



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA CIVIL**



**REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETOS COM AGREGADOS
RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO NA
CIDADE DE CAMPINA GRANDE-PB**

RAFAEL LUÍS DE CARVALHO MAIA

Campina Grande - Paraíba

2018

RAFAEL LUÍS DE CARVALHO MAIA

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Unidade Acadêmica de
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento parcial
das exigências para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Milton Bezerra das
Chagas Filho

Campina Grande - Paraíba

2018

RAFAEL LUÍS DE CARVALHO MAIA

**REAÇÕES ÁLCALI-AGREGADO EM CONCRETOS COM
AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E
DEMOLIÇÃO NA CIDADE DE CAMPINA GRANDE-PB**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado à Unidade Acadêmica de
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Campina Grande, em cumprimento parcial
das exigências para obtenção do título de
bacharel em Engenharia Civil.

Aprovado em _____ de _____ de _____

BANCA EXAMINADORA:

Prof Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho - UAEC/CCT/UFCG
Orientador

Prof. MSc. Rodrigo Mendes Patrício Chagas
Co-Orientador – Examinador Externo

Prof. Esp. Marco Aurélio de Teixeira e Lima
Examinador Interno

Campina Grande – Paraíba

2018

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a meus pais, sem os quais nada disso seria possível. O apoio e amor incondicional me fizeram seguir em frente mesmo nas horas mais difíceis.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Milton Bezerra das Chagas Filho, um verdadeiro guru da Engenharia Civil, por todas as orientações técnicas, conselhos, e por estar sempre disposto a ajudar.

À minha namorada, Luiza Lira, por todo o amor, por nunca desistir de mim e por sempre ter lutado para que eu me sentisse bem.

À minha família de Campina Grande, que me fez sentir em casa mesmo estando tão longe de meus pais.

Aos meus amigos do Pensionato Meu Lar, por todas as conversas em nossas tantas reuniões, pelas histórias hilárias e pelas confraternizações em geral.

À Universidade Federal de Campina Grande, por toda a estrutura fornecida realização dos ensaios necessários para o trabalho, e por todos os ensinamentos ao longo do curso.

Aos técnicos de laboratório: Edvaldo Pinheiro, do Laboratório de Estruturas, por todo o suporte à realização dos experimentos e por me ajudar em vários momentos mesmo sem ter obrigação; e Francisco de Assis, do Laboratório de Saneamento da UAEC, que foi de grande auxílio à preparação da solução que foi utilizada neste experimento.

À coordenação do curso de Engenharia Civil, pelo apoio nos momentos difíceis que passei no processo de elaboração deste trabalho, em especial às professoras Izabelle Marie e Dayse Luna.

Aos integrantes da banca, Prof. Rodrigo Mendes e Prof. Marco Aurélio, pela disponibilidade, auxílio e compreensão.

Ao meu ex-chefe de estágio, Breno Nogueira, pela indispensável ajuda na obtenção dos agregados utilizados neste trabalho, e por ser um grande amigo.

RESUMO

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é um processo químico de deterioração do concreto cujos primeiros registros se deram no início do século XX, e sendo identificada inicialmente em barragens, pontes, estruturas portuárias e, mais recentemente, em blocos de fundação. É primordialmente produto da reação entre álcalis presentes no concreto, minerais reativos nos agregados e água, e gera um efeito expansivo para o qual não existe ainda solução. Devido a isto, a prevenção é a principal ferramenta disponível para impedir que a RAA ocorra, logo deve-se identificar previamente, entre outras coisas, a reatividade do agregado a ser usado. A sustentabilidade é um tópico em crescente evidência, e a utilização de agregados provenientes da reciclagem de resíduos sólidos (ou Resíduos de Construção e Demolição - RCD) é uma alternativa para a destinação destes, sendo necessário, portanto, que tais agregados tenham sua potencial reatividade avaliada. Neste trabalho, foram testados dois agregados provenientes de RCD, sendo estes Resíduos de Concreto e Resíduos de Alvenaria. Ademais, foram testadas areia e brita utilizadas frequentemente em construções na cidade de Campina Grande – PB. O método utilizado para os testes foi o Ensaio Acelerado de Barras de Argamassa, cuja realização se dá pela imersão de barras de argamassa moldadas com os agregados a serem testados em uma solução de hidróxido de sódio aquecida a 80°C. Foram tomadas medidas diárias de expansão das barras até os 16 e os 28 dias de imersão, para todos os agregados. Pelas medidas obtidas e o limite de 0,10% de expansão estabelecido na ABNT NBR 15577, os agregados não se mostraram potencialmente reativos.

Palavras-Chave: Reação Álcali-Agregado, concreto, resíduos de construção e demolição, agregados

ABSTRACT

The Alkali-Aggregate Reaction (AAR) is a chemical process of concrete deterioration which had its first records in the beginning of the 20th century, and it was primarily identified in dams, bridges, port structures and, more recently, foundation blocks. It is basically the reaction product of alkalis in the concrete, reactive minerals in aggregates and water, and generates an expansive effect to which there is no existing solution. Due to this, prevention is the main tool available to stop AAR from occurring, therefore the aggregate reactivity, among other things, must be readily identified. Sustainability is a topic in growing evidence, and the use of aggregates from the recycling of solid residues (or Construction and Demolition Waste – CDW) is an alternative to the destination of these, thus being needed that such aggregates have their potential reactivity assessed. In this work, two CDW aggregates were tested, which were Concrete Residues and Masonry Residues. Furthermore, testing was done on sand and gravel frequently used in constructions in the city of Campina Grande – PB. The method used for testing was the Accelerated Mortar Bar Test, which is done by submerging mortar bars cast with the aggregates to be tested in a sodium hydroxide solution heated to 80°C. Measurements of expansion of the bars, for all aggregates, were taken daily until 16 and 28 days of submersion. From the measurements obtained and the 0.10% expansion limit established in ABNT NBR 15577, the aggregates did not show as potentially reactive.

Key-Words: Alkali-Aggregate Reaction, concrete, construction and demolition waste, aggregates

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Fatores necessários para ocorrência da RAA | 14 |
| Figura 2 - Fissuração característica devido a RAA, ocorrida em um pavimento de concreto | 16 |
| Figura 3 - Fissuração e exsudação de gel em barragem nos EUA..... | 17 |
| Figura 4 - Fissuração causada por RAA, demonstrada por Thomas Stanton (1940)..... | 18 |
| Figura 5 - Desalinhamento no parapeito da barragem de Val de La Maré, causado por RAA..... | 19 |
| Figura 6 - RAA numa via urbana em Joanesburgo, África do Sul..... | 20 |
| Figura 7 - Fissuras causadas por RAA na Via Expressa Hanshin, no Japão..... | 20 |
| Figura 8 - Bloco de Fundação afetado por fissuras devido a RAA..... | 23 |
| Figura 9 - Neutralização das ligações do grupo Silanol pelas Hidroxilas | 24 |
| Figura 10 - Ruptura das ligações do grupo siloxano pelas hidroxilas | 25 |
| Figura 11 - Diagrama esquemático do mecanismo da RAC | 27 |
| Figura 12 - Resíduos de concreto cominuídos no britador de mandíbula | 33 |
| Figura 13 - Aspecto final dos resíduos de concreto após cominuição | 34 |
| Figura 14 - Agregado separado em frações granulométricas exigidas pela ABNT NBR 15577:2008..... | 35 |
| Figura 15 - Agregados acondicionados em sacos plásticos transparentes após lavagem e secagem | 35 |
| Figura 16 - Tanque para Cura em Imersão de CP's Prismáticos, de aço inoxidável, utilizado para submergir as barras de argamassa na solução de NaOH | 36 |
| Figura 17 - Fluxograma instrucional para moldagem dos corpos de prova..... | 37 |
| Figura 18 - Moldes de dimensões padrão utilizados para confecção das barras de argamassa..... | 38 |
| Figura 19 - Corpos de prova a serem desmoldados após cura úmida..... | 39 |
| Figura 20 - Tanque com solução de NaOH (à esquerda) e recipiente com água para aquecimento gradual (à direita) em estufa a 80°C | 39 |
| Figura 21 - Relógio comparador com precisão de 0,01mm | 40 |
| Figura 22 - Modelo de gráfico de expansão (%) versus idade (dias) para análise de RAA pelo método acelerado..... | 41 |
| Figura 23 - Curva granulométrica dos Resíduos de Alvenaria..... | 46 |
| Figura 24 - Curva granulométrica dos Resíduos de Concreto | 46 |
| Figura 25 - Gráfico de expansão das barras de Resíduo de Alvenaria..... | 48 |
| Figura 26 - Gráfico de expansão das barras de Resíduo de Concreto | 49 |
| Figura 27 - Gráfico de expansão das barras de areia | 50 |
| Figura 28 - Gráfico de expansão das barras de brita | 51 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1- Ocorrência de casos de RAA em diferentes países..... | 21 |
| Tabela 2- Barragens afetadas por RAA no Brasil | 22 |
| Tabela 3- Ensaios de caracterização física e respectivas normas técnicas..... | 32 |
| Tabela 4- Granulometria dos materiais para ensaio acelerado (Adaptado da ABNT NBR 15577:2008) | 34 |
| Tabela 5- Resumo das quantidades de cada material para moldagem dos corpos de prova..... | 37 |
| Tabela 6: Resultado dos ensaios de caracterização do CP II Z e limites normativos..... | 43 |
| Tabela 7: Resultados dos ensaios de caracterização física da areia..... | 43 |
| Tabela 8: Distribuição granulométrica da areia..... | 44 |
| Tabela 9: Distribuição granulométrica dos resíduos de alvenaria..... | 45 |
| Tabela 10: Distribuição granulométrica dos resíduos de concreto..... | 45 |
| Tabela 11: Resultados dos ensaios de caracterização física da brita e dos resíduos | 47 |

LISTA DE EQUAÇÕES

| | |
|---|----|
| Equação 1 - Dilatação Térmica Linear | 29 |
| Equação 2 - Expansão diária de cada barra | 41 |

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

ACI: American Concrete Institute

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

Ca⁺²: Íon Cálcio

K⁺: Íon Potássio

MEV: Microscopia Eletrônica de Varredura

N: Normal, unidade química de medida de normalidade

Na⁺: Íon Sódio

NBR: Norma Brasileira

OH⁻: Íon Hidroxila

pH: Potencial Hidrogeniônico

RAA: Reação Álcali-Agregado

RAC: Reação Álcali-Carbonato

RAS: Reação Álcali-Sílica

RASS: Reação Álcali-Silicato

RCD: Resíduos de Construção e Demolição

SO₄⁻²: Íon Sulfato

SUMÁRIO

| | |
|--|-----------|
| 1. INTRODUÇÃO | 12 |
| 1.1. Objetivos Gerais | 13 |
| 1.2. Objetivos Específicos | 13 |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA | 14 |
| 2.1. A Reação Álcali-Agregado | 14 |
| 2.2. Histórico da RAA | 17 |
| 2.3. Tipos de RAA e aspectos químicos | 23 |
| 2.4. Concreto com agregados reciclados de RCD | 28 |
| 2.5. Dilatação térmica linear | 29 |
| 3. MATERIAIS E MÉTODOS | 30 |
| 3.1. Fluxograma de Atividades | 30 |
| 3.2. Materiais Utilizados | 31 |
| 3.2.1. ÁGUA | 31 |
| 3.2.2. CIMENTO | 31 |
| 3.2.3. AREIA | 31 |
| 3.2.4. BRITA #0 | 31 |
| 3.2.6. RESÍDUO DE CONCRETO | 32 |
| 3.2.7. HIDRÓXIDO DE SÓDIO..... | 32 |
| 3.3. Métodos de Ensaio | 32 |
| 3.3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS..... | 32 |
| 3.3.2. ENSAIO ACELERADO DAS BARRAS DE ARGAMASSA | 33 |
| a) Preparo das amostras e da solução de NaOH | 33 |
| b) Moldagem, cura úmida e desmoldagem dos corpos de prova..... | 37 |
| c) Medições e cálculo das expansões..... | 40 |
| 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES | 43 |
| 4.1. Caracterização dos materiais | 43 |
| 4.2. Ensaio das barras de argamassa pelo método acelerado | 48 |

| | |
|---|-----------|
| 5. CONCLUSÕES | 52 |
| 6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS | 52 |
| 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 53 |
| ANEXO A – Expansões diárias das barras moldadas com Resíduo de Alvenaria | 58 |
| ANEXO B – Expansões diárias das barras moldadas com Resíduo de Concreto..... | 61 |
| ANEXO C – Expansões diárias das barras moldadas com Areia | 64 |
| ANEXO D – Expansões diárias das barras moldadas com Brita #0 | 67 |

1. INTRODUÇÃO

O concreto é um material com extensas aplicações nas diversas áreas da Engenharia Civil, sendo utilizado em elementos estruturais (blocos de alvenaria, vigas, lajes, pilares, fundações) e não-estruturais (vergas, contravergas, pisos) de edificações, reservatórios, pontes, muros de arrimo, barragens, canais, pavimentos, entre outras aplicações. No mundo, o consumo médio anual de concreto é estimado em 1,9 toneladas por habitante, sendo menor apenas que o consumo médio de água [CONCRETO e CONSTRUÇÕES, 2009]. Atribui-se isto à disponibilidade e viabilidade financeira de seus componentes e mão de obra, além do grande potencial de modelagem que possibilita a execução de diversas formas, com resistência final elevada.

Além disso, o concreto, sendo primordialmente uma mistura de água, aglutinante (cimento), agregado miúdo e agregado graúdo, tem como peculiaridade uma composição heterogênea. Cada um destes componentes tem suas características próprias e interações entre si. Portanto, é de fundamental importância o estudo minucioso das várias propriedades do concreto, tendo em vista a garantia de qualidade e durabilidade das construções que dele dependem.

Segundo o *ACI Committee 201.2R (2008)* a durabilidade do concreto de cimento Portland é determinada por sua capacidade de resistir a ações climáticas, ataques químicos, abrasão, ou qualquer outro processo de deterioração.

Basicamente, a durabilidade de concretos é afetada por processos físicos e/ou processos químicos. Os efeitos físicos incluem desgaste da superfície, fissuração devido à cristalização de sais nos poros e exposição a temperaturas extremas. Já os efeitos químicos incluem a lixiviação da pasta de cimento devido à ação de soluções ácidas, reações expansivas envolvendo ataques por sulfato, corrosão das armaduras (no caso de concreto armado) e Reação Álcali-Agregado (RAA) [MEHTA e MONTEIRO, 2008].

A RAA, objeto de estudo do presente trabalho, é um processo químico no qual os hidróxidos alcalinos dissolvidos nos poros do concreto reagem com determinados minerais reativos presentes nos agregados, produzindo um gel que na presença de

água tende a se expandir e gerar fissuras que podem afetar a capacidade de resistência do concreto, podendo levar eventualmente à sua ruína. É necessário que haja a presença destes 3 fatores simultaneamente (álcalis, agregados reativos e água) para que a reação ocorra.

O histórico da ocorrência de RAA, devido à necessidade de água para que se efetive, está relacionado a obras como barragens, pontes e estruturas portuárias. Recentemente, segundo Arrais (2011), o interesse pelo assunto aumentou de forma considerável devido ao aparecimento de casos de fissuras em estacas e blocos de fundações localizados em ambientes úmidos.

Uma vez iniciada a reação de RAA, não há solução existente para interromper sua evolução e conseqüente expansão do gel. Os danos podem ser apenas atenuados com o isolamento do local afetado de contato com a água ou outras intervenções estruturais. Tais reparos apresentam custos bastante elevados. Logo, é fundamental o estudo prévio dos materiais a serem empregados, em especial os agregados, visando a prevenção da ocorrência desta reação.

1.1. Objetivos Gerais

O presente trabalho tem como objetivo geral a avaliação da reatividade de agregados produzidos com Resíduos de Construção e Demolição (RCD) utilizados em concreto na cidade de Campina Grande - PB, contribuindo assim para o entendimento da Reação Álcali-Agregado em concretos com agregados reciclados.

1.2. Objetivos Específicos

- Classificar, por meio do ensaio de expansão em barras de argamassa pelo método acelerado, o caráter reativo dos quatro agregados escolhidos: areia, brita, resíduo de alvenaria e resíduo de concreto;
- Identificar se há a exsudação de gel expansivo característico da RAA nas amostras estudadas;

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. A Reação Álcali-Agregado

A Reação Álcali-Agregado (RAA) é um processo químico lento de origem interna no qual alguns constituintes mineralógicos do agregado reagem de forma deletéria com hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros do concreto. Segundo Diamond (1989, apud FOURNIER e BERUBÉ, 2000), sabe-se que, no estado endurecido, os microporos da matriz de concreto têm alcalinidade elevada ($\text{pH} > 12,5$), consistindo principalmente de hidróxidos alcalinos dissolvidos (K^+ , Na^+ , OH^-), com alguns elementos em menor quantidade (Ca^{+2} , SO_4^{-2}). Estes hidróxidos podem ter origem no cimento, na água de amassamento, nos próprios agregados, em materiais pozolânicos ou em agentes externos [SOUZA, 2007]. É necessária a presença simultânea de três componentes para que a RAA ocorra, conforme Figura 1:

- Agregado reativo;
- Umidade suficiente (>80 a 85%);
- Alta concentração de hidróxidos alcalinos.

Figura 1 - Fatores necessários para ocorrência da RAA.



Fonte: SANCHEZ (2008).

O produto resultante dessa reação é um gel cristalino higroscópico, cuja presença só é nociva quando há expansão significativa, podendo originar fissuras, aumento de permeabilidade, diminuição da resistência e conseqüentemente a ruptura da estrutura.

A RAA, portanto, provoca a deterioração das estruturas de concreto. Estas degradações apresentam enormes dificuldades de identificação e recuperação, visto que a reação ocorre internamente à estrutura. Tal fato compromete seriamente a durabilidade das estruturas afetadas.

Segundo Valduga (2002), a velocidade de desenvolvimento e magnitude das deformações vão depender de um grande número de fatores, entre eles a natureza e quantidade disponível de agregados reativos, níveis de álcalis no cimento, temperatura ambiente, disponibilidade de umidade e eventuais restrições físicas à expansão, que podem ser internas e externas.

De acordo com Andriolo (1999), os principais sintomas decorrentes da RAA podem ser percebidos por:

- Microfissuras no concreto, principalmente na argamassa que preenche o espaço entre os agregados graúdos;
- Fissuras na proximidade da superfície dos agregados graúdos, podendo também ocorrer na interface;
- Possibilidade de ocorrência de bordas de reação ao redor dos agregados que reagiram com os álcalis;
- Descolamento (perda de aderência) da argamassa junto à superfície dos agregados graúdos;
- Presença de gel exsudando ou preenchendo vazios no concreto ;
- Movimentação (abertura e/ou deslocamento relativo) de juntas de contração e concretagem;
- Travamento e/ou deslocamento de equipamentos e peças móveis (comportas, turbinas, eixos, pistões);
- Fissuração característica na superfície, com panorama poligonal, havendo predominância na direção de maior dimensão (Figura 2). Em vários casos é confundida com o panorama de reação por sulfatos ou até mesmo retração por secagem (quando as fissuras são de pequena abertura), e com o panorama de fissuração por origem térmica (quando as fissuras são de grande abertura);

Figura 2 - Fissuração característica devido a RAA, ocorrida em um pavimento de concreto.



Fonte: FARNY E KERKHOFF (2007).

- Fissuras de grande abertura, transversais à maior dimensão da estrutura;
- Movimentação das superfícies livres (alteamento de cristas de barragens e soleiras de vertedouros, deflexões para montante nas estruturas de barragens).

Atualmente, os danos causados pela ocorrência da RAA são irreversíveis, Ou seja, uma vez iniciada, não há como tornar a estrutura à mesma matriz cristalina de quando fora concretada. Logo, atitudes de prevenção devem ser consideradas. Arrais (2011) aponta que o surgimento de problemas causados pela RAA atribuiu uma maior importância à investigação prévia dos materiais a serem empregados no tocante ao potencial reativo dos mesmos, sugerindo as seguintes ações de prevenção:

- Seleção adequada de materiais utilizados, agregados e cimento, na confecção do concreto;
- Correta vibração do concreto, evitando vazios e possível percolação de água, visto que o gel absorve água por osmose, que o faz expandir e provocar fissuras;

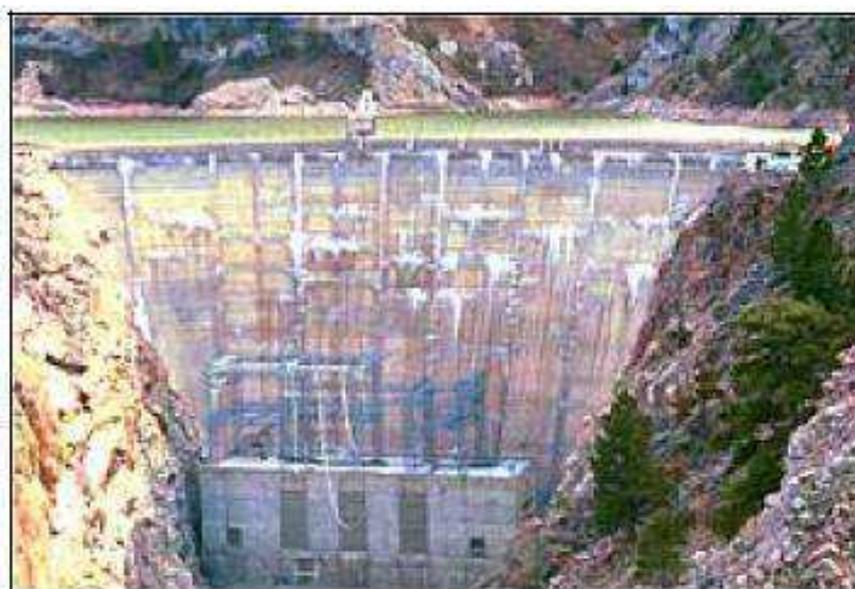
- Ensaios para a verificação da reatividade do agregado, conforme ABNT NBR 15577:2008, que estabelece métodos de ensaio para determinar a suscetibilidade de um agregado participar da reação expansiva.

2.2. Histórico da RAA

O surgimento de manifestações patológicas associadas à Reação Álcali-Agregado remonta às décadas de 1920 e 1930. À época, diversas estruturas de concreto do Sul do Estado da Califórnia (EUA), manifestaram fissuras e expansões que não estavam associadas como efeito de nenhum dos mecanismos de deterioração previamente conhecidos, como congelamento/ descongelamento e corrosão de armaduras.

Estes primeiros casos de deterioração foram descritos por Blanks e Kennedy (1955, apud METHA e MONTEIRO). De acordo com os autores, a primeira vez que se observou a RAA como um mecanismo deletério foi na Usina Hidrelétrica de Buck no New River (Virginia – EUA), em 1922, após apenas 10 anos de sua construção. Ao longo das décadas de 1920 e 1930 um grande número de patologias associadas à RAA foi observado em pontes, barragens (Figura 3) e pavimentos ao longo da costa da Califórnia.

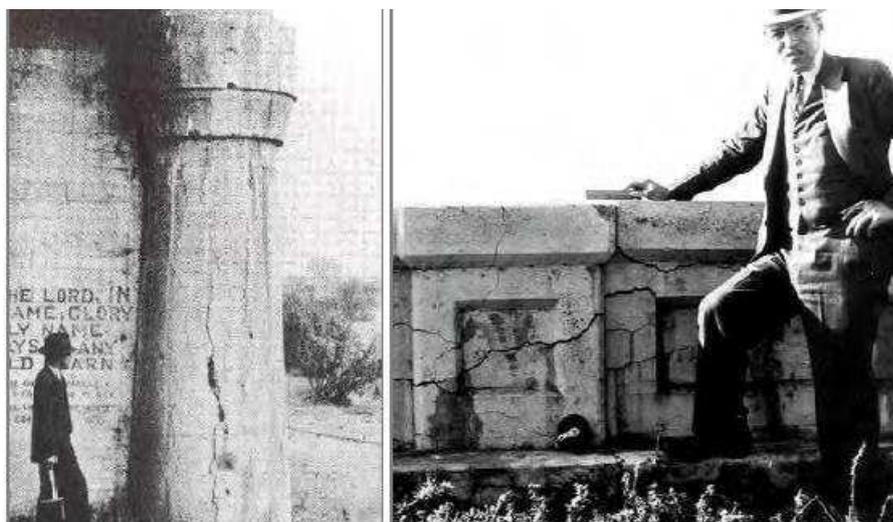
Figura 3 - Fissuração e exsudação de gel em barragem nos EUA.



Fonte: TIECHER (2006).

Os primeiros estudos experimentais sobre RAA foram realizados em 1940 no laboratório de materiais da *California Division of Highways*, dirigida à época pelo Engenheiro Civil Thomas Stanton (Figura 4). Stanton (1940) observou que corpos-de-prova de argamassa moldados com a mesma areia e cimento das estruturas afetadas por patologias nas décadas anteriores apresentavam sintomas semelhantes. Baseado em suas análises, ele chegou à conclusão de que o fenômeno causador das patologias era resultante de reações químicas deletérias entre os álcalis do cimento e a sílica presente na areia, utilizados para confeccionar o concreto. Segundo suas constatações experimentais, a reação era capaz de formar eflorescências brancas, causar expansões e fissurações, fato que causou preocupação no meio técnico e desencadeou diversas pesquisas sobre o tema. Seu trabalho também serviu como base para o método de ensaio das barras de argamassa, normatizado no Brasil pela NBR 15577:2008.

Figura 4 - Fissuração causada por RAA, demonstrada por Thomas Stanton (1940).



Fonte: MIZUMOTO (2009).

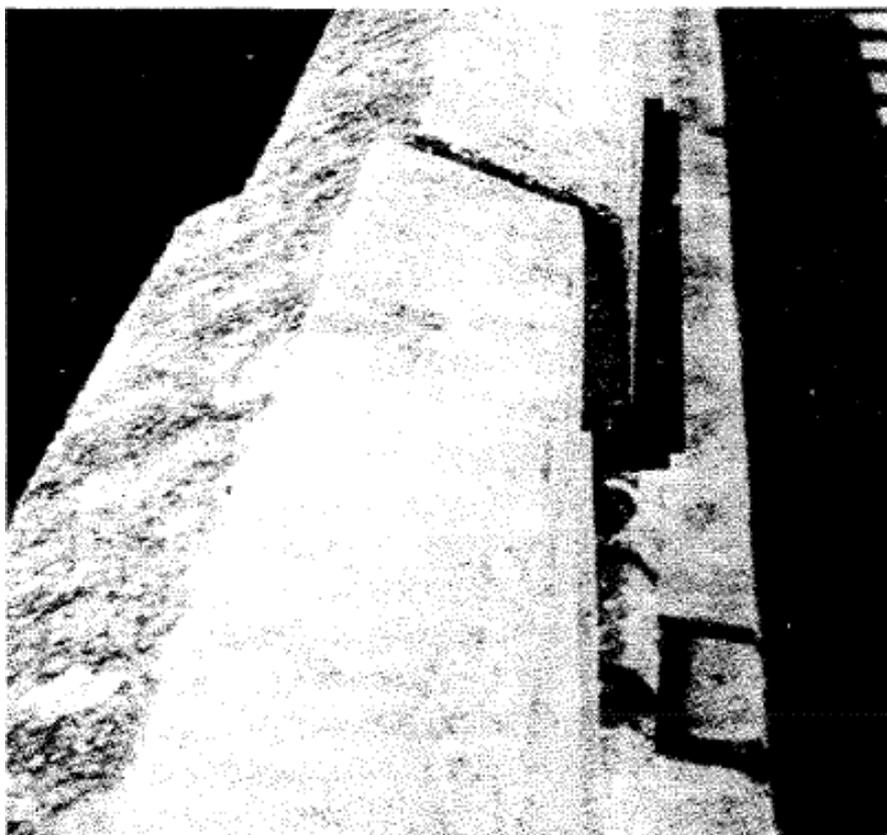
Entre 1940 e 1941, os Estados Unidos continuaram as pesquisas sobre o tema em centros científicos, universidades e empresas de cimento em função da constatação da RAA em várias barragens importantes (Parker, Stewart Mountain e Gene Wash, entre outras), em obras de arte e rodovias [MIZUMOTO, 2009].

Entretanto, após o grande interesse inicial, a atenção pelo problema esmaeceu nos anos 50 e 60, voltando a ser estudado novamente apenas na década de 70, quando começaram a surgir frequentemente relatos de anomalias em estruturas em

diversos países [SANCHEZ, 2008]. Este fato expôs a deficiência dos métodos de ensaio existentes na época. Um fator que contribuiu para o aumento da incidência da RAA foi a crise do petróleo, que forçou os fabricantes de cimento a buscar maior eficiência energética em seus processos, levando conseqüentemente a um aumento do teor de álcalis dos mesmos [HASPARYK, 2005].

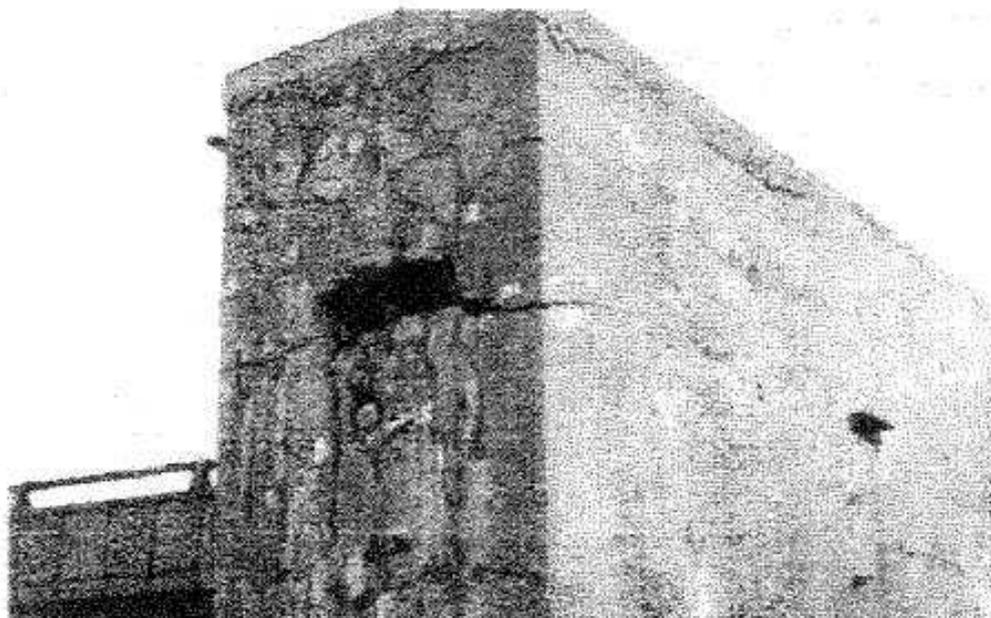
Dentre as estruturas afetadas, podem ser citadas como exemplos as barragens de Val de La Maré, no Reino Unido (Figura 5); de Sandouping, na China; de La Tuque, no Canadá; de Kouga, na África do Sul; de Chambon, na França; além de trechos da via urbana de Joanesburgo, na África do Sul (Figura 6) e da Via Expressa Hanshin, no Japão (Figura 7) [SILVEIRA, 2006].

Figura 5 - Desalinhamento no parapeito da barragem de Val de La Maré, causado por RAA.



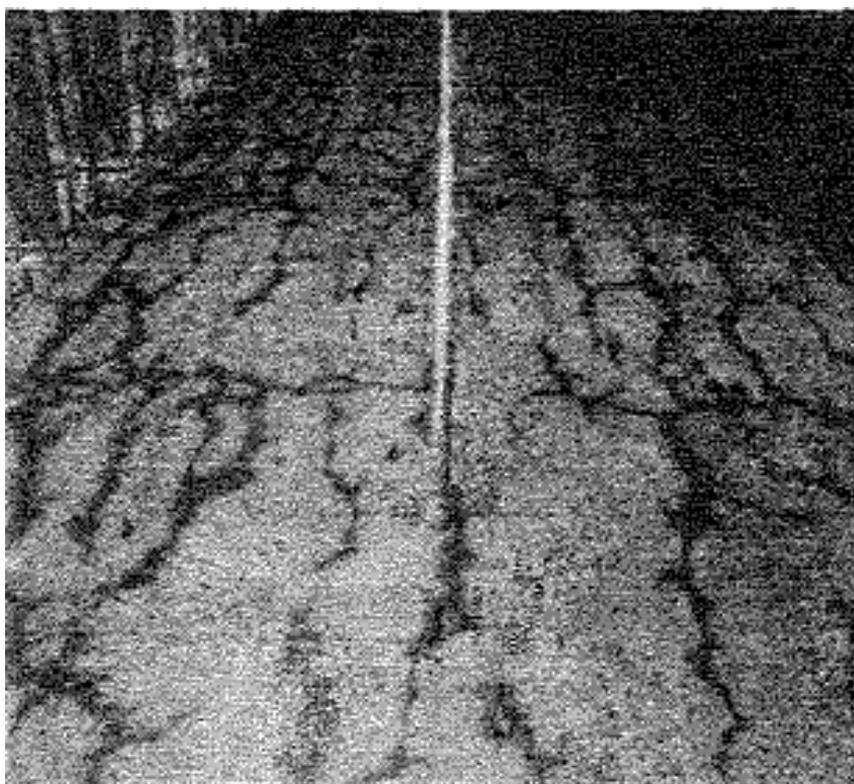
Fonte: MEHTA E MONTEIRO (2008).

Figura 6 - RAA numa via urbana em Joanesburgo, África do Sul.



Fonte: BLIGHT E MALLIM (2000).

Figura 7 - Fissuras causadas por RAA na Via Expressa Hanshin, no Japão.



Fonte: TOORI *et al.* (2000).

Na tabela 1, apresenta-se um levantamento da ocorrência de casos de RAA ao redor do mundo em estruturas hidráulicas construídas até 1998:

Tabela 1- Ocorrência de casos de RAA em diferentes países.

| País | Nº de Casos | País | Nº de Casos | País | Nº de Casos |
|-----------------|-------------|----------------|-------------|---------------|-------------|
| África do Sul | 10 | Estados Unidos | 29 | País de Gales | 05 |
| Argentina | 01 | França | 05 | Paquistão | 02 |
| Austrália | 02 | Ghana | 01 | Portugal | 04 |
| Áustria | 01 | Índia | 02 | Quênia | 01 |
| Brasil | 20 | Inglaterra | 01 | Romênia | 01 |
| Canadá | 41 | Moçambique | 01 | Suíça | 01 |
| Costa do Marfim | 01 | Nigéria | 01 | Uganda | 01 |
| Espanha | 03 | Noruega | 07 | Zambia | 01 |

Fonte: KIHARA *et al.*, 1998.

Nota-se que dos 142 casos registrados, 20 são no Brasil, o terceiro país do levantamento com mais casos de RAA.

Quanto ao desenvolvimento desta reação em concretos produzidos com agregados reciclados, objeto deste trabalho, houve exemplos de insucessos como na Bélgica (De PAUW, C. *et al.* 1996.), nas quais duas pontes tiveram que ser totalmente demolidas devido a RAA. Ainda segundo De Pauw, o fato de uma instalação de reciclagem ter a probabilidade de processar entulhos minerais que contenham agregados potencialmente reativos, que devido a condições especiais no concreto original não desenvolveram a reação, e no novo concreto teriam condições para tal, talvez esteja impedindo a aceitação de uma proposta de normalização pelo BBRI (Belgian Building Research Institute) sobre agregados reciclados.

No Brasil, os primeiros registros sobre o assunto aconteceram através de pesquisadores do IPT (Instituto de Pesquisas Tecnológicas), em um trabalho cujo tema era “Reação expansiva álcali-agregado em concretos” e mencionava as ações mitigadoras a serem executadas, assim como os riscos de aparecimento de tal manifestação deletéria [PAULON, 1981].

Segundo Kuperman *et al.* (2005), a CESP – Companhia Energética de São Paulo foi a primeira empresa no Brasil a descobrir que suas estruturas de concreto poderiam vir a sofrer de RAA, realizando estudos com inibidor pozolânico e empregando-o no concreto da Usina Hidrelétrica de Jupia.

Andriolo (2000) relata pelo menos 16 casos confirmados de barragens afetadas por RAA no Brasil (Tabela 2). Observa-se que, além das barragens em si, a RAA atinge também outras estruturas como casas-de-força, vertedouros e tomadas d'água. Em estruturas onde são instalados equipamentos hidrodinâmicos e elétricos, como geradores e turbinas, as consequências são ainda maiores no caso de eventuais danos. Desníveis milimétricos provocados por expansões nessas estruturas podem causar paralisação de máquinas em hidrelétricas, gerando prejuízos enormes (VALDUGA, 2002).

Tabela 2- Barragens afetadas por RAA no Brasil.

| Nome | Estrutura | Fim da construção | RAA anotada em |
|------------------|------------------|-------------------|----------------|
| Billings-Pedras | Barragem | 1936 | 1992 |
| Furnas | Barragem | 1963 | 1976 |
| Ilha dos Pombos | Barragem | 1924 | 1991 |
| Jaguará | Barragem | 1971 | 1996 |
| Joannes II | Barragem | 1971 | 1988 |
| Moxotó | Casa de Força | 1974 | 1980 |
| Paulo Afonso I | Barragem | 1955 | 1978 |
| Paulo Afonso II | Barragem | 1962 | 1978 |
| Paulo Afonso III | Barragem | 1973 | 1978 |
| Paulo Afonso IV | Barragem | 1979 | 1985 |
| Pedro Beicht | Barragem | 1932 | 1991 |
| Peti | Barragem | 1945 | 1964 |
| Porto Colômbia | Vertedouro | 1973 | 1985 |
| Tapacurá | Barragem | 1975 | 1990 |
| Traição | Usina elevatória | 1940 | 1980 |
| Túnel 6 | Tomada d'água | 1974 | 1989 |

Fonte: Adaptada de ANDRIOLO (2000).

Mais recentemente, constatou-se a ocorrência de RAA no Brasil em outros tipos de estruturas que não barragens. Foram detectadas fissuras em alguns blocos de fundações (figura 8), levantando a mobilização de profissionais de construção e da comunidade técnica. Segundo Souza (2007), no Nordeste ocorreram casos de desabamentos de edifícios em Pernambuco cujas fundações apresentaram RAA, podendo esta ter sido um contribuinte para o incidente.

Figura 8 - Bloco de Fundação afetado por fissuras devido a RAA.



Fonte: Salles *et al.* (2003).

2.3. Tipos de RAA e aspectos químicos

Quanto ao processo químico, a Reação Álcali-Agregado pode ser classificada de 3 formas, de acordo com a composição mineral dos agregados que reagem com os álcalis dissolvidos nos poros do concreto: Reação Álcali-Sílica, Reação Álcali-Silicato ou Reação Álcali-Carbonato.

A **Reação Álcali-Sílica (RAS)**, de acordo com ABNT NBR 15577/2008, é o tipo de RAA na qual a formação do gel expansível hidrofílico é produto da sílica reativa presente nos agregados e dos íons provenientes de hidróxidos alcalinos originados da hidratação do cimento.

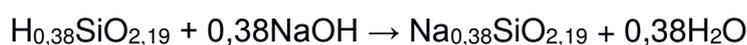
O nível de reatividade da Sílica é função inversa da sua organização estrutural. Minerais de sílica em agregados são geralmente estáveis se cristalinos e reativos se amorfos, porém há exceções. Quartzo, Tridimita e Cristobalita são algumas das formas cristalinas comuns de Dióxido de Sílica; o Quartzo é estável a menos que seja microcristalino ou tenha altas tensões residuais. Os outros dois também são cristalinos, porém são suscetíveis a ataques de hidroxilas devido a serem minerais porosos e de baixa densidade (FARNY e KERKHOFF, 2007).

Ainda de acordo com Farny e Kerkhoff (2007), além de ser a que ocorre mais rapidamente, este é o tipo de RAA mais documentada devido ao fato de que a ocorrência de agregados contendo minerais com sílica reativa é mais comum do que a com outros tipos de minerais. A reação pode ser visualizada em um processo de duas etapas:

1. Álcali + Sílica Reativa → Gel Álcali-Sílica
2. Gel Álcali-Sílica + Umidade → Expansão

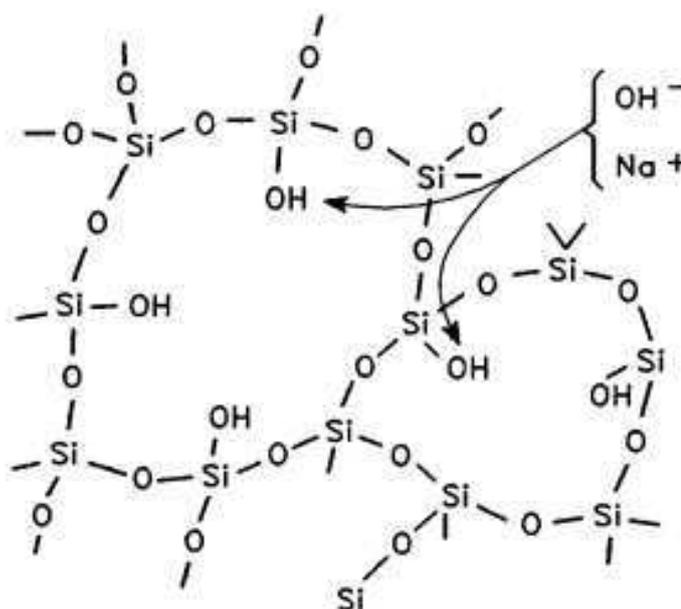
Este processo é melhor detalhada de acordo com as equações químicas abaixo (DENT-GLASSER, 1981 *apud* POOLE, 1992):

(1) Reação ácido-base



De acordo com Hasparyk (2005) grupo silanol (Si-OH), presente na superfície da sílica, é atacado pelas hidroxilas (OH⁻) provenientes do NaOH, liberando água. Os cátions presentes no meio (especialmente o Na⁺) são atraídos e se associam ao SiO⁻, formando um gel sílico-alcálico (Na_{0,38}SiO_{2,19}), conforme mostra a figura 9:

Figura 9 - Neutralização das ligações do grupo Silanol pelas Hidroxilas.



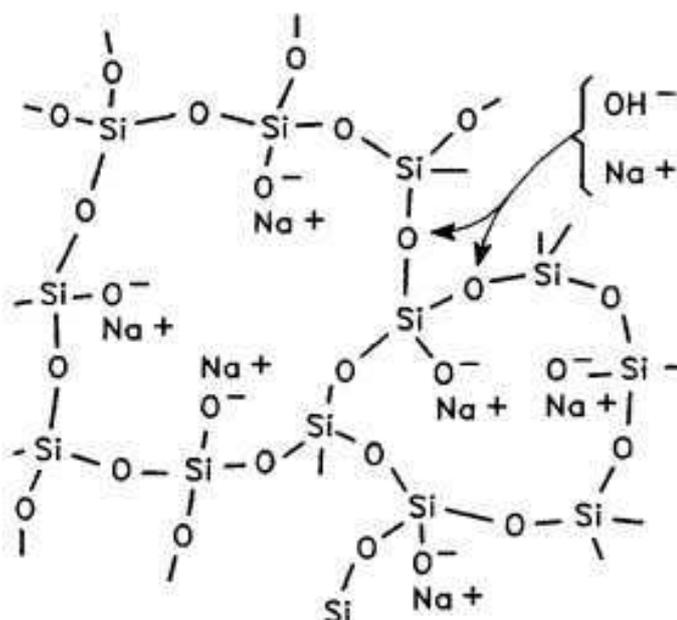
Fonte: TURRIZIANI (1986) *apud* HASPARYK (2005).

(2) Ataque das pontes de Siloxano e desintegração da sílica



Na figura 10, mostra-se como ocorre também o ataque das hidroxilas em excesso ao grupo siloxano (Si-O-Si), cujas ligações são rompidas para formar pares de Si-O⁻, e em seguida possibilita a formação do ácido ortosilícico (H₂SiO₄), um silicato solúvel que, neste ambiente de alto pH, fica em solução. Estas cargas negativas são balanceadas pelos cátions presentes: Cálcio (Ca⁺²), Potássio (K⁺) e Sódio (Na⁺²) (HASPARYK, 2005).

Figura 10 - Ruptura das ligações do grupo siloxano pelas hidroxilas.



Fonte: TURRIZIANI (1986) *apud* HASPARYK (2005).

O gel formado absorve a água ao redor e conseqüentemente aumenta em volume. Este aumento gera pressões que induzem à formação de microfaturas próximas aos locais de reação, que se propagam e eventualmente produzem fissuração na estrutura do concreto, o que permite inclusive a ocorrência de outros mecanismos deletérios (POOLE, 1992).

A **Reação Álcali-Silicato (RASS)** segue o mesmo princípio da Reação Álcali-Sílica, ocorrendo devido à reação entre os álcalis presentes no concreto e silicatos presentes em agregados provenientes de diversos tipos de rochas, como argilitos,

siltitos e grauvacas (rochas sedimentares); ardósias, filitos, quartzitos e xistos (rochas metamórficas) e granitos (rochas magmáticas) (SANCHEZ, 2008).

Este tipo de RAA se desenvolve de uma forma mais lenta e elaborada em comparação à RAS, devido ao fato de os minerais reativos estarem mais disseminados na matriz da rocha constituinte dos agregados (ARRAIS, 2011).

Segundo Poole (1992), a expansão de partículas individuais de rocha que ocorre neste tipo de reação sugere a absorção de água por superfícies de aluminossilicatos previamente 'secas', nas porções microcristalinas da rocha. Há uma relação direta entre a quantidade de material microcristalino, a porosidade e a expansão do concreto contendo estes agregados.

Ainda de acordo com Poole, complicações em identificar a ocorrência de Reações Álcali-Silicato se deve ao fato de, por vezes, haver a presença simultânea de Reação Álcali-Silica, podendo ser prejudicado o diagnóstico de ambas.

Por fim, a **Reação Álcali-Carbonato (RAC)** tem ocorrência bem mais rara em relação aos outros tipos de RAA, além de ter um mecanismo diferente. Ela se dá através da reação de agregados de origem carbonática contendo dolomitas e impurezas argilosas com as hidroxilas dos álcalis contidos no concreto (PAULON, 1981).

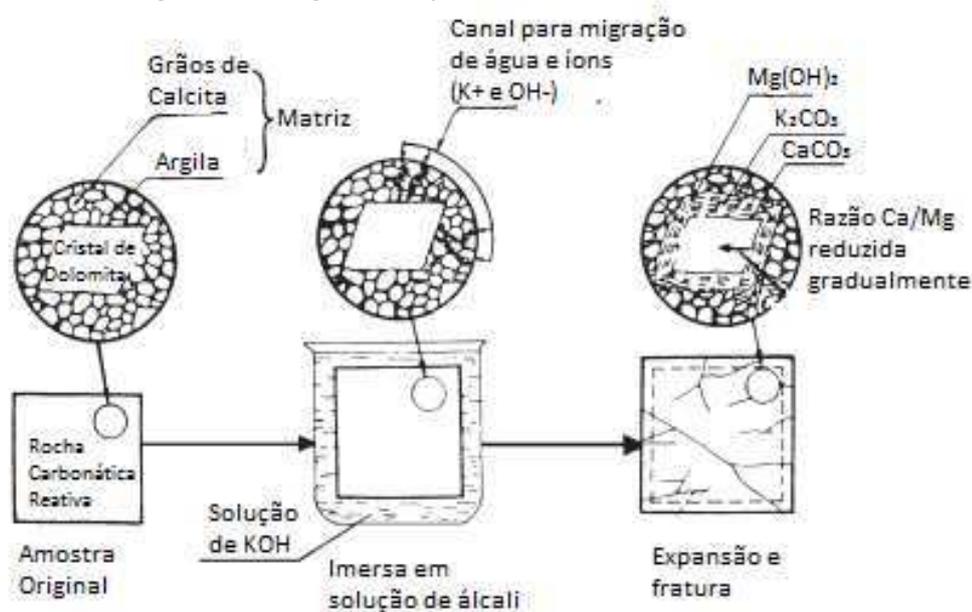
A RAC é relativamente rara pois agregados susceptíveis a esta reação normalmente não são viáveis para uso em concreto devido a razões como menor potencial de resistência. De acordo com Farny e Kerkhoff (2007), agregados reativos normalmente têm cristais de dolomita espalhados pela sua estrutura, cercados por uma matriz de grãos finos de Calcita e Argila. A calcita é uma das formas minerais do carbonato de cálcio; já dolomita é o nome popular do carbonato de cálcio-magnésio.

Esta reação não produz o gel hidrófilo característico dos demais tipos de RAA. Neste caso, a expansão deletéria ocorre em razão do processo de dedolomitização, ou seja, quebra da estrutura do carbonato de cálcio-magnésio, e formação de Brucita ($Mg(OH)_2$), como expressado abaixo por POOLE (1992):



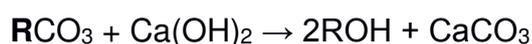
A variável R pode representar Sódio (Na), Potássio (K) ou Lítio (Li). O processo é ilustrado na figura 11, adaptada de TANG *et. Al* (1987): a expansão pode vir da migração de íons alcalinos e moléculas de água ao espaço restrito formado pela matriz de grãos finos de Calcita e Argila; da migração destes materiais para o cristal da dolomita; e do crescimento e rearranjo dos produtos da dedolomitização, especialmente a brucita, que exerce pressão à medida que cristaliza.

Figura 11 - Diagrama esquemático do mecanismo da RAC.



Fonte: Adaptada de TANG *et al.* (1987).

O potencial desta reação, que pode ocorrer em ambientes com pH relativamente baixo, cresce juntamente com o crescimento da alcalinidade do meio. O hidróxido de cálcio produzido pela hidratação do cimento Portland se combina com carbonato alcalino produzido na reação inicial, gerando um hidróxido alcalino e carbonato de cálcio, de acordo com a equação abaixo (POOLE, 1992):



Esta reação não somente regenera a quantidade de álcalis, mas também reduz a concentração de íons de carbonato e agrava o processo de dedolomitização, que terá continuidade até que a dolomita tenha reagido por completo ou a fonte de álcalis se esgote (FARNY e KERKHOFF, 2007)

2.4. Concreto com agregados reciclados de RCD

A importância do estudo da exploração de agregados provenientes de reciclagem de resíduos sólidos de construção e demolição vem do ciclo vicioso que caracteriza a produção de agregados, conforme explana Levy (2001). Os agregados minerais, areia e brita, constituem o segmento mais explorado do setor mineral, sendo indispensáveis para a indústria de construção civil.

Devido aos grandes custos associados ao transporte, as jazidas usualmente são próximas aos grandes centros. A expansão destes é causa direta da produção dos agregados citados, e quando a área urbana chega à área da jazida, esta deve ser fechada. Logo, é necessária a busca por alternativas, sendo a reciclagem de RCD uma delas.

Segundo Tenório (2007), o processo de transformação de RCD em agregado não difere muito da obtenção de agregados naturais, portanto, os equipamentos utilizados podem ser os mesmos, ou adaptados, conforme necessidade. Na linha de produção dos agregados de RCD constam três etapas: Cominuição (fragmentação), separação de tamanho e concentração. Em cada uma destas etapas há diversos procedimentos diferentes, devendo ser utilizado aquele que mais se adeque à finalidade do agregado

De acordo Levy (2001), para garantia da qualidade do processo, além de ser bem graduado limpo, a granulometria do agregado deverá enquadrar-se dentro e determinados limites e, quimicamente, só poderá conter níveis mínimos toleráveis de contaminação. Assim, há garantia de durabilidade do concreto e estabilidade das construções produzidas.

Quanto ao potencial para RAA, De Pauw (1996) constata na reciclagem que há a probabilidade de serem processados entulhos minerais que contenham agregados potencialmente reativos, que devido a condições especiais no concreto original não desenvolveram a reação, e que no novo concreto podem ter condições para tal. Por conseguinte, é de suma importância que este tipo de agregado passe por avaliação para potencial reatividade.

2.5. Dilatação térmica linear

Conforme será detalhado na seção de materiais e métodos deste trabalho, o ensaio feito para medir a reatividade dos agregados testados utiliza barras prismáticas de argamassa de dimensões 28,5cm x 2,5 cm x 2,5 cm.

A variação de tamanho devido à mudança de temperatura ocorre em todas as direções. Entretanto, nas barras moldadas neste estudo, uma das dimensões é consideravelmente maior que as demais, e devido a isso as variações de tamanho nas menores dimensões podem ser desconsideradas por não serem significativas. Portanto, convém discorrer sobre o conceito de dilatação térmica linear.

Segundo Halliday & Resnick (2009), quando ocorre variação na temperatura de um determinado sólido, seus átomos se afastam uns dos outros devido à variação de energia, e isso gera mudanças nas suas dimensões. Em se tratando de uma barra de comprimento inicial L_0 , submetida a uma variação de temperatura ΔT , é dada a equação 1:

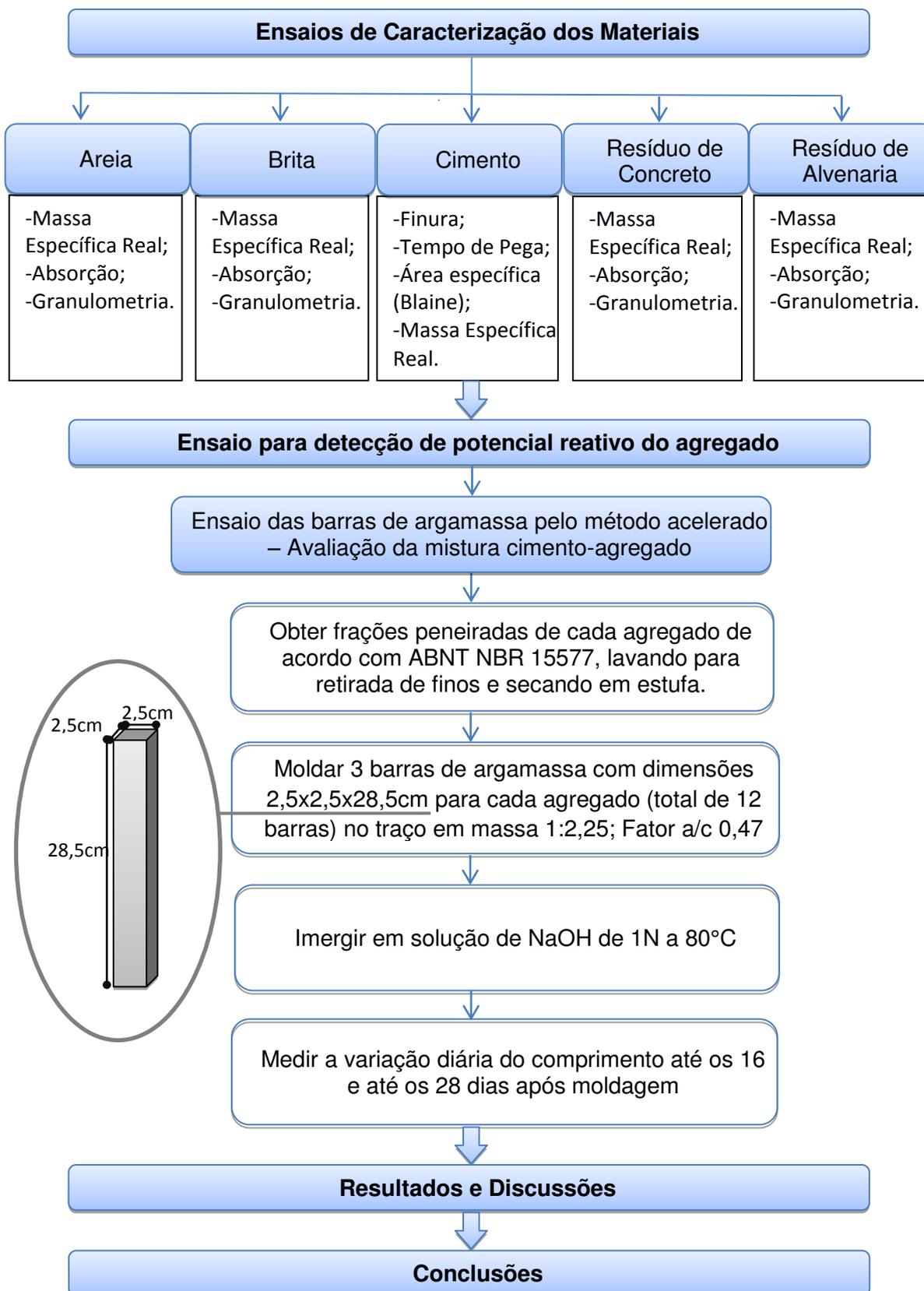
Equação 1 - Dilatação Térmica Linear.

$$\Delta L = L_0 \times \alpha \times \Delta T$$

Onde α é o coeficiente de dilatação linear, dado em $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ou K^{-1} , que é característico de cada material. O concreto, por ser um material heterogêneo, apresenta grande variabilidade em seu coeficiente de dilatação linear. De acordo com Neville (2011), diversos fatores, desde o tipo de agregado até a idade do concreto, influenciam no valor deste coeficiente que, na maior parte dos casos, assume valores da ordem de 10 a $20 \times 10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Fluxograma de Atividades



3.2. Materiais Utilizados

Os materiais utilizados nos ensaios foram obtidos na Cidade de Campina Grande. Para confecção dos corpos de prova, foram necessários água, cimento e os agregados a serem testados. Para o ensaio acelerado das barras de argamassa foi necessária obtenção de Hidróxido de Sódio para confecção da solução reativa.

3.2.1. ÁGUA

A água utilizada neste estudo foi a fornecida pelo abastecimento da cidade de Campina Grande, administrada e tratada pela Companhia de Água e Esgotos da Paraíba (CAGEPA).

3.2.2. CIMENTO

O cimento utilizado neste estudo foi o Portland do tipo CP II-Z-32, sendo um cimento composto com Pozolana (entre 6% e 14% de sua composição). Foi escolhido este tipo de cimento devido a ser o mais utilizado em obras de construção na cidade de Campina Grande.

3.2.3. AREIA

Foi utilizada areia média oriunda do Rio Paraíba, também comumente utilizada em obras de construção na cidade de Campina Grande.

3.2.4. BRITA #0

A Brita #0, de diâmetro máximo 9,5mm, também conhecida como “cascalhinho”, foi utilizada na moldagem dos corpos de prova, tanto por ser utilizada recorrentemente em obras como também por ter granulometria menor, favorecendo a execução do ensaio.

3.2.5. RESÍDUO DE ALVENARIA

O resíduo de alvenaria utilizado foi obtido em uma obra vertical da cidade de Campina Grande, proveniente da demolição de paredes de alvenaria feitas com tijolos cerâmicos de 6 furos.

3.2.6. RESÍDUO DE CONCRETO

O resíduo de concreto foi obtido também de uma obra vertical da cidade de Campina Grande, proveniente do concreto proveniente de demolições e do transbordo na concretagem das lajes.

3.2.7. HIDRÓXIDO DE SÓDIO

Para o ensaio acelerado, foi utilizado 1kg de Hidróxido de Sódio em pó, obtido em uma empresa especialista em produtos químicos da cidade de Campina Grande – PB.

3.3. Métodos de Ensaio

Os ensaios realizados foram executados de acordo com as normas técnicas vigentes, e foram realizados os ensaios necessários para caracterização dos materiais.

3.3.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS MATERIAIS

A tabela 3 mostra os ensaios de caracterização física que foram realizados, assim como suas respectivas normas técnicas:

Tabela 3- Ensaio de caracterização física e respectivas normas técnicas.

| Ensaio | Norma ABNT |
|--|-------------------|
| Absorção de água em agregados miúdos | NBR NM 30 (2001) |
| Determinação da composição granulométrica | NBR 7217 (1987) |
| Finura na peneira nº 200 (75µm) | NBR 11579 (2012) |
| Massa específica e absorção de água em agregados graúdos | NBR NM 53 (2003) |
| Massa específica de agregados miúdos | NBR 9776 (1987) |
| Massa específica do Cimento Portland | NBR NM 23 (2000) |
| Superfície específica (Blaine) | NBR NM 76 (1998) |
| Tempo de pega | NBR NM 65 (2003) |

3.3.2. ENSAIO ACELERADO DAS BARRAS DE ARGAMASSA

O ensaio das barras de argamassa foi executado conforme especificações da ABNT NBR 15577:2008. O método de execução do ensaio está descrito abaixo, e se resume em 3 etapas: Preparo das amostras e da solução de NaOH; Moldagem, cura úmida e desmoldagem dos corpos de prova; Medições e cálculo das expansões.

a) Preparo das amostras e da solução de NaOH

As amostras de agregados foram inicialmente coletadas, sendo a areia e a brita provenientes do depósito de uma empresa da cidade de Campina Grande-PB, e os resíduos de uma obra de grande porte, também da cidade de Campina Grande-PB.

Os resíduos de concreto foram cominuídos a fim de reduzir a sua granulometria a dimensões apropriadas. Foi utilizado para este processo um Britador de Mandíbula (Figura 12), pertencente ao laboratório de Estruturas no bloco BK da Universidade Federal de Campina Grande - UFCG. Ao final, o material foi reduzido a pedras de dimensões menores que 25mm (Figura 13).

Figura 12 - Resíduos de concreto cominuídos no britador de mandíbula.



Fonte: Acervo Próprio.

Figura 13 - Aspecto final dos resíduos de concreto após cominuição.



Fonte: Acervo Próprio.

A maior parte do resíduo de alvenaria era constituído por grãos com aspecto de agregado miúdo. O restante, composto de fragmentos com dimensões da ordem de 10cm, foi descartado. Todos os materiais foram devidamente quarteados para se obterem amostras significativamente representativas.

A seguir, para a posterior moldagem das barras, cada agregado foi peneirado mecanicamente para se obterem as granulometrias requeridas pelo item 4 da ABNT NBR 15577:2008, especificadas na tabela 4.

Tabela 4- Granulometria dos materiais para ensaio acelerado (Adaptado da ABNT NBR 15577:2008).

| Peneira com abertura de malha | | | Quantidade de material em massa | |
|-------------------------------|----------|--------|---------------------------------|-------|
| Peneira | Passante | Retido | % | g |
| Nº 8 | 4,75mm | 2,36mm | 10 | 99,0 |
| Nº 16 | 2,36mm | 1,18mm | 25 | 247,5 |
| Nº 30 | 1,18mm | 600µm | 25 | 247,5 |
| Nº 50 | 600µm | 300µm | 25 | 247,5 |
| Nº 100 | 300µm | 150µm | 15 | 148,5 |
| TOTAL | | | 100 | 990,0 |

Definiu-se, para cada agregado a ser testado, a moldagem 3 barras de argamassa (quantidade mínima exigida pela ABNT NBR 15577). Para esta quantidade de barras, são necessários 990g de cada material. No total, foram moldadas 12 barras (3 barras para cada um dos 4 agregados).

Cada fração foi colocada separadamente em um recipiente (Figura 14), lavada e seca em estufa por 24h para remoção completa dos finos. Em seguida, cada agregado foi acondicionado em um saco plástico transparente e identificado (Figura 15).

Figura 14 - Agregado separado em frações granulométricas exigidas pela ABNT NBR 15577:2008.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 15 - Agregados acondicionados em sacos plásticos transparentes após lavagem e secagem.



Fonte: Acervo próprio.

Para o preparo da solução de NaOH, primeiramente foi calculada a quantidade necessária. O recipiente utilizado para acondicionar a solução com as barras (Figura 16) foi a caixa prismática “Tanque para Cura em Imersão de CP’s Prismáticos” da marca Solotest, com tampa e grelha capaz de acomodar até 36 corpos de prova verticalmente, em conformidade com a ABNT NBR 15577. De acordo com as suas dimensões, o volume de solução necessário foi de 23 litros. A concentração requerida pela ABNT NBR 15577 é de 1N, sendo necessários 40g de NaOH para cada litro de água destilada. Portanto, no total foram utilizados 920g de NaOH.

A solução foi preparada no Laboratório de Saneamento da UFCG, bloco CV, com auxílio dos técnicos de laboratório.

Figura 16 - Tanque para Cura em Imersão de CP’s Prismáticos, de aço inoxidável, utilizado para submergir as barras de argamassa na solução de NaOH.



Fonte: Acervo próprio.

Após preparação, a solução foi levada à estufa para aquecimento a 80°C, temperatura exigida por norma. A estufa utilizada, também da Solotest (referência 3.518.250), possui interior em aço inox e exterior em chapa de aço revestida com epóxi eletrostático, além de controlador microprocessado e termostato hidráulico.

b) Moldagem, cura úmida e desmoldagem dos corpos de prova

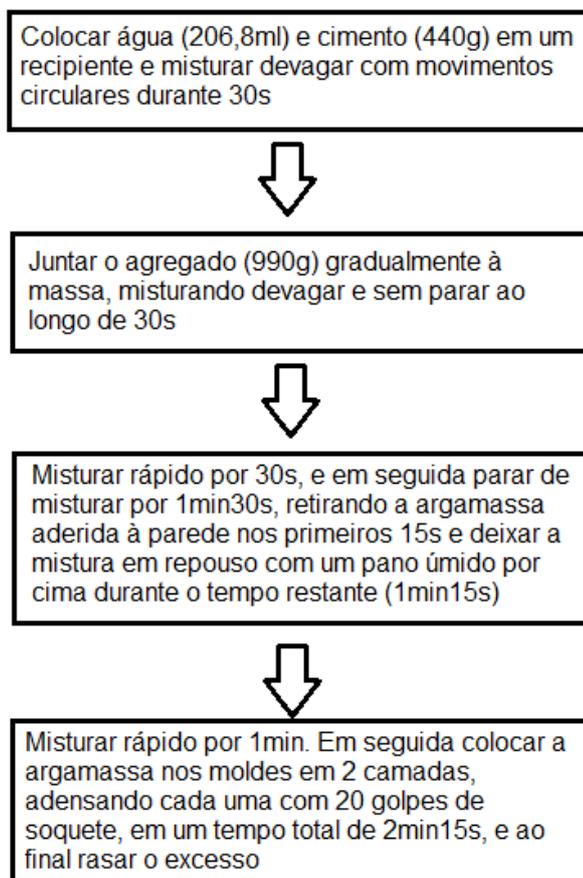
De posse dos materiais devidamente preparados, seguiu-se com a moldagem dos corpos de prova. De acordo com a NBR 15577, para cada conjunto de 3 corpos de prova, além dos 990g do material a ser testado, são necessários 440g de cimento e um fator água/cimento (a/c) de 0,47 em massa, resultando em 206,8ml de água. Estes dados estão resumidos na tabela 5.

Tabela 5- Resumo das quantidades de cada material para moldagem dos corpos de prova.

| Material | Agregado | Cimento | Água |
|------------|----------|---------|-----------------------|
| Quantidade | 990g | 440g | 206,8 ml (f a/c=0,47) |

A moldagem seguiu a ordem do fluxograma da Figura 17, baseado nas instruções normativas. Os moldes, novamente da marca Solotest (Figura 18), possuíam dimensões padrão de 28,5x2,5x2,5 cm. Antes da moldagem, foi aplicada uma fina camada de óleo mineral em sua parte interna, a fim de facilitar o desmolde.

Figura 17 - Fluxograma instrucional para moldagem dos corpos de prova.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 18 - Moldes de dimensões padrão utilizados para confecção das barras de argamassa.



Fonte: Acervo próprio.

Após a moldagem, cada conjunto de 3 barras foi identificado e colocado em cura úmida. A umidade do ar nesta sala é elevada o suficiente para que os efeitos da retração por perda de água das barras sejam diminuídos. Cada conjunto de 3 barras permaneceu em cura úmida por 24h.

Em seguida, os corpos de prova foram cuidadosamente desmoldados (Figura 19), sendo realizadas leituras iniciais orientativas. Para se realizar um aquecimento gradual, as barras foram submersas em água a temperatura ambiente (24°C) dentro de um recipiente metálico (Figura 20, à direita) e colocadas na estufa por 6h, até que atingissem 80°C. Em seguida, as barras foram postas no tanque contendo a solução de NaOH previamente aquecida a 80° C (Figura 20, à esquerda). Este aquecimento gradual serve para medir as possíveis expansões causadas variação térmica inicial. Logo, as expansões seguintes podem ser atribuídas à RAA.

O controle térmico da estufa é realizado pelo termostato hidráulico. Há o aquecimento até a temperatura desejada (por vezes até a uma maior), que é mantida com auxílio da vedação. Entretanto, a estufa não é perfeitamente isolada, e sua temperatura interna decai. O termostato volta a funcionar quando uma determinada temperatura mínima em relação à desejada é atingida. Esta variação pode gerar repercussões ao resultado do ensaio.

Figura 19 - Corpos de prova a serem desmoldados após cura úmida.



Fonte: Acervo próprio.

Figura 20 - Tanque com solução de NaOH (à esquerda) e recipiente com água para aquecimento gradual (à direita) em estufa a 80°C.



Fonte: Acervo próprio.

c) Medições e cálculo das expansões

As medições foram realizadas utilizando um relógio comparador de precisão 0,01mm (Figura 21). Para cada barra, foram realizadas duas leituras diárias, sendo que, na segunda, a barra era rotacionada 180° na vertical em relação à primeira leitura.

As primeiras medições a serem realizadas foram as leituras iniciais orientativas, explanadas no item anterior. Após o aquecimento gradual, foi realizado outro conjunto de medições. E enfim, para cada dia em que as barras estavam imersas na solução de NaOH, efetuou-se outro conjunto de duas leituras em cada barra.

Antes de cada conjunto de medições das barras de argamassa, foi realizada uma medição da barra-padrão de liga de aço, com dimensões 29,5x2,5x2,5 cm, para servir de referência caso houvesse alguma alteração no relógio comparador.

Figura 21 - Relógio comparador com precisão de 0,01mm.



Fonte: Acervo próprio.

Os anexos A, B, C e D apresentam as leituras e expansões diárias das 3 barras moldadas para cada material. Em cada barra foram efetuadas duas leituras diárias, tomando-se a média aritmética destas como valor representativo da barra no dia. Estas leituras foram executadas em um tempo máximo de até 15 segundos, para evitar que a diferença de temperatura entre a estufa e o ambiente interferisse na expansão das barras.

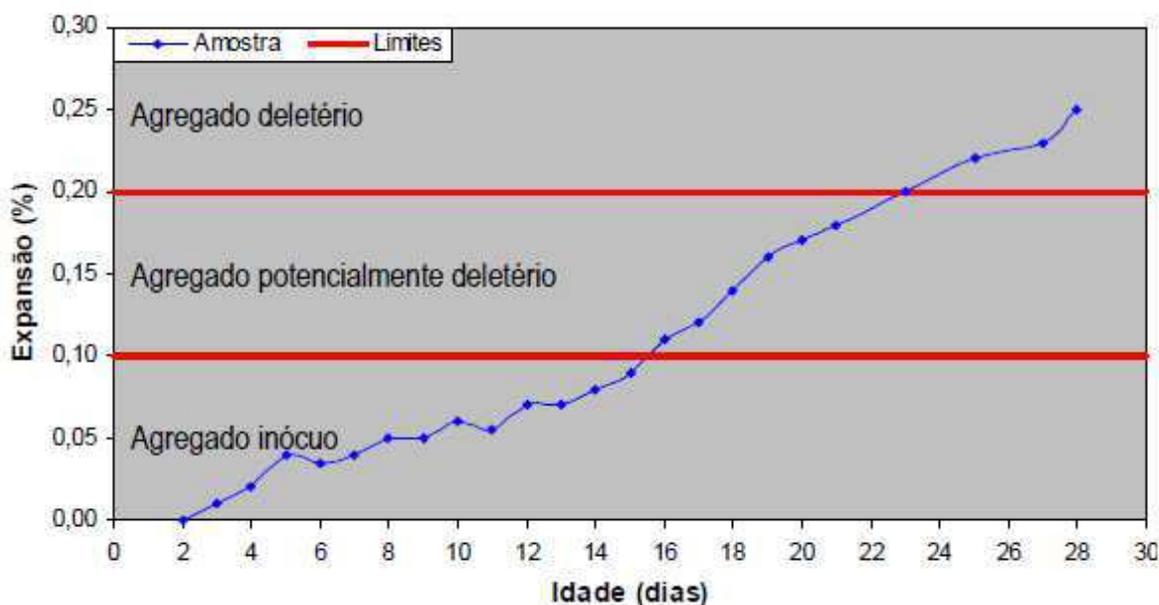
A expansão diária de cada barra (E_d) é calculada dividindo-se a diferença entre a média das leituras do dia (L_n) e a média das leituras iniciais pós aquecimento gradual (L_i) pela média das leituras iniciais pós aquecimento gradual, conforme Equação 2. Para cada agregado, a expansão diária é a média aritmética da expansão de cada barra.

Equação 2 - Expansão diária de cada barra.

$$E_d(\%) = \frac{L_n - L_i}{L_i}$$

A Figura 22 mostra o modelo de gráfico utilizado para analisar a reatividade do agregado de acordo com as expansões diárias.

Figura 22 - Modelo de gráfico de expansão (%) versus idade (dias) para análise de RAA pelo método acelerado.



Fonte: SOUZA (2007).

Para interpretar os resultados, na ASTM C-1260 (2005) são considerados como inócuos os agregados cuja expansão média, na idade de 16 dias após a moldagem, seja inferior a 0,10%, e potencialmente expansivo para valores superiores a 0,20%. Valores de expansão compreendidos entre 0,10% e 0,20% mantêm a dúvida quanto ao caráter inócuo ou deletério do agregado, sendo recomendada à consideração da leitura na idade de 28 dias.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os resultados, cada qual será devidamente discutido e explicado. Inicialmente, serão mostrados os resultados dos ensaios de caracterização dos materiais, e, em seguida, os resultados do ensaio acelerado das barras de argamassa e discussão sobre possível reatividade dos agregados.

4.1. Caracterização dos materiais

Na tabela 6 observa-se que os resultados dos ensaios de caracterização do cimento utilizado (CP II Z) estão de acordo com os limites normativos.

Tabela 6: Resultado dos ensaios de caracterização do CP II Z e limites normativos.

| Ensaio | Norma ABNT | Limites | Resultados |
|---|---------------------|----------------------------------|------------|
| Massa Específica Real (g/cm ³) | NBR NM 23 (2000) | - | 2,93 |
| Finura malha nº200 (%) | NBR 11579 (2012) | ≤ 12 | 3,12 |
| Área específica – Blaine (cm ² /g) | NBR NM 76 (1998) | ≥ 2600 4900 ± 200 (NBR 15577) | 4937 |
| Tempo de Pega (h:min) | NBR NM 65 (1983) | Início ≥ 1:00 | 3:01 |
| | | Fim ≤ 10:00 | 3:52 |
| Equivalente Alcalino – Na ₂ O _{eq} (%) | NBR NM 17 (2004) | 0,90 ± 0,10 | 0,93 |

A tabela 7 mostra os resultados dos ensaios de caracterização física da areia.

Tabela 7: Resultados dos ensaios de caracterização física da areia.

| Ensaio | Norma ABNT | Resultado |
|--|-----------------------|-----------|
| Massa Específica Real (g/cm ³) | NBR 9776 (1987) | 2,58 |
| Absorção de água (%) | NBR NM 30 (2001) | 0,53 |
| Granulometria | D _{máx} (mm) | 4,8 |
| | MF (%) | 2,54 |

O valor de absorção de água obtido foi relativamente baixo, porém esperado para este tipo de material. A distribuição granulométrica da areia é mostrada na tabela 8.

Tabela 8: Distribuição granulométrica da areia.

| Peneira | | Peso (g) | % Amostra Total | % Acumulada |
|--------------|-------|----------|--------------------|-------------|
| Nº | mm | | | |
| 4 | 4,8 | 19,67 | 1,97 | 1,97 |
| 8 | 2,4 | 49,92 | 5,00 | 6,97 |
| 16 | 1,2 | 129,13 | 12,91 | 19,87 |
| 30 | 0,6 | 268,98 | 26,90 | 46,77 |
| 50 | 0,3 | 329,84 | 32,98 | 79,75 |
| 100 | 0,15 | 186,44 | 18,64 | 98,40 |
| | Fundo | 16,02 | 1,60 | 100,00 |
| TOTAL | | 1.000,00 | 100,00 | - |

Pela distribuição granulométrica obtida, é possível classificá-la como areia média de acordo com os limites estabelecidos pela ABNT NBR 7211:1993.

O módulo de finura (MF), obtido dividindo-se a soma dos percentuais acumulados em todas as peneiras da série normal dividida por 100, corresponde a uma medida da dimensão dos grãos de areia. Quanto menor o MF, mais finos serão os grãos de areia, e, portanto, maior o número de grãos por unidade de volume, sendo necessário mais água para envolvê-los. Logo, é importante ter um bom controle sobre o MF, pois uma maior quantidade de água afetaria, além da resistência do concreto, a potencialidade de expansão do gel expansivo formado pela RAA.

. Foi obtido um MF de 2,54%, o que juntamente com a dimensão máxima do agregado de 4,8mm ratifica a classificação como areia média.

A seguir, nas tabelas 9 e 10, são mostradas as distribuições granulométricas dos resíduos de alvenaria e de concreto, respectivamente.

Tabela 9: Distribuição granulométrica dos resíduos de alvenaria.

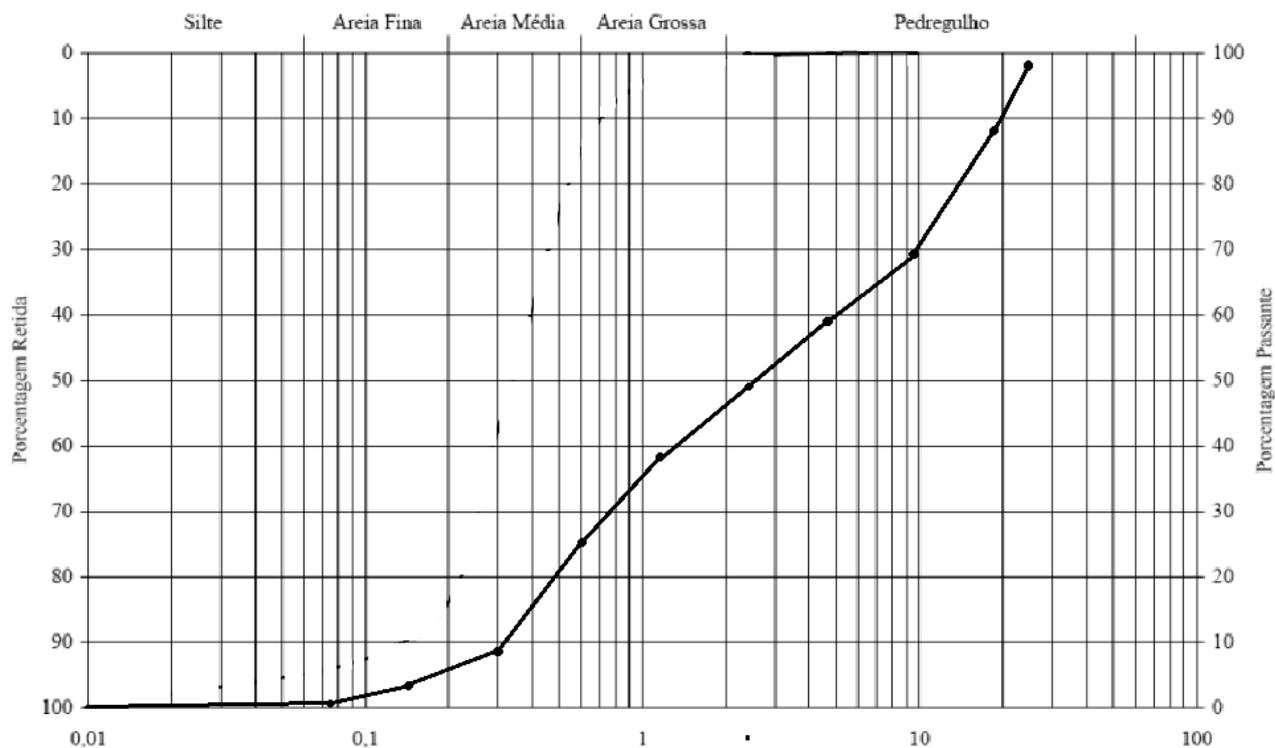
| Peneira | | Peso (g) | % Amostra Total | % Acumulada |
|----------------|-----------|-----------------|------------------------|--------------------|
| Nº | mm | | | |
| 1 pol. | 25,4 | 65,90 | 2,20 | 2,20 |
| 3/4 pol. | 19,1 | 295,60 | 9,85 | 12,05 |
| 3/8 pol. | 9,5 | 550,90 | 18,36 | 30,41 |
| 4 | 4,8 | 334,42 | 11,15 | 41,56 |
| 8 | 2,4 | 297,49 | 9,92 | 51,48 |
| 16 | 1,2 | 287,77 | 9,59 | 61,07 |
| 30 | 0,6 | 440,01 | 14,67 | 75,74 |
| 50 | 0,3 | 468,83 | 15,63 | 91,37 |
| 100 | 0,15 | 172,51 | 5,75 | 97,12 |
| | Fundo | 86,57 | 2,88 | 100,00 |
| TOTAL | | 3000,00 | 100,00 | - |

Tabela 10: Distribuição granulométrica dos resíduos de concreto.

| Peneira | | Peso (g) | % Amostra Total | % Acumulada |
|----------------|-----------|-----------------|------------------------|--------------------|
| Nº | mm | | | |
| 3/4 pol. | 19,1 | 251,26 | 8,38 | 8,38 |
| 3/8 pol. | 9,5 | 1467,90 | 48,93 | 57,31 |
| 4 | 4,8 | 512,80 | 17,09 | 74,40 |
| 8 | 2,4 | 262,73 | 8,76 | 83,16 |
| 16 | 1,2 | 135,92 | 4,53 | 87,69 |
| 30 | 0,6 | 107,45 | 3,58 | 91,27 |
| 50 | 0,3 | 92,59 | 3,09 | 94,36 |
| 100 | 0,15 | 71,86 | 2,40 | 96,76 |
| | Fundo | 97,49 | 3,24 | 100,00 |
| TOTAL | | 3000,00 | 100,00 | - |

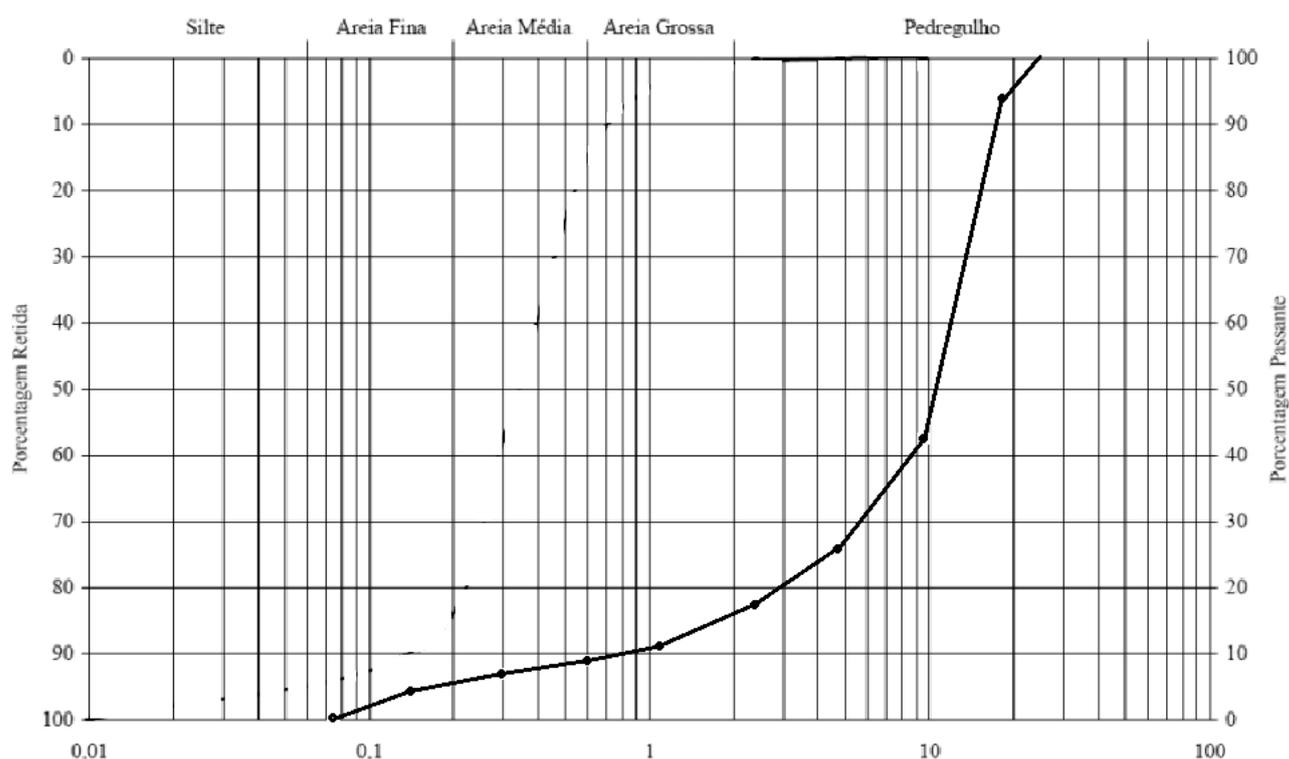
Com as distribuições granulométricas de cada material, é possível traçar as respectivas curvas, contidas nas Figuras 20 e 21.

Figura 23 - Curva granulométrica dos Resíduos de Alvenaria.



Fonte: Acervo Próprio.

Figura 24 - Curva granulométrica dos Resíduos de Concreto.



Fonte: Acervo Próprio.

Analisando as curvas granulométricas, percebe-se que o resíduo de alvenaria possui uma graduação quase contínua, com um pequeno salto no trecho entre 0,3mm e 1,2mm. Pode-se dizer, portanto, que o material é bem graduado.

O resíduo de concreto, por outro lado, possui uma graduação mais aberta, sendo mais de 50% da sua massa retida na peneira de 9,5mm. É um material mal graduado, o que pode ser atribuído a uma variabilidade natural no processo de cominuição de agregados reciclados. Vale salientar ainda que a etapa de separação de tamanho, realizada usualmente no processo de fabricação de agregados reciclados, não foi realizada neste trabalho. Para aplicações que exijam maior controle da resistência do concreto (característica diretamente influenciada pela qualidade da graduação), esta etapa deve ser devidamente realizada.

A tabela 11 mostra os resultados dos demais ensaios de caracterização física da brita e dos resíduos de alvenaria e concreto.

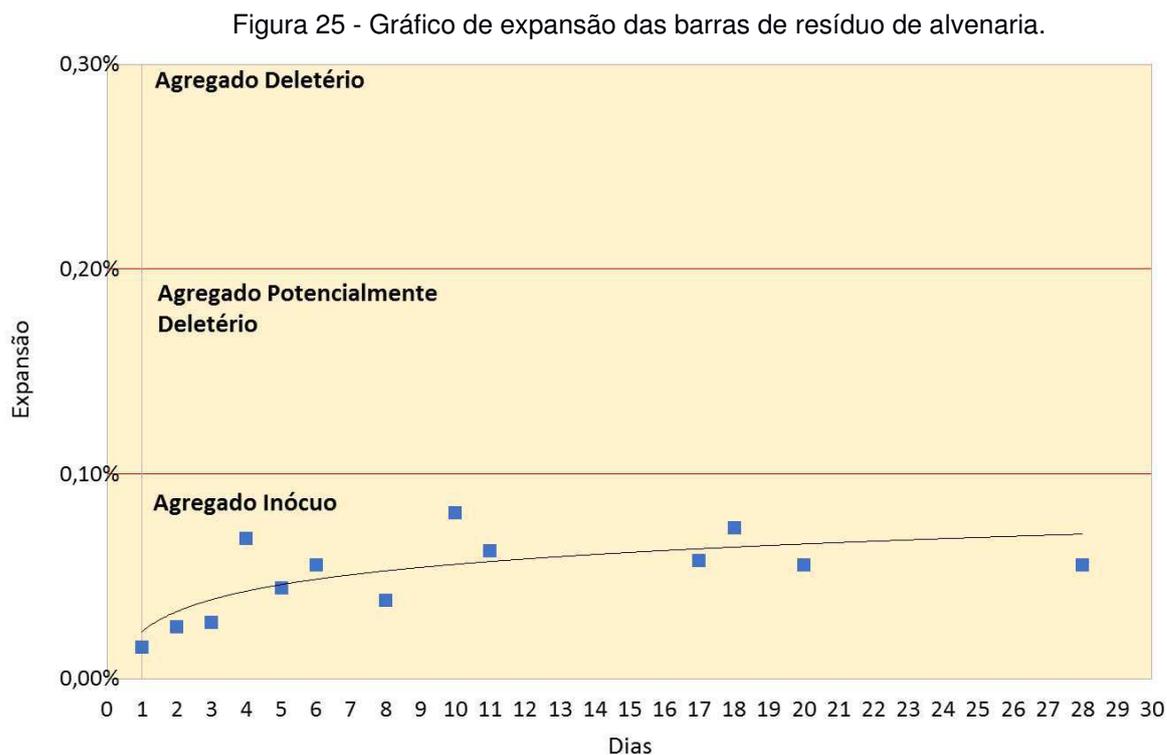
Tabela 11: Resultados dos ensaios de caracterização física da brita e dos resíduos.

| Ensaio | Material | Resultado |
|---|----------------------|------------------------|
| Massa Específica Real (ABNT NBR NM 53:2003) | Brita #0 | 2,60 g/cm ³ |
| | Resíduo de Alvenaria | 2,36 g/cm ³ |
| | Resíduo de Concreto | 2,41 g/cm ³ |
| Absorção (ABNT NBR NM 53:2003) | Brita #0 | 1,1% |
| | Resíduo de Alvenaria | 7,3% |
| | Resíduo de Concreto | 1,1% |

Observa-se que o resíduo de alvenaria possui um índice de absorção bem maior do que o resíduo de concreto e a brita, com uma diferença 6,2 pontos percentuais. Este valor evidencia sua alta porosidade, o que deve ser levado em consideração no cálculo de dosagem do concreto feito com este material, que necessitará de uma quantidade maior de água do que o concreto feito com agregados convencionais. Isto se deve ao fato de que parte da água de amassamento utilizada na moldagem de concreto será absorvida pelos resíduos de alvenaria.

4.2. Ensaio das barras de argamassa pelo método acelerado

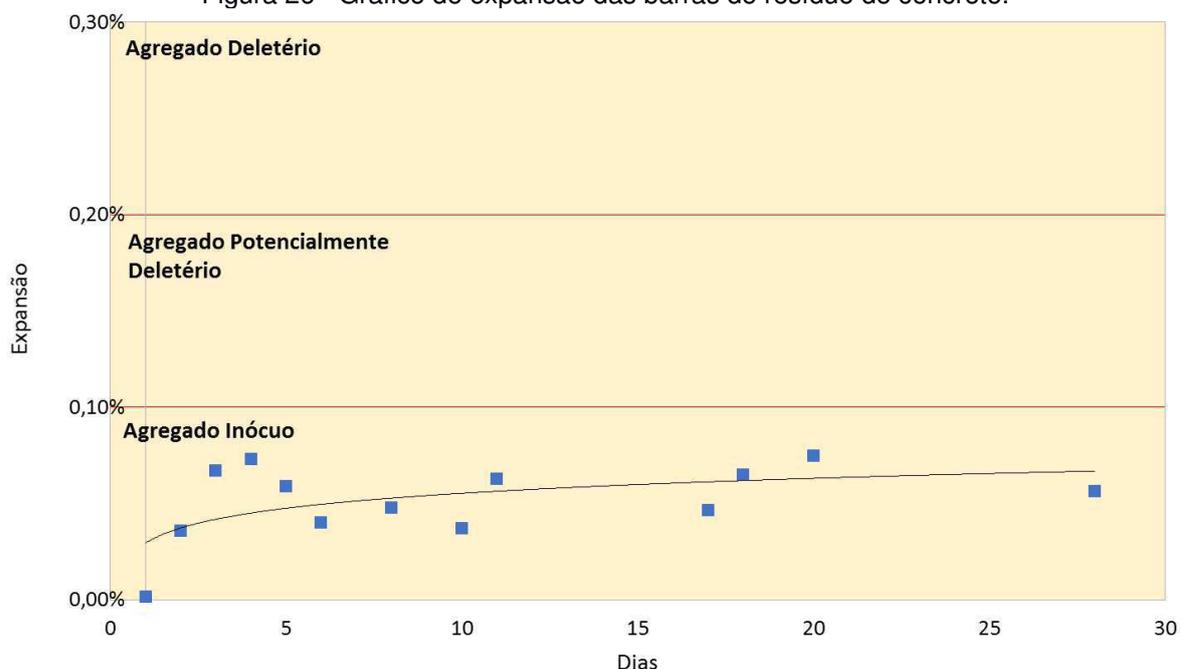
Como resultado do ensaio das barras de argamassa pelo método acelerado foram gerados quatro gráficos como o mostrado na Figura 22, um para cada tipo de agregado testado (Figuras 25 a 28). As tabelas com os dados das leituras e valores de expansão calculados estão no Apêndice deste trabalho.



Fonte: Acervo Próprio.

Na Figura 25, vê-se que as barras moldadas com os resíduos de alvenaria sofreram expansões médias máximas de 0,08%, no dia 10. A expansão aos 16 dias foi de 0,06%, e apesar de ser abaixo do limite inferior de 0,10% (valor referência para analisar, a esta data, se o agregado pode ou não ser reativo), foram efetuadas leituras posteriores até o vigésimo oitavo dia. Conforme mostra a curva de tendência do gráfico, percebe-se uma taxa inicial de crescimento mais acelerada e posterior suavização das expansões ao redor da marca de 0,06%. Todas as expansões, entretanto, ficaram abaixo do limite inferior de 0,10%, e o agregado pode ser considerado inócuo.

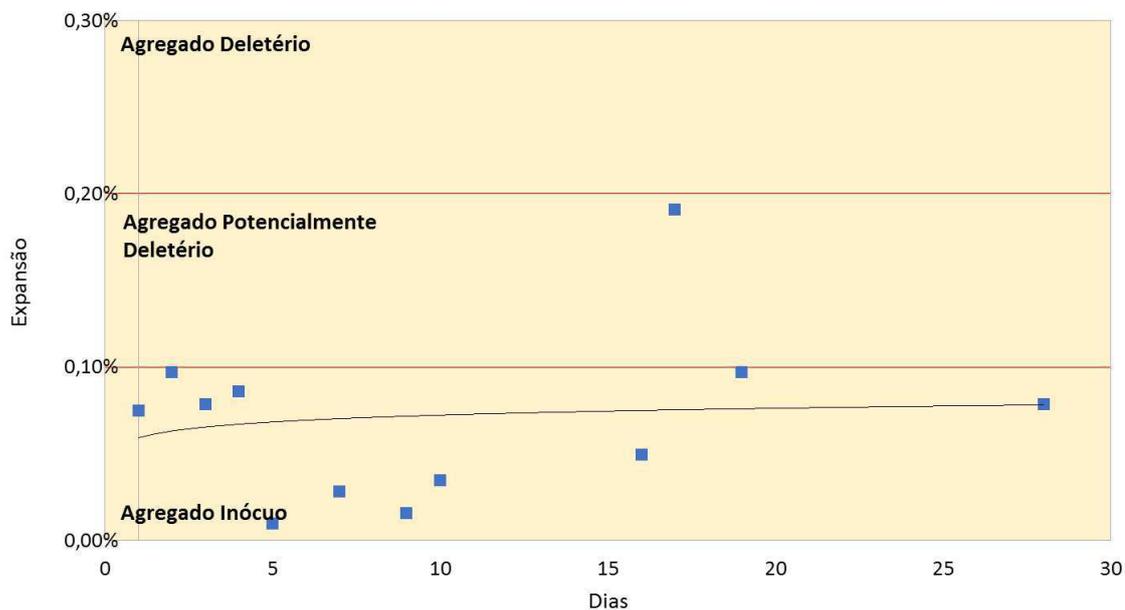
Figura 26 - Gráfico de expansão das barras de resíduo de concreto.



Fonte: Acervo Próprio.

A figura 26 mostra a expansão diária média das barras moldadas com resíduos de concreto. Assim como na figura 25, houve uma tendência inicial mais acelerada de crescimento das expansões. Em seguida houve oscilações, porém sempre em torno de um valor médio de aproximadamente 0,06%, e nunca ficando acima de 0,07%. Aos 16 dias, o valor de expansão não havia passado dos 0,10%. Apesar disto, as leituras foram feitas até os 28 dias. O agregado, portanto, pode ser considerado também inócuo.

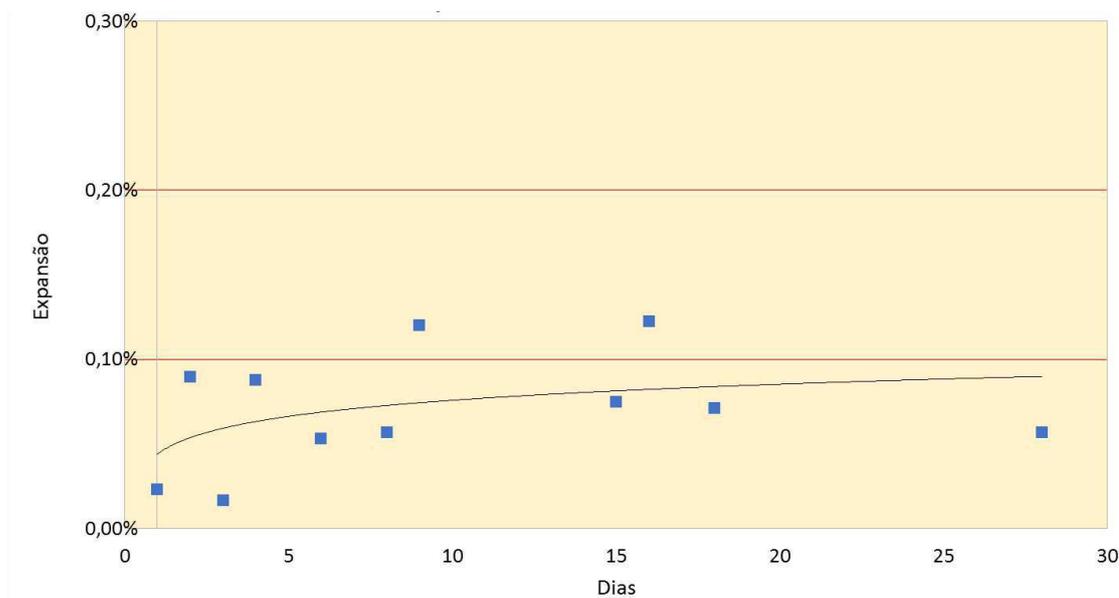
Figura 27 - Gráfico de expansão das barras de areia.



Fonte: Acervo Próprio.

Na figura 27 são mostradas as expansões médias diárias das barras moldadas com areia média. Observa-se ciclos alternados de expansão e contração, com variação dos valores obtidos maior do que a dos demais materiais, e com valor máximo de expansão de 0,19% aos 17 dias. É preciso observar, entretanto, o comportamento da curva de tendência do gráfico, que ficou sempre abaixo do limite inferior de 0,10%. O agregado, portanto, caracteriza-se como inócuo.

Figura 28 - Gráfico de expansão das barras de brita.



Fonte: Acervo Próprio.

Por fim, na figura 28, mostra-se a expansão média das barras feitas com brita #0. Este gráfico é bastante irregular, com valores de expansão variando até em 0,07% de um dia ao outro. Nos dias 9 e 16, as expansões ficaram acima de 0,10% (0,12% em ambos). Após isto e até o dia 28, os valores de expansão decresceram. Analisando a curva de tendência do gráfico, é possível perceber uma estabilização nos valores médios de expansão após o crescimento inicial. Nota-se também que a curva ficou sempre abaixo do limite inferior de 0,10%. Logo, este agregado também se caracteriza como inócuo.

Vale ressaltar que a oscilação entre expansão e contração mostrada em todos os gráficos, alguns, como no caso da areia média e da brita, em maior escala, tem como justificativa a variação na temperatura da estufa, causada pelo acionamento tardio (para o padrão necessário a este experimento) do termostato. Foram percebidas variações da ordem de 10°C. Calculando pela equação 1, a variação de comprimento devido a este fator é da ordem de 0,02mm, valor significativo para as condições do estudo.

5. CONCLUSÕES

De acordo com os resultados obtidos e análises efetuadas na seção anterior deste trabalho, é possível concluir que:

- Os agregados testados são inócuos, pois as porcentagens de expansão obtidas não passaram do limite mínimo estabelecido de 0,10%. Apenas em 3 medições houve expansão acima deste limite mínimo, nas barras moldadas com areia (uma leitura de 0,19%) e com brita (duas leituras de 0,12%), porém a tendência das curvas de expansão destes agregados indica que estes pontos são valores atípicos, com justificativa na variação de temperatura da estufa utilizada. Nas barras moldadas com resíduos de alvenaria e concreto, as expansões máximas obtidas foram de 0,08% e 0,07%, respectivamente.
- Quanto à exsudação de gel expansivo, após o final do experimento não foi visualmente identificada em nenhuma das barras moldadas. Como explicado previamente, é possível que a reação aconteça sem que haja efeitos deletérios para a estrutura. Logo, se houve formação de gel nas barras moldadas, foi em uma quantidade que não acarretou em expansões significativas. Este fato reforça, portanto, a conclusão de que os agregados testados são inócuos.

6. SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

- Fazer o processo de separação das granulometrias dos agregados reciclados e fazer testes de resistência de concreto moldado com estes materiais;
- Efetuar mais leituras e moldar mais barras para cada agregado testado;
- Realizar outros testes de reatividade com os agregados, como análise petrográfica, para identificar possíveis minerais reativos, e microscopia eletrônica de varredura (MEV), para identificar possível formação interna de gel expansivo;

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACI COMMITTEE 201.2R. *Guide to Durable Concrete*. American Concrete Institute – ACI. 2008

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS – ASTM. **Standard test method for potential alkali reactivity of cement-aggregate combinations (mortar-bar method)**. ASTM C 1260. West Conshohocken, 2005.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregado miúdo – Determinação da absorção de água**. NBR NM 30. Rio de Janeiro. 2001

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – Determinação da composição granulométrica**. NBR 7217. Rio de Janeiro. 1987

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – Determinação de massa específica de agregados miúdos por meio do frasco Chapman**. NBR 9776. Rio de Janeiro. 1987.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água**. NBR NM 53. Rio de Janeiro. 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Agregados – Reatividade álcali-agregado, Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado**. NBR 15577. Rio de Janeiro. 2008

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (Método de Blaine)**. NBR NM 76. Rio de Janeiro. 1998

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200)**. NBR 11579. Rio de Janeiro. 2012

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland – Determinação do tempo de pega**. NBR NM 65. Rio de Janeiro. 2003

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS – ABNT. **Cimento Portland e outros materiais em pó – Determinação da massa específica.** NBR NM 23. Rio de Janeiro. 2000.

ANDRIOLO, F.R. **Documentação sobre o panorama brasileiro.** In : Simpósio sobre Reatividade Álcali-Agregado em Estruturas de Concreto. 1997. Goiânia. Relatório Final - Panorama Brasileiro e Relato Técnico do Simpósio - Parte I. Goiânia. 1999

ARRAIS, M. S. M. C. **“Reação Álcali-Silicato: Avaliação do comportamento de agregados graúdos da Região Metropolitana do Recife frente a diferentes tipos de cimento”.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mineral). Centro de Tecnologia e Geociências. Universidade Federal de Pernambuco. Recife. 2011.

CONCRETO E CONSTRUÇÕES. Revista. **Instituto Brasileiro do Concreto – IBRACON.** Nº 53. P. 14. Jan.-Fev.-Mar. 2009.

De PAUW, C., DESMYTER, J., DESSEL J. **“Reuse of construction and demolition waste as aggregates in concrete, technical and environmental aspects”.** In: CONCRETE IN THE SERVICE OF MANKIND. - INTERNATIONAL CONFERENCE CONCRETE FOR ENVIRONMENT ENHANCEMENT AND PROTECTION, Dundee – Escócia. 1996.

FARNY, J. A., KERKHOFF, B. **Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete.** Technical Paper. *Cement and Concrete Technology – Portland Cement Association.* 2007.

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

HALLIDAY, D., RESNICK, R. Robert Resnik. **Fundamentos de Física.** John Wiley&Sons, Inc. Traduzido por LTC – Livros Técnicos e Científicos. Volume 2. 8ª Ed. Rio de Janeiro. 2009

HASPARYK, N. P. “**Investigação de Concretos Afetado pela Reação Álcali-Agregado e Caracterização Avançada do Gel Exsudado**”. Tese (Doutorado em Engenharia). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2005.

KIHARA, Y., SBRIGHI, C. N., KUPERMAN, S. C. **Reação álcali-agregado: visão atual e situação brasileira**. In: Simpósio sobre durabilidade do concreto. São Paulo. 1998. Anais...São Paulo: IBRACON/USPS. 1998.

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

LEVY, S. M. **Contribuição ao estudo da durabilidade de concretos produzidos com resíduos de concreto e alvenaria**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia e Construção Civil. São Paulo. 2001

MEHTA, P. K; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo. 2008.

MIZUMOTO, C. “**Investigação da Reação Álcali-Agregado (RAA) em Testemunhos de Concreto e Agregados Constituintes**”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia. Universidade Estadual Paulista. Ilha Solteira – SP. 2009.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do Concreto**. Pearson Education.. Traduzido por Bookman Editora LTDA. 5ª Ed. Porto Alegre. 2011

PAULON, A. W. “**Reações Álcali-Agregado em Concreto**”. Dissertação (Mestrado). Universidade de São Paulo. 1981.

POOLE, A. B., “**Introduction to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete**”. *The Alkali-Silica Reaction in Concrete*. Editado por Swamy, R.N., Van Nostrand, R. New York, New York, 1992.

SALLES, F. M., SANTO, T. D. E., MARQUES, M. L. **A reação álcali-agregado em concreto: efeito, diagnóstico e prevenção**. In: WORKSHOP CONCRETO: durabilidade, qualidade e novas tecnologias, 2., 2003, Ilha Solteira. **Anais...** Ilha Solteira: Sato, 2003.

SANCHEZ, L. F. M. **“Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das Reações Álcali-Agregado em Concretos”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. 2008.

SILVEIRA, A. L. Z. P. **“Estudo da Reação Álcali-Agregado em rochas carbonáticas”**. Dissertação (Mestrado). Instituto de Geociências. Universidade de Brasília. 2006.

SOUZA, J. L. F. **“Estudo de Durabilidade de Concretos e Argamassas através de RAA em agregados convencionais da região de Campina Grande e alternativos em concreções lateríticas Sapé-PB e Jacumã-PB”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil e Ambiental). Centro de Tecnologia e Recursos Naturais. Universidade Federal de Campina Grande. 2007

STANTON, T. E. **“Expansion of Concrete Through Reaction Between Cement and Aggregate”** *Proceedings. American Society of Civil Engineers – ASCE*. Vol. 66. Nova York. 1940.

TANG, M., DENG, M., LON, X., HAN, S. **“Studies on Alkali-Carbonate Reaction,”**. *ACI Materials Journal. American Concrete Institute*. Farmington Hills. Michigan. 1994.

TENÓRIO, J. J. L. **Avaliação de propriedades do concreto produzido com agregados reciclados de resíduos de construção e demolição visando aplicações estruturais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal de Alagoas. Maceió. 2007.

TIECHER, F. **“Reação Álcali-Agregado: Avaliação do Comportamento de Agregados do Sul do Brasil quando se altera o cimento utilizado”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. 2006.

VALDUGA, L. **“Reação Álcali-Agregado – mapeamento de agregados reativos do estado de São Paulo”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Faculdade de Engenharia Civil. Universidade Estadual de Campinas. Campinas. 2002.

ANEXO A – Expansões diárias das barras moldadas com Resíduo de Alvenaria

| Resíduo de Alvenaria – Leitura inicial orientativa | | | | | Comprimento Inicial (mm) |
|--|--------------|---------|---------|---------|--------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,37 | 277,43 | 277,98 | 278,69 | 278,12 |
| Leitura 2 (mm) | 294,63 | 277,82 | 278,42 | 278,36 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,63 | 278,20 | 278,53 | |
| Resíduo de Alvenaria – Dia 1 na solução | | | | | Expansão Dia 1 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 277,00 | 276,98 | 278,16 | 0,02% |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 277,08 | 277,35 | 278,27 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,04 | 277,17 | 278,22 | |
| Resíduo de Alvenaria – Dia 2 na solução | | | | | Expansão Dia 2 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 277,21 | 277,08 | 278,15 | 0,03% |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 277,01 | 277,27 | 278,28 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,11 | 277,18 | 278,22 | |
| Resíduo de Alvenaria – Dia 3 na solução | | | | | Expansão Dia 3 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,28 | 277,02 | 277,27 | 278,18 | 0,03% |
| Leitura 2 (mm) | 294,73 | 277,15 | 277,12 | 278,30 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,09 | 277,20 | 278,24 | |
| Resíduo de Alvenaria – Dia 4 na solução | | | | | Expansão Dia 4 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,26 | 277,28 | 277,44 | 278,37 | 0,07% |
| Leitura 2 (mm) | 294,75 | 277,37 | 277,39 | 277,87 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,33 | 277,42 | 278,12 | |
| Resíduo de Alvenaria – Dia 5 na solução | | | | | Expansão Dia 5 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,22 | 276,97 | 277,19 | 278,56 | 0,04% |
| Leitura 2 (mm) | 294,79 | 277,06 | 277,62 | 277,92 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,02 | 277,41 | 278,24 | |

| Resíduo de Alvenaria – Dia 6 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,21 | 277,44 | 277,28 | 278,47 |
| Leitura 2 (mm) | 294,80 | 277,19 | 277,07 | 278,06 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,32 | 277,18 | 278,27 |

| Expansão Dia 6 |
|-----------------------|
| 0,06% |

| Resíduo de Alvenaria – Dia 8 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,19 | 277,13 | 277,12 | 278,02 |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 277,30 | 277,39 | 278,26 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,22 | 277,26 | 278,14 |

| Expansão Dia 8 |
|-----------------------|
| 0,04% |

| Resíduo de Alvenaria – Dia 10 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 276,98 | 277,83 | 277,82 |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 277,17 | 278,06 | 278,07 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,08 | 277,95 | 277,95 |

| Expansão Dia 10 |
|------------------------|
| 0,08% |

| Resíduo de Alvenaria – Dia 11 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,20 | 277,19 | 277,32 | 277,99 |
| Leitura 2 (mm) | 294,80 | 276,99 | 277,92 | 278,21 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,09 | 277,62 | 278,10 |

| Expansão Dia 11 |
|------------------------|
| 0,06% |

| Resíduo de Alvenaria – Dia 17 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,15 | 277,30 | 277,47 | 278,00 |
| Leitura 2 (mm) | 294,85 | 277,23 | 277,33 | 278,21 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,27 | 277,40 | 278,11 |

| Expansão Dia 17 |
|------------------------|
| 0,06% |

| Resíduo de Alvenaria – Dia 18 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,15 | 276,97 | 278,14 | 278,01 |
| Leitura 2 (mm) | 294,86 | 277,17 | 277,18 | 278,34 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,07 | 277,66 | 278,18 |

| Expansão Dia 18 |
|------------------------|
| 0,07% |

| Resíduo de Alvenaria – Dia 20 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 277,40 | 277,38 | 278,20 |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 277,33 | 277,23 | 277,97 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,37 | 277,31 | 278,09 |

Expansão Dia 20

0,06%

| Resíduo de Alvenaria – Dia 28 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 277,06 | 277,39 | 278,45 |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 276,97 | 277,72 | 277,92 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,02 | 277,56 | 278,19 |

Expansão Dia 28

0,06%

RESUMO DAS EXPANSÕES – RESÍDUO DE ALVENARIA

| Dia | Expansão |
|-----|----------|
| 1 | 0,02% |
| 2 | 0,03% |
| 3 | 0,03% |
| 4 | 0,07% |
| 5 | 0,04% |
| 6 | 0,06% |
| 8 | 0,04% |
| 10 | 0,08% |
| 11 | 0,06% |
| 17 | 0,06% |
| 18 | 0,07% |
| 20 | 0,06% |
| 28 | 0,06% |

ANEXO B – Expansões diárias das barras moldadas com Resíduo de Concreto

| Resíduo de Concreto – Leitura inicial orientativa | | | | | Comprimento Inicial (mm) |
|---|--------------|---------|---------|---------|--------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,37 | 278,26 | 278,33 | 277,45 | 278,05 |
| Leitura 2 (mm) | 294,63 | 278,54 | 278,62 | 277,07 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,40 | 278,48 | 277,26 | |

| Resíduo de Concreto – Dia 1 na solução | | | | | Expansão Dia 1 |
|--|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 277,90 | 278,03 | 276,81 | 0,00% |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 278,56 | 278,76 | 277,33 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,23 | 278,40 | 277,07 | |

| Resíduo de Concreto – Dia 2 na solução | | | | | Expansão Dia 2 |
|--|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 278,55 | 278,79 | 277,30 | 0,04% |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 278,10 | 278,27 | 276,96 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,33 | 278,53 | 277,13 | |

| Resíduo de Concreto – Dia 3 na solução | | | | | Expansão Dia 3 |
|--|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,28 | 278,39 | 278,30 | 277,51 | 0,07% |
| Leitura 2 (mm) | 294,73 | 278,42 | 278,35 | 277,52 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,41 | 278,33 | 277,52 | |

| Resíduo de Concreto – Dia 4 na solução | | | | | Expansão Dia 4 |
|--|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,26 | 278,77 | 278,56 | 277,72 | 0,07% |
| Leitura 2 (mm) | 294,75 | 278,21 | 278,01 | 277,32 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,49 | 278,29 | 277,52 | |

| Resíduo de Concreto – Dia 5 na solução | | | | | Expansão Dia 5 |
|--|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,22 | 278,24 | 278,17 | 277,19 | 0,06% |
| Leitura 2 (mm) | 294,79 | 278,63 | 278,81 | 277,31 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,44 | 278,49 | 277,25 | |

| Resíduo de Concreto – Dia 6 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,21 | 278,75 | 279,06 | 277,19 |
| Leitura 2 (mm) | 294,80 | 278,07 | 278,15 | 276,82 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,41 | 278,61 | 277,01 |

| Expansão Dia 6 |
|-----------------------|
| 0,04% |

| Resíduo de Concreto – Dia 8 na solução | | | | |
|---|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,19 | 278,29 | 278,20 | 277,37 |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 278,64 | 278,59 | 277,08 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,46 | 278,40 | 277,23 |

| Expansão Dia 8 |
|-----------------------|
| 0,05% |

| Resíduo de Concreto – Dia 10 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 278,09 | 277,77 | 277,43 |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 278,58 | 279,23 | 276,89 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,34 | 278,50 | 277,16 |

| Expansão Dia 10 |
|------------------------|
| 0,04% |

| Resíduo de Concreto – Dia 11 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,20 | 278,06 | 278,18 | 278,18 |
| Leitura 2 (mm) | 294,80 | 278,34 | 278,76 | 276,90 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,20 | 278,47 | 277,54 |

| Expansão Dia 11 |
|------------------------|
| 0,06% |

| Resíduo de Concreto – Dia 17 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,15 | 278,30 | 278,20 | 277,40 |
| Leitura 2 (mm) | 294,85 | 278,50 | 278,61 | 277,13 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,40 | 278,41 | 277,27 |

| Expansão Dia 17 |
|------------------------|
| 0,05% |

| Resíduo de Concreto – Dia 18 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,15 | 278,53 | 278,49 | 277,35 |
| Leitura 2 (mm) | 294,86 | 278,37 | 278,17 | 277,55 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,45 | 278,33 | 277,45 |

| Expansão Dia 18 |
|------------------------|
| 0,07% |

| Resíduo de Concreto – Dia 20 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 278,40 | 278,26 | 277,41 |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 278,59 | 278,43 | 277,53 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,50 | 278,35 | 277,47 |

Expansão Dia 20

0,07%

| Resíduo de Concreto – Dia 28 na solução | | | | |
|--|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 278,50 | 278,19 | 277,78 |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 278,28 | 278,56 | 277,00 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,39 | 278,38 | 277,39 |

Expansão Dia 28

0,06%

RESUMO DAS EXPANSÕES – RESÍDUO DE CONCRETO

| Dia | Expansão |
|-----|----------|
| 1 | 0,00% |
| 2 | 0,04% |
| 3 | 0,07% |
| 4 | 0,07% |
| 5 | 0,06% |
| 6 | 0,04% |
| 8 | 0,05% |
| 10 | 0,04% |
| 11 | 0,06% |
| 17 | 0,05% |
| 18 | 0,07% |
| 20 | 0,07% |
| 28 | 0,06% |

ANEXO C – Expansões diárias das barras moldadas com Areia

| Areia – Leitura inicial orientativa | | | | | Comprimento Inicial (mm) |
|-------------------------------------|--------------|---------|---------|---------|--------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,37 | 277,37 | 277,06 | 278,41 | 277,52 |
| Leitura 2 (mm) | 294,63 | 276,79 | 276,81 | 278,69 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,08 | 276,94 | 278,55 | |
| Areia – Dia 1 na solução | | | | | Expansão Dia 1 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 277,62 | 276,86 | 279,23 | 0,08% |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 277,17 | 277,48 | 278,02 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,40 | 277,17 | 278,63 | |
| Areia – Dia 2 na solução | | | | | Expansão Dia 2 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 277,14 | 276,92 | 278,57 | 0,10% |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 277,62 | 277,29 | 279,21 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,38 | 277,11 | 278,89 | |
| Areia – Dia 3 na solução | | | | | Expansão Dia 3 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,28 | 277,53 | 276,95 | 279,37 | 0,08% |
| Leitura 2 (mm) | 294,73 | 277,13 | 276,83 | 278,63 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,33 | 276,89 | 279,00 | |
| Areia – Dia 4 na solução | | | | | Expansão Dia 4 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,26 | 277,16 | 276,81 | 278,71 | 0,09% |
| Leitura 2 (mm) | 294,75 | 277,54 | 277,02 | 279,32 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,35 | 276,92 | 279,02 | |
| Areia – Dia 5 na solução | | | | | Expansão Dia 5 |
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,22 | 276,99 | 277,08 | 278,08 | 0,01% |
| Leitura 2 (mm) | 294,79 | 277,31 | 276,79 | 279,05 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,15 | 276,94 | 278,57 | |

| Areia – Dia 7 na solução | | | | | Expansão Dia 7 |
|---------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,19 | 277,48 | 276,95 | 279,25 | 0,03% |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 276,92 | 277,02 | 277,99 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,20 | 276,99 | 278,62 | |

| Areia – Dia 9 na solução | | | | | Expansão Dia 9 |
|---------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 277,04 | 276,87 | 277,98 | 0,02% |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 277,42 | 277,10 | 278,98 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,23 | 276,99 | 278,48 | |

| Areia – Dia 10 na solução | | | | | Expansão Dia 10 |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,20 | 277,43 | 276,69 | 279,42 | 0,03% |
| Leitura 2 (mm) | 294,80 | 276,99 | 277,16 | 278,01 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,21 | 276,93 | 278,72 | |

| Areia – Dia 16 na solução | | | | | Expansão Dia 16 |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,15 | 277,01 | 277,16 | 278,05 | 0,05% |
| Leitura 2 (mm) | 294,85 | 277,50 | 277,07 | 279,17 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,25 | 277,12 | 278,61 | |

| Areia – Dia 17 na solução | | | | | Expansão Dia 17 |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,15 | 277,87 | 278,16 | 278,88 | 0,19% |
| Leitura 2 (mm) | 294,86 | 277,39 | 278,33 | 277,68 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,63 | 278,25 | 278,28 | |

| Areia – Dia 19 na solução | | | | | Expansão Dia 19 |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 277,16 | 277,04 | 278,49 | 0,10% |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 277,60 | 277,34 | 279,12 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,38 | 277,19 | 278,81 | |

| Areia – Dia 28 na solução | | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 277,63 | 277,05 | 279,27 |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 277,03 | 276,73 | 278,73 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,33 | 276,89 | 279,00 |

| Expansão Dia 28 |
|------------------------|
|------------------------|

| |
|-------|
| 0,08% |
|-------|

RESUMO DAS EXPANSÕES – AREIA

| Dia | Expansão |
|-----|----------|
| 1 | 0,08% |
| 2 | 0,10% |
| 3 | 0,08% |
| 4 | 0,09% |
| 5 | 0,01% |
| 7 | 0,03% |
| 9 | 0,02% |
| 10 | 0,03% |
| 16 | 0,05% |
| 17 | 0,19% |
| 19 | 0,10% |
| 28 | 0,08% |

ANEXO D – Expansões diárias das barras moldadas com Brita #0

| Brita – Leitura inicial orientativa | | | | | Comprimento Inicial (mm) |
|-------------------------------------|--------------|---------|---------|---------|--------------------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,37 | 277,82 | 278,54 | 278,80 | 278,32 |
| Leitura 2 (mm) | 294,63 | 278,79 | 277,63 | 278,32 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,31 | 278,09 | 278,56 | |

| Brita – Dia 1 na solução | | | | | Expansão Dia 1 |
|--------------------------|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 278,12 | 276,72 | 279,14 | 0,02% |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 277,89 | 278,15 | 278,47 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,01 | 277,44 | 278,81 | |

| Brita – Dia 2 na solução | | | | | Expansão Dia 2 |
|--------------------------|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 277,84 | 276,92 | 279,23 | 0,09% |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 278,42 | 278,19 | 279,00 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,13 | 277,56 | 279,12 | |

| Brita – Dia 3 na solução | | | | | Expansão Dia 3 |
|--------------------------|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,28 | 278,19 | 276,66 | 278,93 | 0,02% |
| Leitura 2 (mm) | 294,73 | 277,73 | 277,85 | 279,02 | |
| Média (mm) | 295,00 | 277,96 | 277,26 | 278,98 | |

| Brita – Dia 4 na solução | | | | | Expansão Dia 4 |
|--------------------------|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,26 | 277,82 | 277,95 | 279,09 | 0,09% |
| Leitura 2 (mm) | 294,75 | 278,42 | 277,23 | 279,06 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,12 | 277,59 | 279,08 | |

| Brita – Dia 6 na solução | | | | | Expansão Dia 6 |
|--------------------------|--------------|---------|---------|---------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 | |
| Leitura 1 (mm) | 295,21 | 278,46 | 276,85 | 279,11 | 0,05% |
| Leitura 2 (mm) | 294,80 | 277,61 | 277,90 | 279,06 | |
| Média (mm) | 295,00 | 278,04 | 277,38 | 279,09 | |

| Brita – Dia 8 na solução | | | | |
|---------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,19 | 277,87 | 276,88 | 279,39 |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 277,89 | 277,82 | 279,20 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,88 | 277,35 | 279,30 |

Expansão Dia 8

0,06%

| Brita – Dia 9 na solução | | | | |
|---------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 278,49 | 278,27 | 279,10 |
| Leitura 2 (mm) | 294,82 | 278,20 | 276,73 | 279,32 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,35 | 277,50 | 279,21 |

Expansão Dia 9

0,12%

| Brita – Dia 15 na solução | | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,14 | 277,77 | 276,83 | 279,05 |
| Leitura 2 (mm) | 294,86 | 278,61 | 278,06 | 279,03 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,19 | 277,45 | 279,04 |

Expansão Dia 15

0,07%

| Brita – Dia 16 na solução | | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,15 | 278,66 | 278,11 | 279,28 |
| Leitura 2 (mm) | 294,85 | 277,78 | 277,01 | 279,31 |
| Média (mm) | 295,00 | 278,22 | 277,56 | 279,30 |

Expansão Dia 16

0,12%

| Brita – Dia 18 na solução | | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,18 | 278,19 | 276,93 | 279,28 |
| Leitura 2 (mm) | 294,83 | 277,66 | 278,09 | 279,14 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,93 | 277,51 | 279,21 |

Expansão Dia 18

0,07%

| Brita – Dia 28 na solução | | | | |
|----------------------------------|---------------------|----------------|----------------|----------------|
| | Barra Padrão | Barra 1 | Barra 2 | Barra 3 |
| Leitura 1 (mm) | 295,23 | 277,77 | 276,73 | 279,45 |
| Leitura 2 (mm) | 294,77 | 277,99 | 277,97 | 279,14 |
| Média (mm) | 295,00 | 277,88 | 277,35 | 279,30 |

Expansão Dia 28

0,06%

RESUMO DAS EXPANSÕES – BRITA #0

| Dia | Expansão |
|-----|----------|
| 1 | 0,02% |
| 2 | 0,09% |
| 3 | 0,02% |
| 4 | 0,09% |
| 6 | 0,05% |
| 8 | 0,06% |
| 9 | 0,12% |
| 15 | 0,07% |
| 16 | 0,12% |
| 18 | 0,07% |
| 28 | 0,06% |