

Capítulo I

1- Introdução

1.1- Considerações gerais

Entre os vários objectivos da construção sustentável encontramos a utilização do betão com agregados reciclados da construção e demolição em novas construções, de forma a fazer um reaproveitamento do material já existente.

Segundo PALIARI *et al.* (2000), actualmente na Europa estima-se que todos os anos haja um desperdício de aproximadamente 200 milhões de toneladas de resíduos de construção e demolição tais como betão, pedras e recursos minerais valiosos. CARRIJO (2005) refere no seu trabalho que esta quantidade de material desperdiçado seria suficiente para construir, todos os anos, uma estrada com 6 vias que teria a mesma distância que separa Roma e Londres.

Um dos grandes problemas que se põe ao fabrico do betão é a utilização de recursos naturais não renováveis, uma vez que assistimos a uma preocupante diminuição destes materiais que, pelas suas características, garantem a estabilidade, durabilidade e desempenho das estruturas de betão. A análise do desperdício do betão não só contraria o impacto ambiental negativo e a limitação dos recursos naturais, como também estimula o reaproveitamento de desperdícios existentes para a utilização de novos materiais. Desta forma o betão fabricado com base em agregados reciclados contribui para um desenvolvimento sustentável.

Para que o uso de agregados reciclados no fabrico de betão seja acreditado, é imprescindível comprovar a qualidade dos novos agregados e do betão com incorporação parcial ou total nos agregados reciclados.

Vários estudos têm sido realizados de forma a comparar as características físicas do betão convencional com as do betão com agregados reciclados. Alguns desses estudos exibem resultados satisfatórios em relação à sua utilização em estruturas.

Entre as várias questões que se colocam acerca do betão com agregados reciclados, uma das mais importantes é a de como se comportará este material perante processos de deterioração que podem ocorrer nos betões convencionais, tais como: a corrosão das armaduras, a acção gelo-degelo, o ataque por sulfatos e as reacções álcalis-agregado.

As reacções álcalis-sílica, álcalis-silicato e álcalis-carbonato englobam-se no termo reacção álcalis-agregado, embora a primeira reacção referida seja a que apresenta maior relevância a nível nacional e internacional.

1.2- Relevância do tema

A reacção álcalis-sílica (RAS) é um fenómeno patológico que ocorre no betão e que pode desencadear problemas tanto a nível estrutural como operacional. Dependendo das condições a que a estrutura de betão está exposta, esta reacção pode gerar expansões internas dependendo, entre outras condicionantes, do grau de reactividade do agregado.

O desenvolvimento deste fenómeno patológico no betão pode potenciar a degradação e a desactivação forçada de diversas estruturas, tais como barragens, fundações de pontes, entre outras. Por esta razão, o estudo de adições mitigadoras da reacção expansiva do betão, neste caso específico com o uso de agregados reciclados com potencialidade reactiva, tem interesse na tecnologia das estruturas de betão.

1.3- Objectivos

Entre os objectivos desta dissertação, devem ser destacados alguns aspectos relevantes tais como:

- colaborar com o avanço da fronteira actual do conhecimento sobre os efeitos da reacção álcalis-sílica em betões com agregados reciclados, utilizando as técnicas empregadas nos betões convencionais;
- analisar a potencialidade do metacaulino e da pozolana de vidro na mitigação das reacções álcalis-sílica em betões com agregados grossos reciclados, através do ensaio acelerado em barra de argamassa (método ASTM C1260) e do ensaio acelerado em barra de betão adaptada (método CMBT);
- análise da correlação existente entre as metodologias de ambos os métodos;
- avaliar a reactividade dos agregados reciclados através dos ensaios realizados;

1.4- Estrutura da dissertação

A elaboração desta dissertação desenvolve-se em cinco capítulos, que se apresentam de seguida, e que desenvolvem a temática da mitigação de reacções expansivas em betões com agregados reciclados.

No Capítulo I, fez-se uma introdução sintetizada sobre o tema da dissertação, referindo-se também o seu conteúdo.

No Capítulo II, discute-se a reacção álcalis-agregado (RAA), mais propriamente a reacção álcalis-sílica. Aborda-se sucintamente a reacção álcalis-sílica-silicato e a reacção álcalis-carbonato.

No Capítulo III, apresenta-se o estado actual de conhecimento sobre a reacção álcalis-sílica em betões convencionais e em betões com agregados reciclados.

No Capítulo IV, descreve-se o programa experimental referindo as características dos materiais usados, a composição das misturas efectuadas e as metodologias de avaliação da reacção álcalis-sílica.

No Capítulo V, discute-se os resultados obtidos no trabalho experimental.

No Capítulo VI, apresentam-se as principais conclusões sobre o estudo.

No Capítulo VII, apresentam-se recomendações para estudos futuros.

Capítulo II

2- Reacção Álcalis-agregado

2.1- Introdução

A reacção álcalis-agregado (RAA) é uma reacção química que acontece entre os álcalis, geralmente derivados do cimento, e alguns dos minerais constituintes dos agregados. Esta reacção tem como produto um gel que ao ser colocado em contacto com a água aumenta o seu volume, sendo este aumento a causa das tensões internas de tracção no betão, que origina fissuras generalizadas. Podemos assim verificar que esta reacção é uma das muitas causas das anomalias a que o betão está sujeito.

Os estudos mais primitivos sobre a reacção álcalis-agregado datam de 1940 e tem a autoria de STANTON. Este constatou que a expansão e a fissuração com perda de consistência, elasticidade e durabilidade da estrutura de betão estão na base do seu quadro patológico. No início dos anos 70 foram relatados vários casos de anomalias em materiais deste tipo em diversos países, levando ao início de uma investigação mais intensiva sobre este tipo de reacção. No entanto, ainda recentemente, as RAA não eram uma causa de preocupação nas obras civis, pois esta reacção é muito comum em betões maciços bastante sujeitos a humidade (ex.: barragens). Todavia registaram-se muitos casos de RAA em pontes, viadutos, estradas e edifícios, o que levou a uma crescente preocupação em relação a estas reacções.

As RAA condicionam a durabilidade do betão, pois trata-se de uma anomalia que ocorre a longo prazo, sendo o potencial agregado reactivo um constituinte necessário à reacção.

A cristalinidade e a área superficial são exemplos de parâmetros morfológicos que influenciam as características reactivas de um agregado. Como é sabido as moléculas de água e de sílica são geometricamente compatíveis, o que permite que a água possa substituir a sílica na estrutura de alguns agregados. Nos agregados assim formados, vamos verificar que a sua integridade estrutural estará enfraquecida e que este será mais reactivo, uma vez que as ligações de hidrogénio são mais fracas do que as ligações siloxano originais (LOPES, 2004; PETERSON *et al.*, 2000).

Os agregados com estruturas cristalinas pobres têm uma maior probabilidade de sofrer uma reacção álcalis-agregado, uma vez que estes têm mais pontos expostos ao ataque dos iões de

hidroxila, pois segundo afirmou PETERSON *et al.* (2000) a susceptibilidade às RAA relaciona-se com a quantidade de pontos disponíveis para ocorrer o ataque da hidroxila.

Em relação aos betões com agregados reciclados, o aparecimento das RAA é uma consequência das potencialidades reactivas dos agregados do betão que foi submetido à reciclagem.

2.2- Reacção Álcalis-Sílica

2.2.1- Factores necessários para a ocorrência da reacção

O teor de álcalis presente nos betões, que resulta do conjunto entre o teor de álcalis do cimento disponível nas soluções dos poros e a quantidade de álcalis incorporada no betão por adições, é o factor que influencia a RAA. Aos álcalis disponíveis acrescenta-se a quantidade e a granulometria dos materiais reactivos, assim como a relação entre o equivalente alcalino e a percentagem de material reactivo (LEVY, 2001).

A velocidade e a intensidade a que ocorre uma reacção de expansão em betões são condicionadas pela natureza e concentração da fase reactiva do agregado (KYHARA, 1997); por sua vez, o comportamento do betão quando sujeito a uma RAA é bastante influenciado pelas variações de temperatura e humidade.

Nas reacções álcalis-sílica, que podem demorar dez ou mais anos a se desenvolver, é necessário que em simultâneo se verifique a existência de quantidades suficientemente elevadas de álcalis e de sílica reactiva nos agregados, assim como uma percentagem de humidade igualmente alta (LOPES, 2004). Esta reacção exhibe-se como micro fissuras nas estruturas de betão.

2.2.1.1- OS ÁLCALIS

Na química do cimento, são considerados como álcalis apenas o sódio e o potássio, contudo já do ponto de vista químico os álcalis são os elementos que se localizam na primeira coluna da tabela periódica.

Oriundos da matéria-prima utilizada para o fabrico do cimento, especialmente o calcário, marga, argila, xisto argiloso ou do carvão utilizado por vezes como combustível, os álcalis do cimento portland encontram-se essencialmente sob a forma de sulfatos, silicatos e aluminatos. Os álcalis que se encontram no betão têm, na sua maioria, origem no cimento, embora possa advir de outros constituintes ou condições de exposição. Podem também contribuir no fornecimento dos álcalis alguns minerais dos agregados, o contacto com a água do mar, a utilização de água do mar na amassadura ou os químicos utilizados em acções de degelo (FERNANDES, 2005).

No cimento, a presença de álcalis resulta do processo de calcinação do clínquer do cimento. Os iões K^+ e Na^+ são vaporizados devido às altas temperaturas nos fornos. À medida que o clínquer é transportado através do forno, dá-se a condensação dos mesmos, criando uma camada superficial de álcalis. Alguns álcalis permanecem na superfície do clínquer, enquanto outros se encontram dentro da sua estrutura (PETERSON *et al.*, 2000).

Na hidratação do betão, os álcalis de superfície encontram-se rapidamente mais disponíveis, enquanto os outros se mostram disponíveis no decorrer do processo. A Figura 1 mostra a concentração de iões da solução intersticial ao longo do tempo de cura, onde é visível que os álcalis são predominantes na solução aquosa que preenche a matriz do cimento (KURTIS *et al.*, 2002).

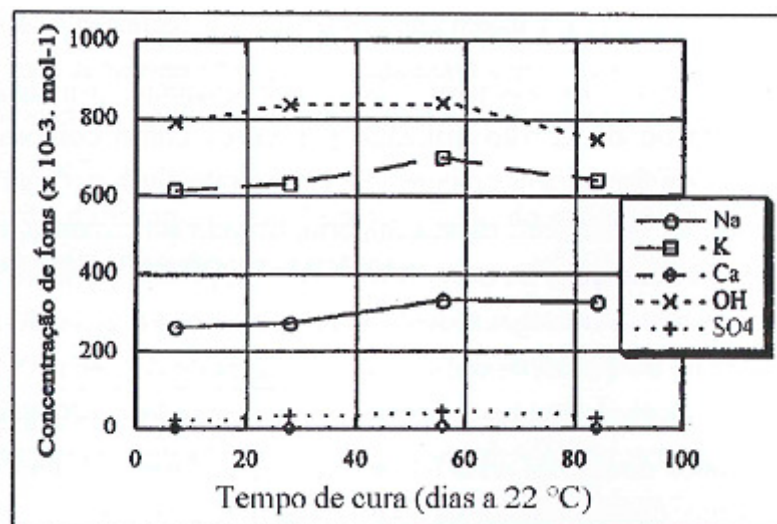


Figura 1: Concentração de íons na solução dos poros do cimento ao longo do tempo de cura

Fonte: KURTIS *et al* (2002)

Por convenção, a composição dos álcalis no cimento de portland é calculada a partir do óxido de sódio equivalente, através da seguinte equação (HOBBS, 1988; POOLE, 1992; FERNANDES, 2005):

$$Na_2O_{eq} = Na_2O + 0,658K_2O$$

O valor da razão entre as massas dos dois óxidos obtido na expressão é 0,658. Os métodos de análise aos álcalis do cimento estão definidos na ASTM C 114 e na BS EN 196-21.

Os álcalis são facilmente solúveis na água dos poros e são apenas parcialmente incorporados nos produtos de hidratação do cimento, o que faz com que a concentração de hidroxilos aumente, aumentando igualmente o pH da solução entre 12,4 e um valor entre 13 e 14 (LOPES, 2004). Segundo HOBBS (1988), no betão com um elevado teor em álcalis, o pH varia entre os 13,5 e 13,9, enquanto no betão com baixo teor em álcalis varia entre 12,7 e 13,1.

O aumento de iões hidroxilo e a subida do pH do meio potencia a ocorrência de reacções álcalis-sílica (FERNANDES, 2005; ACI, 1998). Os óxidos de sódio e potássio apresentam valores reduzidos da ordem de 0,3 a 1,2% da massa de cimento (FERNANDES, 2005; TAYLOR, 1997).

De forma a prevenir a ocorrência de reacções álcalis-sílica, ignorando os álcalis que surgem no betão por outras fontes que não o cimento, a ASTM C 150-02 (2003) e POWER E STEINOUR (1955A,B) sugerem que os valores $Na_2O_{equivalente}$ inferiores a 0,6% no cimento poderão prevenir o aparecimento de reacções (FERNANDES, 2005). Por outro lado, outros autores (PRINCE E PERAMI, 1993; STIEVENARD-GIREAUD, 1987) consideram que, utilizando agregados reactivos no betão, o cimento tenha de conter somente 0,3 a 0,4% de $Na_2O_{equivalente}$ para minimizar o risco de reacção.

O conteúdo de álcalis no betão é em função do nível de álcalis no cimento e do conteúdo de cimento no betão. A seguinte equação traduz o conteúdo em álcalis no betão (A), em massa por unidade de volume (ICOLD, 1991; WEST, 1996; FERNANDES, 2005):

$$A = \frac{C \cdot a}{100}$$

Onde:

- A- Conteúdo em álcalis no betão (kg/m³);
- a- Teor em álcalis do cimento (%);
- C- Conteúdo de cimento no betão (kg/m³).

A totalidade de álcalis do betão deve ser restringida, não sendo apenas dependente da quantidade de álcalis do cimento. Para minimizar a reacção álcalis-sílica é necessário contabilizar a possível contribuição de álcalis dos componentes de betão, em que estes existam em maior ou menor percentagem, e limitar o valor máximo em álcalis no betão.

O limite máximo sugerido de álcalis no betão, contabilizando os álcalis do cimento, dos adjuvantes e adições dos agregados e de outras fontes, é de 3kg de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{equivalente}}$ por metro cúbico de betão, excepto em estruturas vulneráveis (CONCRETE SOCIETY, 1987; BRE DIGEST 330, 1991; FERNANDES, 2005).

Para quantidades semelhantes de álcalis, ocorrem variações significativas de expansibilidade. As diferenças podem atribuir-se a (FORADABA, 2005):

- diferentes velocidades na libertação de álcalis no cimento;
- variações na relação sódio / potássio dos cimentos;
- diferentes velocidades no desenvolvimento da força expansiva.

No desenvolvimento de reacções álcalis-sílica, a quantidade de álcalis tende a não ser um critério determinante, mas o factor principal parece residir na solubilização do agregado sob o ataque dos iões OH^- (PRINCE E PERAMI, 1993; FERNANDES, 2005).

A partir da década de 1980, tem sido estudada por diversos investigadores, a contribuição dos álcalis dos agregados para a quantidade total de álcalis do betão, após se ter denotado que, embora com o elevado teor em álcalis do cimento, este não preenchia a totalidade de álcalis do betão.

A “teoria da solução”, foi apresentada por VAN AARDT E VISSER (1977), na qual propõe explicar a contribuição dos agregados para os álcalis. Contudo, segundo autores, o $\text{Ca}(\text{OH})_2$ reage com o feldspato dos agregados, libertando KOH e NaOH e/ou silicato de cálcio é substituído por silicatos de potássio ou sódio, concentrando-se o cálcio em volta e dentro do agregado. A partícula de agregado fica rodeada de um gel semilíquido que confere o aspecto envernizado e forma os halos escuros nas partículas do agregado, que se observam por vezes no betão (FERNANDES, 2005).

Os álcalis dos agregados contribuem para a reacção álcalis-sílica, conforme tem vindo a ser confirmado. VAN AARDT E VISSER (1977) concluíram que a utilização de rochas feldspáticas que podem libertar álcalis devia ser considerada, em particular os granitos por conterem feldspatos alcalinos. Também STIEVENARD-GIREAUD (1987) e MARC-ANDRÉ BÉRUBÉ (2002) partilham da mesma opinião em relação aos feldspatos e micras (FERNANDES, 2005; BEN HABA, 2006).

Numa campanha experimental, GRATTAN-BELLEW E BEAUDOIN (1980), com o objectivo de analisar o efeito da incorporação de flogopite no cimento, verificaram que o potássio solúvel da flogotipe aumentava o conteúdo em álcalis da solução intersticial, aumentando a velocidade de reacção com agregados reactivos. LARIVE (1990) afirma ainda que, na reacção álcalis-agregado, o consumo de álcalis pode ser dez vezes superior ao que é fornecido pelo cimento (FERNANDES, 2005).

GRATTAN-BELLEW (1994) verificou que a quantidade de álcalis no betão estudado era superior ao que estava estimado no cimento de origem, num estudo a estruturas de betão com agregados constituídos por calcário argiloso contendo ilite. Para concluir, assim, que houve uma contribuição do agregado para os álcalis da solução intersticial (FERNANDES, 2005).

O fornecimento de álcalis pelos agregados foi explicado, por LE ROUX (1991) e LE ROUX *et al.* (1999), pela solubilização dos feldspatos, das micas e das argilas dos agregados, embora estes agregados não libertem facilmente sódio ou potássio da rede cristalina (FERNANDES, 2005).

De modo a minimizar o risco de reacção álcalis-agregado no betão, a utilização de cimentos com baixos teores em álcalis, não é assim condição suficiente para que a reacção não ocorra, pois também os agregados poderão dar a sua contribuição para o aumento do teor em álcalis.

A contribuição dos agregados para os álcalis da solução foi o objectivo de um estudo realizado por CONSTATINER E DIAMOND (2003). Os investigadores produziram argamassas com cimentos de reduzido teor em álcalis e agregados de feldspato, verificando uma libertação de álcalis para a solução existente nos poros quando os feldspatos e possivelmente outros minerais se encontravam envolvidos por pasta de cimento (FERNANDES, 2005).

A confirmação que quantidades significativas de álcalis activos são libertadas ao decorrer do tempo para a solução intersticial do betão, surge em trabalhos mais recentes, BÉRUBÉ *et al.* (2002, 2004 A,B). A contribuição encontrada, especialmente elevada em agregados graníticos, foi considerada responsável pelo aparecimento de casos de degradação do betão devido à reacção álcalis-sílica em estruturas onde foi utilizado cimento com teor em álcalis inferior ao limite máximo estabelecido (SANTOS SILVA, 2006).

Esta constatação constitui uma chamada de atenção em relação à utilização de betões com agregados reciclados pois desconhece-se o estado da reactividade nos agregados reciclados face à nova mistura. Torna-se assim de elevada importância conhecer o comportamento do betão com agregados reciclados face à reacção álcalis-sílica, ultrapassando a situação de impasse das especificações sobre o agravamento do desenvolvimento da reacção nos betões por utilização de agregados reciclados.

2.2.1.2- A SÍLICA

Segundo alguns estudos, qualquer agregado que tenha sílica na sua constituição tem potencial para participar na reacção álcalis-sílica (KURTIS *et al.* 2002). O quartzo possui na sua superfície ligações Si-O polarizadas negativamente, o que possibilita a reacção expansiva, apesar de este ser altamente cristalino. A opala e a obsidiana, são exemplos de rochas siliciosas com estruturas amorfas e desordenadas, que têm a particularidade de serem susceptíveis ao ataque de álcalis. As sílicas cristalinas polimorfas (ex.: cristobalita e trimita) destacam-se também por possuírem elevado potencial reactivo (LOPES, 2004).

A unidade estrutural básica da sílica (SiO_2) é descrita por POWER E STEINOUR (1955A; 1955B) como sendo um ião Si^{4+} rodeado por quatro iões de oxigénio O^{2-} com disposição tetraédrica (Figura 2). Por sua vez, as partículas de sílica compõe-se de tetraedros ligados entre si pelos seus vértices, sendo que cada um desses vértices está ocupado por um oxigénio comum a dois tetraedros. Na forma cristalina (Figura 3), a estrutura interna dos tetraedros apresenta-se com formas orientadas, com estes ligados de modo a criar uma rede tridimensional orientada. Enquanto isso, nas formas amorfas (Figura 3) esta estrutura interna dos tetraedros forma uma rede aleatória, com estrutura interna desordenada (FERNANDES, 2005).

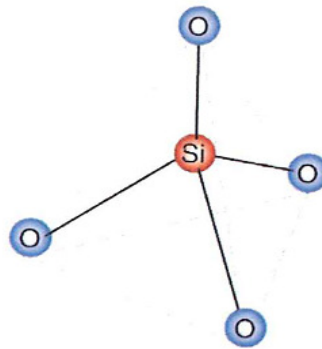


Figura 2: Tetraedro de sílica

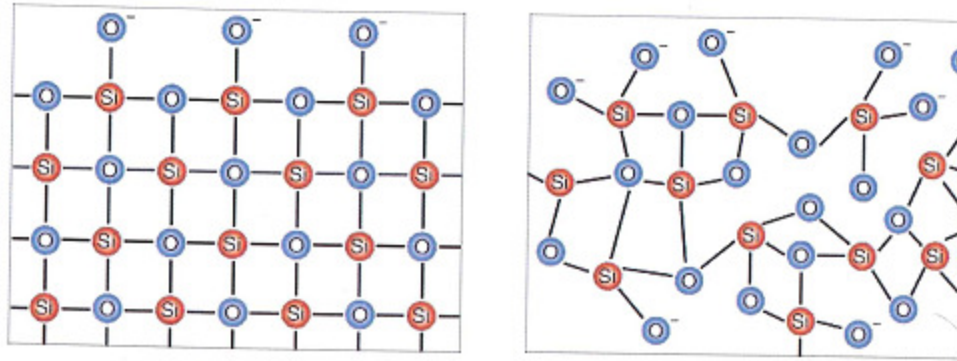


Figura 3: Sílica cristalina (esquerda) e sílica amorfa (direita)

No plano e com a superfície não hidratada, a estrutura da sílica apresenta-se com cargas neutralizadas e equilibrada interiormente, sendo que na superfície o ião oxigénio encontra-se ligado somente a um ião de silício, ficando uma carga negativa desequilibrada (Figura 4).

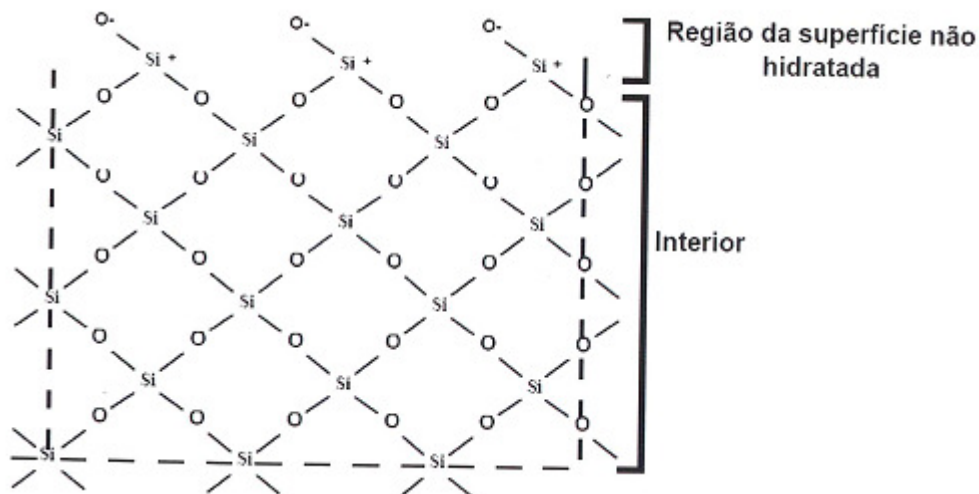


Figura 4: Estrutura de sílica no plano, com a superfície não hidratada

Fonte: DAHER, C. (2009) citando PAULON (1981)

A superfície das partículas de sílica podem se tornar um ácido fraco quando há libertação de algum hidrogénio durante a ionização. Esta libertação de iões H^+ livres é potenciada pela ionização em meio aquoso da ligação mais débil do ião hidrogénio com o oxigénio relativamente ao grupo OH (Figura 5).

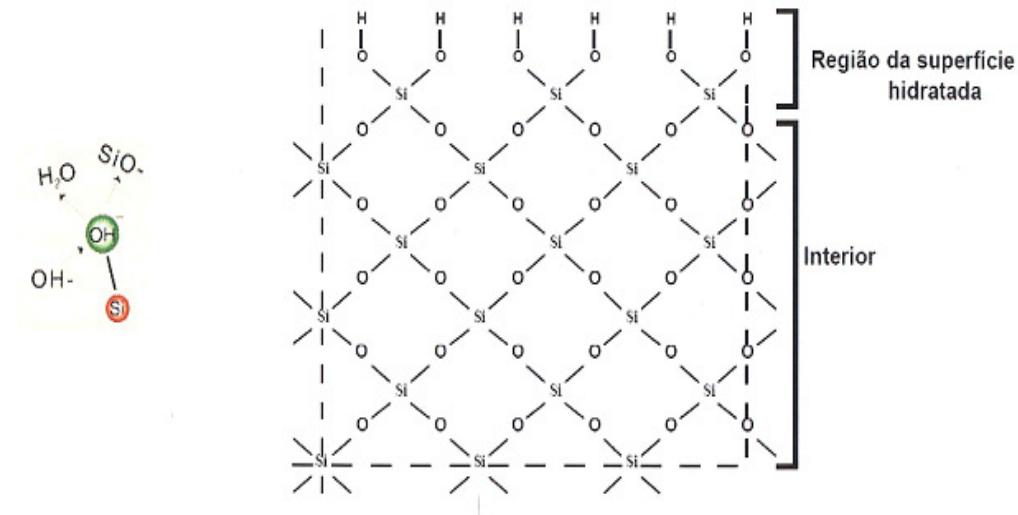


Figura 5: Estrutura de sílica no plano, com a superfície hidratada

Fonte: DAHER, C. (2009) citando PAULON (1981)

No fabrico do betão não se devem utilizar agregados reactivos em meios fortemente alcalinos, pois estes aumentariam a probabilidade de se formar um gel expansivo, que geralmente se desenvolve quando alguns tipos de rochas e minerais reagem com os hidróxidos alcalinos da solução intersticial do betão.

Há um conjunto específico de rochas e minerais que são classificados como potencialmente reactivos para o desenvolvimento de reacções álcalis-agregado. Este facto levou a que se propusesse que estes tipos de agregados tradicionalmente reactivos fossem agrupados com base no seu desempenho em obra.

Quando são observados ao microscópio e identificadas como reactivas, as formas de sílica apresentam uma malha cristalina defeituosa. Os polimorfos mais reactivos aos álcalis com uma baixa cristalinidade são a opala, a calcedónia e o jaspe. Por sua vez, a instabilidade e baixa cristalinidade do quartzo de mirmequite devem ser tomadas em conta na avaliação da reactividade potencial, aumentando esta com a diminuição da cristalinidade (WIGUM, 1995; FERNANDES, 2005).

Os agregados com opala tem sido objecto de diversos estudos, nos quais as reacções álcalis-sílica podem ser esquematizadas como uma esfera de sílica reactiva pura atacada por iões hidroxilo. No entanto, nem todas as rochas reagem como a opala (BEN HABA, 2006).

As diversas análises da reacção álcalis-sílica ainda não conseguiram concluir sobre uma relação entre um determinado constituinte reactivo, a magnitude da reacção álcalis-sílica e a expansão resultante (FERNANDES, 2005 CITANDO SIMS E BROWN, 1998).

O termo “conteúdo péssimo” ou “efeito péssimo” é utilizado para quantificar a proporção de sílica reactiva, na quantidade total de agregado, a que corresponde uma expansão máxima (GILLOT, 1975; HOBBS, 1988; BESEM E DEMARS, 1989; THE INSTITUTION OF STRUCTURAL ENGINEERS, 1992; GRATTAN-BELLEW, 2001; LE ROUX, 2001; RILLEM AAR-1, 2003; FERNANDES, 2005). Desta forma, podemos afirmar que para cada agregado existe um conteúdo péssimo, que se define como o teor crítico de material reactivo presente num agregado ou mistura de agregados que pode originar uma expansão máxima.

Quando se altera as proporções de agregados reactivos podemos comparar as expansões que ocorrem, verificando que existe uma expansão máxima para determinada proporção. As variações de expansão consoante o aumento de quantidade de agregado reactivo podem ser observadas no Figura 6.

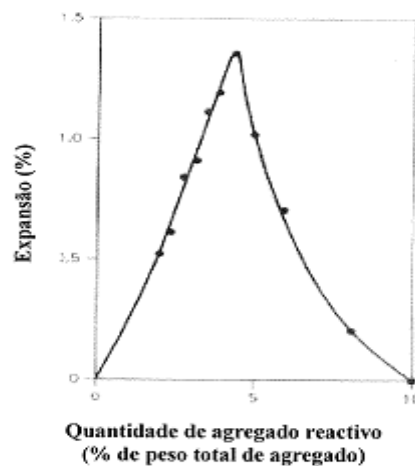


Figura 6: Influência na expansão da quantidade de agregado reactivo

Fonte: ICOLD (1991)

Ao analisarmos o gráfico, vamos verificar que até uma determinada percentagem, há um aumento da expansão com o aumento de quantidade de agregado, chegando a um ponto a partir do qual a expansão diminui, apesar da quantidade de agregado reactivo aumentar. O pico da expansão é o efeito péssimo no exemplo apresentado.

A concentração do constituinte reactivo é variável em relação ao aumento ou diminuição da expansão, sendo exemplo, os meta quartzitos, nos quais a expansão aumenta progressivamente com o aumento dos constituintes reactivos dos agregados.

Quando existe uma concentração de constituinte reactivo que conduz à máxima expansão, tal como acontece nos agregados fortemente reactivos como a opala, a expansão decresce rapidamente para concentrações mais altas ou mais baixas do material, apresentando percentagens de teor péssimo geralmente inferiores a 10 %. No caso dos agregados pouco

reactivos este valor pode atingir os 100 % (BRE DIGEST 330, 1991; POOLE, 1992; SHAYAN, 1992; TAYLOR, 1997; FERNANDES, 2005). Se a proporção de sílica reactiva for superior ao “conteúdo péssimo”, a concentração de iões hidroxilos não será suficiente para manter a reacção e a expansão decresce (FERNANDES, 2005).

Considerando que a expansão está relacionada com a quantidade de gel produzida pela reacção e com as propriedades do gel, podemos dizer que o “conteúdo péssimo” representa a proporção do agregado para a qual se desenvolve a máxima produção de gel (FERNANDES, 2005 CITANDO FRENCH, 1980). Deste modo, o “efeito péssimo” significa também que podemos considerar utilizar agregados com sílica fortemente reactiva no betão sem que por isso ocorram alterações devido às reacções com os álcalis (LE ROUX, 2001; FERNANDES, 2005).

Ao contrário da reactividade dos polimorfos de sílica, que já está assumida, o mesmo não se verifica em relação à definição de reactividade de um conjunto de rochas comuns que mostram indícios de deformação (FERNANDES, 2005).

Um outro factor que também influencia a reacção álcalis-sílica é a granulometria dos agregados, sendo que em algumas situações a expansão e a fissuração do betão ocorre na presença de agregados reactivos com um tamanho entre 1 e 5 mm (fracção fina do agregado), enquanto em outros casos a reacção aparece em agregados grossos (METHA, 1986; FORADABA, 2005).

A quantidade de sílica reactiva depende da superfície especificada do agregado, pelo que, a quantidade de sílica disponível será tanto maior quanto maior a relação superfície/volume (FORADABA, 2005).

A nível experimental comprovou-se que a expansão do betão é tanto maior quanto menor o tamanho da partícula, até um diâmetro aproximado de 75 μ m, quando nos referimos á fracção de areia. No caso de serem usados valores mais reduzidos, vamos verificar que a reacção desenvolve-se de forma mais dispersa e sem grandes expansões, não produzindo tensões internas e consequente fissuração (METHA, 1986; FORADABA, 2005).

Em forma de conclusão, podemos afirmar que a reacção nos agregados pode ser traduzida por (BEN HABA, 2006):

- rápida penetração de álcalis de cálcio e iões hidroxilo nas partículas de agregados;
- dissolução da sílica reactiva;
- formação do gel de sílica nos agregados com aumento de tamanho das partículas;
- penetração de iões agressivos nas fracturas das partículas.

2.2.2- FACTORES QUE INFLUENCIAM A REACÇÃO

A reacção álcalis-sílica é controlada por processos termodinâmicos e cinéticos. Existe actualmente um consenso entre os investigadores relativamente à evolução da reacção álcalis-sílica, embora não estejam bem definidos todos os aspectos do processo, nomeadamente a formação de gel.

Relativamente a sensibilidade da reacção à temperatura acelerando o processo, existe concordância, embora não afectando significativamente a sua amplitude ou a necessidade da humidade para a ocorrência da reacção.

A reacção é limitada pela quantidade de reagentes e não de produto, o que significa que a reacção continuará enquanto existirem reagentes, independentes da quantidade de gel produzida (PETERSON *et al.*, 2000). Embora não exista ainda consenso nos resultados obtidos pelos investigadores têm sido colocadas algumas questões quanto à influência de carregamentos externos na reacção álcalis-sílica (LOPES, 2004).

2.2.2.1- A HUMIDADE

A presença de quantidades suficientes dos seus componentes origina a uma reacção álcalis-sílica. A água, com diversas origens, desde a água livre no interior do betão à contribuição exterior, é um dos componentes necessários à reacção em quantidades superiores a valores entre 75 e 90%.

No desenvolvimento da reacção, a água transporta os catiões alcalinos e os iões OH^- , sendo absorvida pelo gel sílico-alcalino. O gel pode em alguns dos casos expandir e criar pressão entre a pasta endurecida e os agregados (POOLE, 1992; BERRA E BERTACCHI, 1991; FERNANDES, 2005). As fissuras no betão são provocadas, com o aumento do volume, visto que o aumento da humidade pode conduzir a expansões elevadas de gel, dependendo da quantidade de gel formada.

O efeito duplo da água na reacção álcalis-sílica foi comentado por LARRIVE (1998), afirmando o autor que, por um lado, a água influencia a velocidade de expansão no momento de formação dos produtos da reacção sendo considerada um agente reactivo, enquanto que, por outro lado, assegura o transporte das diferentes espécies reactivas, sendo considerada um meio reaccional (SANTOS SILVA, 2006).

A exposição à humidade é frequente nos betões, embora estejam mais vulneráveis nas estruturas (BASEM E DENARS, 1989; ACI, 1998; FERNANDES, 2005):

- expostas a ambientes quentes e húmidos;
- submetidas a ciclos de molhagem e secagem;
- superfícies de betão em contacto com solo saturado.

Os betões de baixa qualidade, menos densos e mais porosos, acabam por secar mais rapidamente e estão menos sujeitos à reacção álcalis-sílica do que os betões de alta qualidade em ambiente húmido (TR 3, 2003).

Segundo FOURNIER E BÉRUBÉ (1993) os valores críticos de humidade relativa apontados pela literatura para o desenvolvimento da reacção álcalis-sílica devem ser superiores a 80 - 85%. Embora OLAFSSON (1986) tenha verificado que o valor limite de 80% de humidade relativa diminui com o aumento da temperatura. SANTOS SILVA (2006) observou expansões consideráveis em ensaios realizados para valores de 70% de humidade relativa a 38 °C.

A exposição do betão com produtos reactivos e com condições de humidade elevada apenas provoca expansão durante o tempo de reacção, isto é, a influência da água sobre a amplitude das deformações é limitada pelo processo de formação dos produtos de reacção (LOPES, 2004).

2.2.2.2- A TEMPERATURA

Uma reacção álcalis-sílica desenrola-se mais rapidamente a temperaturas elevadas, contudo embora em condições de humidade possa estabilizar mais cedo (OLAFSSON, 1987; TR 3, 2003). Já a uma temperatura mais reduzida, a expansão torna-se mais lenta mas a reacção prolonga-se por mais tempo.

Em ensaios de laboratório, é utilizada uma temperatura de 38 °C, ou superior, para acelerar a expansão dos provetes analisados. O efeito de diferentes temperaturas pode criar variações nas expansões do betão (TR 3, 2003). Embora Portugal tenha um clima onde a humidade seja um factor mais condicionante para o desenvolvimento da reacção do que a temperatura, as estruturas industriais merecem alguma atenção, nomeadamente as chaminés expostas a elevadas temperaturas.

A intenção de determinar a influência da temperatura na reacção álcalis agregado originou a realização de vários ensaios ao betão (LARIVE, 1997; CAPRA *et al.*, 1995; DIAMOND *et al.*, 1989;

LOPES, 2004). Da análise dos ensaios, surge a indicação de que a influência da temperatura na cinética da reacção é significativa, uma vez que a uma temperatura de 40 °C a expansão e o consumo de álcalis ocorrem mais depressa, embora influenciando pouco a magnitude da reacção.

Apesar da velocidade de reacção e formação de gel aumentar com a temperatura, a sua viscosidade diminui, permitindo dissolver-se com mais facilidade nas fissuras e poros do betão, podendo dissipar-se em parte a expansão (FORADABA, 2005).

2.2.2.3- FONTES EXTERNAS DE ÁLCALIS

A solução álcalis-sílica deve ter uma humidade suficiente para que a reacção álcalis-sílica se desenvolva. Para se criar uma barreira na formação de reacção álcalis-sílica no betão, podemos limitar a quantidade de álcalis introduzida na mistura. O desenvolvimento da reacção emerge de um fornecimento extra de álcalis pelo ambiente ao betão (TR 3, 2003).

Uma das fontes de álcalis para o betão são as águas do subsolo ricas em sulfato. Onde este constituinte, sulfato, ocorre em níveis muito elevados surgem complicações no betão, que levam à necessidade de proteger o betão nessas áreas, de forma a evitar as reacções álcalis-sílica ou ataque por sulfatos (KENNERLEY, 1980; TR 3, 2003).

O cloreto de sódio é usado como sal descongelante em países com invernos muito gelados, constituindo uma fonte de álcalis para o betão. O sal seco, por acção do vento desloca-se, depositando-se na superfície das estruturas de betão. À noite dá-se a condensação da água, ocorrendo absorção do sal no betão, em especial se o betão for bastante permeável (ROGERS, 1987; FOOKES, 1980; TR 3, 2003). No entanto, estudos realizados no Canadá concluíram que, a exposição ao cloreto de sódio não origina expansões se o betão possuir um baixo conteúdo em álcalis (BERUBÉ *et al.*, 2003; TR3, 2003).

Uma outra fonte externa de álcalis é o betão exposto à água do mar, em especial nas zonas de marés que criam ciclos de molhagem e secagem.

Dependendo da humidade na solução, os iões sódio e potássio adquirem mobilidades diferentes; desta forma, o movimento da água no betão vai transportar iões, retirando-os de determinadas zonas e concentrando-os em outras (NIXON *et al.*, 1979; TR 3, 2003). Se duas zonas do betão têm níveis de humidade diferentes, estando uma em evaporação da água e a outra em contacto com uma percentagem elevada de humidade, vai ocorrer promoção da concentração de álcalis na zona de secagem. Os sais que se depositam na superfície seca

exposta introduzem-se no betão quando esta superfície se encontrava molhada, podendo o álcalis ser lixiviado da superfície o betão que se encontra frequentemente molhada (TR 3, 2003).

2.3- Reacção Álcalis-Sílica-Silicato

Durante algum tempo, considerou-se o mecanismo de reacção álcalis-silicato distinto do mecanismo álcalis-sílica, de modo que, a reacção em rochas com minerais silícios cristalizados eram distintos da reacção em rochas de estrutura mais desordenada. No entanto, verificou-se que o mecanismo da reacção era o mesmo, apesar de que em função do grau de cristalização da sílica, a cinética da reacção torna-se a variável. Mais rapidamente se desenvolverá a reacção, quanto menor for o agregado (FORADABA, 2005).

Na actualidade, a reacção álcalis-sílica-silicato é incluída na reacção álcalis-sílica, e consiste na reacção entre os álcalis disponíveis do cimento ou outras fontes e alguns tipos de silicatos que estejam presentes em algumas rochas, sejam metamórficas, ígneas ou sedimentares. Alguns investigadores consideram esta reacção como sendo uma forma mais complexa da reacção álcalis-sílica (FERNANDES, 2005 CITANDO SIMS E BROWN, 1998).

Esta reacção relaciona-se com a presença de quartzo de sílica amorfa ou de materiais expansivos, tendo o mesmo princípio da reacção álcalis-sílica, ocorrendo no entanto, de forma mais lenta, uma vez que os minerais reactivos estão disseminados na matriz. O processo vai envolver a expansão dos silicatos que estão presentes nas rochas por absorção da água, formando um gel mais ou menos expansivo dependendo da existência de um excesso de álcalis ou cálcio, respectivamente (FERNANDES, 2005). O gel, também chamado sílico-alcalino, percorre a pasta de cimento adjacente originando a fissuração do betão e, algumas vezes, a exsudação para a superfície. O gel tornar-se-á mais viscoso e menos expansivo, caso exista excessivas quantidades de cálcio na sua composição.

Poderá existir uma relação entre a expansão e a formação de argilas expansivas com clorite, a montemorilonite, a vermiculite ou a illite, quando estas estão presentes na solução alcalina (FERNANDES, 2005 CITANDO STIEVENARD-GIREAUD, 1987).

A designação de reacção álcalis-silicato não consta do RILEM AAR-1 (2003), sendo os agregados divididos em grupos de silicosos de reacção rápida ou de reacção lenta ou tardia (FERNANDES, 2005). No relatório TR 3 (2003), a reacção álcalis-sílica e também incluí as reacções antes designadas como álcalis-silicato.

2.4- Reacção Álcalis-Carbonato

Quando alguns calcários dolomíticos argilosos são usados como agregado grosso no betão e são atingidos pelos álcalis do cimento, dá-se uma reacção álcalis-carbonato (FERNANDES, 2005). Esta agressão causa uma desdolomitização com a formação de brucita, carbonato alcalino e carbonato cálcico com excessiva expansão.

Quando os minerais de argila absorvem os iões hidroxilos ocorre expansão, mas não se forma gel expansivo. A circulação da água e consequente expansão da argila são facilitadas pelas fissuras e a porosidade da rocha (FERNANDES, 2005 CITANDO POOLE, 1992). Estes acontecimentos sucessivos potenciam ainda a fissuração do betão, pelo enfraquecimento da ligação entre o cimento e o agregado, favorecendo a micro fissuração.

A reacção regenera os hidróxidos alcalinos, sendo assim, a reacção de desdolomitização terá continuidade até que a dolomite seja totalmente consumida ou até que a concentração de álcalis se reduza o suficiente por reacções secundárias.

A reacção álcalis-carbonato é complexa e muito mais rara do que as duas outras reacções álcalis-agregado anteriormente citadas (SINDIPEDRAS, 2005).

2.5- Avaliação da reactividade potencial aos álcalis

2.5.1- Ensaios

O determinar da potencialidade dos agregados aos álcalis foca-se principalmente em conhecer o fenómeno das reacções de álcalis-agregado e nas possibilidades de se reduzir os efeitos nocivos das reacções (ANDRIOLO, 1997; SABBAG, 2003).

Os principais condicionantes dos métodos de ensaios existentes para a avaliação da reactividade potencial são (SABBAG, 2003):

- conseguir resultados em poucos dias, em algumas semanas no máximo;
- usar metodologia simples;

- aparelhos e equipamentos usados devem ser de baixo custo e de simples manuseamento;
- resultados conseguidos devem ter relação e correspondência com a realidade;
- a possibilidade de obter correlações com baixa dispersão na utilização de vários laboratórios ou diferentes operadores.

Os métodos de ensaio que se utilizam na avaliação da reactividade potencial dos álcalis diferenciam fundamentalmente os agregados inócuos dos agregados potencialmente reactivos. O estudo isolado dos agregados é feito a partir de ensaios de avaliação na reactividade potencial ao álcalis:

- exame petrográfico dos agregados (reconhecimento de espécies potencialmente reactivas por processos visuais);
- ensaio químico.

Os testes usados para determinar a reactividade dos agregados , geralmente induzem nos agregados condições que promovem a aceleração da reacção, sendo os resultados obtidos em menos tempo e com alguma variação de resultados. São vários os ensaios desenvolvidos a nível internacional, de forma a minimizar as grandes diferenças existentes entre os resultados dos testes em laboratório e o comportamento deste no local. Sendo assim, os testes se realizam nos agregados, nas barras de argamassa e no betão (TR 3, 2003).

São elaborados ensaios baseados na expansibilidade de um agregado em argamassas ou betão para a combinação agregado-cimento:

- ensaio de expansão da barra de argamassa;
- ensaio acelerado de expansão da barra de argamassa;
- ensaio do prisma de betão;
- ensaio CMBT.

Estes ensaios são normalizados e comentado numa larga bibliografia, mas no entanto, em Portugal os mais utilizados são os documentos da ASTM, algumas normas francesas NF e normas portuguesas NP.

Apesar de que a expansão é apenas visível após períodos mais prolongados, os ensaios ao betão mostram-se mais próximos da realidade do que os ensaios químicos e barras de argamassa (TR3,2003).

2.5.1.1- ENSAIO DE EXPANSÃO DAS BARRAS DE ARGAMASSA

O ensaio de expansão das barras de argamassa foi publicado em 1950 com base nas normas ASTM C 227-97, a NBR 9773 / ABNT (norma brasileira) e a norma portuguesa NP 1381.

Este ensaio tem como objectivo analisar a reacção álcalis-sílica a partir da análise da variação do comprimento das barras de argamassa que estão numa atmosfera saturada de vapor de água 40° C em recipientes hermeticamente saturados (SABBAG, 2003). Para determinar se uma combinação cimento-agregado é potencialmente reactiva este é o método mais utilizado.

A realização deste ensaio consiste no fabrico de quatro provetes de argamassa com agregado reduzido á dimensão dos grãos de areia (< 5mm) e cimento rico em álcalis (> 60 % de Na₂O_{eq}).

O agregado britado é separado em dimensões entre os 4,76 e 0,149 mm e misturado com cimento com concentração de álcalis não inferior a 0,8 %. Com estes componentes produzem-se prismas de argamassa com 25 x 25 x 250 mm³, tais como os representados na figura seguinte (SOUSA COUTINHO, 1998)

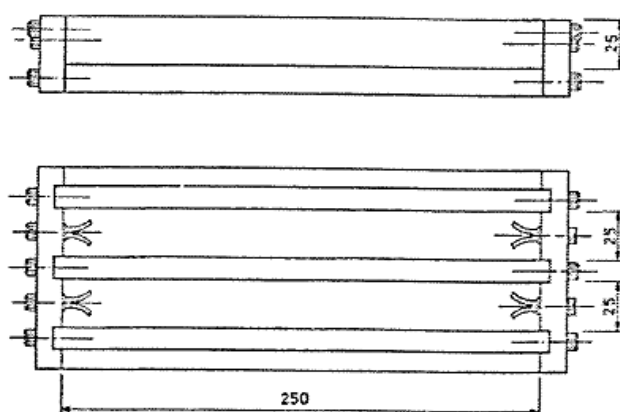


Figura 7: Moldes para prismas de argamassa

Fonte: NP1381

Coloca-se os corpos-de-prova em recipientes com 100 % de humidade relativa a 30° C de temperatura. Depois de desmoldados, procede-se as leituras ao comprimento das amostras em vários intervalos de tempo: 24 horas, 14 dias, 2 meses, 4 meses e 6 meses. Os resultados deveram ser expressos em percentagens de expansão, obtidos numa média de 4 barras.

A extensão deve ser menor ou igual a 1×10^{-3} ao fim de 6 meses, segundo o LNEC E 373. Neste ensaio, nem sempre se observa uma boa correlação com o comportamento real do betão.

Este é um ensaio de longa duração (6 a 12 meses), o que leva a que por vezes não seja compatível com a exigência das obras. Este ensaio tem sido causa de algumas discussões nos últimos anos, especialmente pela sua dependência do teor de álcalis do cimento, condições empregues no acondicionamento dos provetes e pela razão água/ cimento, comprometendo a sua validade. Países como o Canadá e a França, procederam á alteração do ensaio (SANTOS SILVA, 2006).

Dado que este ensaio é um método rigoroso para a avaliação da reactividade dos agregados siliciosos fortemente reactivos (FERNANDES, 2005) apresenta algumas limitações, tais como:

- o comportamento da argamassa durante o ensaio poderá não ser igual ao do betão fabricado com os mesmos agregados (GRATTAN-BELLEW, 1983; ACI, 1998; FERNANDES, 2005);
- não é um método adequado para todas as combinações de agregado e pode produzir resultados incorrectos (RANC *et al.*, 1994; SIMS, 1987; FERNANDES, 2005);
- o ensaio é demasiado curto para agregados siliciosos com reactividade lenta (STIEVENARD-GIREAUD, 1987; FERNANDES, 2005).

Muitos países desenvolveram métodos próprios de avaliação da reactividade aos álcalis na tentativa de diminuir o tempo de resposta dos resultados, face às limitações associadas ao tempo de resposta dos ensaios e as criticas às imposições da ASTM C227. Sendo assim, emergiram vários métodos, dos quais se destaca o ensaio acelerado de barra de argamassa e o ensaio de autoclavagem de barras de argamassa (SANTOS SILVA, 2006).

2.5.1.2- ENSAIO ACELERADO DA BARRA DE ARGAMASSA

Baseando-se na norma ASTM C 1260-94, este ensaio com origem na África do Sul, permite o estudo do desenvolvimento da expansão ao longo do tempo. OBERHOLSTER E DAVIES (1986) e DAVIES E OBERHOLSTER (1987).

Este ensaio serve-se de barras fundamentadas no método de ensaio de reactividade potencial com os álcalis do ligante pelo processo da barra de argamassa descrito no ponto anterior, mas adicionando uma solução de 1N de NaOH á temperatura de 80° C por um período de 28 dias. Com a aplicação de condições mais severas no armazenamento do ensaio em relação ao ensaio tradicional das barras de argamassa e às condições de obra, tem-se como objectivo acelerar a ocorrência de reacções álcalis-silica no betão.

Devem-se realizar 3 amostras que terão uma leitura diária da expansão durante um período de 14 dias de forma a se poder realizar o ensaio. Aos 16 efectua-se uma leitura de referência para comparar com o valor limite.

Expõe-se em seguida alguns comentários relativos á comparação de valores do ensaio (SABBAG, 2003; FERNANDES, 2005):

- caso as expansões sejam inferiores a 0,10 % no 16º dia, tem-se um comportamento inócuo e considera-se a combinação cimento-agregado como sendo não reactiva;
- se as transformações forem superiores a 0,20 %, existe grande probabilidade de ocorrerem reacções expansivas, considerando-se a combinação cimento-agregado reactiva;
- se os valores se encontrarem entre os 0,10 % e os 0,20 %, sugere-se que se realizem mais análises, apesar de que se considere a combinação cimento-agregado potencialmente reactiva.

Em 2000, SILVA E REIS considerou que seria recomendável prolongar o ensaio até aos 28 dias, se ao fim dos 14 dias a expansão fosse superior aos 0,10 % e inferior a 0,20 %, classificando o agregado como de reactividade potencialmente duvidosa (FERNANDES, 2005).

A RILEM adoptou este ensaio, designando-o de AAR-2, como sendo um dos métodos de qualificação de reactividade aos álcalis de agregados para betão (SANTOS SILVA, 2006).

O ensaio não simula as condições reais em obra, no entanto, mostra ser eficaz na avaliação da reactividade dos agregados que produzem reacção lenta ou expansão retardada. Este ensaio acelerado vai ser diferente do ensaio tradicional em relação á velocidade de reacção mas não no mecanismo.

O ensaio acelerado da barra de argamassa tem recebido alguns comentários que essencialmente advertem para como este método é muito severo e que leva à rejeição de muitos agregados que nunca levaram ao desenvolvimento da reacção álcalis-sílica (SANTOS SILVA, 2006 CITANDO FOURNIER E BÉRUBÉ, 1991 A,B; BÉRUBÉ *et al.*, 1992; LE ROUX *et al.*, 1999). Em algumas situações, agregados com mais de 2 % (em massa) de cherte poroso (mineral com formas de sílica potencialmente reactiva), verificou-se que o ensaio não mostrou a reactividade do agregado (SANTOS SILVA, 2006 CITANDO NIXON E SIMS, 2000).

Caso os valores de expansão ultrapassem os limites definidos, os resultados do ensaio devem ser considerados como inconclusivos, salvo quando também o sejam pelo método do prisma de betão. Para GROSBOIS E FONTAINE (2000), este ensaio é considerado restritivo.

Uma das limitações do método é a avaliação da reactividade de agregados carbonatados, uma vez que a reactividade é subestimada pelo ensaio acelerado. Os agregados carbonatados no

ensaio acelerado mostra limitações a avaliação da reactividade, enquanto que no método do prisma de betão mostram-se como reactivos. Em ensaios com milonito, meta-argilito, metagrauvaque, granito, calcário e vidro de sílica WINGUM (1995) verificou existência de uma correlação entre a quantidade de gel formado e a expansão medida na barra de argamassa.

Por sua vez, SANTOS SILVA (2006) considerou que o ensaio não permite prever da forma mais correcta a reactividade potencial aos álcalis de agregados do tipo granitóides, sugerindo que nestes casos devemos recorrer aos ensaios complementares de expansão de provetes de betão fabricados com o agregado de acordo com os ensaios AAR-3 (1ano de duração) ou AAR-4 (3 meses de duração).

2.5.1.3- ENSAIO DO PRISMA DE BETÃO

Este ensaio tem por objectivo avaliar a expansibilidade de calcários dolomíticos reactivos. Os agregados calcários dolomíticos reactivos não produzem expansões significativas na barra de argamassa, quando submetidos ao ensaio da barra de argamassa (GRATTAN-BELLEW, 1983; FERNANDES, 2005). Este ensaio utiliza um prisma de betão. Um elemento alcalino é adicionado à mistura de betão.

O objectivo deste ensaio será avaliar a potencialidade reactiva do agregado como agente na reacção álcalis-sílica com os iões alcalinos, avaliação que é feita através da variação do comprimento dos prismas. Geralmente utiliza-se a norma ASTM C 1293-01, que adverte para a incorporação de 1,25% de $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ na água de mistura (FERNANDES, 2005), para realizar este ensaio.

Para a realizar este ensaio utilizam-se 3 amostras de betão com agregados finos não reactivos (ASTM C-1260) em prismas de 75 x 75 x 285 mm. O agregado grosso deverá corresponder a 70% do volume do betão e em fracções de 33 % de 19, 12,5 e 9,5 mm em peso. A relação entre a água e o cimento deverá ser de 0,42 a 0,45 em massa. Podemos aumentar o teor alcalino dissolvendo NaOH na água de mistura.

Posteriormente, armazenamos os provetes a uma temperatura constante de 38° C e á humidade relativa de 95 % em recipientes com água na zona inferior (FERNANDES, 2005). Deve-se efectuar uma leitura de referência dos prismas 24 horas após a desmoldagem. As leituras posteriores devem ser efectuadas aos 7 dias, 28 dias, 56 dias, 3 meses, 6 meses, 9 meses e 12meses.

Uma das limitações do ensaio é o elevado tempo de execução do ensaio, embora GROSBOIS E FONTAINE (2000) na sua investigação para avaliar a reactividade potencial dos agregados, tenham chegado á conclusão que este método de ensaio é tido em conta como aquele que apresenta resultados que melhor se equiparam ao comportamento do betão em obra, quando exposto a condições severas. Segundo FERNANDES (2005) este é o ensaio adequado para agregados grossos, em especial os de reacção lenta ao álcalis.

Se a expansão for superior a 0,04% em 12 meses considera-se o agregado como deletério. Este é o valor que define o limite para se poder considerar os agregados como potencialmente prejudiciais, embora devemos estabelecer um limite inferior para estruturas especiais, como por exemplo as barragens (ACI, 1998; FERNANDES, 2005).

2.5.1.4- ENSAIO CMBT (CONCRETE MICROBAR TEST)

O ensaio CMBT, tem origem numa proposta por XU *et al.* (2000), para a avaliação da potencialidade da reacção álcalis-carbonato, para agregados de calcário/dolomite. Este ensaio é muito similar ao ASTM C 1260, sendo a única diferença o tamanho dos corpos de prova, neste caso, 40x40x160 mm. Quanto aos agregados, a densidade máxima dos agregados deve ser 10 mm, e a mínima de 5 mm.

A mistura inclui a mesma proporção cimento/agregados, a/c = 0,30. O ensaio deve ter uma duração de 30 dias na solução 1N NaOH a 80 °C. Adoptando a tentativa de limite de 0,10 % ás 4 semanas, como foi proposto no trabalho original de XU *et al.* (2000).

LU *et al.* (2004), seguindo a proposta apresentada por XU *et al.* (2000), foi mais longe no estudo dos álcalis, na dimensão dos agregados, dos moldes, para a expansão do betão incorporando agregados de calcário/dolomito de algumas de pedreiras de certos países.

SOMMER *et al.* (2004), sugeriu comparar a expansão de corpos de prova em CMBT (RILLEM - AAR-5) e o AMBT para avaliar o potencial de contribuição de reactividade álcalis-carbonato, no processo de expansão dos agregados de carbonato. Os agregados reactivos de álcalis-carbonato, neste ensaio, apresentou valores de expansões muito baixos, isto é, valores menores que 0,10 % aos 14 dias, para o ensaio AMBT quando aplicado segundo CMBT. Afim de melhor diferenciar a reacção álcalis-carbonato de agregados de calcário/dolomito da sílica e sílica reactiva.

GRATTAN-BELLEW *et al.* (2003 e 2004) avaliou o uso de CMBT (com a dimensão dos agregados a variar entre os 4,76 mm e os 12,5 mm) em grande variedade de agregados siliciosos e

carbonatados de vários países, que tenham estado alguns anos na CANMET. Os resultados mostraram boa correlação entre a expansão do betão contendo álcalis e sílica de agregados de calcário reactivos.

Capítulo III

3- Reacções álcalis-sílica em betões

3.1- Introdução

O betão é um dos materiais mais utilizados no mundo, fácil de preparar e de manusear sendo um produto de custo reduzido quando comparado com outros materiais de construção.

Existem porém alguns processos de deterioração do betão provenientes de causas físicas e químicas, onde se destacam a corrosão das armaduras, a acção gelo-degelo, o ataque por sulfatos e as reacções álcalis-agregado.

Vários tipos de agregados são utilizados em todo o mundo no fabrico do betão, em especial agregados com uma composição siliciosa que são vulneráveis ao ataque pelos álcalis da solução intersticial do betão. O ataque em condições húmidas, produz um gel higroscópico danoso para o betão (BEN HANA, 2006).

3.2- Reacção álcalis-sílica em betões convencionais

As questões relativas à durabilidade do betão são cada vez mais tema de análise e investigação. Os efeitos negativos causados por processos de deterioração do betão na funcionalidade das estruturas suscitam a necessidade de conhecimento nesta área.

As reacções álcalis-sílica desenvolvidas nos betões podem dar origem a compostos expansivos, que por vezes criam danos na estruturas. A elevada reactividade dos agregados, associada aos álcalis do cimento e à água existente no local, desenvolvem a reacção expansiva do betão.

Os agregados considerados inócuos ou pouco reactivos são cada vez mais escassos. Torna-se assim necessário conhecer toda a influência criada pela reacção álcalis-sílica nos betões, os métodos de diagnóstico existentes e as formas de mitigar a reacção, durante a produção do betão e nas estruturas já afectadas pela reacção expansiva.

3.2.1- Efeitos estruturais devido a reacção álcalis-sílica

O desenvolvimento da reacção álcalis-sílica (RAS) é geralmente apresentado segundo um esquema proposto por DENT GLASSER E KATAOKA (1981). Segundo os autores a evolução da reacção é explicada em duas fases: a formação do gel e absorção de água pelo gel, provocando a expansão.

A expansão é uma consequência da quantidade desequilibrada entre os reagentes e os produtos da reacção e, enquanto existir espaço vazio a ser preenchido pelo gel, o volume de betão mantém-se inalterado (LOPES, 2004).

Assim sendo, o desenvolvimento da RAS e a formação do gel sílico-alcálico (como apresenta a Figura 8) provocam uma expansão no betão, causando microfissuras devido às tensões internas criadas se não existir espaço para expandir. As estruturas de betão danificam-se e a resistência do betão é alterada.

Alguns métodos permitem estudar a influência da degradação do betão devido a reacções álcalis-sílica nas propriedades do betão, nomeadamente ensaios mecânicos do betão.

A resistência à compressão do betão pode ser alterada devido à reacção álcalis-sílica, embora se considere que os principais efeitos nas propriedades de betão estão na redução da capacidade de flexão, tracção e módulo de elasticidade (TR3, 2003).

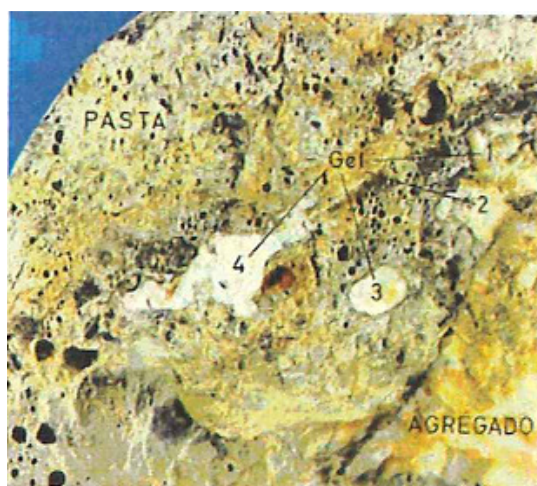


Figura 8: Reacção álcalis-sílica reactiva. Estados de alteração de quartzo-filoneano em gel (1 a 4)

Fonte: SOUSA COUTINHO (1998)

3.3- Reacção álcalis-silica em betões com agregados reciclados

Sendo esta reacção uma das anomalias de mais elevada importância na degradação de estruturas de betão convencional, torna-se relevante e necessário efectuar o estudo da reacção nos betões com agregados reciclados com o objectivo da utilização deste material nos mesmos domínios do betão convencional.

O resíduo do betão pode ter uma grande potencialidade para ser reutilizado como matéria-prima. O conhecimento das propriedades do material de origem será uma vantagem para a sua utilização. Desta forma, é importante saber qual a origem do material de agregado reciclado e as propriedades desse material antes de iniciar a produção de um novo betão.

Na análise da estrutura interna do betão com agregados reciclados, comparando com a de betão convencional, a principal diferença encontra-se na zona de transição dos betões com agregados reciclados, influenciando as propriedades do material. As diferenças são reguladas pelas características da argamassa aderida ao agregado do agregado reciclado e pela nova matriz de cimento que está em contacto essa argamassa.

A qualidade do betão de origem é fundamental para a determinação das propriedades mecânicas do novo betão. A porosidade do agregado reciclado, segundo BUTTLER (2003) e LARRAÑAGA (2004), leva a que a argamassa aderida ao agregado dos agregados reciclados seja o ponto fraco da mistura quando a sua resistência é menor do que a resistência da nova zona de transição.

Nos resíduos de betão que tenham sido reciclados após terem sido efectuados, possuindo uma grande quantidade de cimento não hidratado na superfície, a resistência do conjunto será determinada pelas características da argamassa de aderência ao agregado reciclado. Existirá deste modo um maior número de partículas de cimento para se hidratarem na nova zona de transição dispendo-se densamente junto das partículas do agregado. Assim, a zona de transição possuirá um menor índice de vazios, influenciando de forma menos significativa a resistência (BUTTLER, 2003).

Os agregados reciclados de betão são sujeitos a ensaios de reactividade potencial. No caso de o resultado indicar que os agregados reciclados são potencialmente reactivos, isso poderá ser interpretado como os agregados originais dos reciclados possam ser reactivos, pelo que esta reacção terá probabilidade de ainda ocorrer no novo betão (LARRAÑAGA, 2004).

Este facto não impossibilita a existência de agregados reactivos quando o betão dos agregados reciclados não é reactivo, facto que se atribui a não terem ainda ocorrido as reacções álcalis-silica, o que está relacionado com a cinética lenta destas reacções.

As expansões devem-se principalmente à reactividade dos agregados, a qual esta relacionada com a presença de sílica amorfa, mal cristalizada ou em variedades criptocristalinas, à quantidade de agregado reactivo e sua granulometria, à concentração na solução intersticial em alcalis e cálcio (quantidade interna de substâncias agressivas), ao tipo de cimento, às condições ambientais (quantidade externa de substâncias agressivas - por exemplo, provenientes de sais descongelantes) e à quantidade de água disponível (SOUSA COUTINHO, 1998).

Um estudo da microestrutura de betões com agregados reciclados realizado por LARRAÑAGA (2004) demonstra alguns aspectos importantes na formação do gel sílico-alcalino resultante da reacção álcalis-sílica. Este estudo foi efectuado com recurso a betões com agregados reciclados finos e grossos, utilizando cimento de mistura do tipo CEM I 52.5R com uma grande concentração de álcalis.

Os agregados reciclados, após finalização do processo de transformação, foram sujeitos a ensaios de reactividade álcalis-agregado. No caso de a argamassa dos agregados reciclados ser potencialmente reactiva, isso significa que os agregados originais dos reciclados também eram reactivos. Os agregados reciclados eram formados por argamassa, agregados finos e grossos originais.

No agregado reciclado, quando este é reactivo, pode formar-se uma auréola em volta da zona de aderência entre o agregado e a matriz de cimento. Dá-se a formação de gel sílico-alcalino. Para verificar esta possibilidade, deve ser efectuada uma observação ao microscópio electrónico de varrimento dos agregados originais provenientes dos agregados reciclados e a análise da composição da pasta nos agregados reciclados e da zona de interface onde é detectada a auréola.

Do estudo efectuado por LARRAÑAGA (2004), verificou-se que o gel sílico-alcalino era produzido como resultado da contribuição de álcalis do novo cimento da mistura e de agregados finos com argamassa aderente nas condições de quase totalidade ou totalidade de saturação do betão. Os agregados finos com argamassa aderente eram potencialmente reactivos, sendo constituídos por quartzo e feldspato potássio.

O cimento utilizado era rico em álcalis e verificou-se a sua acumulação na interface com o agregado reciclado, a qual esteve relacionada com a grande capacidade de absorção destes, que eram bastante porosos. Esta acumulação produziu uma interface entre a nova matriz de cimento e o agregado reciclado muito rica em álcalis.

A água que esta em contacto com o cimento acumulado atingiu um elevado pH por dissolução da sílica reactiva na superfície dos agregados, reagindo e formando gel sílico-alcalino.

Neste caso, o gel sílico-alcálico apenas se encontra na zona de interface dos agregados reciclados e da matriz de cimento, não preenchendo os poros de cimento nem fissuras. Deste modo, não afectou as propriedades do betão.

Ainda segundo LARRAÑAGA (2004), a qualidade da zona de interface dos betões com agregados reciclados é maior do que a zona do betão que foi reciclado. Por outro lado, o ponto mais fraco e uma das maiores diferenças para com os betões convencionais pode ser a argamassa aderida dos agregados reciclados, condicionando a resistência do material.

Segundo alguns estudos efectuados, principalmente por LARRAÑAGA (2004), verificou-se que, no ensaio efectuado a betões com agregados reciclados reactivos, não houve aumento da reacção álcalis-sílica já existente no betão com agregados reciclados, não influenciando assim a resistência do novo betão. De qualquer modo, a autora considera importante a continuação no estudo da reacção álcalis-sílica em betões com a agregados reciclados.

A possibilidade da existência da reacção álcalis-sílica com agregados reciclados reactivos mas com cimentos CEM I 42,5 e 32,5 deverá ser analisada. O estudo da interface do agregado reciclado também deve ser igualmente analisado. Embora já tenham sido realizados ensaios a betões com agregados reciclados reactivos segundo LARRAÑAGA (2004), o estudo deve ser aprofundado.

Note-se que o álcalis no betão, que são geralmente fornecidos pelo cimento, podem ser fornecidos pelos agregados, pelo que é importante também avaliar a contribuição de agregados que sejam potencialmente fornecedores de álcalis.

Existe pouca informação e diversas dúvidas no desenvolvimento da reacção álcalis-sílica em betões com agregados reciclados no betão, tornando-se esta patologia uma barreira para o desenvolvimento de especificações para o uso corrente destes betões. O conhecimento existente da problemática em relação a betões convencionais proporciona um termo de referência de propriedades e características entre betões.

3.4- Conclusão

Em relação às reacções álcalis-sílica podemos concluir que é um fenómeno que afecta as estruturas de betão, caracterizada por uma química interna entre sílica amorfa ou cristalizada de alguns agregados e os iões contidos na solução intersticial. A formação de um gel cria tensões na estrutura originando fissuras. As condições de exposição do betão influenciam o desenvolvimento da reacção.

Quanto à reacção, em betões com agregados reciclados, considera-se que a reacção se desenvolve igualmente nos betões com agregados naturais, como a aparição de um gel sílico alcalino.

No próximo capítulo descreve-se a campanha laboratorial desta dissertação. Incorporaram-se agregados reciclados em betões e estudou-se a capacidade mitigadora de algumas adições (metacaulino e pozolana de vidro) no desenvolvimento das reacções álcalis-sílica da reacção. Os estudos foram realizados tanto em argamassas de referência com agregados naturais e reciclados, como em betões.

Capítulo IV

4- Programa experimental

4.1- Introdução

Neste Capítulo descreve-se o programa laboratorial desta dissertação e apresentam-se os materiais usados e as suas características. Foram efectuados dois tipos de ensaio para estudar a reactividade aos álcalis dos agregados utilizados e o desenvolvimento das reacções álcalis-sílica em argamassas e betões. Assim, efectuou-se o ensaio ASTM C 1260/94 para os estudos em argamassas e o ensaio CMBT para os estudos em betões, ambos com incorporação de agregados reciclados.

Apresentam-se também as características e a origem do metacaulino e da pozolana de vidro, utilizados como adições na produção dos betões.

4.2- Características dos materiais usados

4.2.1- Cimento

O cimento utilizado neste estudo foi o cimento CIMPOR CEM I 42,5 R, com a uma resistência de 42,5 MPa. A referência “R” indica que o cimento é de alta resistência inicial, correspondendo a uma resistência mínima à compressão ao 2º dia superior a 20 MPa segundo a norma NP EN 197-1. A sua massa volúmica de 3160 kg/m³.

4.2.2- Pozolana de vidro

O vidro utilizado foi recolhido nos Serviços Municipalizados da Covilhã, tendo sido feita uma recolha selectiva de forma a obter uma amostra de vidro de cor âmbar e verde.

As amostras foram moídas nas fracções <75 µm, com os equipamentos da figura 13. Posteriormente, obteve-se a sua composição por difracção de raio-X e conheceu-se a sua forma por observações ao microscópio electrónico. O resultado da análise de difracção de raio-X é apresentado em percentagem.

Os vidros são essencialmente constituídos por óxido de silício e, em menores percentagens, por óxidos de cálcio e sódio. A forma das partículas também foi analisada e constatou-se que a forma preponderante, que resulta do processo de moagem, é a laminar. O pó de vidro apresenta uma massa volúmica 2525 kg/m³, o que não se verificou ao início e obrigou à moagem do material para aproximação do valor esperado. A moagem foi efectuada com o equipamento indicado na Figura 9.



Figura 9: Esquerda: Recipientes cerâmicos de moagem da pozolana de vidro
Direita: Máquina onde se colocam os recipientes para moagem

4.2.3- Metacaulino

Determinou-se para o metacaulino a massa volúmica, desvio padrão e o coeficiente de variação. A massa volúmica foi determinada pelo picnómetro e apresenta o valor de 3186 kg/m³. O desvio padrão é de 0,309 e o coeficiente de variação de 9,71 %.

Tabela 1: Composição do metacaulino

Composição	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	SiO ₂	P ₂ O ₅	SO ₃	K ₂ O	CaO	TiO ₂
%	0,096	0,161	27	61,26	0,325	0,048	6,622	0,159	0,994

4.2.4- Agregados grossos e agregados finos

- Agregados finos:

Os agregados finos utilizados nos ensaios (utilizados nas argamassas), são provenientes de britagens a agregados disponíveis nos Laboratórios de Construção da UBI e disponibilizados pelo Eng. Miguel Barreto Santos. Todas essas britagens foram executadas para redução do tamanho das partículas originais. Posteriormente, os agregados finos foram separados nas granulometrias exigidas pelos métodos de ensaio utilizados. Foram britados os seguintes agregados:

- Agregados grossos de granito, provenientes do Fundão, da empresa J. Bartolomeu, Lda;
- Agregados grossos reactivos (godo de rio), fornecidos pelo Eng. Miguel Barreto Santos;
- Agregados grossos reciclados, potencialmente reactivos, fornecidos por Eng. Miguel Barreto Santos. Os agregados foram produzidos através da britagem de grandes blocos de betão. Inicialmente tiveram que ser partidos através de martelo pneumático, para depois serem britados com a dimensão máxima de #15mm. Em seguida foram separados por peneiros e assim produzidos os agregados grossos reciclados, potencialmente reactivos. Estes últimos foram novamente britados, produzindo-se deste modo os agregados finos reciclados.

A tabela 2 apresenta os intervalos granulométricos e a respectiva massa correspondente dos agregados, requeridos para o ensaio ASTM C1260:

Tabela 2: Graduação requerida do agregado

Abertura do peneiro #		Massa (%)
Passa	Retido	
4,76 mm (Nº4)	2,36 mm (Nº8)	10
2,36 mm (Nº8)	1,18 mm (Nº16)	25
1,18 mm (Nº16)	600 µm (Nº30)	25
600 µm (Nº30)	300 µm (Nº50)	25
300 µm (Nº50)	150 µm (Nº100)	15

- Agregados grossos:

Dois tipos de agregados grossos foram usados para o ensaio de betão: os agregados grossos naturais no máximo #10 mm e mínimo de #4,76 mm e os agregados grossos reciclados com granulometria máxima de #10 mm e mínima de #4,76 mm.

Como agregados grossos naturais foram utilizados inertes britados (Brita 1) oriundos do Fundão, como indica a Figura10. Os agregados foram fornecidos pela pedreira Bartolomeu, com a granulometria a variar entre #3mm e #15mm. A sua massa volúmica, 2710 kg/m³.

Foi necessário recorrer à britagem dos agregados grossos naturais, para que no máximo tivessem #10mm. Utilizou-se para isso uma britadeira regulada. Esta opção surgiu para reduzir os vazios observados nos corpos-de-prova preparados numa primeira fase.

Os agregados grossos reciclados foram fornecidos pelo Eng. Miguel Barreto Santos e têm uma massa volúmica de 2660 kg/m³.



Figura 10: Esquerda: Agregado grosso granítico
direita: Agregado grosso reactivo

4.3- Misturas estudadas

As Tabelas 3 e 5 apresentam a composição, em gramas, por mistura realizada das argamassas, de acordo com o método ASTM C1260, seguida da mistura dos betões com metacaulino e pozolana de vidro, cujas proporções estão de acordo com o método CMBT.

Tabela 3: Misturas de argamassas para o ensaio ASTM C1260 (em g)

Mistura	Cimento	Granito	Agregados reactivos	Agregados grossos react. reciclados	Agregados finos reciclados	Calcário	Água
REF	440	990	-	-	-	-	206,8
ARB	440	-	990	-	-	-	206,8
O2 r	440	-	-	990	-	-	206,8
O2 f	440	-	-	-	990	-	206,8
Calc	440	-	-	-	-	990	206,8

- Todos os agregados têm uma dimensão máxima de 4,76 mm
- A separação de cada agregado foi feita através de peneiração segundo a Tabela 3:

Tabela 4: Fracções granulométricas na composição dos agregados finos

# peneiros			
4,76 mm	→	10%	→ 99 g
2,36 mm	→	25%	→ 247,5 g
1,18 mm	→	25%	→ 247,5 g
600 µm	→	25%	→ 247,5 g
300 µm	→	15%	→ 148,5 g
150 µm			

- relação água/cimento utilizada no método ASTM C1260: a/c = 0,47;

- as quantidades foram determinadas para 5 corpos de prova (2 de 25x25x285 e 3 de 40x40x160 mm) .

Tabela 5: Misturas de betões com agregados reciclados (metacaulino (MK) e pozolana de vidro (PV ou GL)) (em g)

	Mistura	Cimento	MK	PV	Granito	Reciclado	Água	Super Plast.
REF G.	1	900	-	-	900	-	270	-
REF BOR	2	900	-	-	-	900	270	-
MK 20	3	720	180	-	-	900	270	1%
MK 40	4	540	360	-	-	900	270	1.50%
MK 60	5	360	540	-	-	900	270	2%
GL 20	6	720	-	180	-	900	270	-
GL 40	7	540	-	360	-	900	270	-
GL 60	8	360	-	540	-	900	270	-

- Os agregados de granito e os de reciclado, tem uma dimensão máxima de #10 mm e mínima de #4,76mm;
- foi utilizado um super plastificante devido à dificuldade em moldar os corpos de prova que continham metacaulino, pois o metacaulino é mais denso que o cimento utilizado (1% = 9 g);
- determinação da quantidade de água: a/c = 0,30;
- as quantidades foram determinadas para 3 corpos de prova (40x40x160 mm).

4.3.1- Procedimento para a preparação dos ensaios e suas leituras

x Argamassas:

- Separar os agregados pelas suas granulometrias, e retirar o pretendido de cada peneiro;
- pesar todos os materiais necessários, para além dos agregados, a quantidade de cimento e água;
- uma vez os materiais pesados, colocar a água no recipiente da misturadora;
- adicionar o cimento à água e iniciar a mistura, em velocidade baixa, durante 30s;
- desligar a misturadora e adicionar os agregados. Depois misturar mais 30s em velocidade baixa;

- parar outra vez a misturadora e raspar a argamassa dos bordos e fundo. Em seguida misturar por mais 30s a uma velocidade alta;
- voltar a parar a misturadora e deixar a mistura em repouso durante 1min e 30s;
- finalizar a mistura com mais 1 min em velocidade alta;
- moldar os corpos de prova e de seguida identificar e colocar numa câmara com temperatura e humidade controlada;
- depois de 24 h na câmara húmida, desmoldar e identificar os corpos de prova, realizando aí as primeiras medidas com precisão 0,002 mm;
- de seguida, colocar os corpos de prova num recipiente de água e colocar o recipiente numa estufa a $80^{\circ} \pm 2^{\circ} \text{ C}$, por um período de 24 h;
- passado esse tempo retirar e efectuar a 1ª medida (medida zero), para todos os corpos de prova;
- efectuada a leitura, colocar os corpos-de-prova numa solução com soda cáustica (1N NaOH), em volume suficiente para cobrir por completo os corpos de prova.

A solução de 1N NaOH é composta para cada litro de:

- 40g de NaOH (soda cáustica) em 900 ml de água
- água adicional para completar 1 l.

- os corpos-de-prova foram mantidos na estufa até as datas de leituras definidas.

x Betões com agregados reciclados:

- Preparar os agregados com granulometria máxima de #10 mm e mínima de #4,76 mm;
- pesar todos os materiais necessários, para além dos agregados, a quantidade de cimento, água, de metacaulino ou de pozolana de vidro;
- A mistura dos materiais componentes dos betões foram realizadas por um procedimento manual, detalhado a seguir:
 - adicionou-se inicialmente os agregados num recipiente e em seguida o cimento e as adições (pozolana de vidro ou metacaulino), misturou-se com auxílio de uma espátula até atingir homogeneidade na mistura seca;
 - por fim colocou-se a água e continuou-se a misturar até homogeneizar a mistura. Para o metacaulino foi preciso adicionar uma pequena quantidade de superplastificante, devido a dificuldade de moldagem.
- a partir da moldagem, o procedimento adoptado é igual ao anteriormente descrito para as argamassas.

4.4- Metodologias de avaliação da reacção álcalis-silica

4.4.1- Ensaio ASTM C 1260/94

O método de ensaio ASTM C 1260/94 permite a avaliação no período de 28 dias do potencial expansivo das reacções álcalis-silica de agregados em barras de argamassa. O agregado deve ser classificado de acordo com a Tabela 3. Com o material em estudo, preparam-se as barras prismáticas de argamassa com traço de 1 : 2,25 (cimento : agregado fino - em massa), em moldes prismáticos de $(2,5 \times 2,5 \times 28,5)$ cm⁴. A norma especifica o uso de uma proporção de a/c (água/cimento) de 0,47. O equipamento utilizado na moldagem dos corpos-de-prova está esquematizado na Figura 11.

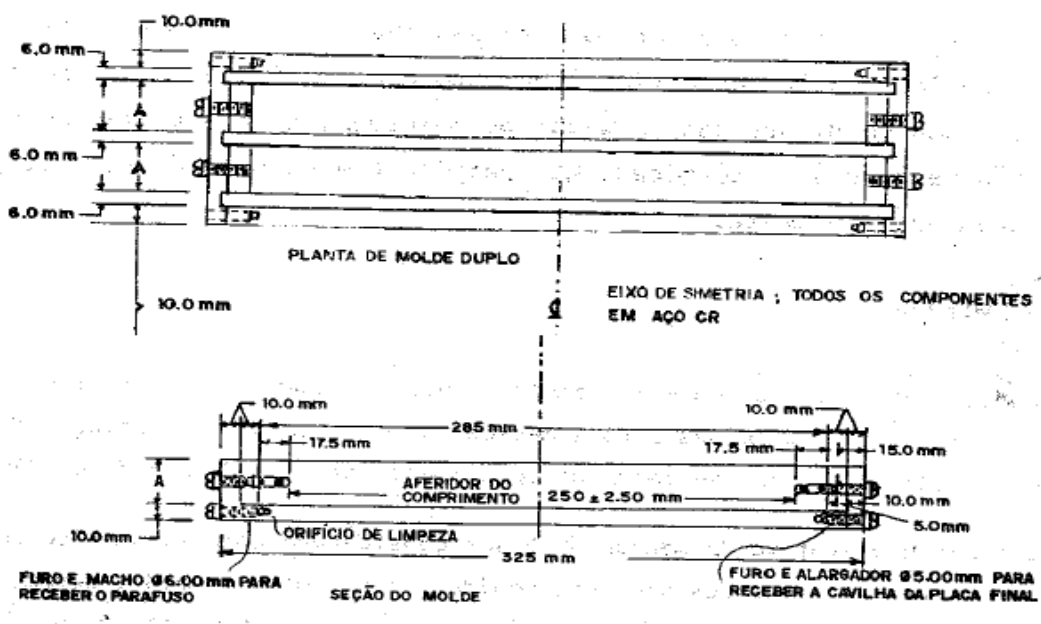


Figura 11: Representação esquemática dos moldes das barras prismáticas

Após a moldagem, os provetes permanecem em cura durante (24 ± 2) horas na câmara húmida, com 95% de humidade relativa, a 25 ± 2 °C. Posteriormente, foram desmoldados, submersos em água e depois colocados em estufa a 80 ± 2 °C, durante 24 ± 2 h. Efectua-se a primeira leitura e adiciona-se aos recipientes de água uma solução de 1N de NaOH:

- 40g de NaOH (soda cáustica) em 900 ml de água
- água adicional para completar 1 l.

Nas leituras seguintes retiramos os provetes num tempo não superior a 15 segundos. Quando a barra de argamassa permanece por um tempo superior a 15 segundos fora da solução pode começar a apresentar uma pequena retracção por perda de água através da evaporação.

A ASTM C 1260, classifica os agregados como deletérios quando, aos 16 dias de idade, as expansões médias dos provetes forem superiores a 0,20 %. Se aos 16 dias as expansões médias forem inferiores a 0,10 %, considera-se que os agregados são inócuos. Contudo, quando as expansões estiverem entre os 0,10 % e os 0,20 %, aos 16 dias os agregados podem ser considerados reactivos.

4.4.2- Ensaio adoptado com prisma 40x40x160 mm

O ensaio adoptado com prisma 40x40x160 mm (Método de CMBT e Método Prisma adaptado), é normalmente realizada a partir da norma ASTM C 1293-01. Adoptando os passos executados no ensaio ASTM C 1260/94, tendo em atenção as medidas dos corpos-de-prova apresentados na Figura 12.



Figura 12: Corpos-de-prova das barras prismáticas (40x40x160 mm)

Capítulo V

5- Resultados e discussões

Neste capítulo apresenta-se e discute-se os resultados obtidos com os diferentes materiais e métodos aplicados para composições de argamassas e de betões, com e sem agentes mitigadores. Em analogia à apresentação dos métodos, no capítulo anterior, os resultados serão aqui discutidos inicialmente para cada método e em seguida comparados entre métodos e materiais.

5.1- Resultados obtidos pelo método ASTM C1260

A Figura 13 apresenta os resultados obtidos com as diferentes origens e características de agregados: natural ou reciclados, reativos e não reativos, finos e britados.

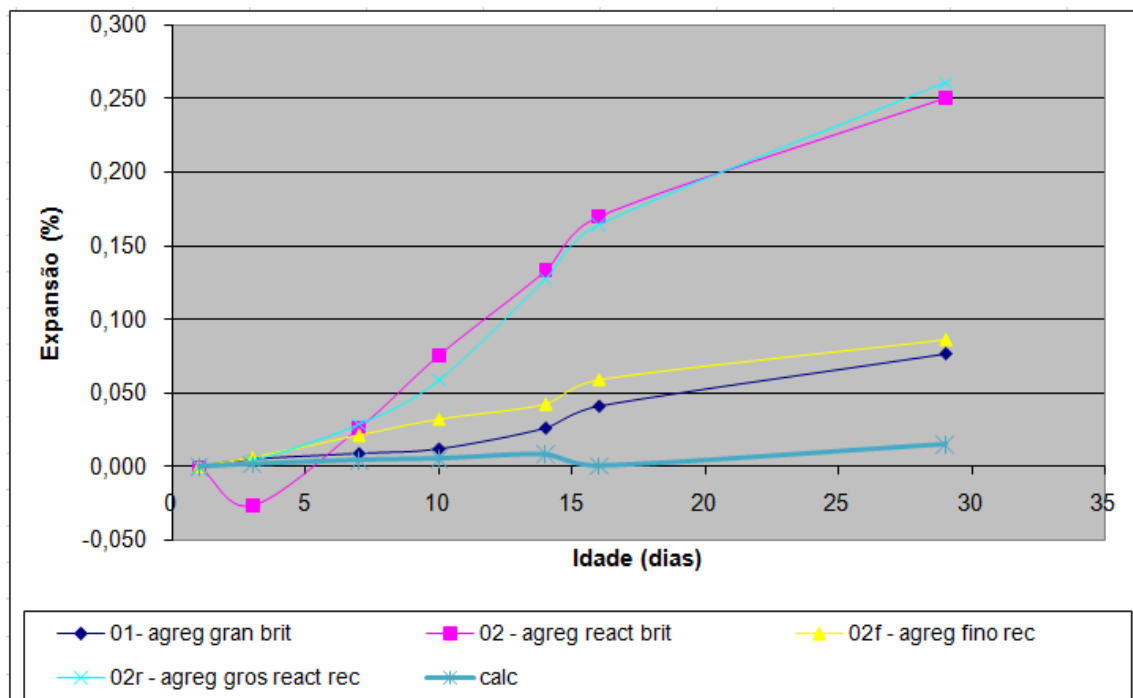


Figura 13: Resultados médios de expansão obtidos pelo método ASTM (corpos-de-prova de 25x25x285 mm)

Ao adoptarmos o limite de 0,10% aos 14-16 dias, o agregado grosso reactivo reciclado e o agregado reactivo britado, seriam considerados potencialmente reactivo.

Com a análise da Figura 13, pode-se observar que todas as argamassas ensaiadas, em corpos-de-prova 25x25x285 mm, têm comportamentos algo similares. A argamassa com agregados reactivos britados e a argamassa grossa reactiva reciclada são consideradas potencialmente reactivas (expansão a variar entre os 0,1 % e os 0,2%), enquanto a argamassa de agregados graníticos britados (argamassa de referência) e argamassa com agregados finos reciclados, são consideradas inócuas (expansão a ser inferior a 0,10 %). Foi efectuado também uma argamassa de calcário, para comprovação, pois o calcário não apresenta nenhuma reactividade.

Na primeira leitura, após colocados os corpos-de-prova na solução, verificou-se que a argamassa 02 (argamassa de agregados reactivos britados) retrai-se enquanto as outras argamassas expandem-se. Tal facto pode ser devido à precisão das medidas, tendo em conta a possibilidade de existir algum erro de operação, muito embora os valores médios tenham sido obtidos após 3 leituras na mesma data para o mesmo corpo-de-prova.

Com o final do ensaio aos 16 dias, resolveu-se ver o comportamento das argamassas por este método, ao fim de 28 dias. Concluiu-se que continuam a aumentar a sua expansão, tendo a argamassa 02 e a argamassa 02r passado para um patamar em que existe a possibilidade de ocorrerem reacções expansivas, considerando-se assim como misturas reactivas. Quanto às outras argamassas continuam inócuas ao fim desses 28 dias, verificando-se também expansões crescentes com a idade destas argamassas.

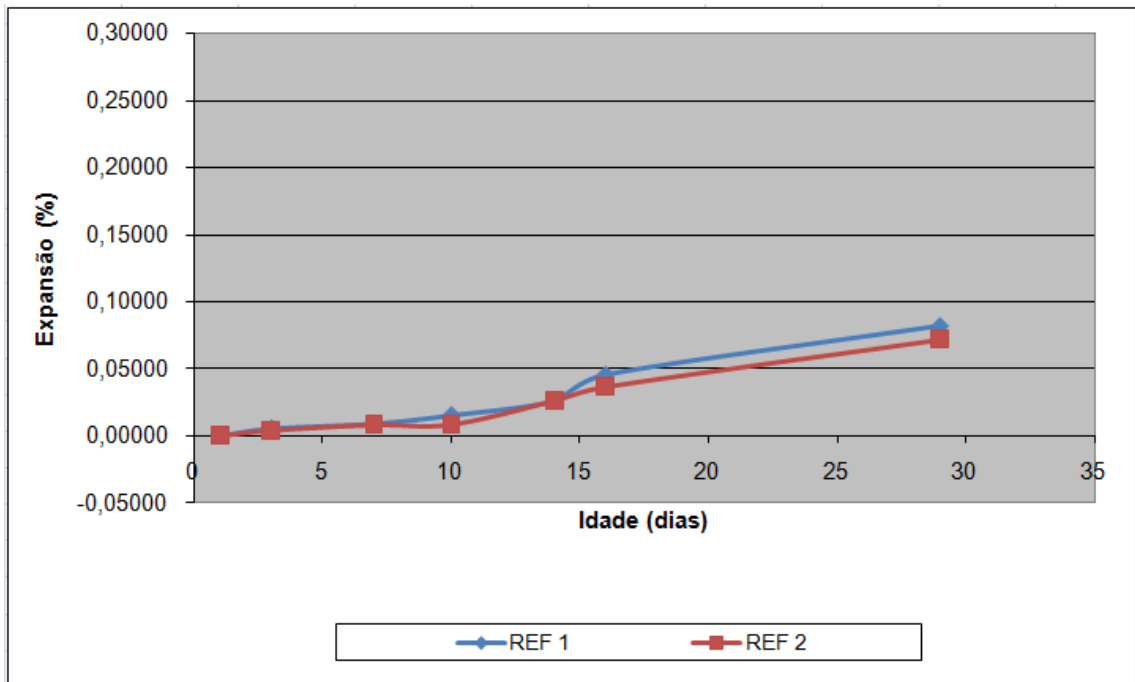


Figura 14: Resultados de expansão obtidos pelo método ASTM com a argamassa de referência (agregado granítico britado)

Na figura 14, ilustram-se os resultados individuais do ensaio segundo a norma ASTM. Nesta figura pode-se observar que as argamassas de agregado granítico britado têm comportamentos similares, sendo as argamassas REF 1 e REF 2 consideradas inócuas aos 16 dias. A expansão vai aumentando até ao fim do ensaio, mantendo-se assim até aos 28 dias.

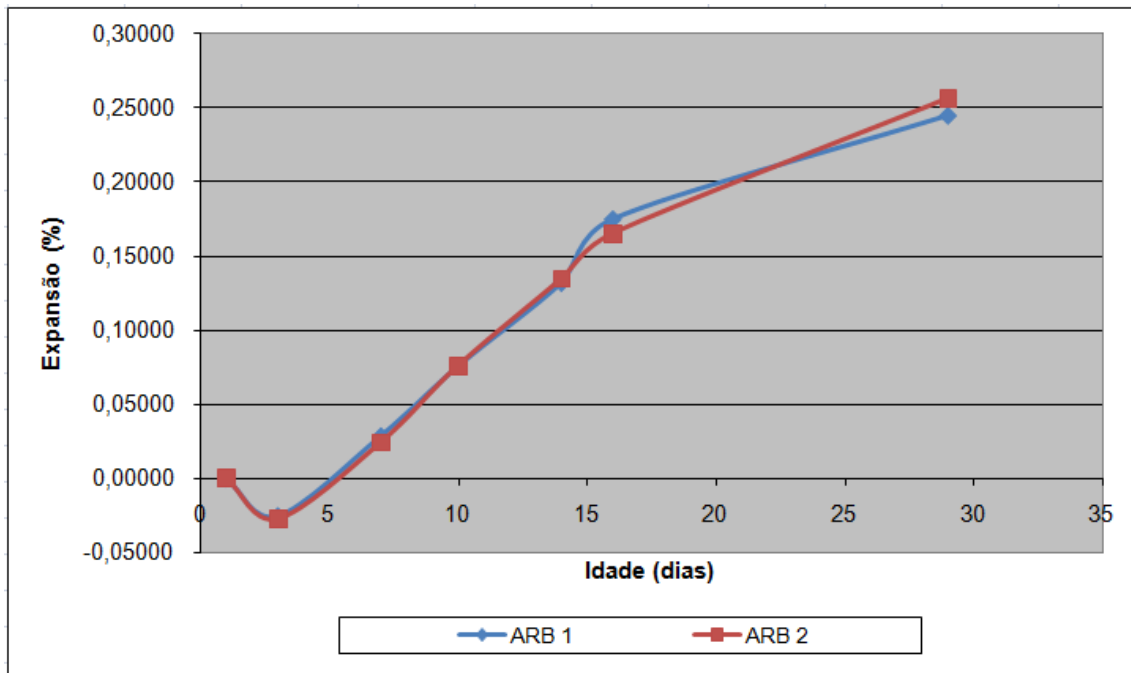


Figura 15: Resultados de expansão obtidos pelo método ASTM em argamassas com agregado reactivo britado

Na Figura 15, apresentam-se resultados individuais do ensaio segundo a norma ASTM para o caso dos agregados reactivos britados. Nesta figura pode-se observar que os resultados individuais das argamassas de agregado reactivo britado são semelhantes. Considera-se, através das argamassas ARB 1 e ARB 2, que o agregado reciclado é potencialmente reactivo uma vez que o limite de expansão aos 16 dias é superior aos 0,10 %. Este valor aumenta gradualmente até ao fim do ensaio e, aos 28 dias, atinge valores superiores a 0,20 %.

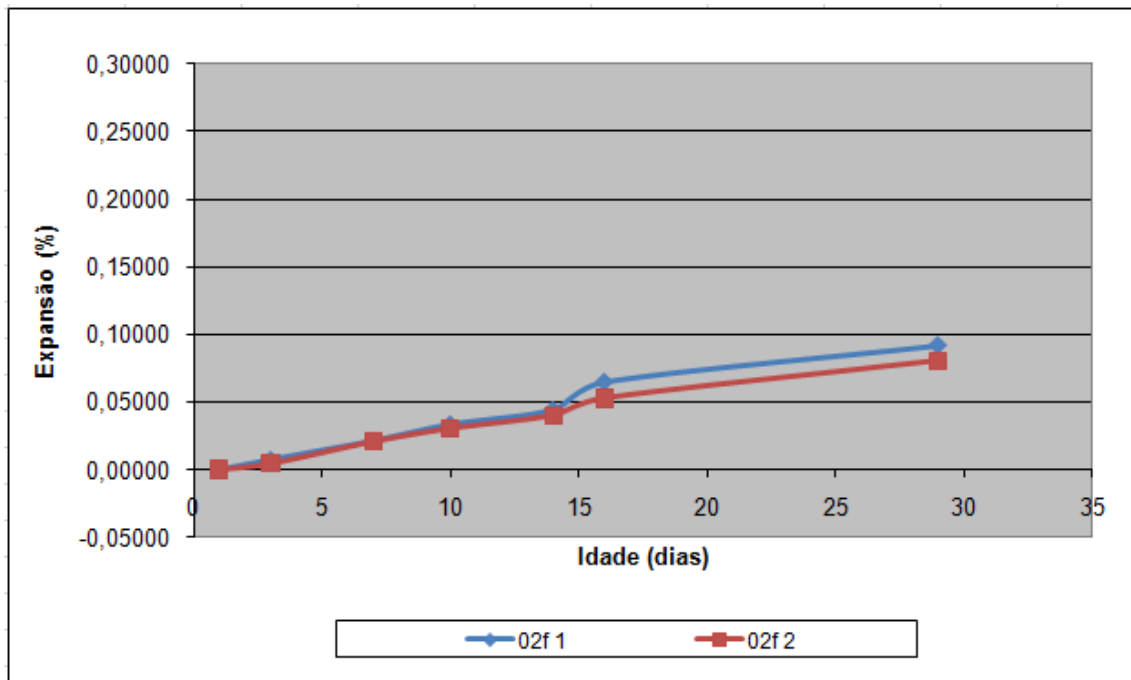


Figura 16: Resultados de expansão obtidos pelo método ASTM em argamassas com agregado fino reciclado

Com a análise da Figura 16 pode-se observar que as argamassas de agregado fino reciclado têm comportamentos similares, sendo as argamassas 02f 1 e 02f 2 consideradas inócuas aos 16 dias. Esta mantém-se inócua até ao fim dos 28 dias.

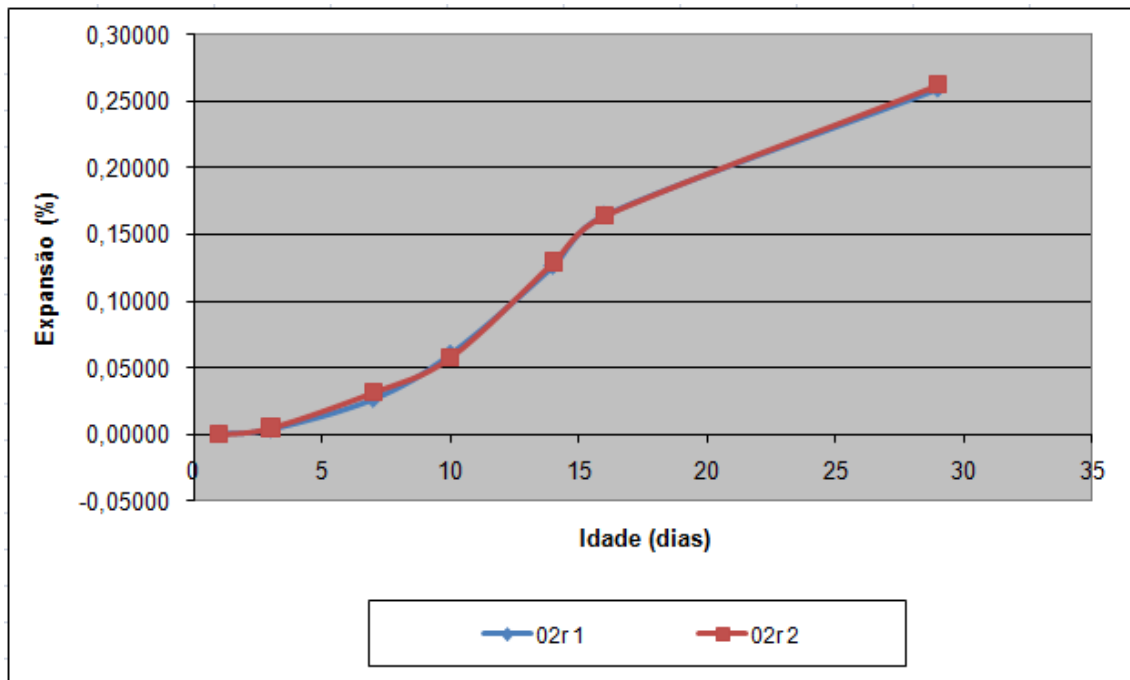


Figura 17: Resultados de expansão obtidos pelo método ASTM em argamassas com agregados grossos reactivos reciclados

Na Figura 17, apresentam-se resultados individuais para o caso dos agregados reactivos britados. Nesta figura pode-se observar que as argamassas de agregado reactivo britado também têm comportamentos similares, sendo as argamassas 02r 1 e 02r 2 consideradas potencialmente reactivas aos 16 dias. Valor que aumenta gradualmente até ao fim do ensaio, aos 28 dias, atingindo valores superiores a 0,20 %.

5.2. Resultados obtidos com o método adaptado ao prisma 40x40x160 mm

Ao adoptarmos a tentativa de limite de 0,10% aos 28 dias, proposto por XU *et al.* (2000), apenas o agregado grosso reactivo reciclado seria considerado potencialmente reactivo. Não obstante, há que se considerar que o limite de expansão potencialmente deletéria depende em iguais condições de ensaio da geometria do corpo de prova. Neste caso, segundo FORNIER *et al.*, a aferição do limite potencialmente reactivo deveria ser realizado com resultados obtidos em ensaios de corpos de prova submetido a condições reais de exposição.

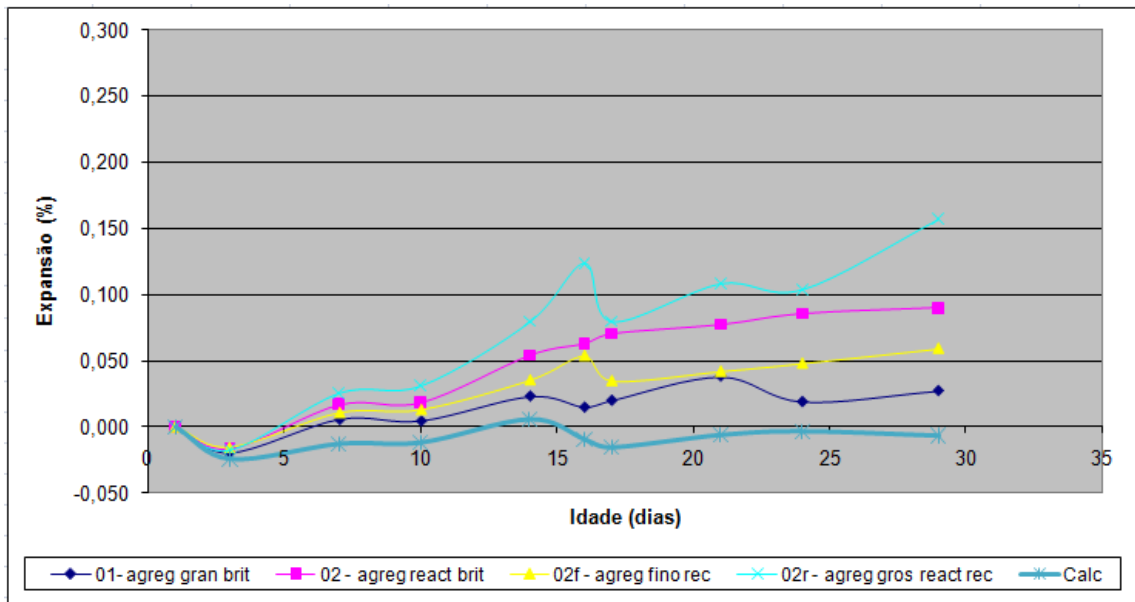


Figura 18: Resultados de expansão obtidos pelo método Prisma adaptado (corpos-de-prova de 40x40x160 mm)

Com a análise da Figura 18, pode-se observar que as argamassas ensaiadas, em corpos-de-prova 40x40x160 mm, que aos 16 dias, a argamassa 02r é considerada potencialmente reactiva, mantendo-se assim até ao final do ensaio. A argamassa 01, a argamassa 02 e a argamassa 02f, aos 16 dias são consideradas inócuas, mantendo-se inócuas até ao fim do ensaio. A argamassa 02, pelo método de ASTM é considerada potencialmente reactiva, aos 16 dias. Neste tipo de ensaio verificamos que tanto nesta mistura como na mistura 02r, desenvolve-se mais lentamente a expansão.

Na primeira leitura, no geral, após colocadas as argamassas na solução, estas retraem-se, demorando algum tempo a reagir logo ao meio alcalino da solução.

Ao fim dos 28 dias podemos verificar que argamassa 02r continua como potencialmente reactiva, notando que a argamassa 02 continua como inócua mas muito perto do valor pretendido de 0,1%. Quanto às outras argamassas, continuam inócuas como o esperado, verificando-se também expansões crescentes até ao fim do ensaio.

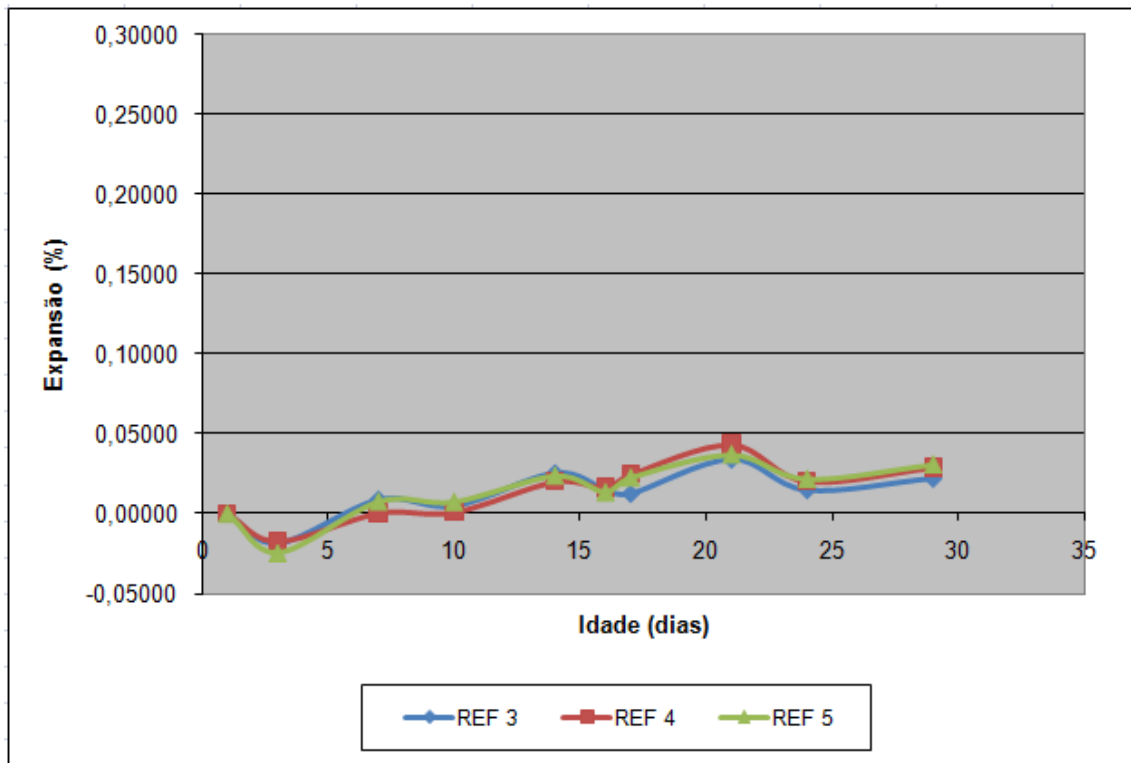


Figura 19: Resultados de expansão obtidos pelo método Prisma adaptado, com a argamassa de referência (agregado granítico britado)

Na Figura 19 ilustram-se os resultados individuais do ensaio segundo o método Prisma adaptado. Nesta figura pode-se observar que as argamassas de agregado granítico britado têm comportamentos similares, sendo as argamassas REF 3, REF 4 e REF 5 consideradas inócuas, aos 16 dias. Ambas continuando inócuas até ao fim do ensaio, aos 28 dias.

A primeira leitura, após colocados os corpos-de-prova na solução, mostra que as argamassas retraem-se, notando-se que entre o dia 5 e o dia 8 deu-se a expansão e o efeito da solução.

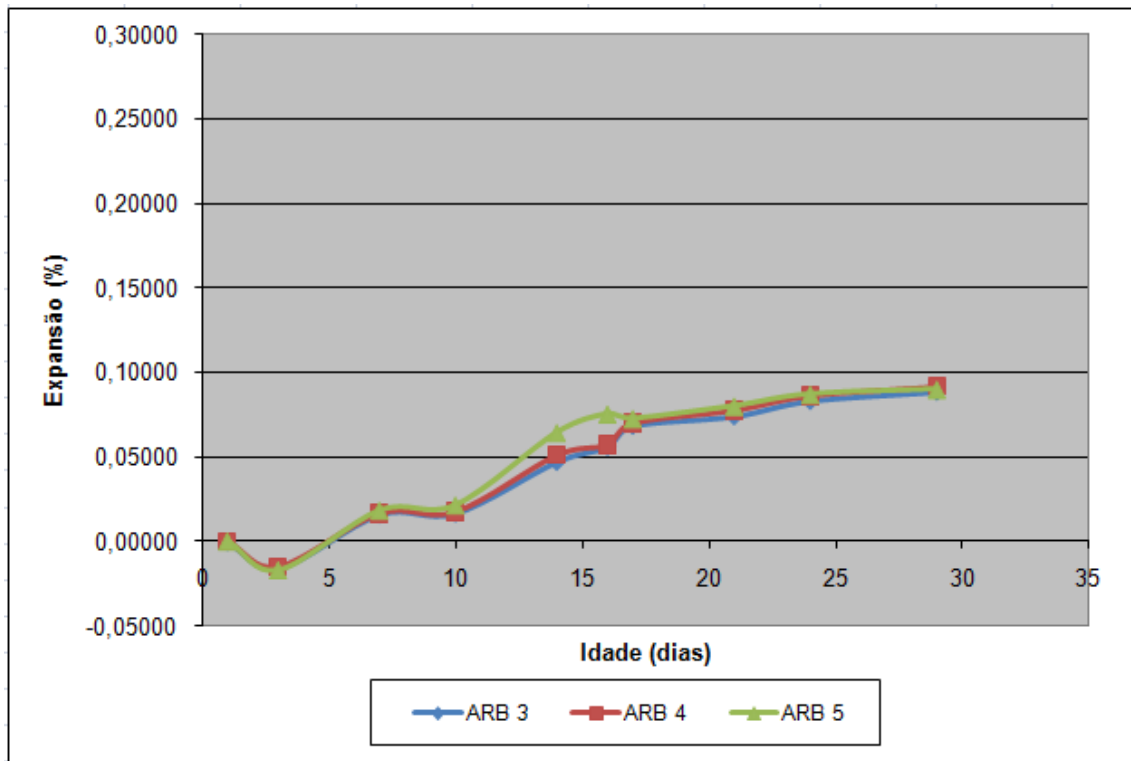


Figura 20: Resultados de expansão obtidos pelo método Prisma adaptado, em argamassas com agregado reactivo britado

Na Figura 20, ilustram-se os resultados individuais do ensaio segundo o método Prisma adaptado. Nesta figura pode-se observar que as argamassas de agregado granítico britado têm comportamentos similares, sendo as argamassas ARB 3, ARB 4 e ARB 5 consideradas inócuas, aos 16 dias. Ambas continuam inócuas até ao fim do ensaio ficando muito perto do esperado, que seria acima dos 0,1 %, sendo o agregado considerado potencialmente reactivo aos 28 dias.

A primeira leitura, após colocados os corpos-de-prova na solução, mostra que as argamassas retraem-se, notando-se que entre o dia 5 e o dia 8 deu-se a expansão e o efeito da solução.

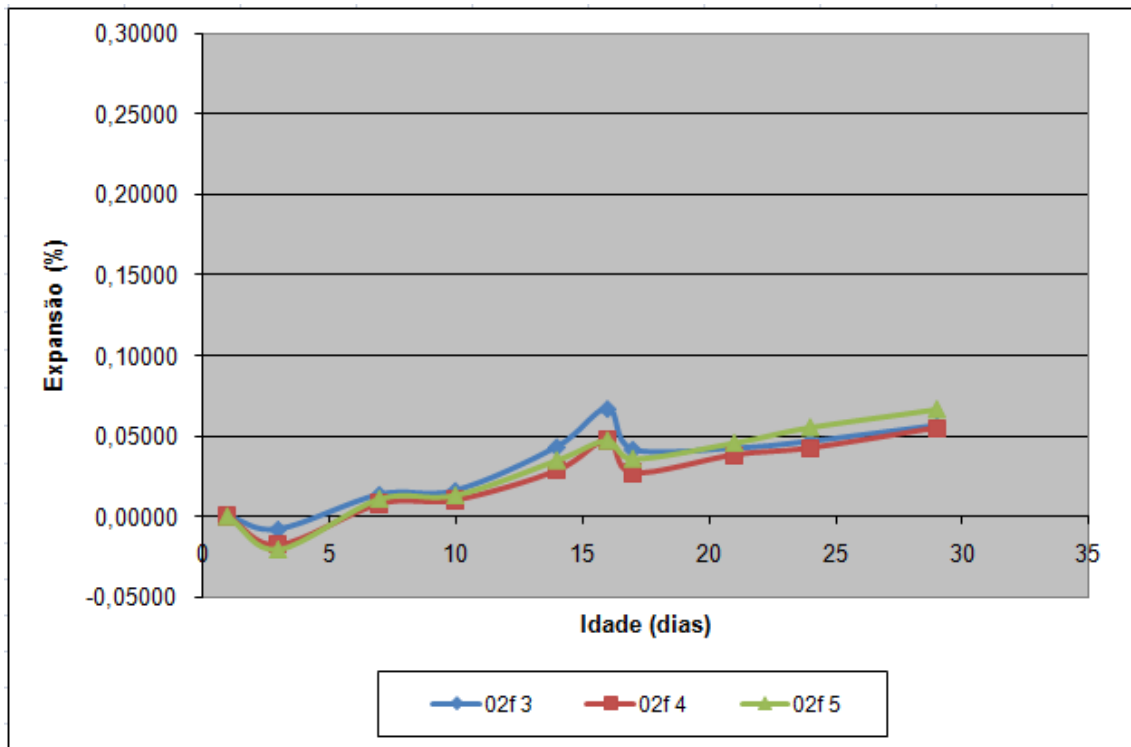


Figura 21: Resultados de expansão obtidos pelo método Prisma adaptado, em argamassas com agregado fino reciclado

Na Figura 21, ilustram-se os resultados individuais do ensaio segundo o método Prisma adaptado. Nesta figura pode-se observar que as argamassas de agregado granítico britado têm comportamentos similares, sendo as argamassas 02f 3, 02f 4 e 02f 5 consideradas inócuas, aos 16 dias. Ambas continuando inócuas até ao fim do ensaio, aos 28 dias.

A leitura aos 16 dias parece um pouco exagerada. Pode ter sido afectada por uma calibragem do equipamento um pouco defeituosa, pois os 3 corpos-de-prova têm um pico de valores nesta leitura.

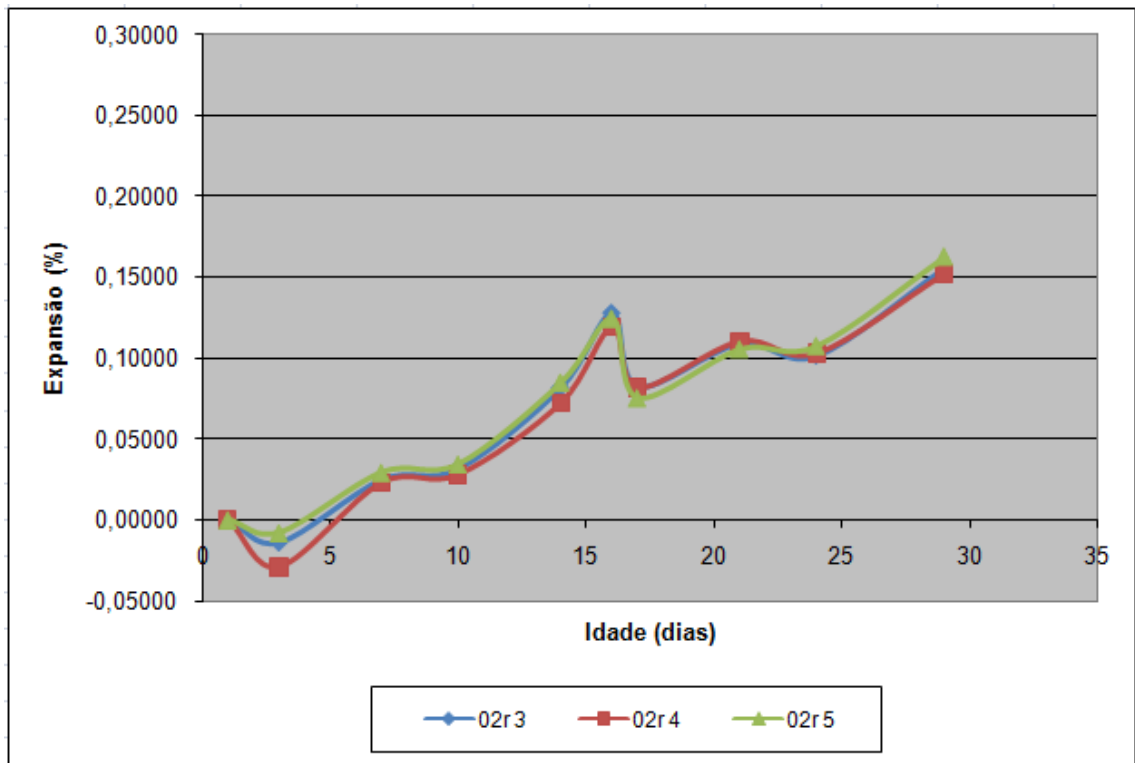


Figura 22: Resultados de expansão obtidos pelo método Prisma adaptado, em argamassas com agregados grossos reactivos reciclados

Com a análise da Figura 22, pode-se observar que as argamassas de agregado grosso reactivo reciclado têm comportamento parecido, sendo as argamassas 02r 3, 02r 4 e 02r 5, consideradas potencialmente reactivas, aos 16 dias. Tendo-se em conta que o parâmetro reactivo, que é um valor de expansão maior que 0,10 % e menor que 0,20%, valor que estará nesse intervalo de valores crescendo gradualmente, até ao fim do ensaio, os 28 dias.

A leitura aos 16 dias parece um pouco exagerada, pode ter sido afectada por uma calibragem do equipamento um pouco defeituosa, pois, os 3 corpos-de-prova têm o mesmo comportamento nesta leitura.

- Comparação entre métodos utilizados nos ensaios (Exp. ASTM e Exp. CMBT)

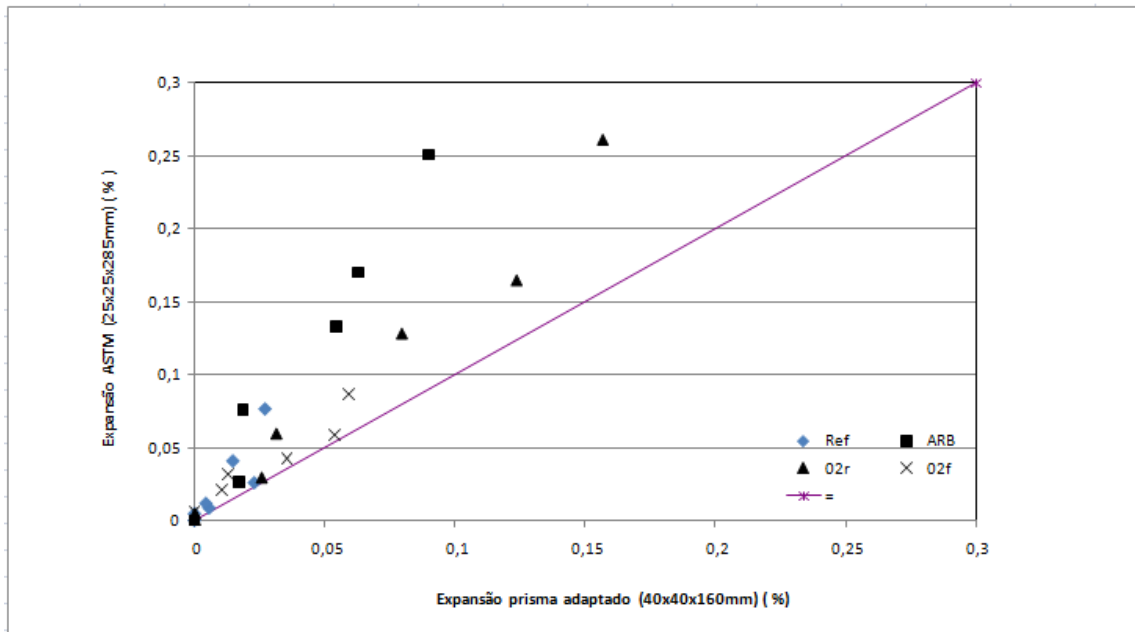


Figura 23: Resultados da comparação entre expansões para argamassas de referência para os dois métodos de ensaio (comparação entre corpos de prova de 25x25x285 com 40x40x160)

Na Figura 23, podemos comparar os resultados obtidos pelos dois métodos, o método ASTM e o método do Prisma adaptado.

Pode-se verificar que para valores baixos de expansão, inferiores a 0,05 %, as dimensões dos corpos de prova não têm grande influência no resultado, porém a partir desse valor é claro que a expansão medida pelo método ASTM desenvolve-se mais rapidamente do que a expansão medida pelo método de Prisma adaptado, para todas as diferentes argamassas.

Os resultados acima da linha de igualdade indicam que o critério limite de expansão utilizado com o método ASTM, não pode ser directamente aplicado ao método do Prisma adaptado (40 x 40 x 160mm). Em verdade a calibração deste ensaio acelerado adaptado ao prisma deverá ser objecto de estudo utilizando-se para tal mensurações de expansão em betões expostos à condições reais e a longo termo.

5.3- Resultados obtidos para composição de betão, método CMBT (concrete micro-bar test)

→ Betões com agregados reciclados (Pozolana de vidro e Metacaulino)

- Misturas Referência (0% de mitigador)

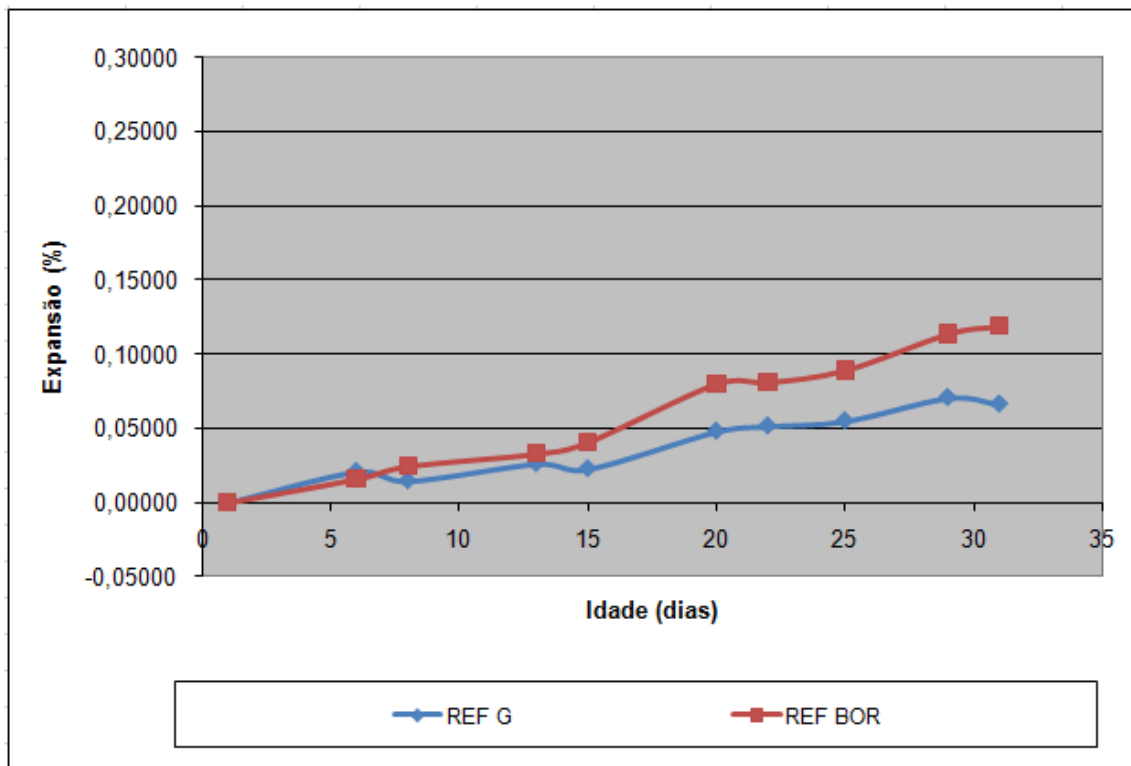


Figura 24: Resultados médios de expansão dos corpos-de-prova de betão reciclado (Pozolana de vidro) com 100 % de agregados grossos reactivos, pelo método do CMBT

Com a análise da Figura 24, pode-se observar que o betão de referência com agregados graníticos é considerado inócuo durante todo o ensaio, quanto ao betão de referência com agregados reciclados, é considerado potencialmente reactivo, aos 30 dias.

- Misturas com 100% de agregados grossos reactivos

- Pozolana de vidro (GL)

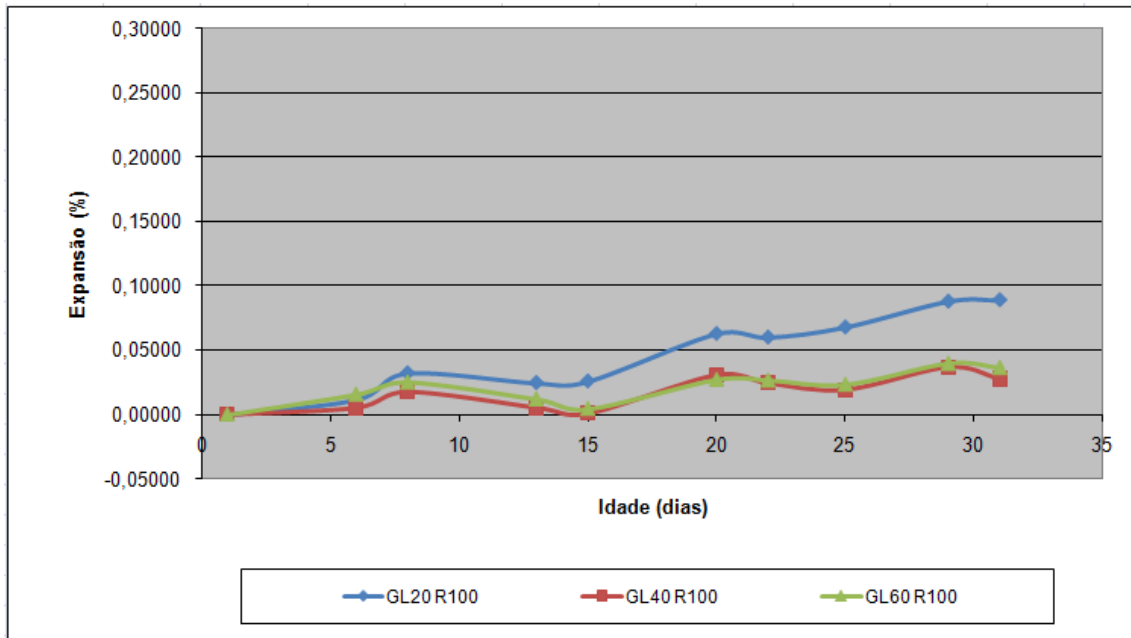


Figura 25: Resultados médios de expansão dos corpos-de-prova de betão reciclado (Pozolana de vidro) com 100 % de agregados grossos reactivos, pelo método CMBT

Com a análise da Figura 25, pode-se observar que os betões com 100 % de agregados grossos reactivos reciclados e com a adição de pozolana de vidro são considerados inócuos até ao fim do ensaio.

Na primeira leitura após colocados os corpos-de-prova na solução expandem-se, sendo importante ver o desenvolvimento do betão GL20R100 comparando às outras duas misturas, mostra-nos que, quanto mais pozolana de vidro colocar-mos na mistura, menor será a sua expansão.

- Metacaulino (MK)

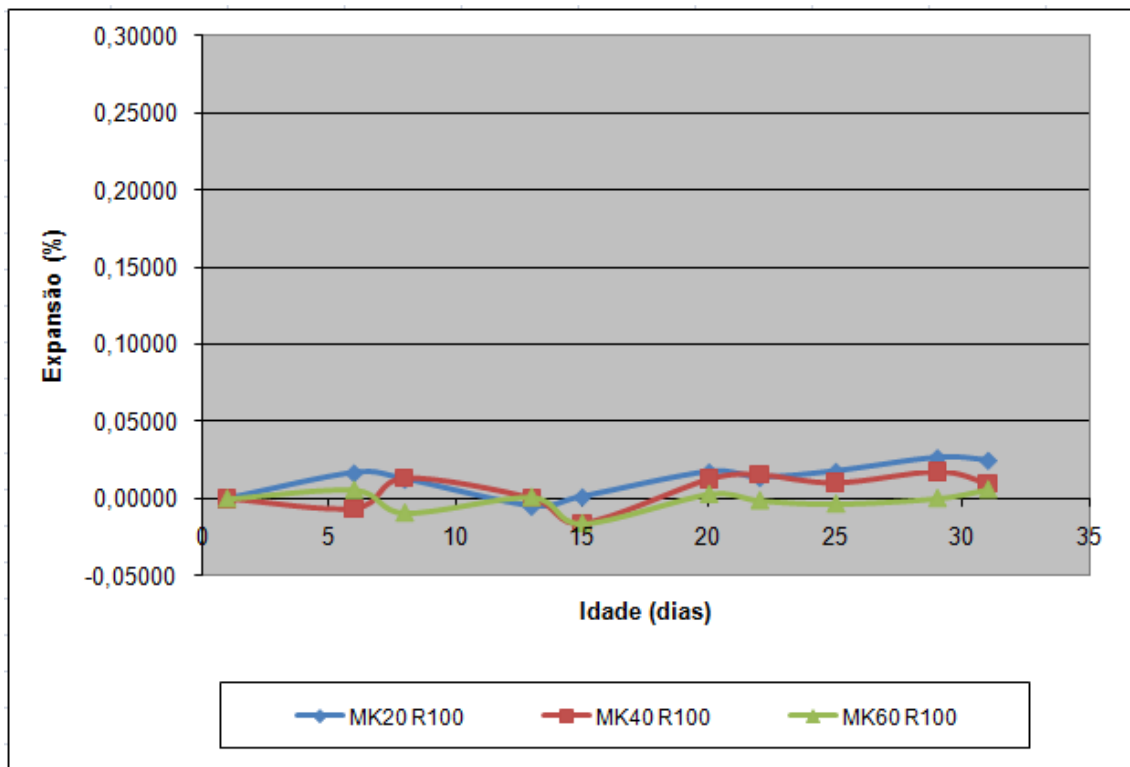


Figura 26: Resultados médios de expansão dos corpos-de-prova de betão reciclado (Metacaulino) com 100 % de agregados grossos reactivos, pelo método CMBT.

Com a análise da Figura 26, pode-se observar que os betões com 100% de agregados grossos reactivos reciclados, e com a adição de metacaulino, são considerados inócuos durante todo o ensaio.

Na primeira leitura após colocados os corpos-de-prova na solução, mostra-nos que, o MK20 R100 e o MK60 R100 expandem-se e o MK40 R100, retrai-se.

- Comparação entre os resultados das argamassas de referência com os argamassas com mitigadores (metacaulino e pozolana de vidro)

Por exemplo GL20 R100, MK 20 R100 e REF BOR:

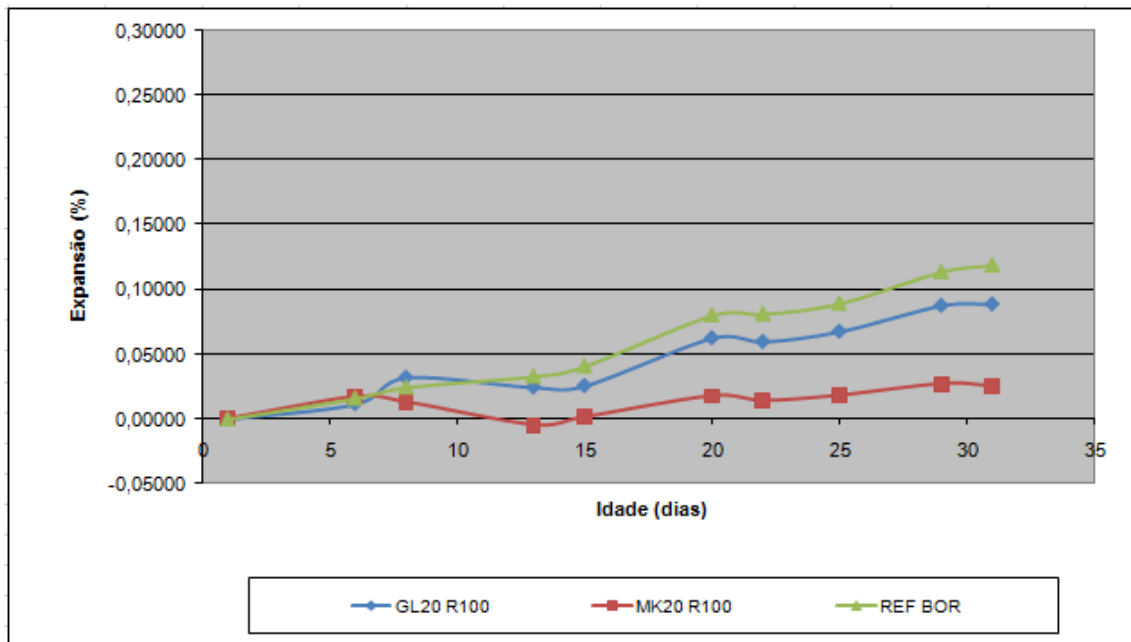


Figura 27: Resultados de expansão dos corpos-de-prova de betão reciclado com 20% (Pozolana de vidro e Metacaulino) com 100 % de agregados grossos reciclados e betão referência com agregados grossos reciclados, pelo método CMBT

Com a análise da Figura 27, pode-se observar que os betões com agregados reciclados (20 % de pozolana de vidro) com 100 % de agregados grossos reactivos são considerados inócuos durante todo o ensaio, acontecendo o mesmo com o betão com agregados reciclados com 20% de metacaulino e 100 % de agregados grossos reciclados.

Tendo em comparação o betão de referência com os betões com 20% de mitigador, podemos dizer que o mitigador actua de forma positiva para diminuir a probabilidade de ocorrer reacções expansivas neste tipo de betões, sendo o betão com o metacaulino como mitigador, o mais eficaz.

- GL60 R100, MK 60 R100 e REF BOR:

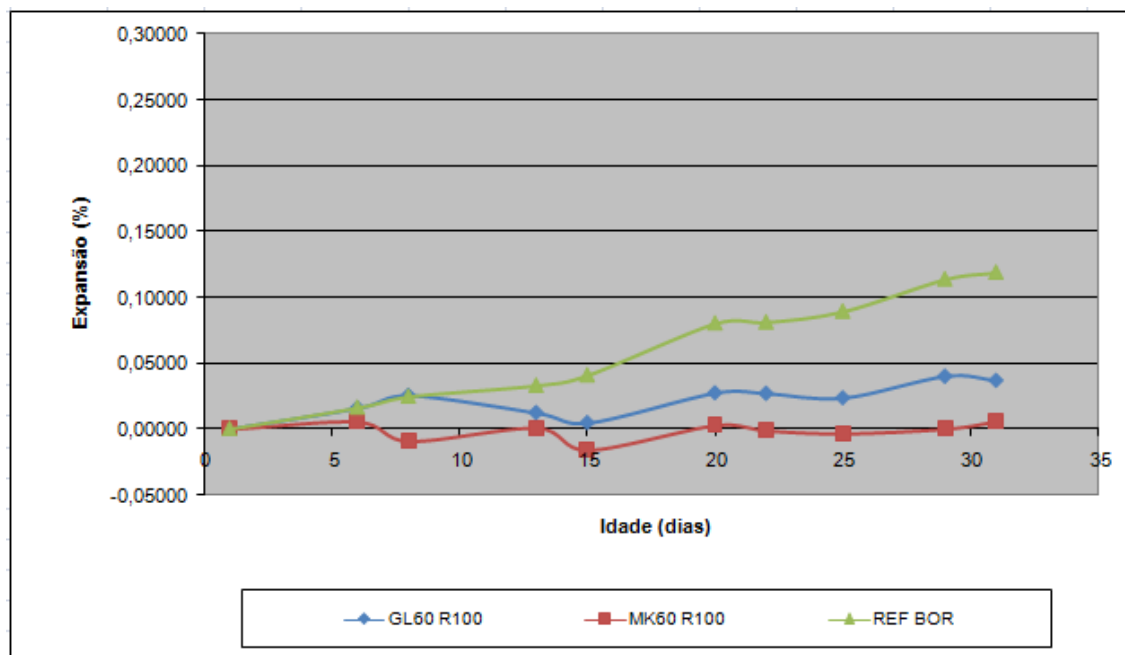


Figura 28: Resultados de expansão dos corpos-de-prova de betão reciclado com 60% (Pozolana de vidro e Metacaulino) com 100 % de agregados grossos reciclados e betão referência com agregados grossos reciclados, pelo método CMBT

Analisando a Figura 28 e tendo em comparação o betão referência com os betões com 60% de mitigador, podemos dizer que o mitigador actua de forma bastante positiva para diminuir a probabilidade de ocorrer reacções expansivas neste tipo de betões, sendo o betão com o metacaulino como mitigador, o mais eficaz, pois esse betão, quase que não sofre retrações nem expansões durante todo o ensaio.

Capítulo VI

6- Conclusões

Os resultados dos ensaios realizados com argamassas através de dois métodos, método ASTM C 1260 e o método do prisma adaptado, bem como os ensaios realizados pelo método CMBT em betão com agregados reciclados e com a adição de minerais, tais como, a pozolana de vidro e o metacaulino, testadas aqui como eventuais mitigadores da reacção álcalis-agregado, permitiram concluir que:

- Para as argamassas ensaiadas pelo método do ASTM C 1260

- Os agregados têm comportamentos já esperados, sendo os agregados reactivos britados e os agregados reactivos reciclados, considerados potencialmente reactivos (expansão a variar entre os 0,1 % e os 0,2%), quanto aos resultados obtidos com agregados graníticos britados (chamada argamassa referência) e com agregados finos reciclados, são considerados inócuos (expansão a ser inferior a 0,10 %). O calcário, também utilizado no ensaio da argamassa é considerado inócuo. Neste estudo o calcário foi utilizado como referência para se diminuir eventuais dúvidas do que se demonstra reactivo e não reactivo. A leitura aos 28 dias, confirmou o potencial reactivo, com expansão superior a 0,20%, dos agregados reactivos britados e dos agregados grossos reactivos reciclados, bem como a inocuidade dos demais agregados ensaiados.

- Para argamassas de referência ensaiadas pelo método do prisma adaptado

- Comparando-se os resultados obtidos pelo método do ASTM C 1260 e os obtidos em corpos-de-prova 40x40x160 mm, observa-se que os valores deste ultimo são em geral inferiores. Aos 16 dias, a argamassa 02r apresenta resultados da expansão que classificam os agregados como inócuos. A argamassa 02, que pelo método de ASTM C 1260 classifica o agregado como potencialmente reactivo, pelo método em questão observa-se que a expansão tanto nesta mistura como na mistura 02r se desenvolve mais lentamente. Ao fim dos 28 dias podemos verificar que a argamassa 02r continua a classificar os agregados como potencialmente reactivos, notando que, os resultados da argamassa 02 continuam explicitando inocuidade dos agregados.

- Para betões com agregados grossos reciclados e com adições (pozolana de vidro e metacaulino) ensaiados pelo método CMBT:

- Com a análise do betão referência, com agregados graníticos, considera-se que este agregado é inócuo, como já se esperava. Quanto ao agregado reactivo reciclado, lembre-se que este é considerado potencialmente reactivo pelos ensaios em argamassas.

- Comparando-os com os betões com metacaulino e pozolana de vidro, (20%,40%,60%) e 100% de agregados reciclados, pode-se confirmar que quanto maior for a percentagem de adição (pozolana de vidro), a expansão é mais lenta, atingindo valores relativamente baixos aos 30 dias.

- Quanto a incorporação do metacaulino, em pequena percentagem no betão, este já demonstra, comparando com o betão referência de agregados reciclados, eficácia na mitigação da reacção álcalis-agregado. Com 20% de metacaulino, a expansão se dá muito lentamente, anulando a acção deletéria do agregado. Com 60% de metacaulino, os resultados de expansão são muito próximos do nulo, isto é, o betão não sofre expansões significativas ao longo deste ensaio.

- Por fim pode-se dizer que tanto o metacaulino ensaiado como a pozolana de vidro tem acção fortemente mitigadora da reacção álcalis-agregado, servindo portanto como um potencial componente de betões quando a escolha da natureza e tipos de agregados é limitada e há suspeita de reactividade dos mesmos.

Capítulo VII

7- Recomendações para Estudos Futuros

Como extensão ao trabalho desenvolvido considera-se de interesse os seguintes estudos adicionais:

- Completar as análises comparativas realizadas ao longo do presente trabalho como novos resultados experimentais alargando assim a confiabilidade dos resultados.
- Estudar a expansão de betões pelo método CMBT e pelo método em verdadeira grandeza ou seja em corpos de prova expostos em condições naturais.
- Estudar experimentalmente e comparativamente com outros métodos, o método adaptado ao prisma com o intuito de estabelecer limites de expansão.
- Estudar outros materiais provenientes de resíduos industriais ou urbanos como eventual mitigador da reacção álcalis-agregado.

Bibliografia

ACI, “*State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity*”, Reported by ACI Committee 221, American Concrete Institute, 31 p., Michigan, 1998

ANDRIOLO, F. R., “*Observação de estruturas de concreto: validade quanto à ocorrência da reação álcalis-agregado*”, Simpósio sobre reactividade álcalis-agregado em estruturas de concreto, CBGB / FURNA/ IBRACON, Goiânia, 1997

BEN HAHA, M., “*Mechanical effects of alkali silica reaction in concrete studied by sem-image analysis*”, Thèse pour le obtention du grade de Docteur ès sciences, Faculté Sciences et Techniques de L’Ingénieur, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 176 p., 2006

BERRA, M.; BERTACCHI, P., “*Alkali-aggregate reaction in concrete dams*”, Water Power and Dam Construction, Vol. 43 (4), pp. 12-16, 1991

BÉRUBÉ, M. A.; FOURNIER, B.; MONGEAU, P.; DUPONT, N.; OUELLET, C.; FRENETTE, J., “*Effectiveness of the accelerated mortar bar method, ASTM C-P proposal P214 or NBRI for accessing potential AAR in Québec (Canada)*”, Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 92-101, London, 1992

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M., “*Laboratory assessment of alkali content of concrete using hot-water extraction*”, Cement, Concrete and aggregates, Vol. 24 (1), pp. 28-36, 2002

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; FOURNIER, B.; VEZINA, D., “*Laboratory and field investigations of the influence of sodium chloride on alkali-silica reactivity*”, Cement and Concrete Research, n. ° 33, pp. 77-84, 2003

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M., “*Reply to the discussion by C. Shi of the paper: Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity*”, Cement and Concrete Research, Vol. 34 (5), pp. 897-899, 2004A

BÉRUBÉ, M. A.; DUCHESNE, J.; DORION, J. F.; RIVEST, M., “*Reply to the discussion by C. Shi of the paper: Laboratory assessment of alkali contribution by aggregates to concrete and application to concrete structures affected by alkali-silica reactivity*”, Cement and Concrete Research, Vol. 34 (5), pp. 903-904, 2004B

BESSEM, P. H.; DEMARS, P., “*Reactions alkalis-granulats dans le beton*”, Annales des Travaux Publics de Belgique, Vol. 4, Ministère des travaux Publics, pp. 345-359, Belgique, 1989

BRE DIGEST 330, “*Alkali-aggregate reaction in concrete*”, Building Research Establishment, U.K., 2 p., 1991

BUTTLER, Alexandre M., “*Concreto com agregados graúdos reciclados de concreto - influência da idade de reciclagem nas propriedades dos agregados e concretos reciclados*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia de Estruturas, Escola de Engenharia da Universidade de São Paulo, 2003

CAPRA, B.; BOURNAZEL, J. P.; BOURDAROT, E., “*Modeling of alkali-aggregate reaction effects in concrete dams*”, In: Proceedings of the Second International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Hydroelectric Plants and Dams, USCOLD, Tennessee, USA, pp. 441-455, 1995

CARRIJO, P. M., “*Análise da influência da massa específica de agregados graúdos provenientes de resíduos de construção e demolição no desempenho mecânico do concreto*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2005

CONCRETE SOCIETY, “*Alkali-silica reaction: minimizing the risk of damage to concrete. Guidance notes and model specification clauses*”, Technical Report n.º 30, 3rd edition, Concrete Society, 34 p., London, 1987

CONSTANTINER, D.; DIAMOND, S., “*Alkali release from feldspars into pure solutions*”, Cement and Concrete Research, Vol. 33, pp. 549-554, 2003

DAHER, C., “*Avaliação do grau de influência de parâmetros de contorno no ensaio de reatividade potencia álcalis-agregado pelo método acelerado*”, Dissertação de Mestrado em Engenharia Civil, Universidade Federal do Paraná, Paraná, 2009

DAVIES, G.; OBERHOLSTER, R. E., “*The alkali-silica reaction product. A mineralogical and an electron microscopic study*”, Proceedings of the 8th International Conference on Cement Microscopy, Orlando, Florida, USA, pp. 303-326, 1986

DAVIES, G.; OBERHOLSTER, R. E., “*Use of the NBRI accelerated test to evaluate the effectiveness of the mineral admixtures in preventing the alkali-silica reaction*”, Cement and Concrete Research, Vol. 17, n.º 1, pp. 621-635, 1987

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N., “*Some observations on the rapid chemical test for potentially reactive aggregate*”, Cement and Concrete Research, Vol. 11, n. ° 2, pp. 191-196, 1981b

DENT GLASSER, L. S.; KATAOKA, N., “*The chemistry of alkali-aggregate reaction*”, Cement and Concrete Research, Vol. 11, n. ° 1, pp. 1-9, 1981a

FERNANDES, M. I. G., “*Caracterização petrográfica, química e física de agregados graníticos em betões. Estudo de casos de obra*” Tese de Doutoramento em Geologia, Faculdade de Ciências da Universidade do Porto, Porto, 2005

FOOKES, P. G., “*An introduction to the influence of natural aggregates on the performance and durability of concrete*”, Quarterly Journal of Engineering and Geology, L3, pp. 207-229, 1980

FORADABA, J. S., “*Envejecimiento de presas por reacciones expansivas en el hormigon*”, Tesina, Departamento de Construção, Escola Superior Técnica de Caminhos, Canais e Portos de Barcelona, Universidade Politécnica da Catalunha, Barcelona, 124 p., Julho 2005

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A., “*Application of the NBRI accelerated mortar bar test to siliceous carbonate aggregates produced in the St. Lawrence Lowlands (Québec, Canada). Part 1: Influence of various parameters on the test results*”, Cement and Concrete Research, Vol. 21, n.° 5, pp. 853-862, 1991a

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A., “*Application of the NBRI accelerated mortar bar test to siliceous carbonate aggregates produced in the St. Lawrence Lowlands (Québec, Canada). Part 2: Proposed limits, rates of expansion, and microstructure of reaction products*”, Cement and Concrete Research, Vol. 21, n.° 6, pp. 1069-1082, 1991b

FOURNIER, B.; BÉRUBÉ, M. A., “*General notions on alkali-aggregate reactions*” in: Petrography and Alkali-Aggregate Reactivity, CANMET, Ottawa, Canada, pp. 7-69, 1993

FRENCH, W. J., “*Reactions between aggregates and cement paste - in interpretation of the pessimum*”, Quarterly Journal of Engineering Geology, Vol. 13, pp. 231-247, 1980

GILLOT, J. E., “*Alkali-aggregate reaction in concrete*”, Engineering Geology, Vol. 9, pp. 303-326, 1975

GRATTAN-BELLEW, P. E., “*Microcrystalline quartz, undulatory extinction and alkali-silica reaction*”, Proceedings of the 6th International Conference on Alkalis in Concrete, Copenhagen, pp. 303-314, 1983

GRATTAN-BELLEW, P. E., “*Evaluation of test methods for alkali-aggregate reactivity*”, Proceedings of the 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, pp. 383-394, 1992

GRATTAN-BELLEW, P. E., “*Petro graphic and technological methods for evaluation of concrete aggregates*”, In: Ramachadran, V. S. e Beaudoin, J. J. (editors), Handbook of analytical techniques in concrete science and technology. Principles, techniques, and applications, Noyes Publications, pp. 63-230, USA, 2001

GRATTAN-BELLEW, P. E.; BEAUDOIN, J. J., “*Effect of ph logopite mica on alkali-aggregate expansion in concrete*”, Cement and Concrete Research, Vol. 10, pp. 789-797, 1980

GRATTAN-BELLEW, P. E., et al., “*Proposed universal accelerated test for alkali-aggregate reaction - The concrete microbar test*”, Cement, Concrete and Aggregates, Vol. 25, p. 29-34, 2003

GRATTAN-BELLEW, P. E., et al., “*Comparison of expansions in the concrete prism and concrete microbar tests of an assorted suite of aggregates from several contries*”, in: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, October 2004

GROSBOIS, M.; FONTAINE, E., “*Evaluation of the potential alkali-reactivity of concrete aggregates: performance of testing methods and a producer’s point of view*”, Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, Québec, pp. 267-276, 2000

HASPARYK, N. P., “*Investigação de concretos afetados pela reacção álcalis-agregado e caracterização avançada do gel estudado*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Porto Alegre, 2005

HOOPS, D. W., “*Alkali-silica reaction in concrete*”, Thomas Telford Ltd., 183 p., London, 1988

ICOLD, “*Alkali-aggregate reaction in concrete dams*”, International Commission on Large Dams, Committee on Materials for Concrete Dams, Bulletin 79, Paris, 159 p., 1991

KENNERLEY, T., “*Corrosion resistance of concrete in a geothermal environment with special reference to the cooling tower proposed for Ohaaki*”, Chemistry Division Report, New Zealand Department of Scientific and Industrial Research, 1980

KURTIS, K. E.; COLLINS, C. L.; MONTEIRO, P. J. M., “*The surface chemistry of the alkali-silica reaction: a critical evaluation and x-ray microscopy*”, Concrete Science and Engineering, Vol. 4, March 2002

KYHARA, Y., “*The influence of carbonation of the alkali-aggregate reaction mechanism*”, International congress of chemistry of cement 10 proceedings, Vol. 4, 1997

LARIVE, C., “*Apports combinés de l’alkali-réaction et des ses effets mécaniques*” Thèse de doctorat, École Nationale des Ponts et Chaussées, Paris, 1997

LARIVE, C., “*Apports combinés de l’ experimentation et de la modélisation à la compréhension de l’ alkali-réaction et de ses effets mécaniques*”, Laboratoire central des Ponts et Chaussées, 395 p., Paris, 1998

LARIVE, C., “*Les reactions de degradations internes du béton - Où, quand, comment, pourquoi?*”, Relatório do Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Série AO-6, Paris, 70 p., 1990

LARRAÑAGA, M. Etxeberria, “*Experimental study on microstructure and structural behavior of recycle aggregate concrete*”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Universidade Politécnica de Catalunha, Barcelona, Março 2004

LE ROUX, A., “*Méthodes petro graphiques d’étude de l’alkali réaction*”, Bulletin of the International Association of Engineering Geology, n.º 44, pp. 47-54, 1991

LE ROUX, A., “*Les mécanismes mis en jeu dans les degradations dues à l’alcali-réaction*”, Seminário Degradação de Estruturas por Reacções Expansivas de Origem Interna, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa, 2001

LE ROUX, A.; THIEBAUT, J.; GUÉDON, J. S.; WACKENHEIM, C., “*Pétrographir appliqué à l’alcali-réaction*”, Laboratoire central des Ponts et chaussées, 98 p., Paris, 1999

LEEMANN, A.; HOLZER, L., “*Alkali-aggregate reaction - identification of reactive silicates*”, Proceedings of the 9th Euro seminar on Microscopy Applied to Building Materials, Trondheim, 2003

LEVY, S. M., “*Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos, produzidos com resíduos de concreto e alvenaria*”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, Dezembro 2001

LI, X.; GRESS, D., “*Mitigating alkali-silica reaction in concrete containing recycled concrete aggregate*”, Transportation Research board 85th Annual Meeting TRB 2006 Annual meeting CD-ROM, July 2005

LOPES, L. E., “*Modelagem mecânica e numérica da reacção álcalis-agregado com aplicação a barragens de concreto*”, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Novembro 2004

LU, D.; FOURNIER, B.; GRATTAN-BELLEW, P. E., “*Evaluation of the chinese accelerated test for alkali-carbonate reaction*”, in: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, October 2004

METHA, P. K., “*Concrete. Structure, properties and materials*”, Englewood Clifffd, NJ Pretice-Hall, 1986

NIXON, P.; COOLINS, R. J.; RAYMENT, P. L., “*The concentration of alkalis by moisture migration in concrete - a factor influencing alkali-aggregate reaction*”, Cement and Concrete Research, n.º 9, pp. 417-423, 1979

NIXON, P.; SIMS, I., “*Universally accepted testing procedures for AAR. The progress of RILEM technical committee*”, Proceedings of the 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Québec, pp. 435-444, 2000

OBERHOLSTER, R. E.; DAVIES, G., “*The alkali-silica reaction product. A mineralogical and an electron microscopic study*”, Proceedings of the 8th International Conference on Cement Microscopy, Orlando, Florida, USA, pp. 303-326, 1986

OLAFSSON, H., “*The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bar*”, Proceedings of the 7th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete, Ottawa, Canada, pp. 461-465, 1986

OLAFSSON, H., “*The effect of relative humidity and temperature on alkali expansion of mortar bar*”, in: P. E. Grattan-Bellew (Editor), International conference (on) concrete alkali-aggregate reactions, Park Ridge, N.J. Noyes publications, pp. 461-465, 1987

PALIARI, J. C.; SOUZA, U. E. L.; AGOPYAN, V., “*Methodology for collection and analysis of information on materials waste in building construction sites*”, CIB Symposium on Construction & Environment: theory into practice, São Paulo, 2000

PETERSON, M. G.; ULM, F-J, “*Chemoplasticity of the alkali-silica reaction in concrete: modeling of stress-induced anisotropy*” Report, Department of Civil & Environmental Engineering - School of Engineering, Massachusetts, June 2000

POOLE, A. B., “*Introduction to alkali-aggregate reaction on concrete*”, In: Swamy, R. N. (editor), The alkali-silica reaction on concrete, Blackie and Son Ltd., pp. 1-29, London, 1992

POWER, T. C.; STEINOUR, H. H., “*An interpretation of the some published researches on the alkali-aggregate reaction. Part 1 - The chemical reactions and mechanisms of expansion*”, Journal American Institute, n.º 51-26, pp. 497-516, 1995a

POWER, T. C.; STEINOUR, H. H., “*An interpretation of the some published researches on the alkali-aggregate reaction. Part 2 - A hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete*”, Journal American Institute, n.º 51-40, pp. 758-811, 1995b

PRINCE, W.; PERAMI, R., “*Mise en evidence du role essential des ions OH⁻ dans le reactions alkali-silice*”, Cement and Concrete Research, Vol. 23 (5), pp. 1121-1129, 1993

RANC, R.; ISABELLE, H.; CLÉMENT, J. Y.; SORRENTINO, D., “*Limits of application of the ASTM C 277 mortar bar test. Comparison with two other standards on alkali-aggregate reactivity*”, Cement Concrete and Aggregates, The American Society for Testing and Materials, Vol. 16, n.º1, pp. 63-72, 1994

RILEM AAR-0, “*Detection alkali-reactivity potential in concrete - Outline guide to use of RILEM methods in assessments of aggregates for potential alkali-reactivity*”, TC 191-ARP: Alkali-reactivity and prevention - Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, prepared by I. Sims and P. Nixon, Materials and Constructions, Vol. 36, pp. 472-479, 2003

RILEM AAR-1, “*Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Petro graphic method*”, TC 191-ARP: Alkali-reactivity and prevention - Assessment, specification and diagnosis of alkali-reactivity, prepared by I. Sims and P. Nixon, Materials and Constructions, Vol. 36, pp. 480-496, 2003

RILEM AAR-1, “*Detection of potential alkali-reactivity of aggregates - Petro graphic method - Final draft*”, TC 191-ARP, 48 p., 2003

ROGERS, C. A., “*Testing Canadian aggregates for alkali reactivity*”, In: P. E. Grattan-Bellew (Editor), International Conference on Concrete Alkali-Aggregate Reactions, Park Ridge, N. J. Noyes Publications, pp. 259-263, 1987

SABBAG, A. F., “*Verificação da existência de reacção álcali-agregado no concreto da UHE de Mascarenhas*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Outubro 2003

SANTOS, M.; BRITO, J., “*Reacção álcalis-silica em betões com agregados reciclados*”, Dissertação de Mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, 2007

SANTOS, M.; BRITO, J., “*O panorama nacional das reacções álcalis-silica e betão*”, N. 32, 2008

SANTOS SILVA, A., “*Degradação do betão por reacções álcalis-silica - Utilização de cinzas volantes e metacaulino para a sua prevenção*”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil pela Escola de Engenharia da Universidade do Minho, Teses e Programas de Investigação, Laboratório Nacional de Engenharia Civil, 339 p., Lisboa, 2006

SHAYAN, A., “*The “pessimum” effect in a accelerated mortar bar test using 1M NaOH solution at 80 °C*”, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 14, pp. 249-255, 1992

SILVA, A. Santos; REIS, M. O. Braga, “*Avaliação da reactividade aos álcalis dos agregados para betão*”, Encontro Nacional Betão Estrutural 2000, FEUP, Porto, pp. 23-32, 2000

SILVA, A. Santos; REIS, M. O. Braga, “*Les essais de diagnostic de la reactivite aux alcalins des granulats. L’ experience portugaise*”, Seminário sobre a degradação de estruturas por reacções expansivas de origem interna, Laboratório Nacional de Engenharia Civil & Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Lisboa, Dezembro 2001

SIMS, I., “*The importance of petrography in the ASR assessment of aggregates and existing concretes*”, *Proceedings of the 7th International Conference on AAR*, Ottawa, pp. 358-367, 1987

SIMS, I.; BROWN, B., “*Concrete aggregates*”, In: Peter C. Hewlett (editor), *Lea’s Chemistry of Cement and Concrete*, 4th Edition, pp. 903-1011, London, 1998

SINDIPEDRAS, “*Reacção álcali-agregado - Entenda do que se trata*”, Sindicato da Indústria de Mineração de Pedra Britada do Estado de São Paulo, 2005

STIEVENARD-GIREAUD, D., “*Étude de la réaction alcalis-silice dans des bétons*”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Rapport de recherche LPC, n.º144, 104 p., Paris, 1987

SOMMER, H., et al, “*Development of inter-laboratory trial for RILEM AA-5 rapid preliminary screening test for carbonate aggregates*”, in: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, October 2004

SOUSA COUTINHO, Joana, “*Melhoria da durabilidade dos betões por tratamento da cofragem*”, Tese de Doutoramento em Engenharia Civil, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Julho 1998

STANTON, T. E., “*Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate*”, *Proceedings of the American Society of Civil Engineers*, Vol. 66, 1940

TAYLOR, H. F. W., “*Cement chemistry*”, 2^o edition, Thomas Telford, London, 1997

TR 3 - Technical Report 3, "*Alkali-silica reaction - Minimizing the risk of damage to concrete, guidance notes and recommended practice*", Cement and Concrete Association of New Zealand, 84 p., 2003

VAN AARDT, J. H. P.; VISSER, S., "*Calcium hydroxide attack on feldspars and clays: possible relevance to cement-aggregate reactions*", Cement and Concrete Research, Vol. 7, pp. 643-648, 1977

WIGUM, B. J., "*Alkali-aggregate reaction in concrete - properties, classification and testing of Norwegian cataclysmic rocks*", PhD. Thesis, University of Trondheim, The Norwegian Institute of technology, Norway, 227 p., 1995

WEST, G., "*Alkali-aggregate reaction in concrete roads and bridges*", Thomas Telford Publications, 167 p., London, 1996

XU, Z., et al. "*A new accelerated method for determining the potencial alkali-carbonate reactivity*", in: 11th International Conference on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete, p. 129-138, June 2000