

Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP
Departamento de Engenharia de Construção Civil

ISSN 0103-9830
BT/PCC/498

**Efeito de adições ativas na mitigação das reações
álcali-sílica e álcali-silicato.**

Flávio André da Cunha
Maria Alba Cincontto

São Paulo – 2008

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
Departamento de Engenharia de Construção Civil
Boletim Técnico – Série BT/PCC

Diretor: Prof. Dr. Ivan Gilberto Sandoval Falleiros
Vice-Diretor: Prof. Dr. José Roberto Cardoso

Chefe do Departamento: Prof. Dr. Orestes Marracini Gonçalves
Suplente do Chefe do Departamento: Prof. Dr. Alex Kenya Abiko

Conselho Editorial
Prof. Dr. Alex Abiko
Prof. Dr. Francisco Ferreira Cardoso
Prof. Dr. João da Rocha Lima Jr.
Prof. Dr. Orestes Marracini Gonçalves
Prof. Dr. Paulo Helene
Prof. Dr. Cheng Liang Yee

Coordenador Técnico
Prof. Dr. Alex Kenya Abiko

O Boletim Técnico é uma publicação da Escola Politécnica da USP/ Departamento de Engenharia de Construção Civil, fruto de pesquisas realizadas por docentes e pesquisadores desta Universidade.

Este texto faz parte da dissertação de mestrado de título "Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato", que se encontra à disposição com os autores ou na biblioteca da Engenharia Civil.

FICHA CATALOGRÁFICA

Munhoz, Flávio André da Cunha
Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato. – São Paulo : EPUSP, 2008.
18 p. – (Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, Departamento de Engenharia de Construção Civil, BT/PCC/498)

1. Estruturas de concreto 2. Reação álcali-agregado 3. Prevenção 4. Álcali-silicato I. Cincotto, Maria Alba II. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia de Construção Civil III. Título IV. Série

ISSN 0103-9830

EFEITO DE ADIÇÕES ATIVAS NA MITIGAÇÃO DAS REAÇÕES ÁLCALI-SÍLICA E ÁLCALI-SILICATO

MUNHOZ, Flávio André da Cunha (1); CINCOTTO, Maria Alba (2)

(1) Eng. Civil - Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP)

flavio.munhoz@abcp.org.br.

(2) Química. Dr^a Pesquisadora Associada do Dep. de Engenharia de

Construção Civil e Urbana - PCC/EPUSP – cincotto@pcc.usp.br

RESUMO

Foram analisados dois tipos de agregado potencialmente reativos com os hidróxidos alcalinos: *basalto* e *milonito granítico*. O primeiro, proveniente de rocha ígnea, tem como constituintes deletérios vidro, clorofeita, calcedônia (sílica criptocristalina), que dará origem à reação do tipo *álcali-sílica*. O agregado milonito granítico provém de rocha metamórfica, tem como constituintes deletérios quartzo microgranular, quartzo recristalizado, quartzo com extinção ondulante e quartzo e feldspato deformados, que dará origem ao tipo de reação *álcali-silicato*. Com o objetivo de avaliar a eficiência de adições ativas em mitigar as reações, os agregados foram combinados com 16 cimentos com adições ativas. Escória de alto-forno foi adicionada a 15%, 30%, 45% e 60% e cinza volante, a 10%, 15%, 25% e 35%, teores normalmente encontrados nos cimentos brasileiros. Metacaulim foi adicionada a 5%, 10%, 15% e 20%, e sílica ativa, a 5%, 10% e 15%, teores representativos da faixa normalmente adicionada diretamente a concretos. Os resultados indicam que a eficiência das adições ativas varia de acordo com a composição química e mineralógica das adições, da proporção desse material no cimento, e do grau de reatividade do agregado.

ABSTRACT

The experimental work included the analysis of two potentially reactive aggregates to alkali hydroxides: basalt and granite milonite. The igneous basalt carries deleterious constituents such as glass, chloropheite (cryptocrystalline silica), that will give rise to the *alkali-silica* type reaction while the metamorphic granite milonite carries micro granular, re-crystallized, undulate-extinction-bearing quartz and deformed feldspar grains, that give rise to *alkali-silicate* type reaction. Aiming at evaluating how efficient in mitigating these reactions the active admixtures are, these aggregates were mixed with 16 composite cements. The contents of admixtures followed those usually found in Brazilian industrial cements for blast-furnace slag (15%, 30%, 45%, 60%) and fly ash (10%, 15%, 25%, 35%), and those generally added directly to concrete for metakaolin (5%, 10%, 15%, 20%) and silica fume (5%, 10%, 15%). The results show that the efficiency of active admixtures varies according to their chemical and mineralogical composition and proportioning in cement, and to the aggregate reactivity.

1. INTRODUÇÃO

A durabilidade das estruturas de concreto está diretamente ligada aos materiais, aos processos construtivos, às propriedades físicas, às condições de exposição e aos tipos de solicitação. A qualidade dos materiais (cimento, agregados miúdo e graúdo, água e aditivos) pode influenciar a durabilidade, uma vez que a interação desses materiais é que vai conferir ao concreto determinadas propriedades ligadas à sua vida útil.

A durabilidade do concreto está relacionada à maior ou menor capacidade do concreto de resistir a agressões químicas, físicas, mecânicas e biológicas do ambiente para o qual foi projetado ou a interações deletérias internas do próprio concreto. Dentre as agressões químicas destacam-se os ataques por íons cloreto e sulfato, dióxido de carbono, ataques ácidos e as reações álcali-agregado. Esta última se dá entre os hidróxidos alcalinos solubilizados na fase líquida dos poros do concreto e alguns agregados reativos; a reação é lenta, e resulta em um gel que, ao se acumular nos vazios e na interface pasta-agregado, na presença de água, se expande gerando pressão interna no concreto. Ao exceder a sua resistência à tração, promove fissurações, as quais permitem que mais água/umidade difunda no concreto, o que acelera a reação álcali-agregado e torna-o mais vulnerável a outros fenômenos patológicos, comprometendo a durabilidade da estrutura.

A reação álcali-agregado ocorre principalmente em estruturas de concreto em contato com a água, tais como: obra hidráulica, barragem, ponte, pavimento, fundação, entre outras (Kihara, Scandiuzzi, 1993). A RAA afeta grande número de obras de construção civil. Nos casos de danos moderados, o monitoramento periódico e a manutenção das estruturas de concreto podem ser adequados para o controle da patologia. Nos casos mais severos, requer-se a substituição dos elementos afetados, devido ao comprometimento das propriedades mecânicas do concreto.

A RAA compreende três tipos, em função da composição mineralógica dos agregados e do mecanismo envolvido: reação *álcali-silica*, reação *álcali-silicato* e reação *álcali-carbonato*. Três condições são necessárias para que se inicie a RAA no concreto: 1) presença de fases reativas no agregado, 2) umidade suficiente, 3) concentração de hidróxidos alcalinos (K^+ , Na^+ , OH^-) na solução dos poros do concreto suficiente para reagir com as fases reativas dos agregados. Na ausência de um desses fatores, a reação não ocorrerá (ACI 221.1R, 1998; Mather, 1999).

No Brasil, a RAA estava restrita a obras hidráulicas. Em 2005, constatou-se a ocorrência em blocos de fundações em edifícios urbanos, sobretudo residenciais, em Recife/PE, fato inédito para o meio técnico de todo o mundo.

Nos edifícios de Recife contribuíram para a ocorrência da reação a presença de fases reativas nos agregados (quartzo com extinção ondulante e quartzo microgranular) a baixa profundidade do lençol freático, e a disponibilidade de álcalis (Andrade et al., 2006).

A medida mais eficiente para prevenir a RAA é o uso de agregado não-reativo, solução nem sempre prática ou economicamente viável. A utilização de adições ativas (escória de alto-forno, cinza volante, argila calcinada, metacaulim, sílica ativa e cinza de casca de arroz) ou a combinação delas em teores adequados pode reduzir significativamente e mesmo controlar a expansão deletéria relacionada à RAA no concreto. Os teores mínimos dessas adições ao cimento Portland podem variar em função do grau de reatividade do agregado, do teor de álcalis no cimento, da qualidade desses materiais, bem como dos mecanismos de redução da expansão (Malvar et al, 2002).

No Brasil, a escória de alto-forno e as pozolanas de cinza volante e argila calcinada são adicionadas diretamente na produção dos cimentos Portland, enquanto metacaulim e sílica ativa podem ser adicionados ao concreto conforme prescreve a norma NBR 12655/2006. No País são produzidos sete tipos básicos de cimento, os quais, além de clínquer e sulfato de cálcio, podem conter adições de filer calcário, escória de alto-forno e materiais pozolânicos (cinza volante ou argila calcinada) em diferentes teores.

Os cimentos mais eficientes na minimização da RAA são os de alto-forno (CP III) e os pozolânicos (CP IV), que representaram 18% e 7% da produção nacional em 2005, respectivamente. Os outros tipos de cimento, menos eficientes para esse fim, representam 75% da produção nacional (SNIC, 2005).

A cinza volante é uma pozolana eficiente na minimização da RAA, quando presente no cimento Portland em teores de 25% a 35%. Escórias de alto-forno em teores acima de 50%, sílica ativa, em teores de 10 a 12%, e metacaulim, em teores próximos de 10%, também têm sido relatados como eficientes na redução da reação (Malvar et al, 2002).

No entanto, a presença de escória de alto-forno e materiais pozolânicos em alguns tipos de cimento não significa garantia de mitigação da RAA, pois essa dependerá também do teor em que a adição está presente, do grau de reatividade do agregado e do teor total de álcalis no concreto. Por outro lado, esses cimentos com adições não estão disponíveis em todas as regiões do território nacional, pois a sua produção depende da disponibilidade de escória de alto-forno e de materiais pozolânicos.

A expansão deletéria e fissuração do concreto provenientes de RAA também podem ser significativamente reduzidas e mesmo prevenidas pelo uso de cimentos com baixos teores de álcalis ou limitando o teor total de álcalis no concreto a um valor específico, sendo o mais comumente recomendado de $3\text{kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_e$ (Fournier e Bérubé, 2000).

Esse limite de segurança se aplica à maioria dos agregados e pode variar de 1,8 a $3\text{kg/m}^3 \text{Na}_2\text{O}_e$, mas, na prática, depende do grau de reatividade do agregado, do teor de álcalis no cimento e do consumo de cimento no concreto (kg/m^3), das condições de exposição da estrutura, do projeto da estrutura e da própria análise de risco de ocorrência da reação (Fournier e Bérubé, 2000).

A reatividade do agregado pode ser determinada pelo método acelerado das barras de argamassa ASTM C 1260 ou pelo método de longa duração em prismas de concreto ASTM C 1293 ou ainda pela identificação das fases reativas presentes no agregado por análise petrográfica.

Os problemas da engenharia civil surgem quando em determinada região só há agregados reativos e cimentos não-mitigadores da RAA. Em obras correntes de engenharia civil, o investimento para solucionar o problema é alto, o que tem inviabilizado a investigação na busca de solução.

Quando o agregado é reativo e há disponibilidade de cimentos com escória ou materiais pozolânicos, a questão é saber se o teor presente é suficiente para mitigar a reação álcali-agregado. Em caso contrário, qual seria esse teor?

Se o cimento disponível na região não for mitigador da reação e caso seja inviável adquiri-lo em outra região, metacaulim e sílica ativa tornam-se opções técnica e economicamente viáveis. Nesse caso, para o tipo de cimento e agregado disponíveis, quais seriam os teores adequados para mitigar a reatividade do agregado?

A melhor forma de prevenir a patologia referente à RAA é determinar a reatividade do agregado antes de ser usado no concreto e, a partir dessa avaliação, selecionar o cimento Portland mais adequado.

Com base nas questões apresentadas este trabalho tem por objetivo determinar o grau de reatividade dos agregados, identificar as fases reativas e investigar a eficiência de cimentos Portland com adições ativas (escória de alto-forno, cinza volante, metacaulim e sílica ativa) na mitigação da reação álcali-agregado através dos ensaios acelerados em barras de argamassa, imersas em solução alcalina 1N de NaOH a 80°C.

Para mitigar as reações álcali-agregado das amostras selecionadas foram testados 15 tipos de cimento, preparados em laboratório com quatro adições ativas normalmente utilizadas nos cimentos e concretos brasileiros (escória de alto-forno, cinza volante, metacaulim e sílica ativa), e também um cimento industrial (CP V-ARI), sem adição. Os agregados milonito granítico e basalto foram ensaiados pelo método acelerado das barras de argamassa ASTM C 1260, para determinar o grau de reatividade, e ASTM C 1567, para avaliar a eficiência das adições ativas em mitigar as RAA. Todos os materiais utilizados foram caracterizados química, física e mineralogicamente, incluindo a análise petrográfica dos agregados.

2. PROGRAMA EXPERIMENTAL

2.1. Materiais Selecionados

Para a realização do programa experimental foram selecionadas duas amostras de agregados, um milonito granítico proveniente da Região do Grande Recife/PE, e um basalto da Região de Marília/SP, ambos potencialmente reativos com os álcalis. Vale lembrar que rochas basálticas são típicas das regiões Sul e Sudeste e amplamente utilizadas no preparo de concreto destinado a obras correntes e de infra-estrutura, como nas usinas hidroelétricas.

A escória de alto-forno empregada na pesquisa foi produzida pela Companhia Siderúrgica Nacional (CSN), representativa da normalmente empregada pela indústria do cimento no Brasil nos cimentos CP II-E e CP III.

A cinza volante procede do pólo Petroquímico do Sul, foi produzida pela Companhia Petroquímica do Sul - COPESUL, instalada em Triunfo/RS. É equivalente à normalmente adicionada aos cimentos CP II-Z e CP IV produzidos na Região Sul.

O metacaulim utilizado provém da empresa de beneficiamento de minerais não-metálicos Caulim do Nordeste S/A, localizada em Ipojuca/PE, e é similar ao normalmente adicionado aos concretos de cimento Portland.

A sílica ativa Silmix produzida pela Camargo Corrêa Metais S.A. é representativa da normalmente adicionada aos concretos de cimento Portland.

O cimento utilizado é do tipo CP V-ARI, constituído essencialmente por clínquer e sulfato de cálcio, comprovadamente não-mitigador da reação álcali-agregado.

Foram preparados em laboratório 15 cimentos experimentais, substituindo-se, em massa, o CP V-ARI pelas adições ativas. Os cimentos Portland compostos, pozolânicos e de alto-forno são produzidos industrialmente a partir das adições ativas de escória de alto-forno e cinza volante. A escolha dessas adições bem como os teores presentes nos cimentos produzidos em laboratório foram definidos visando representatividade dos normalmente comercializados no mercado brasileiro.

As adições de metacaulim e sílica ativa foram escolhidas por serem as únicas adições ativas normalizadas que podem ser adicionadas ao concreto, segundo a norma NBR 12655. Os teores escolhidos abrangem a faixa comumente adicionada nos concretos de cimento Portland. A Figura 1 ilustra a composição dos aglomerantes empregados.

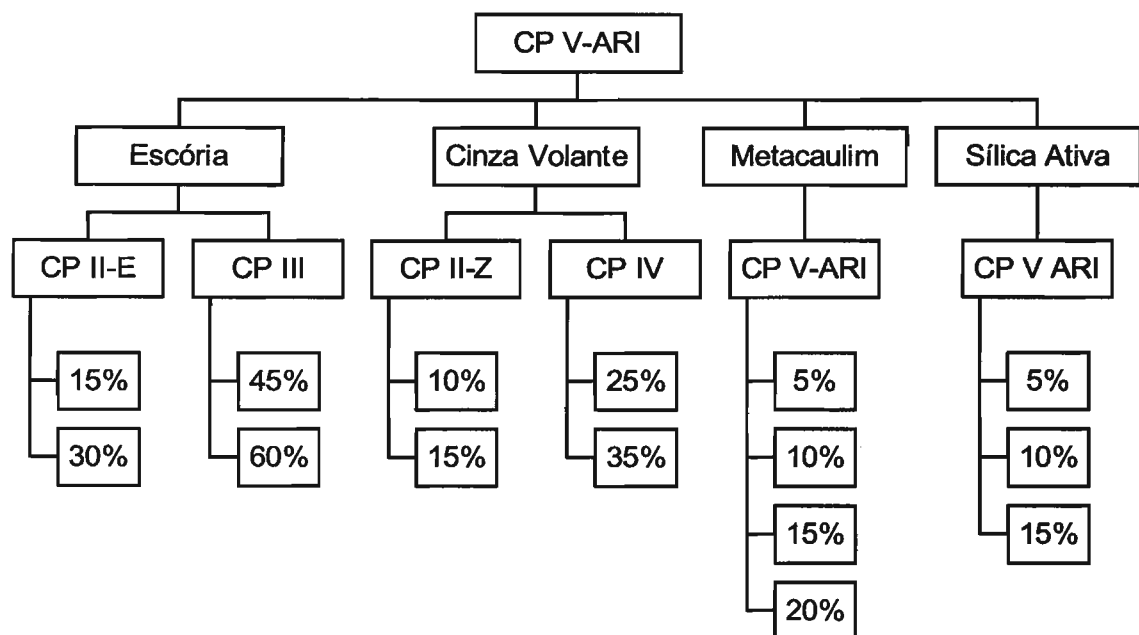


Figura 1 - Resumo da composição dos aglomerantes empregados

3. RESULTADOS

Os materiais empregados na pesquisa foram submetidos aos ensaios de caracterização química, física, mecânica e mineralógica. Uma síntese das caracterizações é apresentada a seguir.

3.1. Caracterização Química dos Aglomerantes

A Tabela 1 apresenta a análise química do cimento e das adições ativas empregados na pesquisa.

Tabela 1 - Resultados percentuais da composição química do cimento e das adições ativas

Ensaio	Cimento		Adições		
	CP V-ARI	Escória	Cinza volante	Metacaulim	Sílica ativa
Perda ao fogo - PF	2,45	0,00	1,31	1,99	3,15
Dióxido de silício - SiO ₂	19,21	35,03	66,39	49,92	91,56
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃	4,97	11,07	18,68	41,39	0,09
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃	2,89	1,96	5,87	3,83	0,30
Óxido de cálcio - CaO	64,52	44,70	2,64	0,69	0,85
Óxido de magnésio - MgO	0,50	4,84	2,89	1,85	0,25
Anidrido sulfúrico - SO ₃	2,92	-	0,12	0,09	0,26
Óxido de sódio - Na ₂ O	0,26	0,10	0,15	0,03	0,05
Óxido de potássio - K ₂ O	0,90	0,31	1,85	0,20	2,40
Anidrido carbônico - CO ₂	1,22	-	-	-	-
Resíduo insolúvel - RI	0,86	-	-	-	-
Óxido de cálcio livre CaO (livre)	1,71	-	-	-	-
Equivalente alcalino total-Na ₂ O _e	0,85	0,30	1,34	0,16	1,63
Óxido de sódio disponível - Na ₂ O	-	0,001	0,000	0,000	0,001
Óxido de potássio disponível - K ₂ O	-	0,002	0,005	0,002	0,003

3.2. Caracterização Físico-Mecânica dos Aglomerantes

A Tabela 2 apresenta as características físicas e o desempenho dos aglomerantes.

Tabela 2 - Características físicas e desempenho dos aglomerantes

Ensaio	Cimento		Adições		
	CP V-ARI	Escória	Cinza volante	Meta-caulim	Sílica ativa
Finura - resíduo na peneira de 75 μ m (%)	0,2	0,2	1,2	0,2	-
Massa específica (g/cm ³)	3,10	2,94	2,21	2,56	2,69
Área específica - Blaine (cm ² /g)	4400	4160	4680	23430	-
Atividade pozolânica com cal (MPa)	-	-	8,8	14,0	-
Atividade pozolânica com cimento (%)	-	-	98,9	89,7	-
Porcentagem de água requerida (%)	-	-	100,0	128,6	-
Atividade hidráulica com hidróxido de sódio a 23°C(MPa)	-	11,0	-	-	-
Atividade hidráulica com hidróxido de sódio a 55°C(MPa)	-	17,9	-	-	-
Expansibilidade em autoclave (%)	0,10	-	-	-	-

3.3. Caracterização dos Agregados

A Tabela 3 apresenta a caracterização química dos agregados milonito granítico e basalto.

Tabela 3 - Composição química dos agregados

Ensaio	Agregados	
	Milonito granítico	Basalto
Perda ao fogo - PF	0,94	1,60
Dióxido de silício - SiO ₂	69,37	50,03
Óxido de alumínio - Al ₂ O ₃	10,38	11,74
Óxido de ferro - Fe ₂ O ₃	2,73	15,39
Óxido de cálcio - CaO	3,45	11,47
Óxido de magnésio - MgO	5,16	5,99
Anidrido sulfúrico - SO ₃	0,13	0,02
Óxido de sódio - Na ₂ O	3,92	1,90
Óxido de potássio - K ₂ O	3,65	0,80

De acordo com a análise petrográfica, a rocha do agregado procedente da Região do Grande Recife/PE é classificada como milonito granítico (álcali feldspato granito protomilonítico). Foi submetida a processos tectônicos que levaram à deformação e cisalhamento da textura, modificando a estrutura cristalina dos silicatos, com aumento de entropia. A presença de cristais de quartzo microgranulares e freqüentemente recristalizados associados aos cristais de feldspatos e quartzo deformados, esse último, com extinção ondulante, indicam susceptibilidade à reação com os álcalis do concreto.

A rocha do agregado procedente da Região de Marília/SP é classificada como basalto. A presença de vidro vulcânico, calcedônia e clorofeita, substâncias minerais normalmente mal cristalizadas com estruturas cristalinas pouco coesas, desordenadas e com muitos defeitos, são os componentes suscetíveis à reação com os álcalis.

➤ **Determinação da reatividade dos agregados (ASTM C 1260)**

Os agregados milonito granítico e basalto foram ensaiados com cimento Portland de alta resistência inicial (sem adição ativa) com o objetivo de avaliar o grau de reatividade das amostras.

O CP V-ARI utilizado é comprovadamente não-mitigador da RAA e apresenta expansão em autoclave inferior a 0,20%, conforme prescreve o método de ensaio ASTM C 1260-05a; 2005.

Segundo os critérios dessa norma, a expansão média aos 14 dias de cura em solução alcalina é tomada como valor de referência para a estimativa da reatividade potencial do agregado com os álcalis. Valores de expansão superiores a 0,20% indicam que o agregado é reativo e que entre 0,10% e 0,20%, o agregado é potencialmente reativo, havendo necessidade de ensaios complementares para decisão quanto ao uso; valores de expansão inferiores a 0,10% indicam que o agregado é inócuo.

A Figura 2 ilustra a evolução da expansão medida até os 28 dias. Os valores limites estão indicados no gráfico, podendo-se observar que, aos 14 dias, ambos estão acima do valor máximo de 0,20%. O milonito granítico apresentou expansão média das barras de argamassa de 0,25% e o basalto de 0,49%, concluindo-se que os dois agregados são, portanto, reativos, em concordância com o indicado pela análise petrográfica.

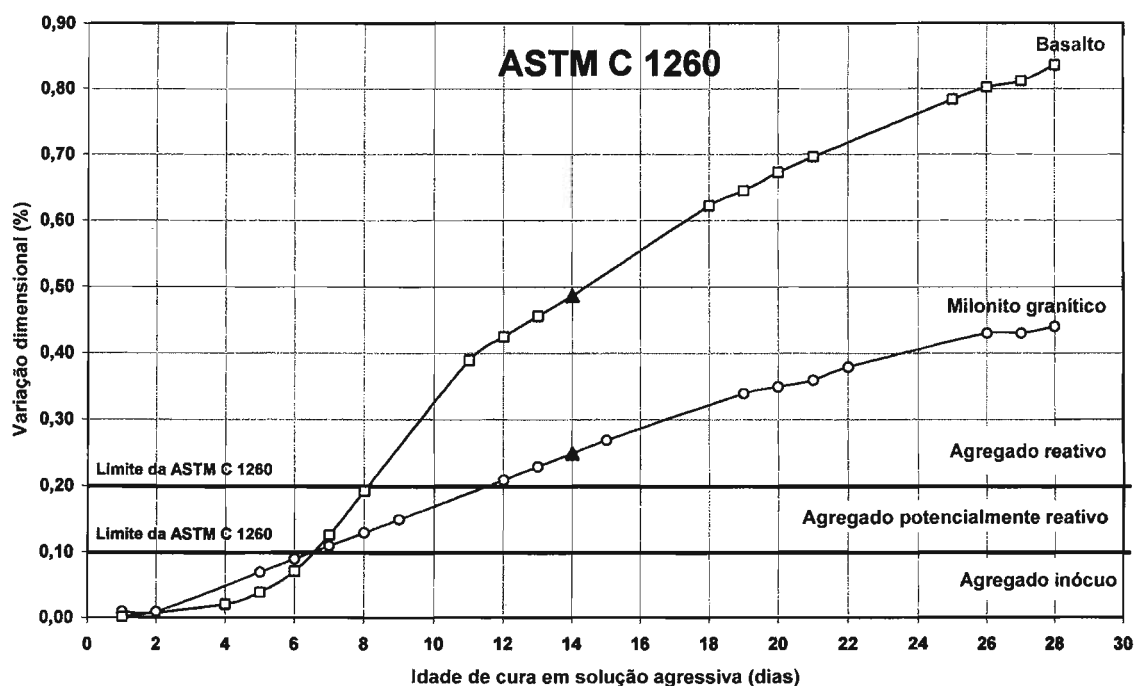


Figura 2 - Evolução da variação dimensional com o tempo de cura em solução alcalina das amostras de agregado

3.4. Avaliação da Eficiência dos Cimentos com Adições Ativas na Mitigação da RAA (ASTM C 1567)

Com o objetivo de mitigar a expansão causada pelas reações álcali-silicato e álcali-sílica, os agregados reativos milonito granítico e basalto foram combinados com 15 cimentos experimentais preparados a partir da substituição parcial do CP V-ARI por adições ativas, conforme definido no programa experimental. Os ensaios foram realizados segundo a ASTM C 1567.

Segundo o critério dessa norma, valores de expansão inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina indicam que a combinação do cimento com adições de escórias de alto-forno, cinza volante, metacaulim ou sílica ativa com o agregado analisado apresenta características favoráveis ao emprego em obras de construção civil, com baixo risco de desenvolvimento de manifestações a patologia referente à RAA. Valores iguais ou superiores a 0,10% indicam potencial para o desenvolvimento de expansão deletéria; a norma sugere que a mesma combinação dos materiais deve ser testada no concreto conforme método constante da norma ASTM C 1293, 2005, ou deve-se aumentar os teores das adições e confirmar a mitigação através de novos ensaios (ASTM C 1567, 2005).

A Figura 3 e a Figura 4 apresentam os resultados da expansão aos 14 e 28 dias de cura em solução alcalina das amostras de milonito granítico e basalto, respectivamente, combinadas com os cimentos com adição em teores crescentes de escória de alto-forno (A), cinza volante (B), metacaulim (C) e sílica ativa (D). As seguintes considerações podem ser tecidas:

- A expansão das barras de argamassa é reduzida sistematicamente com o aumento do teor de adição ativa nos cimentos experimentais, e à medida que o teor de adição aumenta, a diferença de expansão entre 14 e 28 dias diminui.
- Os perfis dos materiais pozolânicos são semelhantes e indicam analogia de mecanismo de reação, diminuindo mais rapidamente, provavelmente pela influência da reação pozolânica.
- O teor mínimo de adição para mitigar a expansão causada pela reação álcali-silicato da amostra de milonito granítico para valores inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina é de: 60% de escória de alto-forno; 16% de cinza volante; 15% de metacaulim e 10% de sílica ativa.
- O teor mínimo de adição para mitigar a expansão causada pela reação *álcali-silica* da amostra de basalto para valores inferiores a 0,10% aos 14 dias de cura em solução alcalina é de: 45% de escória de alto-forno; 20% de cinza volante; 13% de metacaulim e 9% de sílica ativa.

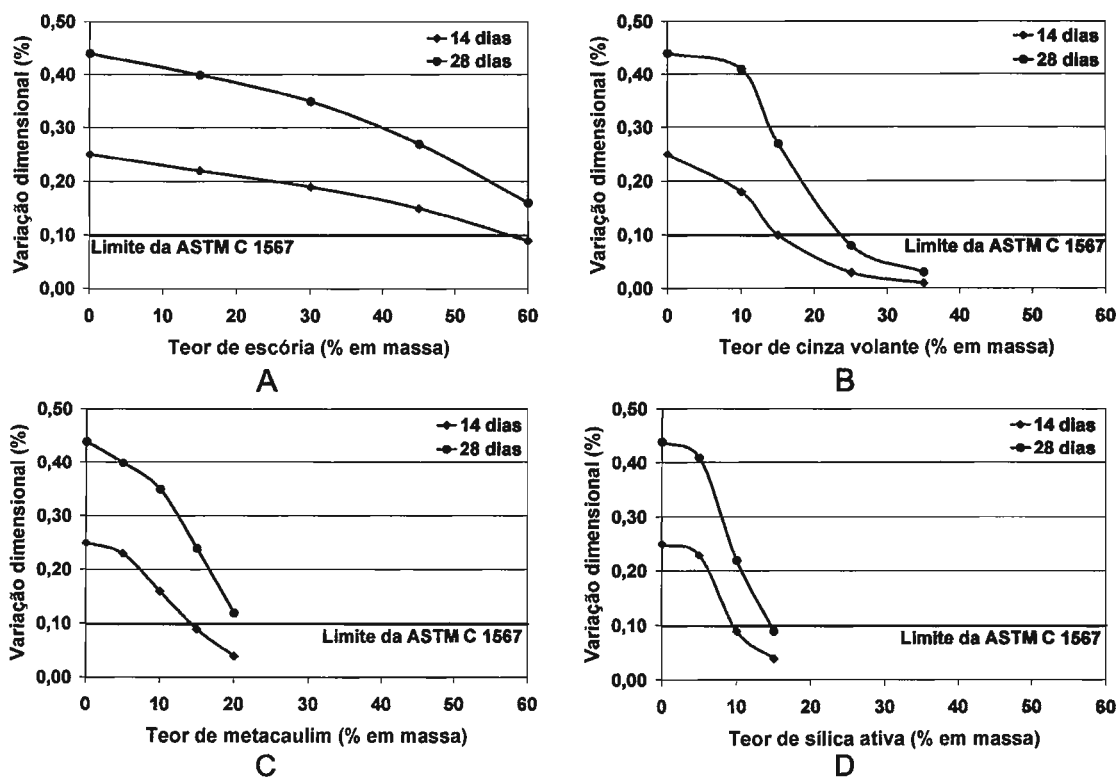


Figura 3 - Efeitos da adição de escória, cinza volante, metacaulim e sílica ativa na redução da expansão do agregado milonítico granítico

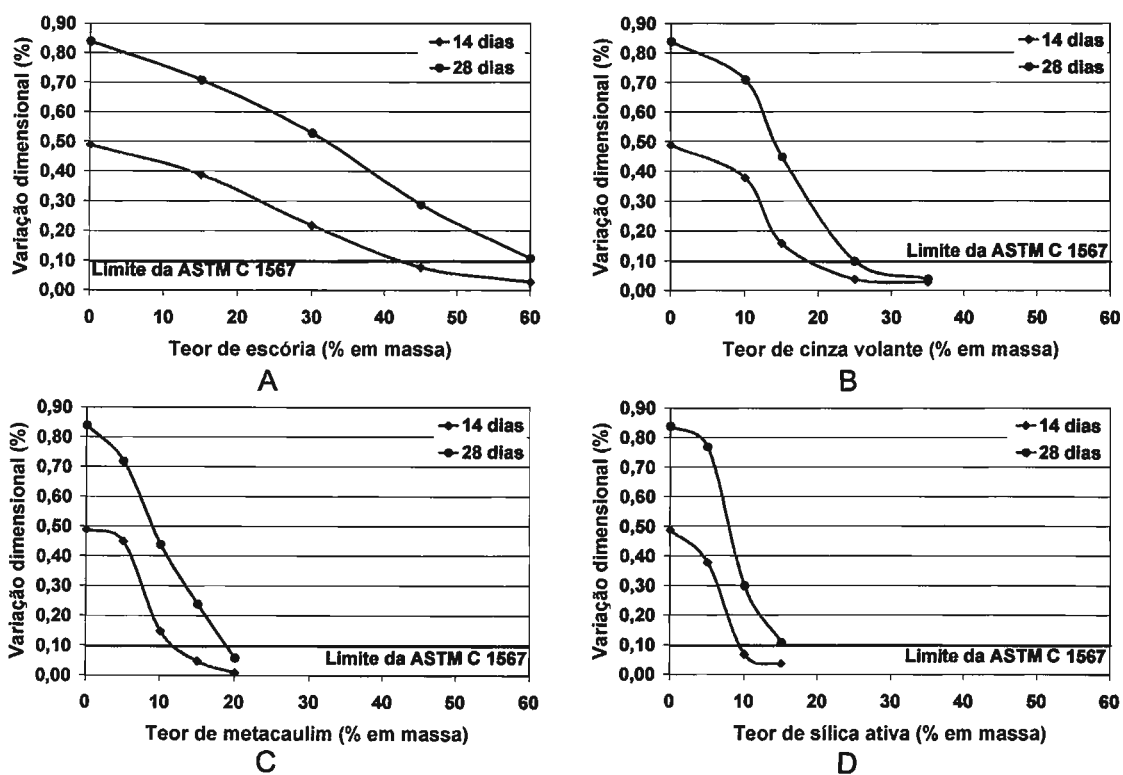


Figura 4 - Efeitos da adição de escória, cinza volante, metacaulim e sílica ativa na redução da expansão do agregado basalto

A Figura 5 apresenta os resultados da expansão aos 14 dias de cura em solução alcalina das amostras de milonito granítico e basalto combinadas com os cimentos com teores crescentes de adição de escória de alto-forno (A), cinza volante (B), metacaulim (C) e sílica ativa (D).

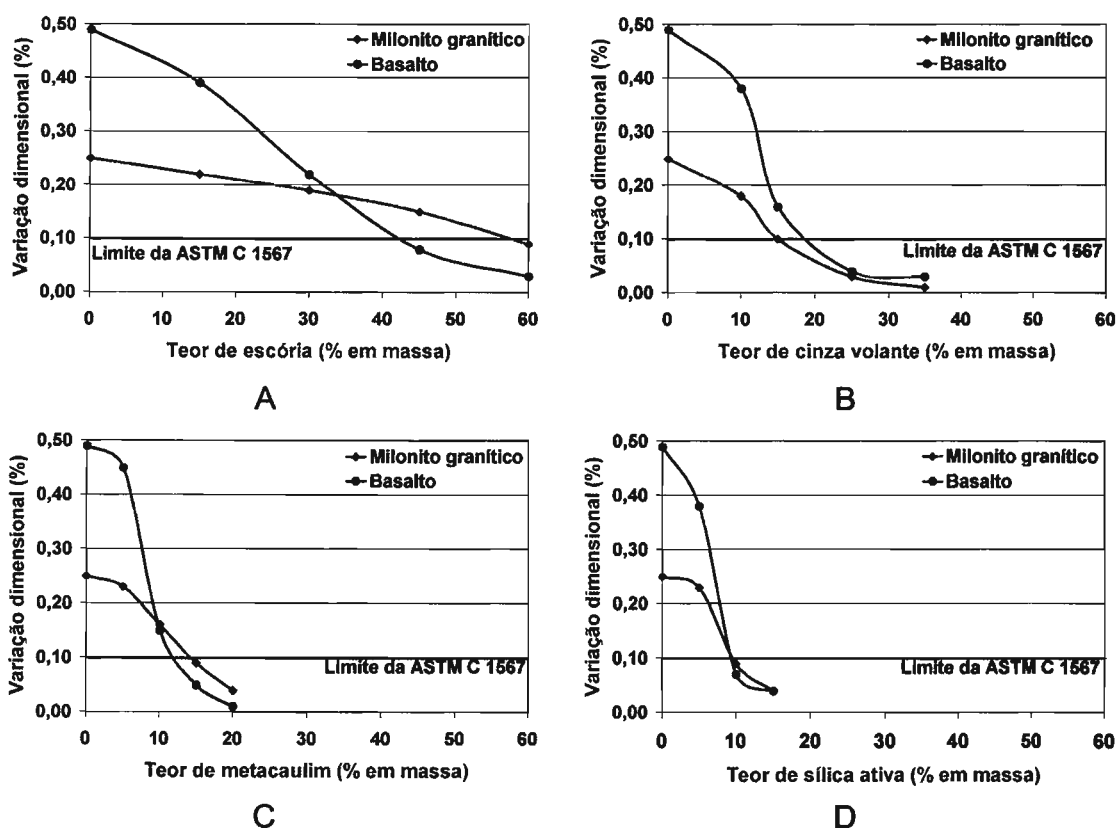


Figura 5 - Ilustra a eficiência dos cimentos com adição de escória de alto-forno, cinza volante, metacaulim e sílica ativa em reduzir a expansão dos agregados milonito granítico e basalto.

Embora a expansão inicial do basalto seja o dobro da expansão do milonito granítico aos 14 dias de cura em solução alcalina com o cimento sem adição, observa-se que as adições são mais eficientes na minimização da expansão do basalto, que produz o tipo de reação álcali-silica, em relação ao milonito granítico, que produz reação tipo álcali-silicato.

Com base nos valores de expansão obtidos com os cimentos experimentais com 15% de adição, comum a todos, verifica-se que a sílica ativa é a *mais* eficiente na minimização das reações álcali-silicato e álcali-silica, seguida pelo metacaulim e cinza volante.

Dentre as adições ativas investigadas, a escória de alto-forno é a *menos* eficiente, pois são necessários teores de adição até seis vezes maiores que da sílica ativa para se obter o mesmo grau de eficiência. Metacaulim e cinza volante apresentaram desempenho semelhante na mitigação da reação álcali-silicato (milonito granítico), mas metacaulim foi mais eficiente na minimização da reação álcali-silica (basalto). A sílica ativa mostrou-se a mais eficiente, pois o teor de apenas 10% mitigou a expansão para níveis aceitáveis.

A menor eficiência da escória de alto-forno está relacionada provavelmente à composição química, cujo teor de cálcio é maior em relação às das outras adições. São necessários maiores teores de adição para reduzir a relação CaO/SiO_2 dos aglomerantes e o teor de Ca(OH)_2 da argamassa após as reações de hidratação.

O desempenho da escória em mitigar a RAA pode ter sido agravado no ensaio acelerado devido à ativação térmica e química, que proporcionou ao sistema maior quantidade de produtos hidratados e, conseqüentemente, preencheu os espaços vazios da pasta, reduzindo assim os poros que podem atuar como minimizadores das tensões. Como a porosidade total foi reduzida, os produtos da reação puderam exercer maior pressão na pasta, contribuindo assim para o aumento da expansão, que é o parâmetro utilizado para avaliar a eficiência das adições.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Basalto e milonito granítico, os dois agregados analisados, são reativos com os hidróxidos alcalinos. Vidro, clorofeita e calcedônia (sílica criptocristalina), presentes no basalto, deram origem à reação do tipo *álcali-silica*. Quartzo microgranular, recristalizado, com extinção ondulante e cristais de quartzo e feldspato deformados do milonito granítico, por sua vez, deram origem ao tipo de reação *álcali-silicato*.

As reações álcali-silica e álcali-silicato apresentaram cinéticas diferentes aos ensaios acelerados em barras de argamassa, relacionadas ao estado termodinâmico da sílica. As fases reativas do basalto são preferencialmente vítreas e amorfas, reagem rapidamente com os hidróxidos alcalinos em função da alta energia interna. Já no milonito granítico, as fases reativas são cristalizadas, as estruturas cristalinas do quartzo e feldspato são desordenadas devido a esforços tectônicos, o que lhes conferiu reatividade com os hidróxidos alcalinos da solução dos poros. O basalto apresentou o dobro da expansão do milonito granítico aos 14 dias de cura.

Todas as adições ativas testadas contribuíram para mitigar a reação álcali-agregado, mas a eficiência variou de acordo com a composição química e mineralógica e sua proporção no cimento, e também com o grau de reatividade do agregado e com o tipo de reação. A sílica ativa foi a mais eficiente na minimização das reações álcali-silicato e álcali-silica, seguida pelo metacaulim, cinza volante e escória de alto-forno.

Os teores mínimos para mitigar a expansão dos agregados analisados foram de 10% e 15%, de sílica ativa e metacaulim, respectivamente. Esse desempenho está provavelmente relacionado à composição química dos materiais e ao diâmetro das partículas, que conferem alta reatividade pozolânica, reduzem de forma acentuada o teor de hidróxido de cálcio da argamassa e favorecem a mitigação da RAA.

No caso da escória de alto-forno, foram necessários maiores teores para reduzir a relação CaO/SiO_2 dos aglomerantes e o teor de Ca(OH)_2 da argamassa após as reações de hidratação. A menor eficiência dessa adição está relacionada à sua composição química, cujo teor de cálcio é maior do que o de outras adições. O pior desempenho da escória em mitigar a RAA pode ter sido agravado no ensaio acelerado devido à ativação térmica e química.

Em suma, os resultados indicam que a eficiência das adições ativas varia de acordo com a composição química e mineralógica das adições, da proporção desse material no cimento, do grau de reatividade do agregado e do tipo de reação álcali-agregado. Conclui-se que esses agregados, quando usados em obras de engenharia civil, devem ser adequadamente combinados a cimentos com adições ativas.

5. BIBLIOGRAFIA

ACI COMMITTEE 221. ACI 221.1R-98. State-of-the-art: Report on alkali-aggregate reactivity. Farmington Hills, Michigan: American Concrete Institute, p.1-31, 1998.

ANDRADE et al. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na Região Metropolitana do Recife. In. II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO, 2006, Rio de Janeiro.

_____. **ASTM C-1260/05a**. Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method). Philadelphia, 2005. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrete and Aggregates).

_____. **ASTM C-1567/04**. Standard Test Method for Determining the Potential Alkali-Silica Reactivity of Combinations of Cementitious Materials and Aggregate (Accelerated Mortar-Bar Method). Philadelphia, 2005. section 4 (Construction), v. 04.02 (Concrete and Aggregates).

CHATTERJI, S. Some fundamental aspects of alkali-silica reaction. In: Proceedings of the 11th INTERNATIONAL CONFERENCE ON ALKALI - AGGREGATE REACTION, 2000, Quebec, p. 21-29.

CHATTERJI, S. Chemistry of alkali-silica reaction and testing of aggregates. Cement & Concrete Composites 27 (2005) 788-795.

FOURNIER, B., BÉRUBÉ. M. A. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. Can. J. Civ. Eng. 27 (2000) p.167-191.

GLASSER, L. S.; KATAOKA, N.. The chemistry of alkali-aggregate reaction. Cement and Concrete Research. 11 (1981) p. 1-9.

HASPARYK, N. P. Investigação dos mecanismos da reação álcali-agregado – efeito da cinza de casca de arroz e da sílica ativa. 1999. 257 p. Dissertação (Mestrado) - UFG, Escola de Engenharia Civil. Goiânia, 1999.

HASPARYK, N. P. Investigação de concretos afetados pela reação álcali-agregado e caracterização avançada do gel exsudado. 2005. 326p. Tese (Doutorado em Engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre, 2005.

KIHARA, Y. Reação álcali-agregado: aspectos mineralógicos. In: 1º SIMPÓSIO NACIONAL DE AGREGADOS, 1986, São Paulo. *Anais...*São Paulo: Escola Politécnica da USP, 1986.

KIHARA, Y & SCANDIUZZI, L. Reação álcali-agregado: mecanismo, diagnose e casos brasileiros. In: 3º CONGRESSO BRASILEIRO DE CIMENTO, 1993, São Paulo. *Anais...*São Paulo: Associação Brasileira de Cimento Portland, 1993, v.1, p. 319-338.

MALVAR, L. J. et al. Alkali-Silica Reaction Mitigation: state of the art and recommendations. *ACI MATERIALS JOURNAL*, v. 99, n. 5, p. 480-489, 2002.

MATHER, B., How to make concrete that will not suffer deleterious alkali-silica reaction, *Cement and Concrete Research* 29 (1999) 1277-1280.

MUNHOZ, F.A.C., Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato. 2007. 165 p. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

NEW ZEALAND. Cement & Concrete Association of New Zealand. Alkali Silica Reaction Minimising the Risk of Damage to Concrete Guidance Notes and Recommended Practice(Second Edition). Technical Report 3. New Zealand, 2003. 84p.

SINDICATO NACIONAL DA INDÚSTRIA DO CIMENTO (SNIC). Relatório anual de 2004. Rio de Janeiro 2005. Disponível em: <http://www.snic.org.br/25set1024/abre.asp?pagina=imprensa>. Acesso em 18 jan. 2007.