UHE Furnas.** RAA 2006 - II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, setembro de 2006 (Ibracon).

HASPARYK, N.P.; GONÇALVES,I.N.;VEIGA,F.N. **A utilização da técnica de microscopia eletrônica de varredura na identificação de seus produtos.** VI Congresso Iberomamericano de Patologia das Construções, p.655-662. Porto Alegre, 1997.

HASPARYK, N.P.; MUNHOZ, F; SANCHEZ, L.F.M.; SALLES, F.; HAMASSAKI, L. **Efeito dos álcalis e da finura do cimento nas expansões geradas pela reação álcali-agregado.** Congresso Brasileiro do Concreto, Bento Gonçalves, setembro de 2007.

HASTER, D.; MACNALLY, C.; RICHARDSON, M. **A Study of The Influence of Slag Level on The Alkali-Silica Reactivity of Slag Concrete**. Concrete and Buildings Materials, vol. 19, pp. 661-665, 2005.

HELENE, P.R.L; PEREIRA, M. F.; CASTRO, P. **Tests for Alkali Aggregate Reaction.** ACI, Concrete International, July, 2005.

HOOTON, R.D.; ROGERS, C.A. **Development of the NBRI Rapid Mortar Bar Test Leanding to its use in North America.** Construction and Buildings Materials, vol. 7, number 3, 1993.

KIHARA, Y. **Reação Álcali-agregado: Aspectos Mineralógicos.** 1º Simpósio Nacional de Agregados, p. 127-138. São Paulo, junho, 1986.

KIHARA, Y.; SBRIGHI, C.N.;PECCHIO, M. **Avaliação Prática da Previsão da Reação Álcali-Silicato de Rochas Granitóides.** II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Setembro, 2006 (Ibracon).

KIHARA,Y. **A Influência da Carbonatação no Mecanismo de Expansão da RAA.** Simpósio Sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Goiânia, 1997.

KUPERMAN, S.C.; CAVALCANTI,A.J.C.T.; KRUGER,D.A.V.; VASCONCELOS,G.R.L.; HASPARYK, N.P. **Investigação dos Mecanismos da reação Álcali-Agregado - Efeito da Cinza de casca de Arroz e Sílica Ativa.** Mestrado em Engenharia Civil, Universidade federal de Goiás, GO (1999).

KUPERMAN, S.C.; SALLES, F.M.; PÍNFARI, J.C.; CARNEIRO, E.F.**Detecção da Reação Álcali-Agregado.** Seminário Internacional de Barragens. Goiânia, 2005.

LEE, C.; LIU, C.C.; WANG, C.W. **An Accelerated Concrete Prism Soaking Test for Evaluating the Alkali-Reactivity of Aggregates.** 12th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. Beijing, China, 2004.

MARZOUK, H., LANGDON, S.; **The Effect of Alkali-Aggregate Reactivity on the Mechanical Properties of High and Normal Strebgth Concrete.** Cement and Concrete Composities, vol.25, pp.549-556, 2003.

MEHTA,P.K; MONTEIRO, P.J.M. **Concreto: estrutura, propriedades e materiais**. Pini, 1994.

MUNHOZ, F. A. C.; **Efeito das adições nas reações álcali-sílica e álcali-silicato.** Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, SP (2007).

OBERHOLSTER, R.E.; DAVIES, G. **An Acelerated Method for testing The Potential Alkali Reactivity of Silicious Aggregates.** Cement and Concrete Research, vol. 16, pp. 181-189, 1986.

OZOL, M.A. Alkali-Carbonate Rock Reaction. In: Klieger, P., Lamond, J.F. **Significance of test and properties of concrete and concrete making materials. (ASTM/STP 169C)**. Philadelphia, ASTM, 1994. p.372-387.

PAULON, A.W. **Reações Álcali-Agregado em Concreto.** Dissertação Mestrado – Universidade de São Paulo. São Paulo, 1981.

PECCHIO, M.; KIHARA, Y.; BATTAGIN, A. F.; ANDRADE, T. **Produtos da Reação Álcali-Silicato em Concretos de Edificações da Região do Grande Recife.** RAA 2006 - II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, setembro de 2006 (Ibracon).

PEDROZO, P.H.; SAVA,J.A.; LACERDA, L. A.; PAULON; SABBAG, A. F.; CARRAZEDO,R. **Diagnóstico de Previsão da Degradação de Estruturas de Concreto Devido a RAA na UHE Mascarenhas.** São Paulo, 2002.

PIRES SOBRINHO, C. W. A.; GALVÃO, S. P. S.; RANGEL, J. M. **Microscopia Eletrônica como ferramenta para Identificação de Reações Deletérias nos Concretos – Estudo de Casos nos Blocos de Fundações de Edifícios no recife.** II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em estruturas de Concreto. Ibracon, Setembro, 2006.

POWERS, L.J. **Developments in Alkali-Silica Gel Detection.** Concrete Technology, April, 1999.

PRISZKULNIK,S. **Inspeção e Diagnóstico de Estruturas de Concreto Afetadas pelas Reações Cimento-Agregado.** Livro Ibracon: Concreto, Ensino, pesquisa e Realizações, Vol. 2, cap.34, p. 985-1016, 2005.

RIVARD, P.; BERUBÉ, M. A.; OLLIVER, J. P.; BALLIVY, G. **Alkali Mass Balance during the Accelerated Concrete Prism Test for Alkali-Aggregate Reactivity.** Cement and Concrete Research, vol. 33, pp. 1147-1153, 2003.

SALLES, F. M.; KUPERMAN, S. C.; BERTOLUCCI, L.D.V. **Ensaio Acelerado para Verificação da RAA em Prismas de Concreto.** II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em estruturas de Concreto. Ibracon, Setembro, 2006.

SHAYAN, A.; MORRIS, H.; **A Comparison of RTA T636 and ASTM C 1260 Accelerated Mostar Bar Test Methods for Detecting Reactive Aggregates.** Cement and Concrete Research, December, 2000.

SHAYAN, A; XU, A. **Efects of cement composition and temperature of curing on AAR and DEF expansion in steam-cured concrete.** 12ª ICARR – International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, p.773-788. Beijing, 2004.

SHOMGLIN, K.; MONTEIRO, P. J. M.; WENK, H. R. **Effect of Aggregate Deformation on Concrete Expansion.** RAA 2006 - II Simpósio sobre Reação Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. Rio de Janeiro, setembro de 2006 (Ibracon).

SHON, C. S., ZOLLINGER, D.G.; SARKAR, S.L**. Evaluation of modified ASTM C 1260 acelerated mortar bar test for alkali-silica reactivity.** Cement and Concrete Research, v 32, p.1981-1987, 2002.

SHON, C.S.; ZOLLINGER, D.G.; SARKAR, S.L. **Evaluation of Modified ASTM C 1260 Accelerated Mortar Bar test for Alkali-Silica Reactivity.** Cement and Concrete Research, vol.32, pp. 1981-1987, 2002.

SILVA, P. N., **Reação Álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo de Paulo Afonso/CHESF**. Mestrado em Engenharia Civil, Universidade de São Paulo, SP (2007).

STARK, D.C.; **The Moisture Condition of Field Concrete Exhibiting Alkali-Silica Reactivity.** SP-126, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich., pp. 973-987.

SWAMY, R.N; HAMADA, H; TANIKAWA, S; LAIW, J.C. **Influence of Protective Surface Coating on the Structural Behavior of ASR-Affected RC Beams under Sustained Loading.** 12ª ICARR – International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, p.1235-1243. Beijing, 2004.

THOMAS, M.; FOURNIER, B.; FOLLIARD, K.; IDEKER, J.; SHEHATA, M. Test Methods for **Evaluating Preventive measures for controling expansion due the alkali-silica reaction in concrete.** Paper. Cement and Concrete Research , p. 1842-1856, 2006.

TIECHER, F, Dal Molim, D. C. C. **Método de Ensaio da ASTM C 1260: Avaliação das Idades Prescritas para o Estabelecimento da Potencialidade Reativa dos Agregados.** 2006. 178f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TIECHER, F. **Reação álcali-agregado: avaliação do comportamento de agregados no sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado.** 2006. 178f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

TOUMA, W. E., FOWLER, D. W., CARRASQUILLO, R. L. **Alkali-silica reaction in portland cement concrete : testing methods and mitigation alternatives.** Research Project, University of Texas, Austin (2001).

VALGUGA, L.; **Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado**. Doutorado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, RS (2007).

ANEXO I – DOSAGEM DOS PRISMAS DE CONCRETO

Para a confecção da dosagem se faz necessário o cálculo da densidade de todos os agregados Após realização dos ensaios, obteve-se os seguintes resultados para as seis amostras citadas anteriormente.

- **Granito (Embu das Artes):**

Massa Saturada Superfície Seca (M_{sat}) – 3001g

Massa Subersa (M_{sub}) – 1889g

Massa Seca (M_s) – 2984g.

Portanto:

M_s / (M_s - M_{sub}) = 2,725 kg/l.

- **Basalto (Americana):**

Massa Saturada Superfície Seca (M_{sat}) – 3001g

Massa Subersa (M_{sub}) – 1992g

Massa Seca (M_s) – 2961g.

Portanto:

M_s / (M_s - M_{sub}) = 3,055 kg/l.

- **Basalto (Birigui):**

Massa Saturada Superfície Seca (M_{sat}) – 3000g

Massa Subersa (M_{sub}) – 1958g

Massa Seca (M_s) – 2918g.

Portanto:

M_s / (M_s - M_{sub}) = 3,039 kg/l.

- **Granito-Gnaisse I (Recife):**

Massa Saturada Superfície Seca (M_{sat}) – 3000g

Massa Subersa (M_{sub}) – 1879g

Massa Seca (M_s) – 2985,1g.

Portanto:

M_s / (M_s - M_{sub}) = 2,698 kg/l.

- **Quartzito (Ilha-Solteira):**

Massa Saturada Superfície Seca (M_{sat}) – 3001g

Massa Subersa (M_{sub}) – 1863g

Massa Seca (M_s) – 2970g.

Portanto:

M_s / (M_s - M_{sub}) = 2,683 kg/l.

- **Granito-Gnaisse II (Recife):**

Massa Saturada Superfície Seca (M_{sat}) – 3179g

Massa Subersa (M_{sub}) – 1994g

Massa Seca (M_s) – 3179g.

Portanto:

M_s / (M_s - M_{sub}) = 2,697 kg/l.

Possuindo a massa específica dos agregados, é necessário então encontrar a massa específica no seu estado compactado seco. Para todos os agregados utilizados, este parâmetro foi encontrado como sendo bem próximo a 1,5 kg/l, sendo, portanto adotado este valor. A Tabela 35 mostra os agregados utilizados, assim como as suas massas específicas e massas unitárias no estado compactado seco.

Tabela 35. Agregados utilizados na pesquisa.

	Agregados	Massa Específica (Kg/l)	Massa Unit. C.S. (Kg/l)
1	Granito - Usp	2,725	1,5
2	Basalto – Americana	3,055	1,5
3	Basalto – Birigui	3,039	1,5
4	Milonito – Recife	2,698	1,5
5	Granito – Recife	2,698	1,5
6	Quartzito – Ilha Solteira	2,683	1,5

A relação a/c deve estar contida entre 0,42 e 0,45. Fixou-se 0,45 para este parâmetro, de modo que este fosse próximo aos concretos utilizados e obras correntes.

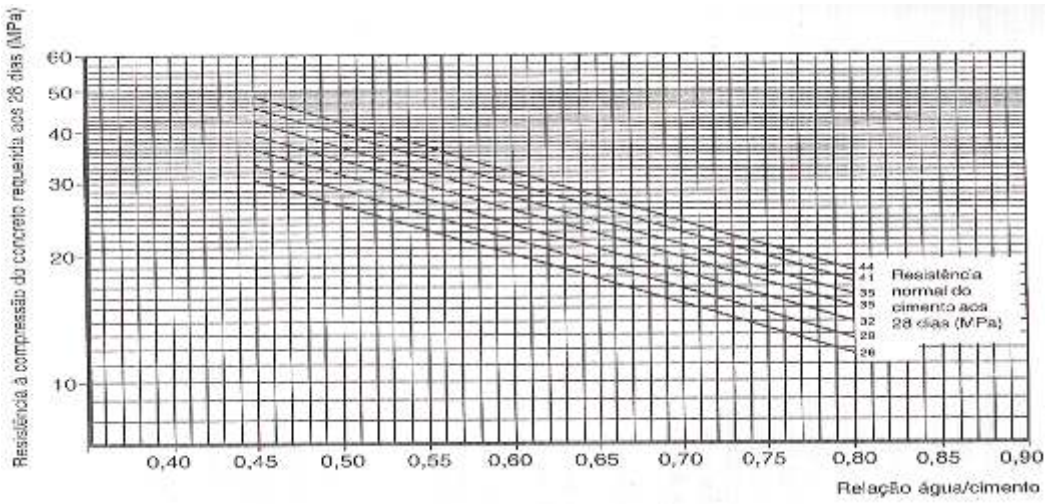

Figura 113. Escolha da relação a/c e a respectiva resistência à compressão.

O consumo de cimento por m^3 de concreto é um parâmetro fixo pela ASTM C 1293, sendo estipulado como 420 kg/m³.

Fixando a relação a/c (0,45), e tendo o consumo de cimento (420 kg/m^3), pode-se então calcular o consumo de água e através da tabela abaixo ter uma noção do abatimento da tal mistura.

Tabela 36. Consumo de água por m^3 de concreto.

Consumo de água Aproximado (Kg/l)					
Abatimento (mm)	**Dimensão Máxima Característica do Agregado (mm)**				
	9,5	**19**	**25**	**32**	**38**
40 a 60	220	195	190	185	180
60 a 80	225	200	195	190	185
80 a 100	230	205	200	195	190
		a/c =	**0,45**	**C.A. (l) =**	**189**

Adotou-se no presente trabalho a areia IPT como agregado miúdo, pois era conhecida a sua não potencial reatividade quando testada segundo o método AMBT, além da necessidade da fixação de uma areia padrão, pois como visto anteriormente, diferentes areias, mesmo sendo inócuas, provocam diferentes expansões no método CPT (para o mesmo agregado graúdo).

No método ACI/ABCP de dosagem, com o módulo de finura da areia (M.F.), e conhecendo o diâmetro máximo do agregado graúdo utilizado, pode-se encontrar a porcentagem de agregado graúdo em relação ao concreto em estado compactado seco.

Como a norma ASTM C 1293 solicita um módulo de finura de 2,7, adotou-se uma porcentagem retida de modo que as granulometrias utilizadas fossem fáceis de serem encontradas no mercado, além de se encaixarem dentro desta exigência. A Tabela 37 demonstra o módulo de finura utilizado.

Tabela 37. Cálculo do módulo de finura da areia.

Areia IPT	(%) Retida	(%) Retida Acumulada	
2,4	0	0	
1,2	35	35	
0,6	25	60	
0,3	25	85	
0,15	15	100	
		M.F. =	**2,8**
		M.F. (ASTM) =	**2,7 ± 0,2**

Utilizando este módulo de finura (M.F.), pode-se perceber através da Tabela 38 que para um diâmetro máximo de 19 mm, tem-se um volume de agregado graúdo

em relação ao concreto no estado compactado seco de aproximadamente 70%. Portanto, a norma ASTM C 1293 de maneira implícita fixa o M.F. e o $D_{máx}$ agregado, obtendo um volume de agregados por m^3 de concreto igual a 70%.

Tabela 38. Volume de estado compactado seco de agregado graúdo.

MF	Volume Compactado Seco (Vc) de agregado graúdo / m3 de concreto Dimensão Máxima (Dmáx), mm				
	9,5	**19**	**25**	**32**	**38**
1,8	0,645	0,77	0,795	0,82	0,845
2	0,625	0,75	0,775	0,8	0,825
2,2	0,605	0,73	0,755	0,78	0,805
2,4	0,585	0,71	0,735	0,76	0,785
2,6	0,565	0,69	0,715	0,74	0,765
2,8	0,545	0,67	0,695	0,72	0,745
3	0,525	0,65	0,675	0,7	0,725
3,2	0,505	0,63	0,655	0,68	0,705
3,4	0,485	0,61	0,635	0,66	0,685
3,6	0,465	0,59	0,615	0,64	0,665
				Vc =	**0,7**

Com o valor do volume compactado seco (Vc), pode-se calcular o consumo de agregados graúdos, como sendo $C_{agr} = V_c * M_c$, onde V_c é o valor da tabela acima encontrado e M_c é a massa unitária compactada.

Como a massa unitária compactada seca adotada para todos os agregados foi a mesma (1,5 kg/l), o consumo dos 6 agregados graúdos foi igual (1050 kg/m³).

O volume de agregado miúdo por m^3 de concreto pode ser calculado, como sendo Vm = 1- (C/ρc + Cb/ρb + Ca/ρa), onde C é o consumo de cimento, Ca é o consumo de água e Cb é o consumo de agregado graúdo. Os dividendos são respectivamente as densidades do cimento, do agregado graúdo e da água.

Logo, o consumo será $C_{agr.miúdo}$ = pm * Vm, onde pm é a massa específica da areia. A Tabela 39 e Tabela 40 mostram o volume e o consumo de agregados miúdos por m^3 de concreto para os seis agregados.

Tabela 39. Volume de agregado miúdo dos traços.

Determinação do Volume de Agregado Miúdo (Litros)	
Volume de agregado miúdo 1	291,06
Volume de agregado miúdo 2	332,69
Volume de agregado miúdo 3	330,88
Volume de agregado miúdo 4	287,21
Volume de agregado miúdo 5	287,21
Volume de agregado miúdo 6	285,03

Tabela 40. Consumo de agregado miúdo dos traços.

Consumo de Agregado Miúdo (Kg/m3)	
Consumo de agregado miúdo 1	793,15
Consumo de agregado miúdo 2	1016,36
Consumo de agregado miúdo 3	1005,53
Consumo de agregado miúdo 4	774,89
Consumo de agregado miúdo 5	774,89
Consumo de agregado miúdo 6	764,74

Com os valores calculados anteriormente, pode-se então determinar os teores de argamassa, assim como os traços para os seis diferentes tipos de agregados.

Tabela 41. Teor de argamassa dos traços.

Teor de Argamassa (%)	
α1	0,536
α2	0,578
α3	0,576
α4	0,532
α5	0,532
α6	0,530

Tabela 42. Traços em massa das seis amostras.

Traço (kg)			
1	1,888447802	2,5	0,45
1	2,419892857	2,5	0,45
1	2,394125824	2,5	0,45
1	1,844965934	2,5	0,45
1	1,844965934	2,5	0,45
1	1,820809341	2,5	0,45

Tabela 43. Traços em kg para 0,006 m^3 de concreto (volume necessário para concretar 3 formas de 7,5 x 7,5 x 28,5 cm).

0,006	c	a	p	água	Kg
1	2,52	4,76	6,3	1,134	
2	2,52	6,10	6,3	1,134	
3	2,52	6,03	6,3	1,134	
4	2,52	4,65	6,3	1,134	
5	2,52	4,65	6,3	1,134	
6	2,52	4,59	6,3	1,134	

Como os agregados graúdos foram considerados com a mesma massa unitária no estado compactado seco, os seis traços possuem a mesma quantidade de material em massa, para todas as granulometrias. A Tabela 44 mostra estas quantidades.

Tabela 44. Agregados graúdos e suas respectivas porcentagens retidas em massa para os seis traços.

Agregados Graúdos				
Agregados	**% Retida 12,5 mm**	**% Retida 9,5 mm**	**% Retida 4,8 mm**	**gramas**
1	2097,9	2097,9	2097,9	
2	2097,9	2097,9	2097,9	
3	2097,9	2097,9	2097,9	
4	2097,9	2097,9	2097,9	
5	2097,9	2097,9	2097,9	
6	2097,9	2097,9	2097,9	

Para os agregados miúdos, os materiais retidos em cada granulometria podem ser visualizados abaixo.

Tabela 45. Agregados miúdos e suas respectivas porcentagens retidas em massa para os seis traços.

Agregados Miúdos					
Agregados	**% Retida 1,2 mm**	**% Retida 0,6 mm**	**% Retida 0,3 mm**	**% Retida 0,15 mm**	**gramas**
1	1665,61	1189,72	1189,72	713,83	
2	2134,35	1524,53	1524,53	914,72	
3	2111,62	1508,30	1508,30	904,98	
4	1627,26	1162,33	1162,33	697,40	
5	1627,26	1162,33	1162,33	697,40	
6	1605,95	1147,11	1147,11	688,27	

ANEXO II – CONFECÇÃO DE EQUIPAMENTO DE BANHO MARIA

O aparelho de banho-maria é composto de uma caixa d água externa que possui aproximadamente 670 litros, e uma caixa d água interna com aproximadamente 296 litros. Ambas são compostas de fibrocimento sem amianto.

Encheu-se a caixa d água externa com água até que a distância entre o topo da mesma e o nível de água fosse de aproximadamente 25 cm. Nesta água, foram depositados os aparelhos de resistência e termostato para elevação e controle de sua temperatura.

Foi colocada uma bomba de aquário com capacidade de locomoção de água de 140 litros/h, para que a água da caixa externa permanecesse com a temperatura constante.

Portanto:

Capacidade do reservatório externo → 670 litros

Capacidade do reservatório interno → 296 litros

Logo,

670 – 296 = 374 litros.

374 litros / 140 litros/h = 2,7 horas

Em aproximadamente 162 minutos (2,7 horas), toda a água da caixa d água externa terá percorrido todo seu espaço.

Figura 114. Resistência do equipamento de banho-maria.

Figura 115. Caixa de controle de temperatura (com termostato ajustado e disjuntor).

Figura 116. Bomba utilizada para rotação da água.

Dentro da caixa d água interna, foram armazenados os prismas de concreto, apoiados em um suporte de madeira.

Figura 117. Suporte para encaixe dos corpos de prova.

Figura 118. Fio da bomba e termômetro do termostato (esquerda inferior).

Para que a caixa d água interna ficasse estável e submersa, foi necessário calcular seu empuxo, considerando que apenas a altura de 30 cm da caixa externa estaria cheia e 25 cm de altura estaria vazia para efeito de manuseio dos prismas.

Sendo:

$$E = d_f * V_f * g$$

Onde,

d_f – Densidade do fluido.

V_f – Volume do fluido ocupado.

g – Aceleração da gravidade.

Substituindo os valores:

$$E = 1000\ kg/m^3 * 0{,}200\ m^3 * 10\ m/s^2 = 2000\ N.$$

Portanto, seria necessária uma massa de 200 kg para que uma força de 2000 N fosse gerada e combatesse o empuxo.

Para que este problema fosse sanado, no fundo da caixa d água interna foi colocado 200 kg de brita. Considerando a massa específica no estado compactado seco da brita de 1,5 kg/l, pode-se efetuar o seguinte cálculo:

$$d = M / V$$

Logo,

$$V = 133{,}34\ litros.$$

Considerando que o volume de brita dentro da caixa interna deva ser de 133,34 litros, pode-se encontrar a altura necessária de brita (h) que gere ao sistema o peso que combata o empuxo.

Sendo:

$$V = [(\pi * d^2)/4] * h$$

E considerando,

d = 8,2 dm.

V = 133,34 litros.

$$h = 25 \text{ cm.}$$

Como os corpos de prova possuem 28,5 cm de altura e tendo que ser colocada uma camada de brita de 25 cm, a caixa d água interna precisaria ter uma altura 53,5 cm para que o ensaio pudesse ser realizado. Como a utilizada possuía 56 cm, o projeto pode ser realizado sem maiores problemas.