UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

THIAGO GALVÃO CORREIA LIMA

FORMAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADO NO NORDESTE: ANÁLISE MICROESTRUTURAL VERSUS MÉTODOS CONVENCIONAIS

Orientador: Prof. Drº. Sandro Marden Torres

JOÃO PESSOA
2017

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

THIAGO GALVÃO CORREIA LIMA

FORMAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADO NO NORDESTE: ANÁLISE MICROESTRUTURAL VERSUS MÉTODOS CONVENCIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Civil da Universidade Federal da Paraíba – UFPB, em cumprimento à exigência para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Drº. Sandro Marden Torres.

JOÃO PESSOA

2017

L732f Lima, Thiago Galvão Correia

Formação da reação álcali-agregado em diferentes tipos de agregado no nordeste: análise microestrutural versus métodos convencionais / Thiago Galvão Correia Lima – João Pessoa, 2017.

62f. il.:

Orientador: Prof. Dr. Sandro Marden Torres

Monografia (Curso de Graduação em Engenharia Civil) Campus I - UFPB / Universidade Federal da Paraíba.

1. Reação Álcali-Agregado 2. Patologia 3. Agregado I. Título.

BS/CT/UFPB CDU: 2.ed. 620.1(043)

FOLHA DE APROVAÇÃO

THIAGO GALVÃO CORREIA LIMA

FORMAÇÃO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM DIFERENTES TIPOS DE AGREGADO NO NORDESTE: ANÁLISE MICROESTRUTURAL VERSUS MÉTODOS CONVENCIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado em 29/11/2017 perante a seguinte Comissão Julgadora:

Sandro Marden Torres Departamento de Engenharia de Materiais do CT/UFPB	APPROVADO
Marçal Rosas F Lima Filho Departamento de Engenharia de Energias Renováveis CEAR/UFPB	APPROVADO
William Vieira Fernandes Doutorando em Engenharia de Materiais do CT/UFPB	Aprovado
Tibério Wanderley Correia de Oliveira Andrade Departamento de Engenharia Civil da UFPE	APPROVED

Profa. Ana Cláudia Fernandes Medeiros Braga
Coordenadora do Curso de Graduação em Engenharia Civil

AGRADECIMENTOS

A Deus, acima de tudo, minha eterna gratidão.

A minha família: meus pais Esdras e Germana e aos meus dois irmãos, que sempre estão ao meu lado nas horas mais necessitadas e que me deram oportunidades, através da educação e orações.

Aos professores Sandro e Tibério pela colaboração e paciência em repassar seus conhecimentos para este trabalho.

Agradeço à Universidade Federal da Paraíba pela colaboração em todos estes anos e pelo incentivo ao meu aperfeiçoamento.

A todos os professores do nosso departamento que são fontes de inspiração e pelo apoio e atenção aos alunos.

A coordenadora do curso Ana Claudia por seu esforço e dedicação para o melhoramento do curso.

Aos meus amigos e colegas de curso pelas experiências compartilhadas e que sempre foram companheiros nas principais horas.

Aos técnicos e funcionários do laboratório de materiais, por toda ajuda na realização dos ensaios para este trabalho.

“Em todos os mundos há um caminho para o meu país – falou o Cordeiro. E, enquanto ele falava, sua brancura de neve transformou-se em ouro quente, modificando-se também sua forma. E ali estava o próprio Aslam, erguendo-se acima deles e irradiando luz de sua juba. ”

(C. S. Lewis – As Crônicas de Nárnia)

LIMA, Thiago G. C. **Formação da reação álcali-agregado em diferentes tipos de agregado no nordeste: análise microestrutural versus métodos convencionais**. Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2017.

RESUMO

A reação álcali-agregado está presente em um grande número de obras de construção civil e é uma das manifestações patológicas de maior grau de deterioração do concreto. Essa reação, mesmo que lenta, conduz a um quadro patológico irreversível e está normalmente associado com a integração de processos químicos de alguns compostos mineralógicos do agregado com hidróxidos alcalinos procedente do cimento, água e agentes externos. Os relatos mais usuais de ocorrência dessa reação são em estruturas hidráulicas, tais como as barragens, em função do permanente contato com a água. Entretanto, nos últimos anos, inúmeros outros tipos de estruturas têm sido afetados, inclusive fundações de edifícios, deixando o problema em evidência. A cidade de Recife foi a primeira do país onde foram encontrados e divulgados, sistematicamente, desde 2005, inúmeros casos de fissuração em blocos de fundação de edifícios residenciais e comerciais e em obras de infraestrutura, como pontes, viadutos e em dormentes de sistemas de trens urbanos. Devido a isso, esse trabalho buscou verificar a correlação entre o ensaio dos prismas de concreto e o ensaio de expansão acelerada de barras de argamassa dos agregados do Nordeste, já que até o presente momento, nenhum estudo foi realizado utilizando o método de ensaio dos prismas de concreto na região nordeste. Além disso, foi desenvolvido uma comparação entre os métodos convencionais e novos métodos que surgem no meio acadêmico como, por exemplo, difratometria de raios X, microscopia eletrônica de varredura e fluorescência de raios X. Com os resultados obtidos, foi observado uma correlação entre os ensaios não convencionais com os ensaios de expansão, tanto no método acelerado das barras de argamassa, quanto pelo método dos prismas de concreto.

Palavras-chave: Reação Álcali-Agregado, patologia, agregado

LIMA, Thiago G. C. **Formation of the alkali-aggregate reaction in different types of aggregate in the northeast of Brazil: microstructural analysis versus conventional methods.** Trabalho de conclusão de curso (Graduação) – Universidade Federal da Paraíba. João Pessoa. 2017.

ABSTRACT

The alkali-aggregate reaction is present in a large number of constructions and is one of the pathological manifestations of a greater degree of deterioration of the concrete. This reaction, even if slow, leads to an irreversible pathological condition and is usually associated with the integration of chemical processes of some aggregate mineralogical compounds with alkali hydroxides from cement, water and external agents. The most common reports of this reaction occur in hydraulic structures, such as dams, due to the permanent contact with water. However, in recent years, numerous of other types of structures have been affected, including building foundations, leaving the problem in evidence. The city of Recife was the first in the country where, since 2005, there have been numerous cases of cracking in residential and commercial building blocks and constructions such as bridges, viaducts and urban train system sleepers. Due to this, this study sought to verify the correlation between the concrete prisms test (CPT) and the accelerated mortar bars test (AMBT) of the Northeast of Brasil aggregates, since until the present moment, no study was carried out using the concrete prisms test in the northeast region. In addition, a comparison was created between conventional methods and new methods that emerge in the academic environment, such as X-ray diffractometry, Scanning Electron Microscopy (SEM) and X-ray fluorescence (XRF). With the results obtained, a correlation was observed between the unconventional tests with the expansion tests in the accelerated mortar bars test and the concrete prisms test.

Keywords: Alkali-aggregate reaction, pathology, aggregate

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Fraturas características por esforços mecânicos 127

Figura 2: Micrografia de uma esferulite de etringita 128

Figura 3: Ataque de sulfatos por água do mar 129

Figura 4: Exemplificação do processo da corrosão do aço devido ao ataque de cloretos 22

Figura 5: Bloco de fundação fissurado por efeito de RAA 22

Figura 6: Ponte Paulo Guerra em janeiro de 2001 24

Figura 7: 1º Caso de fissuração referente a RAA em recife 25

Figura 8: Bloco de fundação de um edifício residencial em Boa Viagem 25

Figura 9: Gel formado circundando oagregado graúdo 28

Figura 10: Efeito da umidade reletiva na expansão do concreto devido a RAA 29

Figura 11: Agregado graúdo moído e peneirado 32

Figura 12: Agregado graúdo 32

Figura 13: Difratômetro de raios X 33

Figura 14: Microscópio eletrônico de varredura 34

Figura 15: Espectrômetro de fluorescência de raios X 35

Figura 16: Expansão acelerada de barra de argamassa 37

Figura 17: Três prismas reservados para cada amostra 38

Figura 18: Expansões até 28 dias dos quinze agregados graúdos 41

Figura 19: Gráfico da reatividade do agregado miúdo pelo método AMBT 42

Figura 20: Gráfico da reatividade dos agregados pelo método de prisma de concreto 44

Figura 21: Variação relativa das amostras potencialmente reativas pelo método CPT 45

Figura 22: Variação relativa das amostras potencialmente inócuas pelo método CPT 45

Figura 23: Resultados do CPT versus AMBT 47

Figura 24: Microscopia das amostras a)65, b) 57, c) 56, d) 66, e) 63, f) 68, g) 64, h) 60, i) 59, j) 58, k) 61, l) 69, m) 55, n) 62 50

Figura 25: Resultados do DRX para cada amostra.....52

Figura 26: Resultados do DRX para cada amostra in natura.....53

Figura 27: Resultados do DRX para cada amostra queimada a 500 ^{o}C 54

Figura 28: Resultados do DRX para cada amostra queimada a 1000 ^{o}C 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Caracterização química 31

Tabela 2: Pedreiras, cidades e estados do Nordeste que fizeram parte do projeto 31

Tabela 3: Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina 40

Tabela 4: Variação dimensional das barras através do ensaio de expansão de prismas de concreto 43

Tabela 5: Resultados do FRX das amostras 55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

DNIT	Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas.
ASTM	American Society For Testing And Materiais.
RAA	Reação Álcali-Agregado
RAS	Reação Álcali-Sílica
FRX	Fluorescência de Raios-X
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
CPT	Método de prismas de concreto
AMBT	Método acelerado de barras de argamassa

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 12

1.1. Justificativa 13

1.2. Objetivos 14

1.3. Estrutura do TCC 15

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 15

2.1. Mecanismos fissuratórios em concreto 135

2.1.1. Retração por secagem 146

2.1.2. Esforços mecânicos 157

2.1.3. Esforços Expansivos 138

2.1.3.1 Etringita 148

2.1.3.2 Ataque por sulfato 159

2.1.3.3 Carbonatação 20

2.1.3.4 Ataque por cloretos 214

2.1.3.5 Reação Álcali Agregado 22

2.2. Histórico da Reação Álcali Agregado 23

2.3. Definição da Reação 25

2.3.1 Reações Álcali-Carbonato 26

2.3.3. Reações Álcali-Sílica 27

3. MATERIAIS E MÉTODOS 31

3.1. Materiais 31

3.1.1. Cimento 31

3.1.2. Agregados 32

3.2. Métodos 33

3.2.1. Difratometria de Raios X 333

3.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura 333

3.2.3. Fluorescência de Raios X 335

3.2.4. Expansão acelerada das barras de argamassa 336

3.2.5. Expansão de prismas de concreto 337

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL 40
4.1. Ensaios de caracterização 41
4.1.1. Ensaio de expansão acelerada pelas barras de argamassa 41
4.1.1.1. Preparo das amostras 41
4.1.1.2. Leitura do ensaio 42
4.1.2. Ensaio de expansão de prismas de concreto 43
4.1.2.1. Preparo das amostras 43
4.1.2.2. Leitura do ensaio 44
4.2. Métodos Avançados 449
4.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura 449
4.2.2. Difratometria de Raios X 44
4.2.3. Fluorescência de Raios X 44
5. CONSIDERAÇÕES FINAIS 59
5.1. Sugestões para trabalhos futuros 59
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 61

1. INTRODUÇÃO

O estudo da patologia nas estruturas de concreto surge no ramo da Engenharia Civil como uma necessidade de reparação dos vários defeitos existentes, mesmo com o advento da implantação dos Sistemas de Gestão de Qualidade – ISSO 9001 nas construtoras, isso ocorre devido a má execução das obras, falhas em projeto, imperfeição dos materiais, ou ainda, os três casos coexistentes.

O crescimento sempre acelerado da construção civil, em alguns países e épocas, provocou a necessidade de inovações que trouxeram, em si, a aceitação implícita de maiores riscos. Junto a esses riscos, vieram as inevitáveis falhas involuntárias e casos de imperícia o que causaram desempenho insatisfatório em algumas estruturas de acordo com cada finalidade a que se propunham. Embora muita coisa ainda precise ser estudada, por se tratar de um campo muito vasto e interdisciplinar, os conhecimentos relacionados à patologia das estruturas têm avançado ao longo do tempo devido as lições emanadas do dia-a-dia das construções e, principalmente, pela justificação científica alcançada por pesquisas realizadas. (SOUZA E RIPPER, 1998).

Uma análise da origem dessas patologias é de suma importância nos processos construtivos independente se sua origem é oriunda de projeto, do seu processo construtivo ou da forma como ela é utilizada. Não menos importante é o conhecimento dos mecanismos e suas formas da deterioração do concreto, para assim, promover uma restauração ou reforço estrutural de acordo com a necessidade patológica.

Diversos mecanismos fissuratórios, seja por fenômenos mecânicos, eletroquímicos ou geoquímicos, são responsáveis por desempenho insatisfatório em diversas estruturas. Porém, dentre esses vários processos que podem provocar a fissuração excessiva, sobressaem-se a retração por secagem, ataque por sulfatos e a corrosão do aço por ataque de cloretos.

Dentre dessas diversas falhas que podem provocar um desempenho insatisfatório devido a fissuração excessiva, surge a reação álcali-agregado (RAA), que vem ganhando destaque no Brasil principalmente pelas atribuições dadas para edificações na cidade de Recife.

Ao olharmos rapidamente para o fenômeno reação álcali-agregado (RAA), sem aprofundamento, ele pode apresentar-se similarmente com outros processos de deterioração do concreto, porém a RAA é um fenômeno complexo e há várias interações e parâmetros interdependentes que induzem a sua ocorrência. Além disso, os efeitos do fenômeno podem

ser muito profundos e causar severos danos a estrutura de concreto afetando sua resistência, segurança e estabilidade.

1.1. Justificativa

Souza e Ripper (1998) nos esclarece que entre a década de 60 e 70, a engenharia de estruturas viu-se confrontada com a necessidade técnica, econômica e social de começar a pesquisar outros critérios, e não apenas o da capacidade resistente, para garantir o sucesso das construções, pois até essa época a maioria dos edifícios possuía grande rigidez com paredes robustas e bastante resistentes. Como consequência, eles praticamente não apresentavam deformações significativas.

Já atualmente os problemas de desempenho e de durabilidade são muito mais complexos. Vivemos no século das grandes edificações, onde a todo momento surge um novo arranha-céu que supera os limites de altura, antes, inimaginável pela humanidade. A notícia do site Dezzen[11] nos informa que o número de edifícios acima de 600 metros de altura irá mais que duplicar em poucos anos. A humanidade tem lutado dia após dia por novos desafios na história da arquitetura humana, sempre lutando por novas façanhas e pontos de referências para o mundo. O neologismo criado descreve bem esse momento pelo qual a engenharia de estruturas atravessa que é a Manhattanização[2], sinônimo de verticalização proveniente de Manhattan, distrito de Nova Iorque, onde existe uma grande quantidade de arranha-céus, como o Empire State Building, o edifício Chrysler, entre outros. Tudo isso se deve ao avanço das tecnologias construtivas e dos materiais que levaram ao aumento da resistência dos concretos.

A partir disso, as construções começaram, então, a apresentar muito precocemente diversos tipos de patologia nas suas estruturas. As mais graves estão relacionadas à degradação dos próprios materiais constituintes, em outras palavras, do concreto e/ou do aço. Portanto, torna-se essencial a criação de projetos e a construção de obras duráveis, já que a degradação dos seus materiais prematuramente gera uma série de impactos ambientais e socioeconômicos para a população.

O cimento Portland é um dos produtos industriais mais utilizados no mundo, porém o seu processo de fabricação demanda de um alto consumo de energia e que, por isso, apresenta

---

[1] Frearson A., 2016 heralds beginning of the "megatall" skyscraper era, Disponível em: < https://www.dezeen. com /2016/01/22/2016-megatall-skyscraper-era-council-tall-buildings-urban-habitat-ctbuh/>. Acesso em: Outubro 2017.

2 Manhattanização, Disponível em: < https://pt.wikipedia.org/wiki/Manhattaniza%C3%A7%C3%A3o/>. Acesso em: Outubro 2017.

elevados níveis de emissão de gases poluentes, consequentemente deve-se sempre pensar em minimizar o seu consumo com a finalidade de reduzir o impacto ambiental.

Portanto, visando em reduzir os danos ambientais e econômicos, o caso de patologia estrutural a ser estudado mais profundamente através deste trabalho pode ajudar ao meio técnico na compreensão e de como se evitar essa patologia, cuja correção é de alto custo, além de estender a durabilidade das estruturas de concreto minimizando processos de recuperação das construções.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo Geral

Devido ao grande número de obras de construção civil afetadas pela reação álcali agregado, esta pesquisa tem como objetivo desenvolver uma comparação entre os métodos convencionais normatizados de detecção de RAA e novos métodos que surgem no meio acadêmico.

Assim, de forma a alcançar o objetivo geral da pesquisa foram estabelecidos os seguintes objetivos específicos:

1.2.2. Objetivos Específicos

a) Obter uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaios não convencionais, como a composição química, tipos de fases, grau de cristalinidade e defeitos, como microfissuras, com os ensaios de expansão, tanto no método acelerado das barras de argamassa, quanto pelo método dos prismas de concreto, sendo todos esses 2 ensaios contemplados na normalização brasileira;
b) Até o presente momento, em nenhum estudo foi realizado ensaios em agregados da região nordeste, utilizando o método de ensaio dos prismas de concreto. Portanto, como um dos objetivos específicos seria verificar a correlação entre os ensaios;
c) Além disso será feita uma revisão bibliográfica sobre o histórico da reação no Brasil e no mundo, os tipos de reações existentes, a química e as condições para a ocorrência, as medidas preventivas, como: métodos para a detecção que podem ser tomadas para se evitar a instauração do processo de deterioração por RAA.

1.3. Estrutura do TCC

O presente estudo foi subdividido em 5 capítulos.

No capítulo 1, no qual estamos inseridos, foi feita uma breve apresentação acerca da problemática do tema, assim como também a justificativa e a explicação dos objetivos gerais e específicos.

No capítulo 2, foi apresentada a revisão da literatura a respeito dos principais temas relacionados ao tema.

Em sequência, no capítulo 3, apresentou-se a metodologia aplicada e os materiais usados.

No capítulo 4, foram apresentados e discutidos os resultados obtidos.

No capítulo 5, foi feita a conclusão do trabalho sintetizando a análise dos resultados bem como as considerações finais baseadas nos objetivos propostos.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Mecanismos fissuratórios no concreto

Há um vasto número de causas de deterioração registradas e catalogadas em estruturas e edifícios de concreto armado na atualidade. Mesmo quando elas são adequadamente construídas e adequadamente utilizadas e bem mantidas, ainda assim, as construções estão sujeitas a patologias e seus componentes sujeitos a desgastes.

A maior causa única de deterioração do concreto armado é a corrosão do aço da armadura. Porém, os estudos recentes revelam que as patologias identificadas em campo apresentam mecanismos fissuratórios combinados e não uma única causa. A corrosão do aço, por exemplo, pode vir combinada com ataques de sulfatos que causaram fissuras no concreto e deixaram as barras de aço sujeitas às agressões do meio ambiente que podem corroê-las e, em casos mais severos, comprometer a estabilidade da construção.

Os principais mecanismos fissuratórios observados no Brasil são:

i. Retração por secagem
ii. Esforços mecânicos
iii. Etringita
iv. Ataque por sulfato
v. Carbonatação
vi. Corrosão do aço por ataque de cloretos

vii. Reações Álcali Agregado

A seguir será descrito um pouco de cada um desses principais mecanismos fissuratórios.

2.1.1. Retração por secagem

A retração causada pela secagem já é conhecida por sua capacidade de produzir rachaduras em espécimes de concreto, bem como em estruturas. Segundo Zdenek P. (1982), as fissuras aliviam as tensões devido a tensões diferenciais e, assim, alteram as deformações observadas. Além disso, a presença de rachaduras pode aumentar a taxa de secagem.

A retração por secagem é a variação de volume observada no concreto quando este é submetido à variação de umidade, mantida a temperatura constante, sem nenhuma espécie de carregamento. (DNIT, 2004)

Este encolhimento provoca um aumento no estresse de tração, o que pode levar a rachaduras e deflexão externa, antes do concreto ser submetido a qualquer tipo de carga. Todo concreto de cimento Portland está susceptível ao encolhimento de secagem à medida que o concreto envelhece. A retração por secagem pode ocorrer em lajes, vigas, colunas, tanques e fundações, por exemplo.

O encolhimento de secagem depende de vários fatores. Esses fatores incluem as propriedades dos componentes, proporções dos componentes, modo de mistura, quantidade de água durante a cura, a umidade do ambiente e tamanho do membro de concreto. A retração por secagem ocorre principalmente devido à redução da água capilar por evaporação e devido a redução da água na pasta do cimento. O potencial de encolhimento de um concreto em particular é influenciado pela quantidade da mistura dos componentes do concreto, o tempo decorrido após a adição de água, flutuação de temperatura, modo de despejo do concreto e cura. Quanto maior a quantidade de água no concreto fresco, maior será a retração.

Os componentes do concreto também são muito importantes para evitar a retração. Cada tipo de agregado e cimento tem características distintivas e cada uma delas pode contribuir de uma forma específica para essa retração. Outro fator é a quantidade de água e a mistura utilizada que também possuem efeitos diretos e indiretos sobre a retração de secagem do concreto. O encolhimento de concreto ocorre principalmente devido à evaporação da água capilar de mistura e a gravidade depende das propriedades físicas do concreto, incluindo o tamanho e a localização da estrutura e a temperatura ambiente.

A umidade relativa, a temperatura e a circulação do ar são fatores externos que influenciam na retração. O concreto submetido a uma atmosfera seca, na maioria dos casos, terá um encolhimento de secagem maior do que se submetido a uma certa umidade no concreto. Além disso, temperaturas mais baixas geralmente produzem uma diminuição na retração por secagem por causa de maior umidade e evaporação mais lenta.

2.1.2. Esforços mecânicos

O design de um componente requer frequentemente que o engenheiro minimize a possibilidade de falha. No entanto, o nível de desempenho dos componentes em serviço depende de vários fatores, como por exemplo, as propriedades inerentes dos materiais, os sistemas de cargas, o ambiente e a manutenção.

O planejamento estrutural de um componente geralmente prevê uma possiblidade de falha e por isso busca-se minimizar essa possibilidade. Portanto, é sempre importante compreender os diferentes tipos de falha para evitar a falha estrutural. Segundo descreve Maleque (2013), os principais fatores que causam a falha devido aos esforços mecânicos no sistema são os erros de montagem, uso indevido, manutenção inadequada, condições de operação imprevistas entre outros. Abaixo na figura 1 encontram-se alguns exemplos de padrões de fraturas causadas por esforços mecânicos.

Figura 1: Fraturas características por esforços mecânicos

Fonte: Maleque (2013)

Os principais tipos de falha mecânica incluem:

- Falha por fratura devido à sobrecarga estática, sendo a fratura frágil ou dúctil;
- Flambagem em colunas devido à sobrecarga compressiva;
- Carregamento estático que, em seguida, leve a desalinhamento ou sobrecarga em outros componentes;
- Falha devido a cargas de impacto ou choque térmico;
- Falha por fratura de fadiga;
- Falha devido aos efeitos combinados de estresse e corrosão;
- Falha devido ao desgaste excessivo.

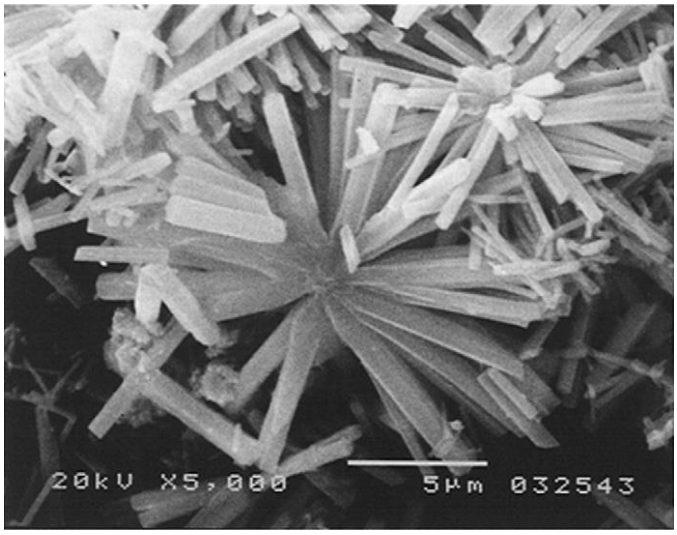
2.1.3. Esforços expansivos

2.1.3.1. Etringita

Etringita é um mineral de natureza rara, mas um produto comum que ocorre durante a hidratação de cimentos Portland. Além disso, Baquerizo (2015) cita que é também o principal produto de hidratação de aglutinantes especiais, tais como cimentos de sulfato de cálcio e cimentos de aluminato de cálcio misturados com sulfatos de cálcio. A formação de etringita nas primeiras idades está associada ao uso de sulfatos adicionados para evitar o rápido endurecimento do concreto, mas a sua formação em idades posteriores, devido ao ataque externo de sulfato ou à formação retardada de etringita, pode causar degradação de estruturas de concreto.

Morfologicamente, a etringita cristaliza habitualmente em forma de um cristal acicular de aspecto grande. O crescimento desses cristais acíclicos pode exercer tensões dilatantes substanciais sobre o objeto, o que resulta em microfissuras, inchaço e, eventualmente, na falha. Um exemplo de uma forma habitual a qual a estrutura se desenvolve está exemplificada na figura 2 abaixo.

Figura 2: Micrografia de uma esferulite de etringita



Fonte: Komatsu (2008)

A estrutura da etringita foi amplamente estudada no passado. Baquerizo (2015) nos informa que Moore e Taylor relataram pela primeira vez sua estrutura de cristal e, que desde então, outras técnicas, como a difração de nêutrons, foram usadas para determinar com precisão a localização dos átomos dentro da estrutura, especialmente os átomos de hidrogênio.

A expansão é resultada da ação simultânea da pressão de cristalização gerada pelo crescimento cristalino da etringita e da pressão de inchaço causada pela absorção seletiva de íons combinada com uma grande quantidade de moléculas de água em cristais de etringita minúsculos (Deng, 1993).

2.1.3.2. Ataque por sulfato

O ataque de sulfatos pode vir através de dois meios: externo e interno. Caso venha através do meio externo, os sulfatos de sódio, cálcio, potássio e alumínio são encontrados em águas subterrâneas e solos e podem causar degradação da matriz de concreto por ataque expansivo do hidróxido de cálcio e aluminatos de cálcio no concreto. Já através do meio interno, o ataque ocorre devido a uma fonte solúvel sendo incorporada no concreto no momento da mistura, como, por exemplo, a gipsita no agregado.

O ataque externo de sulfatos é o tipo mais comum e tipicamente ocorre onde a água contendo sulfato dissolvido penetra no concreto. Collepardi (2001) nos informa que o ataque ocorre pela interação química de um solo ou água rico em sulfato com a pasta de cimento. Os solos contendo sódio, potássio, magnésio e sulfato de cálcio são as principais fontes de íons sulfato nas águas subterrâneas. A patologia é normalmente evidenciada por: rachaduras extensas, expansão, perda de ligação entre a pasta de cimento e o agregado e formação de gesso. A patologia está evidenciada na figura 3 a seguir.

Figura 3: Ataque de sulfatos por água do mar

Fonte: Techne (2010)

Collepardi (2001) indica três condições para que o ataque externo de sulfatos venha a ocorrer, são elas:

i. Alta permeabilidade do concreto;
ii. Ambiente rico em sulfato;
iii. Presença de água.

Os cimentos mais vulneráveis ao ataque são os cimentos do tipo 1. Os cimentos Portland resistentes a sulfatos, os cimentos pozolânicos (> 30%) e os cimentos com escória de alto forno (> 65%), oferecem maior resistência, porém não tornam o concreto imune ao ataque de sulfatos em todas as situações. Um desses casos é devido ao que citou Macdonald (2003): cimentos de baixo teor de C3A tem a desvantagem de baixa resistência à entrada de cloreto, portanto, nos casos em que os sulfatos são de exposição marinha, o cimento Portland resistente a sulfatos (ASTM Tipo II) pode acelerar a corrosão induzida por cloreto.

2.1.3.3. Carbonatação

Uma das muitas propriedades fascinantes do concreto é a sua relação com o aço incorporado nele. Macdonald (2003) revela que historicamente, foram feitas tentativas para reforçar o concreto com metais, como o bronze. As falhas resultantes foram devidas à diferença nos coeficientes de expansão térmica entre o bronze e o concreto.

O aço possui um coeficiente de expansão térmica similar ao concreto o que evita danos. No entanto, o aço corrói em uma atmosfera úmida oxigenada. Porém no concreto armado, mesmo que o concreto possua uma porosidade característica e ainda possua um nível

de umidade natural quando exposto à atmosfera ao ar livre, o aço não corrói, uma vez que possui um cobrimento mínimo de concreto. Existem dois mecanismos principais para a corrosão do aço no concreto que não exigem a degradação do concreto antes do ataque do aço. O primeiro deles é a carbonatação e o segundo é o ataque de cloreto.

No primeiro mecanismo, Macdonald (2003) nos informa que a corrosão por carbonatação é evitada pelo teor de álcalis no concreto. Durante o processo de hidratação, formam-se hidróxidos de cálcio e potássio, que se dissolvem na água dos poros do concreto para formar uma solução muito alcalina de pH 12-13,5. A este nível, o aço forma um óxido de proteção muito fino e conhecido como camada passiva, responsável pela notável resistência a corrosão do aço. Esse processo é um processo natural autossustentável e é muito melhor do que os revestimentos sintéticos ou metálicos que se deterioram ou são consumidos. A camada passiva irá sustentar e manter-se indefinidamente, desde que a amostra permaneça sem contaminação e o pH permaneça acima de 11, mantendo assim, uma certa alcalinidade.

A carbonatação é eventualmente inevitável, e é causada pela entrada de dióxido de carbono atmosférico que reage com a água dos poros para formar ácido carbônico. Isso neutraliza a alcalinidade no concreto. Isso ocorre progressivamente, e uma frente de carbonatação se move através do concreto até chegar ao aço. A camada passiva, em seguida, desmorona à medida que o pH cai de mais de 12 para cerca de 8. A corrosão pode começar na presença de oxigênio e água à medida que o pH cai abaixo de 11.

Um concreto típico de cimento Portland pode mostrar uma profundidade de carbonatação de 5-8 mm após 10 anos, aumentando para 10-15 mm após 50 anos (Macdonald 2003). Portanto, as estruturas com baixo cobrimento de concreto sobre o aço mostrarão corrosão induzida por carbonatação mais rapidamente do que aquelas com boa cobertura.

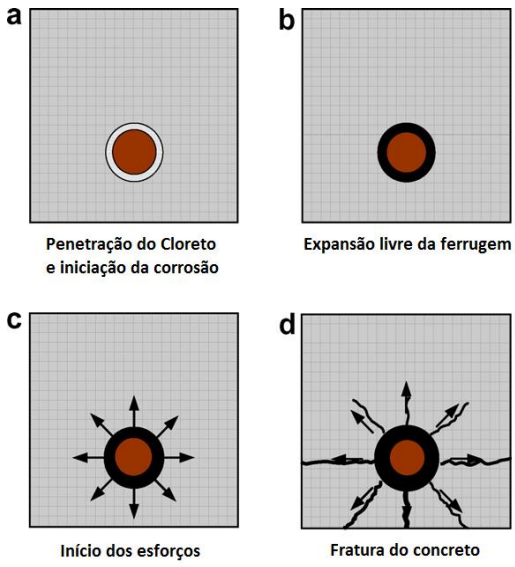
2.1.3.4. Ataque por cloretos

No segundo mecanismo, Macdonald (2003) nos ensina que o ataque de cloreto geralmente ocorre devido a uma das seguintes causas: entrada de sal marinho em ambientes marinhos ou sal originados a partir de agregados contaminados. Um nível de cloreto mínimo é necessário para que a corrosão ocorra.

Independentemente da causa da corrosão, uma vez que a proteção da camada passiva do aço é perdida, a corrosão irá prosseguir através do processo eletroquímico cátodo-ânodo. A corrosão do aço no concreto é uma reação eletroquímica em que o principal constituinte do aço (ferro) entra em solução como íons de ferro com fluxo de elétrons (fluxo elétrico). Ele é

chamado de ânodo. Os elétrons são produzidos neste processo e circulam através do reforço em direção a locais catódicos onde eles reagem com oxigênio e água externo para produzir íons hidroxilas adicionais. Isso é conhecido como a reação catódica. Essa reação causa um aumento de volume que vai quebrar e espalhar o concreto. A corrosão e o seu padrão de fissura estão ilustrados na figura 4 abaixo para um melhor entendimento.

Figura 4: Exemplificação do processo da corrosão do aço devido ao ataque de cloreto



Fonte: Chen (2008)

2.1.3.5. Reações Álcali Agregado

A RAA é uma ocorrência não generalizada entre as edificações e não é muito usual de ser identificada, porém, quando temos esse evento, ele é altamente destrutivo e devastador como pode ser visto na figura 5. O fator disso é que o evento ocorre lentamente durante o ciclo de vida da estrutura e normalmente somente depois de algumas décadas sem apresentar nenhum problema, e quando falamos de edifícios são em torno de 50 anos, é que a patologia é evidenciada. Além disso, atualmente não existe absolutamente nenhum teste que possa assegurar cem por cento que a estrutura nunca irá ser afetada pela RAA.

Figura 5: Bloco de Fundação fissurado por efeito de RAA

Fonte: Pecchio et al. (2006)

O que torna esses acontecimentos mais incomuns e complexos do que outros eventos é o fato de que a RAA é muito mais difícil de ser identificado, reconhecido e monitorado. As condições ideais para a sua formação ocorrem em locais não facilmente acessíveis, como, por exemplo, em bloco de fundações, os quais estão enterrados em edifícios já habitados. Provavelmente, não existe nenhum país que não tenha vivenciado a RAA de alguma forma ou outra, além disso provavelmente não existe nenhum agregado que seja totalmente não reativo, embora alguns assim o permaneça por um longo tempo.

2.2. Histórico da Reação Álcali Agregado

De acordo com Swamy (1990), durante os séculos 1920 e 1930 um grande número de estruturas de concreto na Califórnia, EUA, foram observadas com o desenvolvimento de severas rachaduras com pouco anos depois de construídas e mesmo aplicando padrões aceitáveis de construção e controle de qualidade na obra em si.

Dez anos depois, Stanton demonstrou cientificamente a existência da Reação Álcali-Agregado como um intrínseco processo deletério entre os constituintes do concreto. Com isso ficou claro que a exposição a certas condições de umidade e características do cimento e do agregado usado geravam a patologia. Os experimentos subsequentes de Stanton revelaram que as rachaduras através das expansões do concreto eram causadas por combinações de uma alta concentração de álcalis no cimento e os agregados de opalina.

Após as publicações de Stanton em 1940, uma série de pesquisas foram desenvolvidas e publicadas sobre o assunto em revistas internacionais e, inclusive, no Brasil, o que contribuiu para o desenvolvimento em 1974 do primeiro de uma série de encontros internacionais de cientistas interessados sobre a Reação Álcali-Agregado.

Já no Brasil, os primeiros relatos de RAA foram datados na década de 1960 e 1970. Os casos ocorridos foram em três barragens no estado de Minas Gerais, entre os estados da Bahia e Alagoas e ainda no estado de São Paulo. Segundo Andrade (2006) a cidade de Recife foi a primeira do país onde foram encontrados, sistematicamente, nos últimos anos, inúmeros casos de fissuração em blocos de fundação. Em todos os casos, onde foram realizadas análises laboratoriais e investigações de campo, foi diagnosticada a presença da reação álcali-agregado.

O primeiro caso diagnosticado e divulgado no meio acadêmico foi em janeiro de 2001 nos blocos de fundação da Ponte Paulo Guerra, responsável pela interligação entre os bairros do centro e da zona norte de Recife ao bairro de Boa Viagem, onde foi diagnosticado a RAA em elevada intensidade. O detalhe é que a ponte tinha 29 anos de serviço quando foi diagnosticado mostrando assim como a identificação e o reconhecimento da patologia são difíceis, além disso demonstra o quão perigoso são os efeitos dessa anomalia, pois essa é uma ponte de alto fluxo rodoviário.

Figura 6: Ponte Paulo Guerra em janeiro de 2001

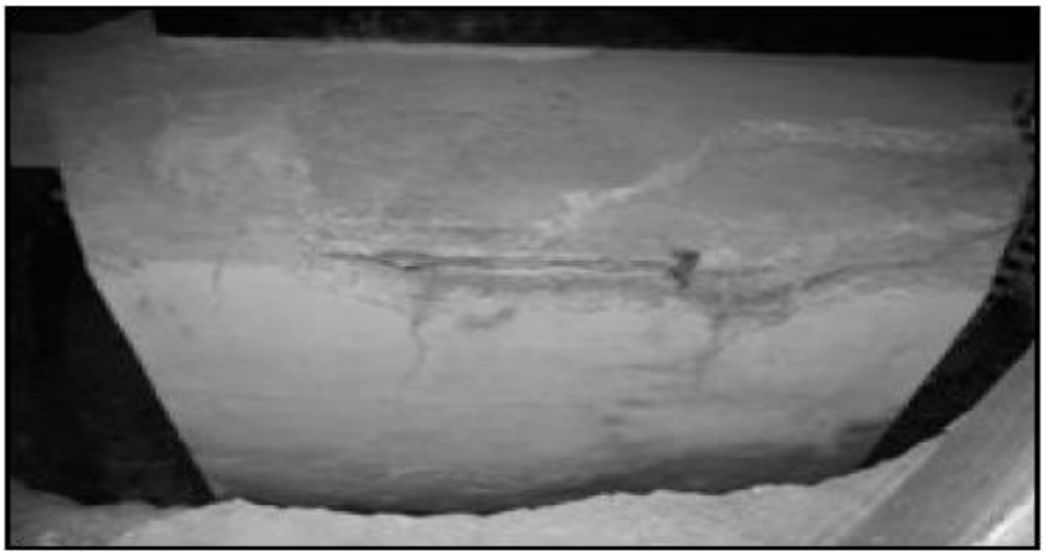
Fonte: Andrade (2006)

Porém na época o caso foi considerado como pontual e, por isso, o meio técnico local não deu a devida importância e não foi difundido. Não sendo assim um caso de alerta para averiguações da mesma patologia em outros blocos de fundações. No final do ano de 2004 o edifício Areia Branca, residencial de 12 pavimentos no bairro de Piedade em Recife desaba por motivo estrutural e com nada relacionado a RAA, porém o local onde o prédio estava

situado possuía grandes edifícios ao seu redor. Os moradores por precaução e pela dúvida se a queda do Areia Branca tinha afetado a fundação dos edifícios ao redor do mesmo, solicitaram uma inspeção sistemática e detalhada dos blocos de fundação. Ao averiguarem os blocos encontraram um quadro fissuratório nas fundações em estado bem avançado referente a RAA. Com o descobrimento desta manifestação patológica em muitas fundações ao redor do Areia Branca, o problema foi disseminado na sociedade e muitos condomínios começaram a solicitar inspeções nos seus blocos de fundações.

Há uma estimativa de 22 casos de fissuração em blocos de fundação de janeiro de 2005 até a presente data e em todos esses casos em que foram realizados o ensaio petrográfico foi confirmado a existência da Reação Álcali-Agregado. Abaixo na figura 7 está ilustrado o primeiro caso de fissuração de bloco de fundação referente a RAA na cidade do Recife, PE.

Figura 7: 1º Caso de fissuração referente a RAA em recife



Fonte: Andrade (2006)

Já na figura 8 está representado um bloco de fundação de um edifício de alto padrão que possuía apenas 9 anos de serviço.

Figura 8: Bloco de Fundação de um edifício residencial em Boa Viagem

Fonte: Andrade (2006)

2.3. Definição da Reação

A pressão formada a partir da expansão interna desenvolvida pelo resultado da reatividade entre os compostos do concreto é a responsável pela expansão, deterioração e até pela falha estrutural dos elementos do concreto, pois a Reação Álcali-Agregado é suficiente para produzir e propagar microfraturas pelo elemento estrutural.

Estudos de pesquisa detalhados mostraram que existe um bom número de diferentes materiais que produzem interações químicas no concreto que podem ser descritas como Reações Álcali-Agregado. Eles estão divididos basicamente entre três tipos distintos que são:

a) Reações Álcali-Carbonato
b) Reações Álcali-Silicato
c) Reações Álcali-Sílica

Abaixo um pouco será descrito de cada uma dessas reações.

2.3.1. Reações Álcali- Carbonato

Esta é uma reação bem diferente da Reação Álcali-Sílica e foi primeiramente descrita por Swenson em 1957. Ele relatou casos dessa patologia em pavimentos de concreto em Kingston, Ontario, onde ele mostrou casos de expansão bem evidentes pertos das juntas de dilatação e que formavam rachaduras das placas com apenas 6 meses de executadas. Ele relatou essas trincas como trincas em áreas hexagonais entorno de 50 a 100 mm que entravam

profundamente no concreto. Após esse relato vários outros casos dessa reação em específico foram relatadas por todo o mundo.

Muitas dessas reações aparentam não ser muito expansivas e destrutivas, portanto não são importantes de serem descritas no corpo desse trabalho, porém uma dessas reações em específico produz uma significante expansão e é bem deletéria. É a reação que ocorre devido à expansão das rochas carbonáticas, calcários dolomíticos argilosos, a partir do ataque dos álcalis do cimento ao calcário dolomítico. O ataque desses álcalis do cimento às rochas carbonáticas é chamado de desdolomitização.

Na reação álcali-carbonato diferentemente das demais não é formado gel expansivo; ocorre a expansão do mineral Brucita (Mg(OH)2). Além disso, também há a formação de carbonatos cálcicos e silicato magnesiano.

Muitas das construções históricas ao redor do Brasil utilizaram rochas calcarias dolomíticas argilosas como parte da sua construção. Portanto ao realizar uma reforma em algum edifício histórico que utilize dessa rocha, é significativamente importante a não utilização do cimento Portland bruto como aglomerante na mistura, e sim um cimente preparado, pois ao invés de estar solucionando os problemas da estrutura, irá estar formando Reações Álcali-Carbonato na estrutura.

2.3.2. Reações Álcali-Sílica

A *Reação Álcali-Sílica* (*RAS*) é o tipo de reação álcali-agregado mais conhecida e registrada no meio técnico, além disso, a que normalmente ocorre mais rapidamente, em função das formas minerais de sílica reativas envolvidas.

A diferença entre essa reação e as duas anteriormente citadas é que essa última tem como resultado entre a reação dos fluidos alcalinos no concreto e os componentes silicosos dos agregados, um gel hidrofílico produzido. A NBR 15577-1 (ABNT, 2008) nos diz sobre essa reação: é o tipo de reação álcali-agregado em que participam a sílica reativa dos agregados e os álcalis, na presença do hidróxido de cálcio originado pela hidratação do cimento, formando um gel expansivo.

Todo cimento possui óxidos de sódio e de potássio em sua composição e ao entrar em contato com a água, estes dois óxidos produzem formação de bases muito fortes como os hidróxidos de sódio e de potássio. Existe ainda os íons de cálcio, porém eles são menos frequentes. Quando esses hidróxidos entram em contato com as sílicas amorfas dos agregados

no concreto (são formadas através do esfriamento rápido do magma, não dando tempo assim para a sua total cristalização) o concreto apresenta um potencial de reação química com as bases formando assim um gel e à medida que o concreto absorve água, o gel cresce de volume gerando pressões internas suficientes para causarem ruptura no concreto.

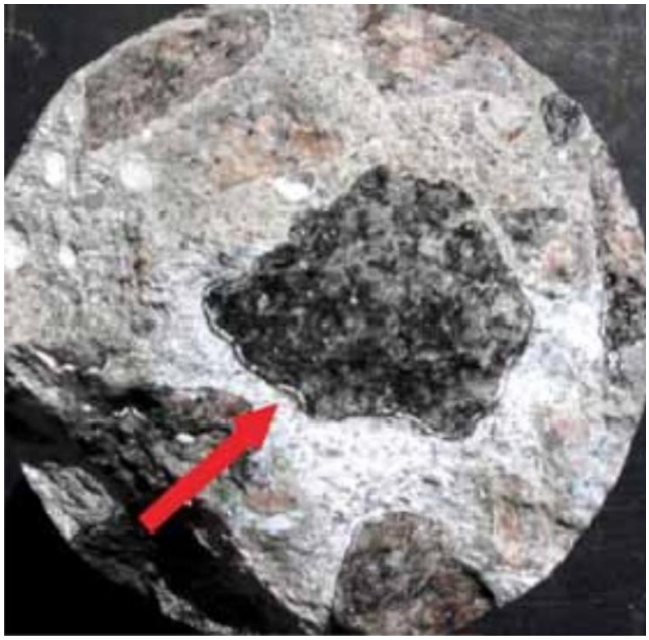
Segundo descreve Swamy (1990), o mecanismo da reação acontece em duas etapas. Na primeira etapa da reação ocorre a hidrólise do grupo silanol (S_i OH) da sílica através do ataque dos álcalis NaOH, KOH e/ou CaOH. O que gera um gel álcali-sílica como resultante e depois uma absorção de água pelo gel o que causa como consequência um aumento de volume. A primeira etapa pode ser definida como sendo do tipo ácido-base e seu resultado é a neutralização dos grupos silanol e a liberação de água. Essa primeira etapa pode ser exemplificada pela equação abaixo.

$$H_{0.38}\,S_i\,O_{2.19} + 0.38\,N_aOH = N_{a0.38}\,S_i\,O_{2.19} + 0.38\,H_2O \qquad \text{(equação 1)}$$

Já na segunda etapa, há um ataque às ligações do grupo silanol e uma desintegração da sílica pelos íons hidroxilas (OH^-), rompendo-as e proporcionando a formação de um grupo silanol na estrutura interna o que ajuda em absorção de água e íons alcalinos.

As fraturas se manifestam através de uma rede fina de fissuras juntas a outras grandes, em forma de mapa, tornando-se assim, um aspecto característico de concretos deteriorados pela ação da reação álcali-agregado. Já o gel que é gerado pela reação, preenche os poros do concreto e apresenta um aspecto viscoso e de cor esbranquiçada. Na figura 9 abaixo pode-se observar o gel formado.

Figura 9: Gel formado circundando o agregado graúdo

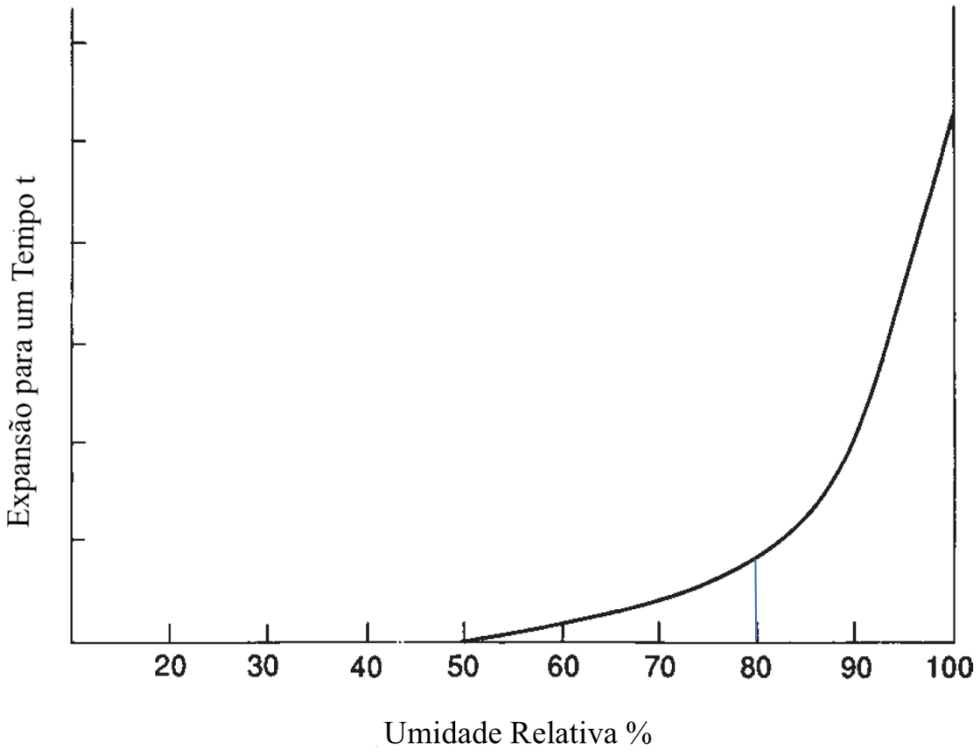


Fonte: Techne (2007)

É importante salientar a necessidade da presença de água nos poros do concreto para desencadear a RAS. A água tem dupla participação na Reação Álcali-Sílica, primeiramente, ela é essencial para o transporte dos cátions álcalis e dos íons hidroxilas. Além disso, a água é absorvida pelo gel hidroscópico que incha, desenvolvendo pressões internas suficientes para a quebra do concreto. Esta água é oriunda, principalmente de fontes externas, como o meio ambiente.

Além disso, é válido ressaltar que estudos feitos por Figueirôa e Andrade (2007), levaram a conclusão de que é necessário que a umidade interna esteja acima de 80% para que a reação se processe em uma velocidade considerada significativa. Da mesma forma Swamy (1990), indica que experimentos e investigações de estudos de caso foram capazes de demonstrar os efeitos da reação de acordo com a variação do percentual relativo da umidade do concreto.

Figura 10: Efeito da umidade relativa na expansão do concreto devido a RAA



Fonte: Swamy (1990)

O gráfico da figura 10 mostra bem os efeitos da umidade na expansão do concreto. Acima de 80% a expansão causada pela reação cresce significativamente.

Outro fator que influencia diretamente na aceleração da patologia é a elevação da temperatura, uma vez que aumenta a reatividade química.

A fim de controlar e normatizar métodos de descoberta dessa patologia, o Comitê de Especialistas do Ibracon para Reações Expansivas em Estruturas de Concreto no 2º semestre de 2005 definiu 5 métodos principais para detecção de RAA, são eles:

I. Análise petrográfica: ASTM C-295 e NBR 7389;
II. Método químico: ASTM C-289 e NBR 9774;
III. Método da barra de argamassa: ASTM C-277 e NBR-15577;
IV. Método acelerado das barras de Principais métodos de detecção de RAA argamassa: ASTM C-1260, NBR-15577 com limites de expansão estabelecidos para as idades de16 e 28 dias;
V. Método das barras de concreto: ASTM1293, CSA A23.2, NBR 15577 com limites de expansão de prismas de concreto para a idade de um ano.

Além disso temos uma subdivisão desse grupo conhecido como Reações Álcali-Silicato. Swamy (1990) expõe que essas reações aparentam ocorrer em concretos ricos em

álcalis que contenham argilitos, arenito argiloso folhelhos ou feldspato no agregado. O processo dessa reação é normalmente lento e não é completamente claro para os pesquisadores.

Os minerais silicatos presentes nesses tipos de agregados expandem e causam ruptura no concreto. A expansão das partículas rochosas sugere a absorção de água em uma superfície de aluminosilicato que estava anteriormente seca nas porções microcristalinas dessas rochas. Com isso, supõe uma relação direta entre a quantidade de material microcristalino, porosidade e a expansão do concreto que contém esses agregados.

Essa reação tem concentração maior em barragens e em blocos de fundações. É a reação mais comum no Brasil, devido à grande quantidade de obras com a utilização de quartzito, e Gnaisse.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Materiais

3.1.1. Cimento

O cimento empregado nesta pesquisa foi produzido a partir de um cimento Portland de alta resistência inicial – CP V-ARI que atende integralmente aos requisitos da ABNT NBR 5733, além de possuir finura de (4900 ± 200) cm2/g determinada de acordo com a ABNT NBR NM 76, equivalente alcalino total expresso em Na_2Oeq (0,658 $\%K_2O$ + $\%Na_2O$) de (0,90 ± 0,10) %, determinado de acordo com a ABNT NBR NM 17 e expansão em autoclave inferior a 0,20%, determinada pelo método prescrito pela ASTM C 151.

Em estudos objetivando a análise da reatividade potencial de rochas, é o mais comumente empregado, pois possui uma quantidade menor de adições que outros cimentos comerciais. Estas adições, se presentes, podem inibir o caráter reativo do agregado, invalidando a classificação da rocha como reativa ou inócua.

O equivalente alcalino do cimento utilizado foi de 0,91 %. A análise química do cimento empregado nesta pesquisa, realizada em junho de 2014, encontra-se apresentada na Tabela 1.

Tabela 1. Caracterização Química

Ensaios	Método de ensaio	Resultados % em massa	Limites da NBR 05733/91
Perda ao fogo - PF	NBR NM 18/12	**4,32**	≤ 4,5%
Dióxido de silício total - SiO2	NBR NM 11-2/12	**18,67**	-
Óxido de alumínio - Al2O3	NBR NM 11-2/12	**4,79**	-
Óxido de ferro - Fe2O3	NBR NM 11-2/12	**2,76**	-
Óxido de cálcio total - CaO	NBR NM 11-2/12	**62,61**	-
Óxido de magnésio - MgO	NBR NM 11-2/12	**1,22**	≤ 6,5%
Anidrido sulfúrico - SO3	NBR NM 16/12	**3,19**	≤ 4,5%
Anidrido carbônico - CO2	NBR NM 20/12	**2,62**	≤ 3,0%
Resíduo insolúvel - RI	NBR NM 15/12	**0,6**	≤ 1,0%
Óxido de cálcio livre - CaO	NBR NM 13/12	**1,84**	-

.

3.1.2. Agregados

Foram coletadas amostras de agregados graúdos de 15 pedreiras comerciais, distribuídos em 3 estados da Região Nordeste, sendo Pernambuco, Alagoas e Sergipe. As 15 pedreiras foram mapeadas e contatadas, sendo mostradas na tabela 2.

Tabela 2. Pedreiras, cidades e estados do Nordeste que farão parte do projeto

Nº	Estado	Cidade
1	Pernambuco	Recife
2		
3		
4		
5		
6		
7	Alagoas	Maceió
8		
9		
10		
11		Arapiraca
12	Sergipe	Aracajú
13		
14		
15		

A escolha dos 3 estados se deveu, em parte, ao custo de coleta, que seria maior a medida que se afastasse do local dos ensaios. Também seria interessante que os 15 agregados apresentassem níveis de reatividade bastante distintos, o que permitiria uma melhor correlação entre os ensaios não convencionais propostos e os ensaios definidos pela normalização brasileira.

Abaixo na figura 11 e na figura 12 encontra-se a rocha na forma de brita de 19mm e na forma de pó após passar por um processo de moagem e britagem e peneiramento.

Figura 11. Agregado graúdo moído e peneirado (esq.) e agregado graúdo (dir.)

Para cada agregado foram coletadas, aproximadamente, 80kg de amostra, com diâmetro de 19mm ou 25mm e 2 a 3 pequenos matacões com peso de 3 a 4 kg. Os matacões foram usados como amostras de brita para os demais ensaios.

Parte dessa brita foi triturada através de moinhos para a produção de pó com finura menor que #200. A razão é que era necessário pó com uma finura característica para ser utilizado na Difração de Raios X e na Fluorescência de Raios X.

3.2. Métodos

Para o conhecimento da microestrutura é preciso utilizar-se de alguns tipos de análises, então para a análise comparativa proposta nesse estudo, foram realizados os seguintes ensaios:

i. Difração de Raios X;
ii. Microscopia Eletrônica de Varredura;
iii. Fluorescência de Raios X;
iv. Expansão acelerada das barras de argamassa (NBR 15577-parte 4);
v. Expansão de prismas de concreto (NBR 15577- parte 6).

Esses ensaios incluem os estabelecidos pela NBR 15577 (ABNT, 2008) parte 3, 4, e 6, que são os ensaios para caracterização do potencial de reatividade definidos pela normalização brasileira e os ensaios não convencionais, quais sejam, microscopia eletrônica, difração de Raios X e ensaio de florescência de Raios X, para determinação da composição química dos agregados.

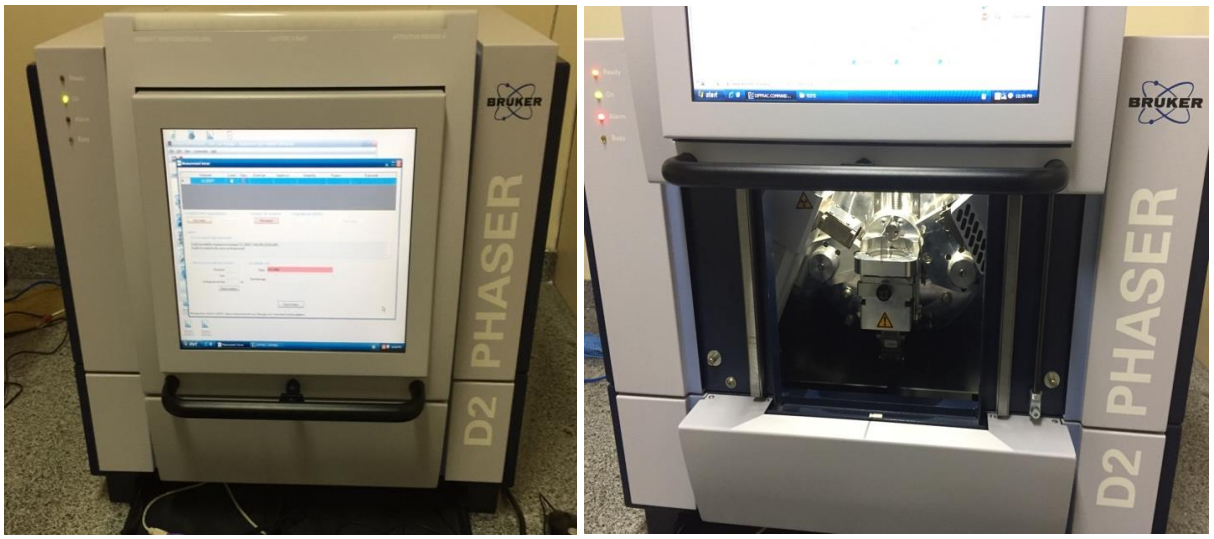
3.2.1. Difratometria de Raios X

Através da técnica de difração de raios X, o estudo da estrutura dos materiais pode ser estudado a nível atômico. Essa é uma importante ferramenta na mineralogia para identificação, quantificação e caracterização dos minerais nos seus complexos planos cristalinos (Stanjek & Häusler, 2004).

Essa técnica de difração de raios X é recomendada quando a identificação e a quantificação das fases cristalinas de um material são importantes para o trabalho, pois os átomos da maioria dos sólidos apresentam-se ordenados em planos cristalinos e estão separados entre si por distâncias da mesma ordem de grandeza dos comprimentos de onda dos raios X.

Através da incidência de um feixe de raios X, esse ensaio cria o fenômeno da difração em um cristal que interage com os átomos presentes nele, proporcionando assim, a identificação das fases e o grau de cristalinidade do material, através da comparação de um perfil desconhecido com o conjunto de difração padrão, coletado e mantido pelo *Joint Committee on Powder Diffraction Standards* – JCPDS.

Figura 13: Difratômetro de raios X



3.2.2. Microscopia Eletrônica de Varredura

A técnica de microscopia eletrônica de varredura é importante para o entendimento da repetição e eficiência dos diferentes processos em uma pesquisa. Através desse microscópio é possível analisar mais detalhadamente as características micro estruturais de um sólido.

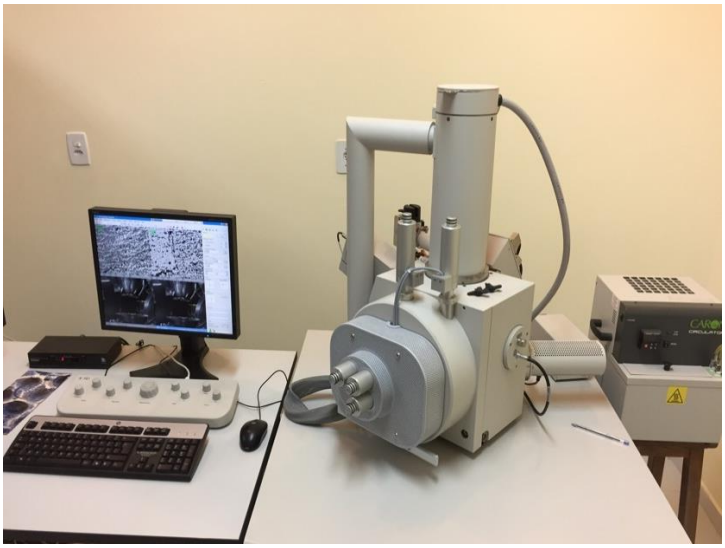
O método consiste em observar o campo das partículas depositadas em uma subestrutura condutora com emissão de fótons cuja incidência no detector fornece os detalhes morfológicos necessários. Um algoritmo de computador é usado para reconhecer partículas individuais durante a varredura. São feitas medições do diâmetro, do fator de forma e da química do objeto a ser estudado. O algoritmo quantifica a porcentagem de partículas contadas em cada escala de tamanho e reúne em função de densidade de probabilidade.

O microscópio utilizado possui um filamento de tungstênio e um detector EDS. O instrumento funciona como um microscópio eletrônico de varredura com um sistema de operação baseado em processamento de imagens. O sistema usa o contraste entre os dados retrodifusados das partículas de interesse e a subestrutura para encontrar e medir as partículas.

Além de contar o número de partículas e medir sua forma e tamanho, este instrumento também é capaz de caracterizar a composição química das partículas através da EDS. O instrumento é automatizado para encontrar e contar o número de partículas que estão dispersas. O sistema pode usar pré ou pós processamento para examinar partículas com uma determinada química, forma ou tamanho. Isso é muito útil para materiais complexos e misturas de materiais que podem mostrar a complexidade química das diferentes partículas e sua faixa de tamanho.

Esse equipamento é um dos mais utilizados nas análises de caracterização de materiais devido à sua capacidade normal de ampliação alta.

Figura 14: Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV)



3.2.3. Fluorescência de Raios X

A Fluorescência de Raios-X (XRF) é a emissão de raios-X "secundários" (ou fluorescentes) característicos de um material que foi excitado por bombardeamento com raios-X ou raios gama de alta energia. O fenômeno é amplamente utilizado para análise elementar e análise química, particularmente na investigação de metais, vidro, cerâmica e materiais de construção e para pesquisa em geoquímica, ciência forense, arqueologia e objetos de arte, pois essa é uma técnica precisa e não destrutiva.

O termo fluorescência é aplicado a fenômenos em que a absorção de radiação de uma energia específica resulta na re-emissão de radiação de uma energia diferente (geralmente menor).

Quando os materiais são expostos a raios X de curto comprimento de onda ou a raios gama, ocorre a ionização de seus átomos. A ionização consiste na ejeção de um ou mais elétrons do átomo e pode ocorrer se o átomo estiver exposto a radiação com uma energia maior do que sua energia de ionização.

Raios-X e raios gama podem ser energéticos o suficiente para expulsar elétrons firmemente presos dos orbitais internos do átomo. A remoção de um elétron desta maneira torna a estrutura eletrônica do átomo instável, e os elétrons em orbitais superiores "caem" no orbital inferior para preencher o buraco deixado para trás. Ao cair, a energia é liberada na forma de um fóton, cuja energia é igual à diferença de energia dos dois orbitais envolvidos.

Figura 15: Espectrômetro de fluorescência de raios X (FRX)

3.2.4. Expansão acelerada das barras de argamassa

O método acelerado foi inicialmente concebido por Oberholter e Davies (1986) e é um dos métodos mais disseminados no meio acadêmico em todo o mundo. Ele também é conhecido como NBRI ou Método Sul-Africano e consiste no molde de barras de argamassa com uma consistência fixa e o agregado em faixas granulométricas e porcentagens pré-definidas.

Após a confecção das barras, elas são estocadas em imersão em uma solução de NaOH 1N, a 80^{o} C, e são tomadas medidas de expansão em idades definidas. O objetivo principal do teste é simular as piores condições necessárias para que a reação ocorra que é o conjunto da alta temperatura, umidade e teor de álcalis, fatores esses que já foram explicados e detalhados na explicação da reação neste trabalho.

Mais tarde este teste foi normatizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), órgão americano de normalização. A ASTM desenvolve e publica normas técnicas para uma ampla gama de materiais, produtos, sistemas e serviços. Ela foi normatizada como ASTM C-1260, com pequenas variações, sendo a principal, a pré-definição da relação água/cimento fixa de 0,47. Esse teste foi, posteriormente, preconizado por várias normas, dentre elas encontram-se a NBR 15577-4 (2008), brasileira; e a CSA A23.2-25A (1994), canadense.

A razão desse método ser chamado de expansão acelerada é devido ao fato do tempo de ensaio ser bastante reduzido em comparação com o tempo de outros métodos

(VALDUGA, 2007). A leitura de referência para a NBR 15577-4 (2008) é aos 16 dias de idade (14 dias de imersão na solução de NaOH), contados a partir da data da confecção das barras. Esse método não é recomendado para as reações do tipo álcali-carbonato.

Os resultados do método, apesar de não traduzirem com precisão a realidade, podem garantir a segurança de prevenção da RAA. Porém, Sanchez, (2008) afirma que o método, embora de fácil execução e prático, tem apresentado incoerências no campo. Alguns agregados, indicados como reativos no ensaio, têm se apresentado inócuos no campo (falso-positivos), bem como, agregados indicados como inócuos no ensaio, demonstraram ser reativos no campo (falso-negativos).

Por causa desses fatores, a efetividade desse método de ensaio ainda não foi plenamente comprovado e ainda necessita uma maior quantidade de estudos a respeito para ajudar a tornar o teste mais pleno e eficaz em seus resultados. Na figura 16 abaixo está o teste de expansão utilizado com uma referência para calibração.

Figura 16: Expansão acelerada de barra de argamassa

3.2.5. Expansão de prismas de concreto

Esse método permite a avaliação da potencialidade reativa dos agregados graúdos ou miúdos na participação ou não da reação deletéria, através da variação do comprimento dos prismas de concreto.

Isso é possível através de uma combinação entre um agregado graúdo reativo e um miúdo não reativo, ou vice-versa, o que permite a investigação de apenas um dos compostos na reação de acordo com o objetivo da pesquisa dependendo apenas da disposição dos mesmos. Isto é uma grande vantagem porque não necessita britar o agregado graúdo (alterando a características mecânica e física do mesmo) para a realização do teste.

Para o teste são confeccionados três prismas de concreto (figura 17) com dimensões de (75x75x285) mm com uma dimensão máxima de 19 mm do agregado graúdo. Após a confecção, esses prismas são submetidos a uma cura em um tanque de cura por 24 horas, para só assim sua desforma ser realizada.

Após isso, os prismas são acondicionados em recipientes com atmosfera saturada de vapor d'água a uma temperatura de (38±2) ^{o}C e com um fluxo de ar no entorno do recipiente durante todo o procedimento.

As expansões dos prismas são medidas em períodos de 7, 28, 56 dias e, posteriormente, em períodos mensais dos 3 aos 12 meses. O agregado será considerado reativo se a expansão do mesmo for igual ou maior que 0,04% em um período de 1 ano, de acordo com as normas Brasileiras NBR 15577-6 (ABNT, 2008), normas canadenses A.23.2-27A (CSA, 2000) e pela norma americana C-1293 (ASTM, 2005).

A vantagem desse teste é que ele elimina as possíveis influência da redução de tamanho do agregado, além de eliminar as dúvidas deixadas pelos métodos acelerados sobre a reatividade do agregado. O grande problema desse teste é que ele é um teste demasiadamente longo, sendo necessário um ano inteiro para a sua finalização completa.

Figura 17: Três prismas reservados para cada amostra

4. PROGRAMA EXPERIMENTAL

A partir dos ensaios apresentados no item anterior e com o intuito de formar uma metodologia de ensaios para analisar os agregados utilizados em concretos de cimento Portland, com ênfase em avaliar o potencial de reatividade álcali agregado, fizeram-se os ensaios de caracterização física e mecânica dos componentes dos 15 agregados.

A parte do programa experimental foi dividida em duas partes. Na primeira parte está inclusa os testes que controlam e normatizam a patologia do RAA segundo o Comitê de Especialistas do Ibracon para Reações Expansivas em Estruturas de Concreto que no 2o semestre de 2005 definiu 5 métodos principais para detecção de RAA já citados no final do tópico 2.3.3. desse trabalho. Foi escolhido dois desses cinco métodos.

O primeiro ensaio escolhido a ser feito foi o ensaio de expansão acelerada pelas barras de argamassa (NBR 15577-parte 4) e o segundo foi o de expansão pelos prismas de concreto (NBR 15577-parte 6). A razão é que até o presente momento, em nenhum estudo foi realizado ensaios em agregados da região nordeste, utilizando o método de ensaio dos prismas de concreto. Esse ensaio é bem mais representativo para definir o potencial de reatividade dos agregados, em relação ao método acelerado das barras de argamassa, sendo adotada a sua interpretação em caso de discrepância entre os dois métodos.

Já na segunda parte do programa experimental será formado pelos ensaios estabelecidos para caracterização do potencial de reatividade definidos como métodos

avançados de caracterização, quais sejam, microscopia eletrônica, difração de Raios X e ensaio de fluorescência de Raios X, para determinação da composição química dos agregados.

4.1. Ensaios de caracterização

Valduga (2007) nos explica que os métodos que avaliam concretos e argamassas confeccionados com agregados reativos são bastante empregados, pois permitem avaliar o desempenho destes agregados dentro da matriz, simulando condições de exposição. O produto de reação também pode ser avaliado, e não só a reatividade potencial da rocha como nos métodos de avaliação dos agregados apenas.

4.1.1. Ensaio de expansão acelerada pelas barras de argamassa

O ensaio acelerado teve a NBR 15577- 2008 como base, e foi realizado no Laboratório da empresa TECOMAT em Recife, PE.

4.1.1.1. Preparo das amostras

As amostras foram coletadas em suas respectivas jazidas na forma de brita e apresentavam diâmetro máximo de partícula de 19 mm, foram então trituradas e homogeneizadas. Para a trituração, foi utilizado um moinho de rolo localizado na empresa TECOMAT em Recife PE.

O procedimento consistia em passar a amostra três vezes pelo moinho, até que as partículas ficassem menores que o solicitado pela NBR 15577 que recomenda valores menores que 4,8 mm. As amostras eram trituradas e peneiradas para separar as amostras menores que 4,8 mm, as que não passavam eram novamente trituradas e peneiradas. Depois de britadas as amostras foram peneiradas, para separação das frações granulométricas indicadas pela norma.

Após peneiradas as amostras foram então para o próximo procedimento que a NBR 15577 recomenda, que é lavar as amostras para retirada das partículas menores que 0,15 mm, e depois secar em estufa.

Em seguida, foram moldadas de acordo com a NBR 15577 três barras de argamassa resultante da combinação do cimento padrão – agregado em um traço de 1:2,5 e relação a/c=0,47, ambos em massa.

4.1.1.2. Leitura do ensaio

Por fim, foi feito, a média das variações dimensionais das barras de argamassas imersas em solução alcalina de hidróxido de sódio em concentração de 1,00±0,01N nas idades de 16 dias e 30 dias e no mínimo 3 leituras intermediárias em cada período.

Para uniformizar as leituras de expansão, todas as amostras foram lidas no sétimo, décimo sexto e vigésimo primeiro dia. Além destes dias, foram feitas as leituras em outros 7 dias.

Na tabela 3 abaixo encontra-se os valores medidos de todas as 15 amostras.

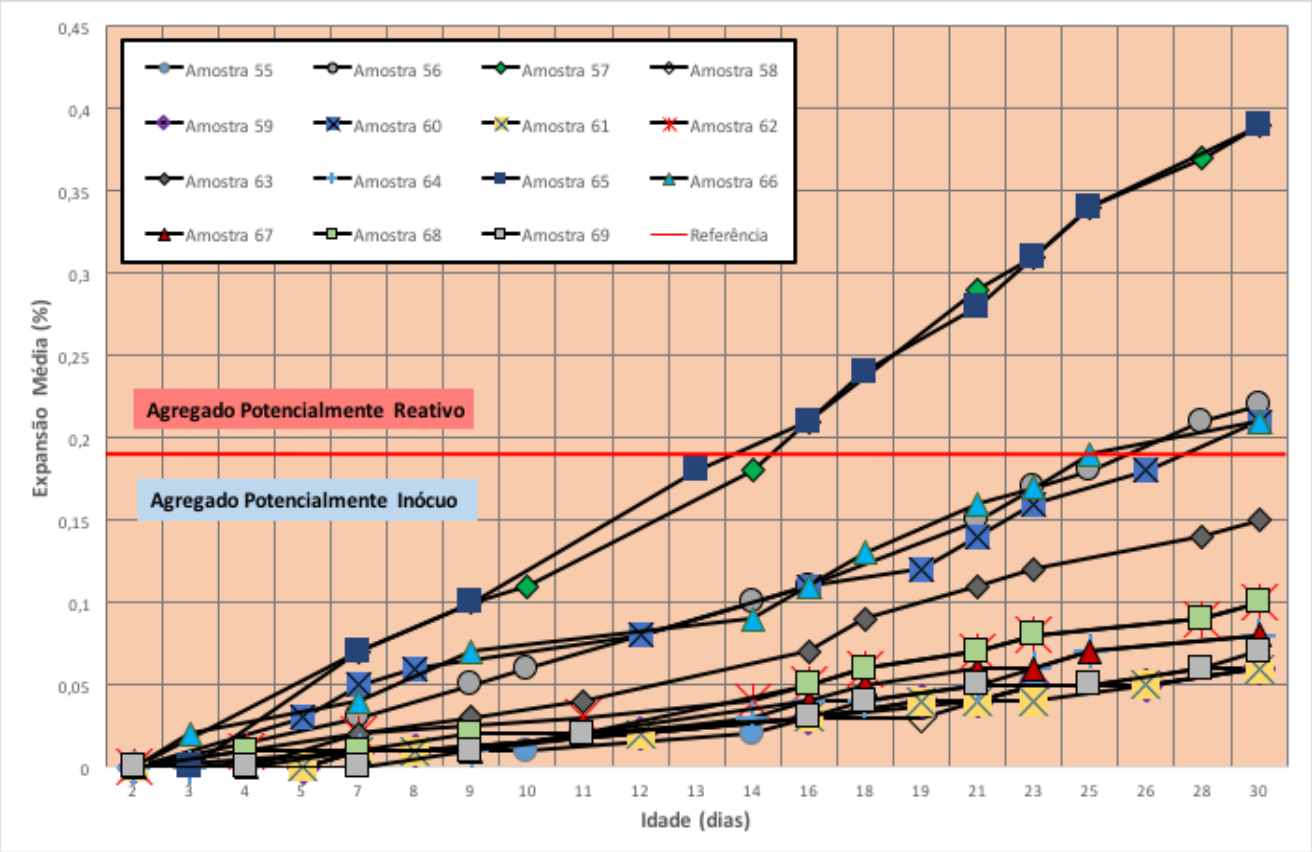
Tabela 3. Variação dimensional das barras de argamassa em solução alcalina

Idade (dias)	Idade (dias)	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	Referência
2	0	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,19
3	1										0,00	0,00	0,02				0,19
4	2								0,01	0,00				0,00	0,01	0,00	0,19
5	3				0,00	0,00	0,03	0,00									0,19
7	5	0,01	0,03	0,07	0,01	0,01	0,05	0,01	0,02	0,02	0,01	0,07	0,04	0,01	0,01	0,00	0,19
8	6				0,01	0,01	0,06	0,01									0,19
9	7	0,01	0,05	0,10						0,03	0,01	0,10	0,07	0,01	0,02	0,01	0,19
10	8	0,01	0,06	0,11													0,19
11	9								0,03	0,04				0,02	0,02	0,02	0,19
12	10				0,02	0,02	0,08	0,02									0,19
13	11											0,18					0,19
14	12	0,02	0,10	0,18					0,04		0,03		0,09				0,19
16	14	0,03	0,11	0,21	0,03	0,03	0,11	0,03	0,05	0,07	0,04	0,21	0,11	0,04	0,05	0,03	0,19
18	16								0,06	0,09	0,04	0,24	0,13	0,05	0,06	0,04	0,19
19	17				0,03	0,04	0,12	0,04									0,19
21	19	0,04	0,15	0,29	0,04	0,04	0,14	0,04	0,07	0,11	0,05	0,28	0,16	0,06	0,07	0,05	0,19
23	21	0,05	0,17	0,31	0,05	0,05	0,16	0,04	0,08	0,12	0,06	0,31	0,17	0,06	0,08		0,19
25	23	0,05	0,18	0,34							0,07	0,34	0,19	0,07		0,05	0,19
26	24				0,05	0,05	0,18	0,05									0,19
28	26	0,06	0,21	0,37					0,09	0,14					0,09	0,06	0,19
30	28	0,06	0,22	0,39	0,06	0,06	0,21	0,06	0,10	0,15	0,08	0,39	0,21	0,08	0,10	0,07	0,19

Para poder analisar mais detalhadamente as expansões nas idades de ensaio indicadas pela NBR 15577, são apresentados inicialmente tabelas individuais para cada rocha, nos quais são exibidas as leituras até 28 dias de idade.

Na sequência, tem-se um gráfico que delineia a expansão de todas as rochas até a última leitura (28 dias).

Figura 18: Expansões até 28 dias dos quinze agregados graúdos



4.1.2. Ensaio de expansão de prismas de concreto

O ensaio acelerado teve a NBR 15577- 6, 2008 como base, e foi realizado no Laboratório da empresa TECOMAT em Recife, PE.

4.1.2.1. Preparo das amostras

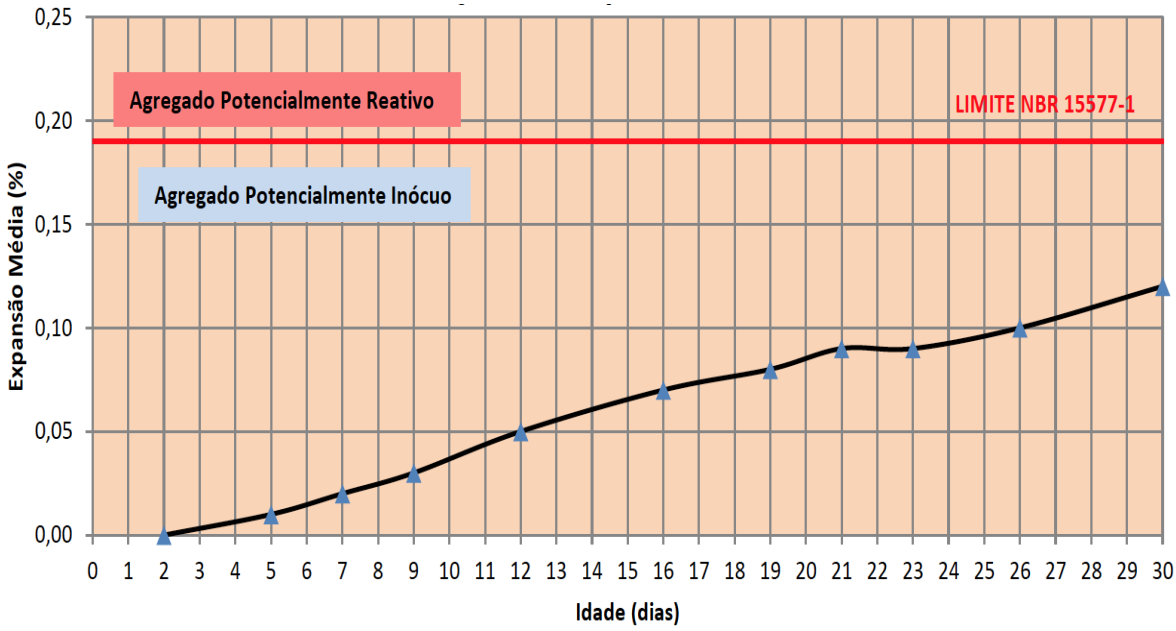
As mesmas amostras do ensaio de expansão acelerada também foram coletadas e utilizadas para esse teste de expansão de prisma de concreto. Além disso, da mesma forma foram trituradas e homogeneizadas.

O objetivo deste teste era analisar os agregados graúdos, para avaliar a reatividade de um agregado graúdo, era necessário utilizar um agregado miúdo potencialmente inócuo de acordo com a NBR 15577-1 e previamente ensaiado pelo método acelerado previsto na ABNT NBR 15577-4 na presença de um cimento padrão. Esse agregado miúdo deveria atender a os requisitos estabelecidos na ABNT NBR 7211 e apresentar módulo de finura de 2,7±0,2.

Devido a isso, foi feito o teste no agregado miúdo seguindo as considerações requisitadas da norma. O resultado foi que o agregado era potencialmente inócuo para uso em

concreto tendo em vista os critérios pré-estabelecidos, como pode ser visto na figura 19 a seguir.

Figura 19: gráfico da reatividade do agregado miúdo pelo método AMBT



Após isso foi feita a separação do agregado graúdo. Elas foram britadas e depois peneiradas, para separação das frações granulométricas indicadas pela norma NBR 15577- 6 que é uma proporção de 1/3 de material com 12,5 mm retido, 1/3 de material com 9,5 mm retido e 1/3 de material com 4,75 mm retido.

Em seguida, foram moldadas de acordo com a NBR 15577 três barras de argamassa resultante da combinação do cimento padrão com dimensões de (75x75x285) mm. Estes prismas foram acondicionados em recipientes com atmosfera saturada de vapor d'água a uma temperatura de 38° C por 360 dias.

4.1.2.2. Leitura do ensaio

Antes do começo do experimento foi lida uma barra padrão como referência para a calibração do instrumento antes da leitura de cada conjunto de prismas. Quando houve alteração na leitura da barra-padrão, os valores das leituras seguintes foram corrigidos pela medida da barra-padrão.

A primeira leitura do corpo de prova foi feita um dia após ao retirar do molde. Após isso os prismas foram medidos nas idades de 7, 28, 56 dias e 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 e 12 meses.

Os recipientes foram dispostos em um ambiente hermeticamente fechado e sempre com temperatura controlada de (38,0±2,0) °C, onde permaneceram durante todo o ensaio, sendo retirados apenas para a realização das leituras de comprimento dos prismas. O resultado pode ser visto na tabela e no gráfico a seguir. Observa-se que sete das amostras demonstraram uma potencialidade reativa e em destaque tem-se a amostra 57 e 65 que demonstraram uma grande reatividade.

Tabela 4. Variação dimensional das barras através do ensaio de expansão de prismas de concreto

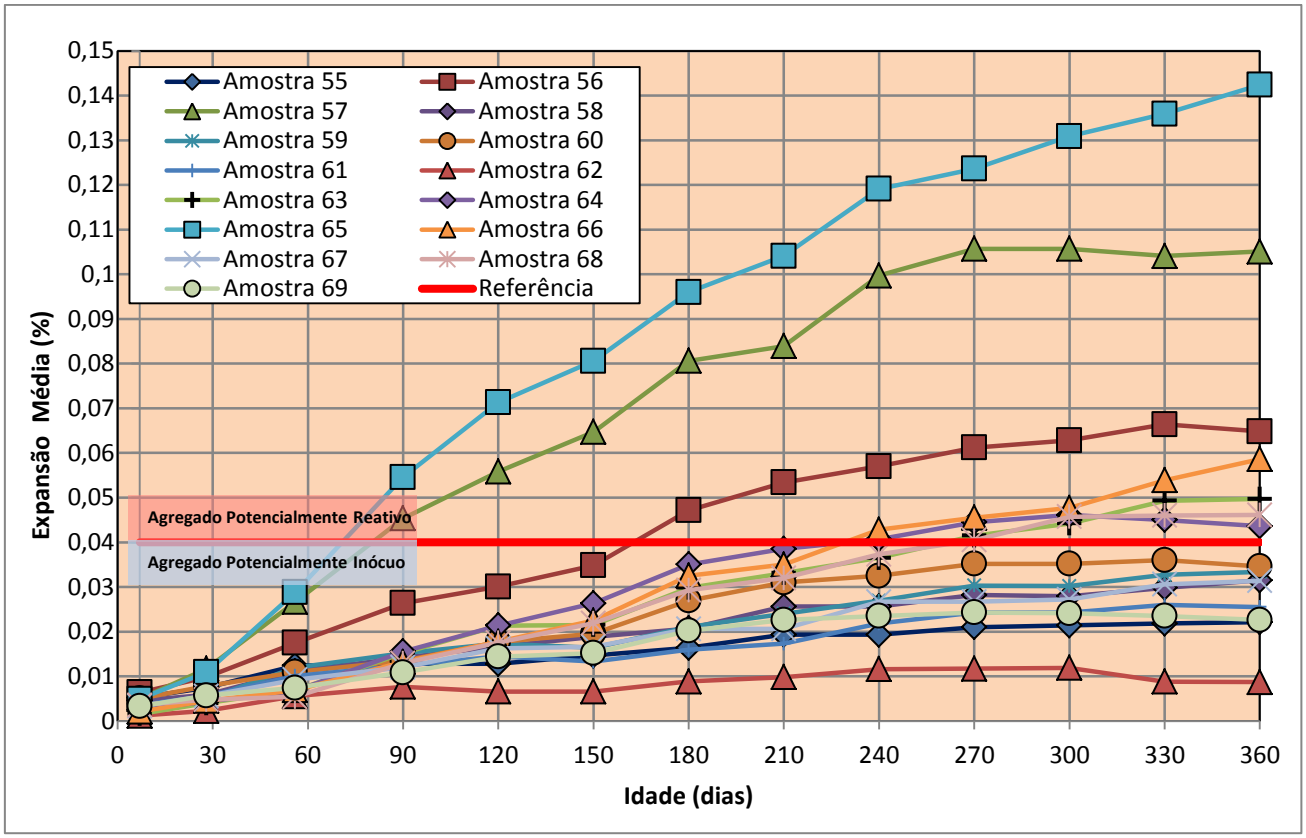
IDADE (Dias)	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	Referência
7	0,0052	0,0064	0,0049	0,0045	0,0036	0,0050	0,0036	0,0012	0,0016	0,0025	0,0049	0,0021	0,0033	0,0036	0,0033	0,0400
28	0,0075	0,0098	0,0117	0,0059	0,0049	0,0078	0,0056	0,0022	0,0040	0,0043	0,0109	0,0045	0,0055	0,0047	0,0057	0,0400
56	0,0124	0,0175	0,0267	0,0111	0,0120	0,0110	0,0101	0,0055	0,0069	0,0067	0,0288	0,0069	0,0092	0,0054	0,0074	0,0400
90	0,0128	0,0264	0,0453	0,0142	0,0152	0,0135	0,0124	0,0076	0,0152	0,0155	0,0546	0,0132	0,0120	0,0129	0,0108	0,0400
120	0,0128	0,0301	0,0558	0,0167	0,0173	0,0177	0,0145	0,0066	0,0214	0,0213	0,0713	0,0177	0,0162	0,0175	0,0144	0,0400
150	0,0146	0,0348	0,0647	0,0188	0,0164	0,0195	0,0133	0,0066	0,0215	0,0263	0,0806	0,0225	0,0166	0,0219	0,0152	0,0400
180	0,0164	0,0472	0,0806	0,0207	0,02102	0,0269	0,0159	0,0088	0,0298	0,0350	0,0960	0,0325	0,0206	0,0293	0,0202	0,0400
210	0,019	0,053	0,0839	0,0256	0,024	0,0310	0,0173	0,0098	0,0331	0,0385	0,1041	0,0350	0,0206	0,0320	0,0226	0,0400
240	0,019	0,057	0,0997	0,0256	0,027	0,0325	0,0218	0,0116	0,0365	0,0407	0,1191	0,0428	0,0267	0,0373	0,0235	0,0400
270	0,021	0,061	0,1057	0,0282	0,03	0,0352	0,0243	0,0117	0,0415	0,0445	0,1236	0,0455	0,0267	0,0405	0,0243	0,0400
300	0,021	0,063	0,1057	0,0279	0,03	0,0352	0,0243	0,0119	0,0442	0,0461	0,1309	0,0477	0,0272	0,0457	0,0241	0,0400
330	0,022	0,066	0,1041	0,0298	0,033	0,0360	0,0260	0,0088	0,0493	0,0450	0,1359	0,0539	0,0306	0,0460	0,0235	0,0400
360	0,022	0,065	0,1051	0,0315	0,033	0,0346	0,0255	0,0087	0,0497	0,0436	0,1424	0,0586	0,0314	0,0461	0,0226	0,0400

Para poder analisar mais detalhadamente as expansões nas idades de ensaio indicadas pela NBR 15577-4 (360 dias), são apresentados inicialmente os resultados em um único gráfico.

Em ordem crescente da mais reativa para a menos reativa, temos:

Amostra 65, amostra 57, amostra 56, amostra 66, amostra 63, amostra 68, amostra 64, amostra 60, amostra 59, amostra 58, amostra 67, amostra 61, amostra 69, amostra 55 e amostra 62.

Figura 20: gráfico da reatividade dos agregados pelo método de prisma de concreto



É importante salientar que para todas as amostras não houve diferença significativa nos valores de expansão entre as três barras, indicando que a média representa verdadeiramente o grupo. Também foi feita a verificação de existência de resultados fictícios, e nenhum valor individual está afastado da média mais do que o dobro do desvio.

Observa-se que, para a amostra 57 e 65 já poderiam ser classificadas como potencialmente reativas antes mesmo dos 90 dias, ou seja, em 25% do tempo total proposto para o experimento. O seu comportamento expansivo crescente é notado durante todo o experimento e não há sinal de estabilização das expansões.

Para uma melhor visualização das expansões durante os 360 dias, foi calculado a taxa de variação da expansão média em função do tempo de cada amostra e foram separados os resultados das amostras potencialmente reativas das potencialmente inócuas, de acordo com o ensaio de prisma de concreto, e colocadas em gráficos separados. O resultado pode ser visto nos dois gráficos a seguir.

Figura 21: Variação relativa das amostras potencialmente reativas pelo método CPT

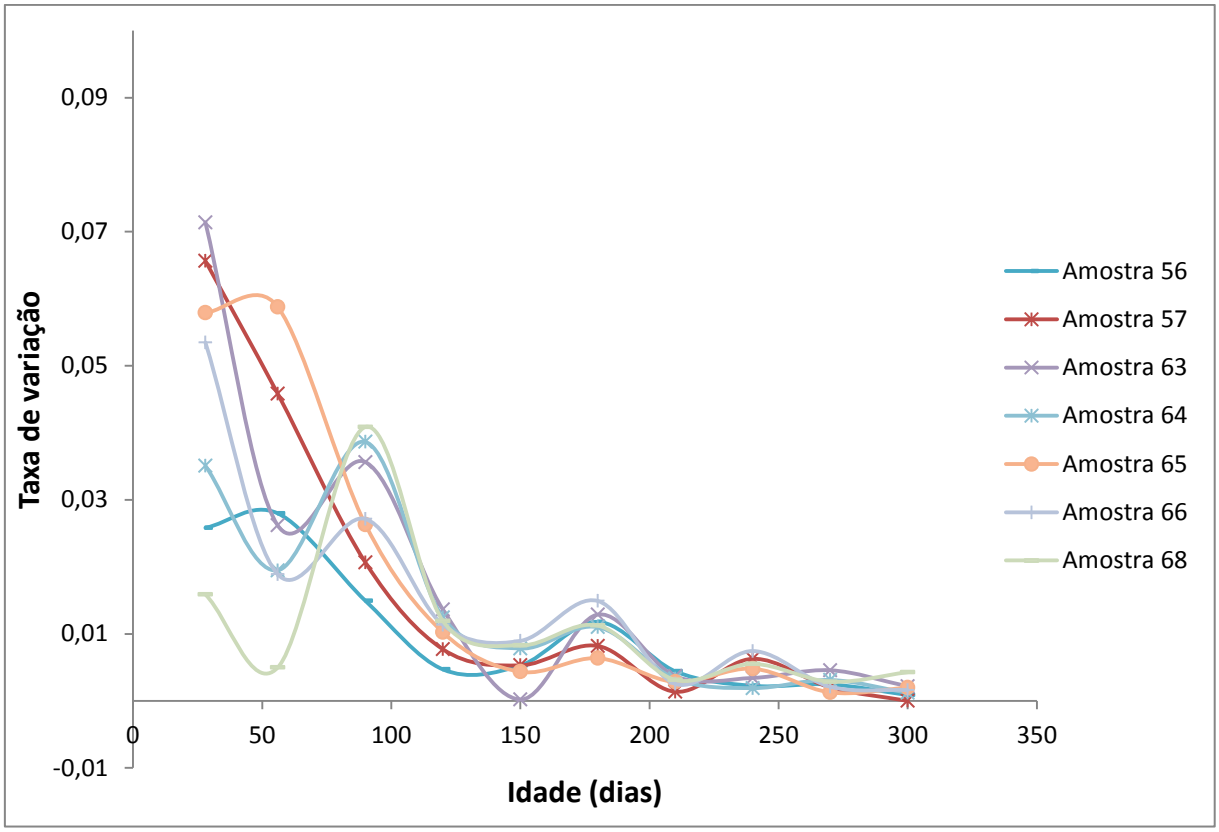
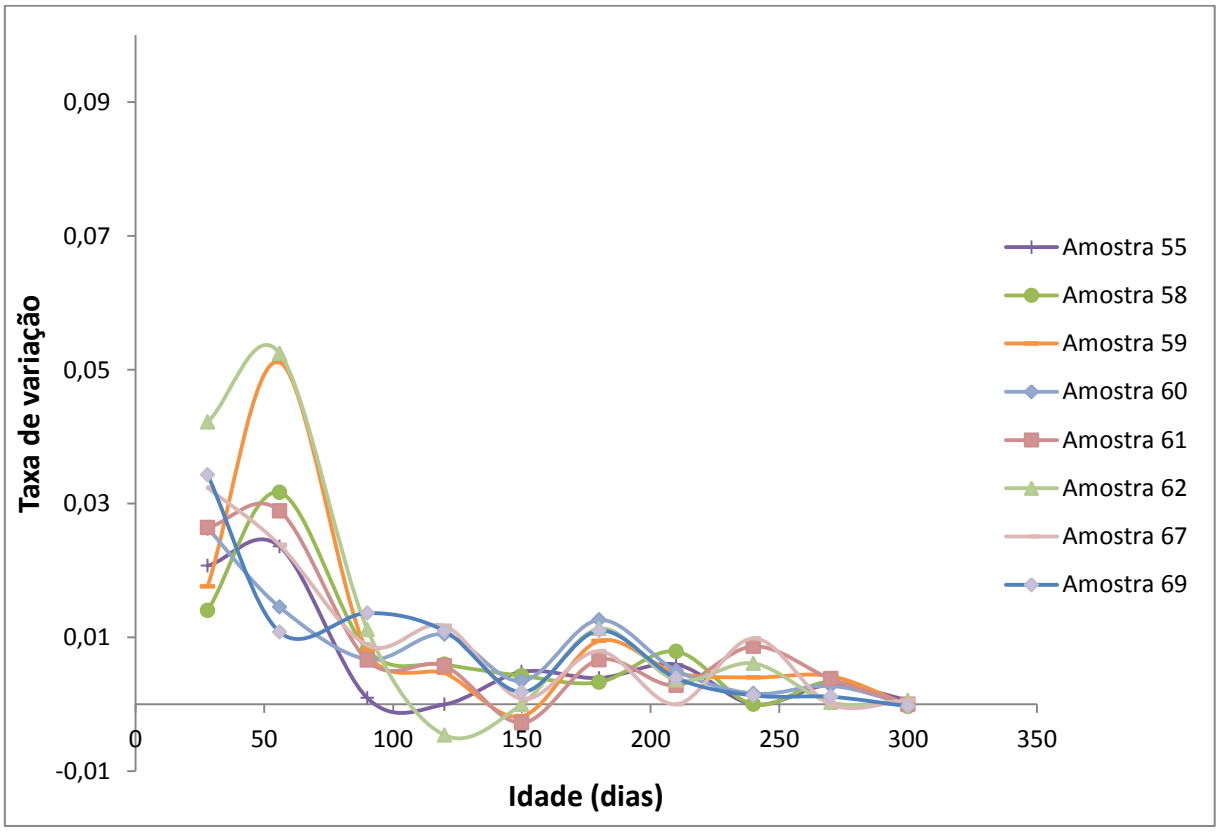


Figura 22: Variação relativa das amostras potencialmente inócuas pelo método CPT



Esse gráfico demonstra a taxa de variação das expansões medidas em função do tempo. Em outras palavras, foi feito uma derivada dos valores de expansão em função do tempo, ou seja, calculamos a tangente da curva de expansões para 7, 28, 56, 90, e os meses subsequentes. A derivada tem como fórmula:

$$f'(x) = \lim_{h \to 0} \frac{f(x+h)-f(x)}{h} \quad \text{(equação 2)}$$

O que é obtido fazendo $h = x - a$ no limite acima.

Com esses dados em mãos, podemos saber o quanto a amostra reagiu para um determinado período de tempo e se a sua expansão aumentou ou diminuiu ao decorrer do experimento.

Diante disso, é importante observar que, para todas as amostras, a sua variação relativa tem um comportamento característico. Ela é alta inicialmente, mas com o passar do tempo, o seu potencial reativo diminui.

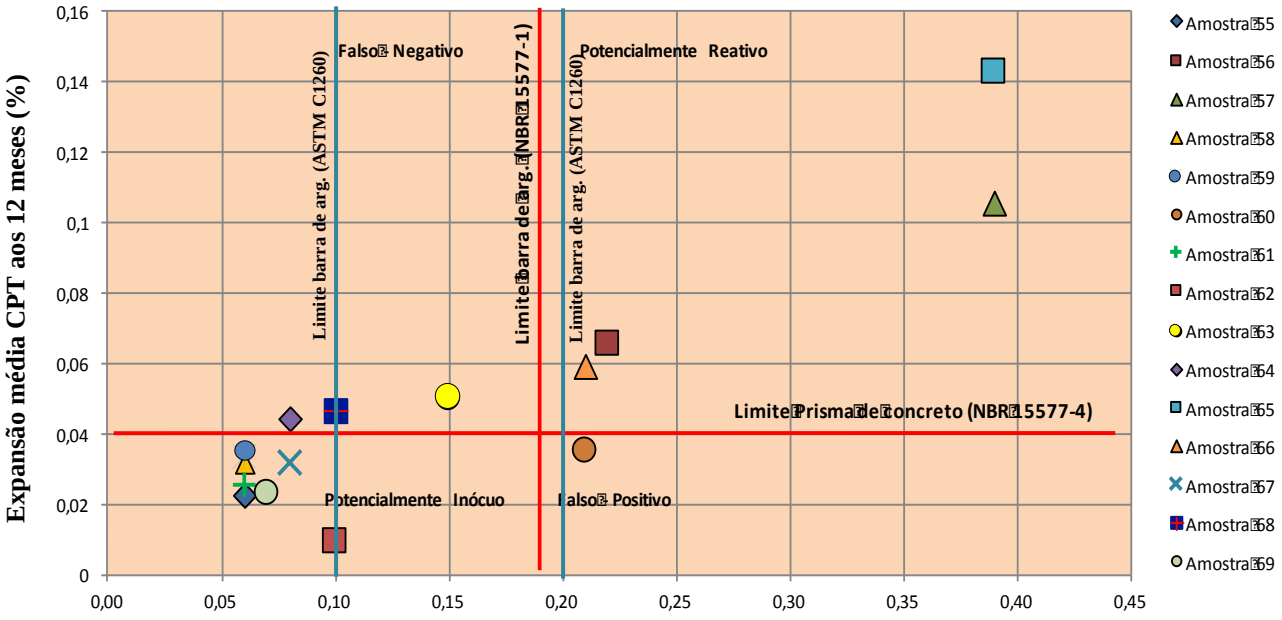
Além disso, observa-se uma curva senoidal característica específica. A maioria das curvas estão sobrepostas em um padrão de crescimento seguido de uma diminuição desse potencial expansivo ciclicamente. É interessante observar que as amostras reativas são mais fiéis a esse padrão do que as amostras inócuas e esse padrão é digno de ser estudado como uma forma de achar alguma relação, portanto sugere-se um estudo sobre a taxa de variação das expansões para trabalhos futuros.

Comparando esses dois gráficos podemos perceber como as amostras mais reativas apresentam uma alta variação relativa inicial, porém com uma queda bem representativamente acentuada. Porém essa alta variação se desfaz no final do experimento e o padrão da curva torna-se bem próxima das amostras inócuas. A amostra 57 e 65, que são as mais reativas, apresentam um valor inicial da sua variação de 0,6 a 0,7, por exemplo, e ambas apresentam a mesma característica de uma queda acentuada do seu valor e no final a sua variação está bem baixa e muito próxima das amostras inócuas.

Muitos consideram o teste da NBR 15577-4, ensaio de expansão de prismas de concreto (CPT) como o melhor método para avaliação do potencial deletério da Reação Álcali Agregado em termos de prover a mais forte correlação com a performance em campo. Entretanto, o teste CPT leva um ano para sua conclusão e, por isso, o teste de barra de argamassa tem uma significante vantagem prática com relação à sua velocidade, o que faz com que o teste de barra de argamassa ainda seja bastante utilizado pelo meio acadêmico.

Por causa disso, uma forma de analisar os dados é através da comparação dos resultados dos prismas de concreto com os resultados da barra de argamassa. Um meio simples de comparar é expondo os resultados dos testes em um gráfico comum à ambos para cada amostra. O resultado pode ser visto no gráfico da figura 23 a seguir.

Figura 23: Resultados do CPT versus AMBT



Diante desse gráfico, a amostra pode ser classificada em 4 regiões, todas elas estão expostas no gráfico e podem ser: potencialmente reativa, potencialmente inócua, falso – positiva e falso – negativa.

Para minimizar confusões que por ventura possam surgir, os termos são definidos a seguir:

Falso – Negativo: Caso o experimento de barra de argamassa preveja uma não reatividade de acordo com o limite pré-estabelecido pela NBR 15577-1, porém apresenta reatividade de acordo com o método do prisma de concreto, de acordo com a NBR 15577-4, essa amostra é um falso – negativo. Pois, o resultado mostra que o teste de barra de argamassa expõe um resultado de não reatividade, quando na verdade há uma reatividade, já que os resultados do prisma de concreto são mais confiáveis e devem ser utilizados como referência para os outros métodos de investigação da reatividade.

Falso – Positivo: Já se o experimento de barra de argamassa preveja uma reatividade de acordo com o limite pré-estabelecido, porém o método de prismas de concreto mostre que

a amostra é inócua, essa amostra é um falso – positivo, pois o resultado revela que o teste de argamassa expõe um resultado positivo para reatividade, quando na verdade não há reatividade.

Ao analisarmos o gráfico, percebemos que o ensaio de barra de argamassa presumiu bem a alta reatividade tanto da amostra 57, quanto da amostra 65, pois no ensaio de prisma de concreto essas duas amostras também foram altamente reativas.

Da mesma forma o ensaio AMBT pressupôs que as amostras 55, 56, 58, 59, 61, 67 e 69 eram amostras não reativas. Conclusão essa confirmada pelo ensaio de prismas de concreto que demonstrou uma reatividade abaixo do limite normatizado.

Já para as amostras 63, 64 e 68 o ensaio de barra de argamassa mostrou que elas não são reativas, quando na verdade elas são reativas, já que no ensaio de prismas de concreto seus valores estavam acima do permitido pela norma. Portanto essas amostras são nomenclaturadas como falso-negativo.

Por fim, a amostra 60 foi considerada potencialmente reativa pelo método AMBT, porém o ensaio de prismas não confirmou esse resultado já que a amostra estava abaixo do limite normatizado. Portanto essa amostra é nomenclaturada como falso-positivo.

No gráfico também foram colocados os limites segundo a norma americana ASTM C-1293. Segundo a norma americana, abaixo de 0,10% a amostra é considerada inócua, acima de 0,20% a amostra é considerada reativa e entre esses dois limites o resultado é considerado inconclusivo. A norma brasileira elimina o limite de 0,10% e desloca o limite de 0,20% para 0,19%, portanto a norma brasileira inclui todos os resultados inconclusivos da ASTM C-1293 dentro do mesmo limite das amostras inócuas. Portanto é de se esperar um maior número de falsos positivos e falsos negativos seguindo os limites da norma brasileira quando comparada com a norma americana, já que a ASTM C-1293 é mais conservadora.

As amostras falsas indicadoras de reatividade normalmente se concentram próximas ao eixo, porém não é esse o resultado encontrado. As amostras 64 e 68 estão bem afastadas do limite AMBT e também são consideradas inócuas pelo normativo americano (0,10%), portanto as amostras estão bem abaixo dos limites medidores de reatividade tanto da ASTM como da NBR, porém pelo CPT elas são reativas, o que mostra a tamanha discrepância dos resultados. Essa discrepância requer uma atenção e merece ser estudada, portanto sugere-se um estudo sobre a discrepância desses valores para trabalhos futuros.

4.2. Métodos Avançados

Após a realização dos ensaios de caracterização das amostras foram separadas as amostras que eram potencialmente reativas das que eram inócuas e foram realizados três diferentes tipos de experimentos não convencionais para estudar diferenças físicas, mecânicas e químicas que esses agregados pudessem ser diferenciados.

Os três testes escolhidos foram:

Microscopia Eletrônica de Varredura, que tinha por função descobrir alguma característica física que por ventura pudesse diferenciar os agregados reativos e inócuos.

Difração de Raios X que tinha por função descobrir alguma diferença química dos minerais nos seus complexos planos cristalinos entre os agregados reativos e inócuos.

Ensaios de Fluorescência de Raios X que tinha por função investigar a análise elementar e análise química entre os agregados reativos e inócuos.

4.2.1. Microscopia Eletrônica de Varredura

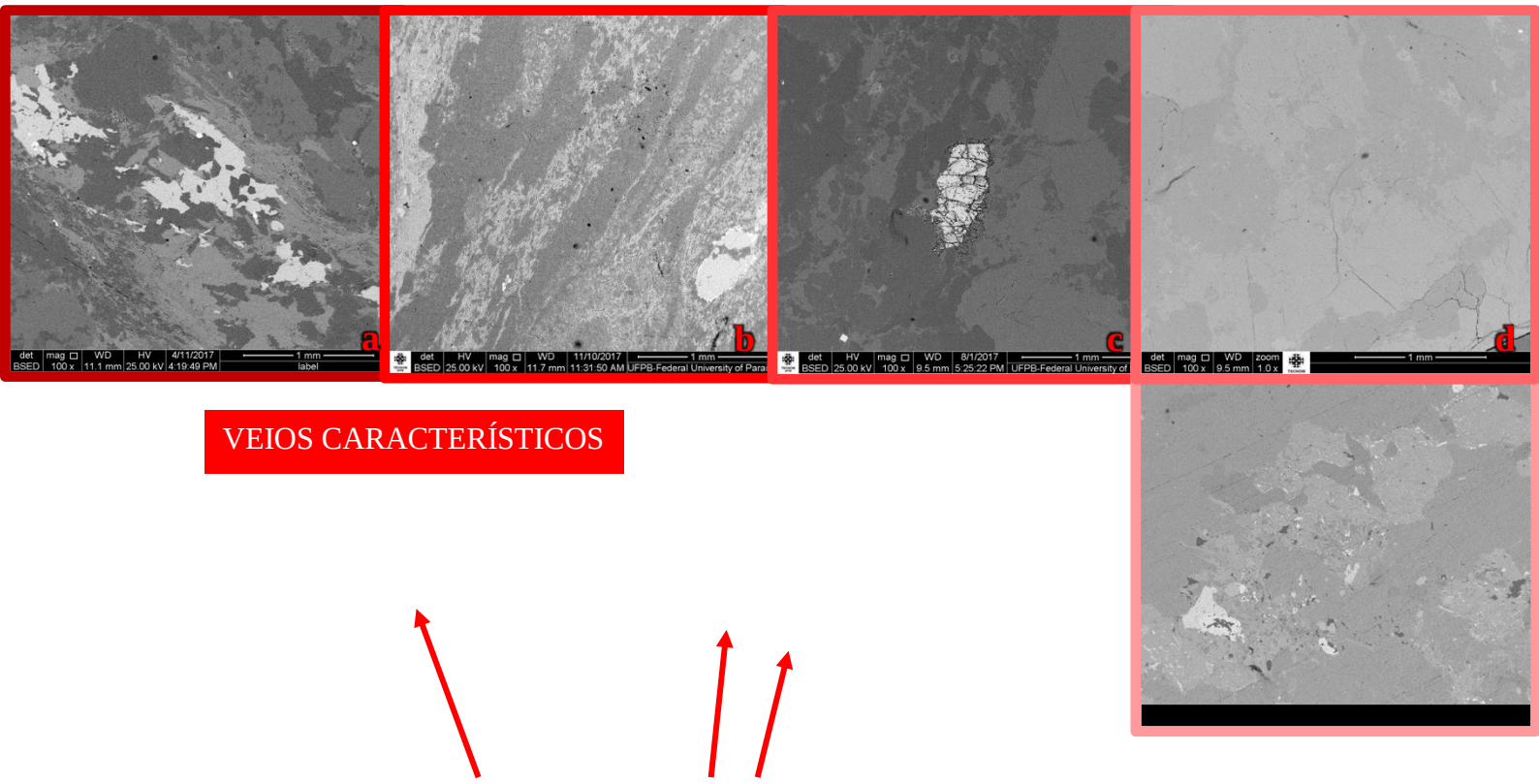
Os ensaios de Microscopia Eletrônica de Varredura foram realizados no Laboratório de Novos Materiais do IDEP/UFPB.

Foram analisadas no MEV os 15 tipos de amostras de agregados. De todas as amostras colhidas de cada agregado, foi escolhida duas daquelas que eram mais representativas como um todo do agregado. Dessas duas amostras uma foi reservada e guardada como forma de prevenção de qualquer imprevisto e a outra foi preparada e embutida em resina epóxi.

As imagens foram realizadas com o objetivo de uma melhor visualização das fases dos agregados e, através disso, uma melhor análise de cada um, além disso, buscar algumas diferenças que por ventura pudessem aparecer entre os mesmos.

As imagens foram realizadas em duas magnitudes distintas: 100x e 200x de aumento de várias regiões da amostra. Sendo postadas nesse trabalho apenas as imagens mais representativas que exibissem alguma morfologia característica, como por exemplo veios característicos.

As amostras foram colocadas em ordem crescente de reatividade, sendo a mais reativa a amostra 65 e a menos reativa a 62. Além disso uma linha foi desenhada na separação entre a última amostra inócua e a primeira amostra reativa, como forma de auxiliar a visualização. Elas foram dispostas uma ao lado da outra, pois o objetivo é descobrir relações que diferenciem as amostras.



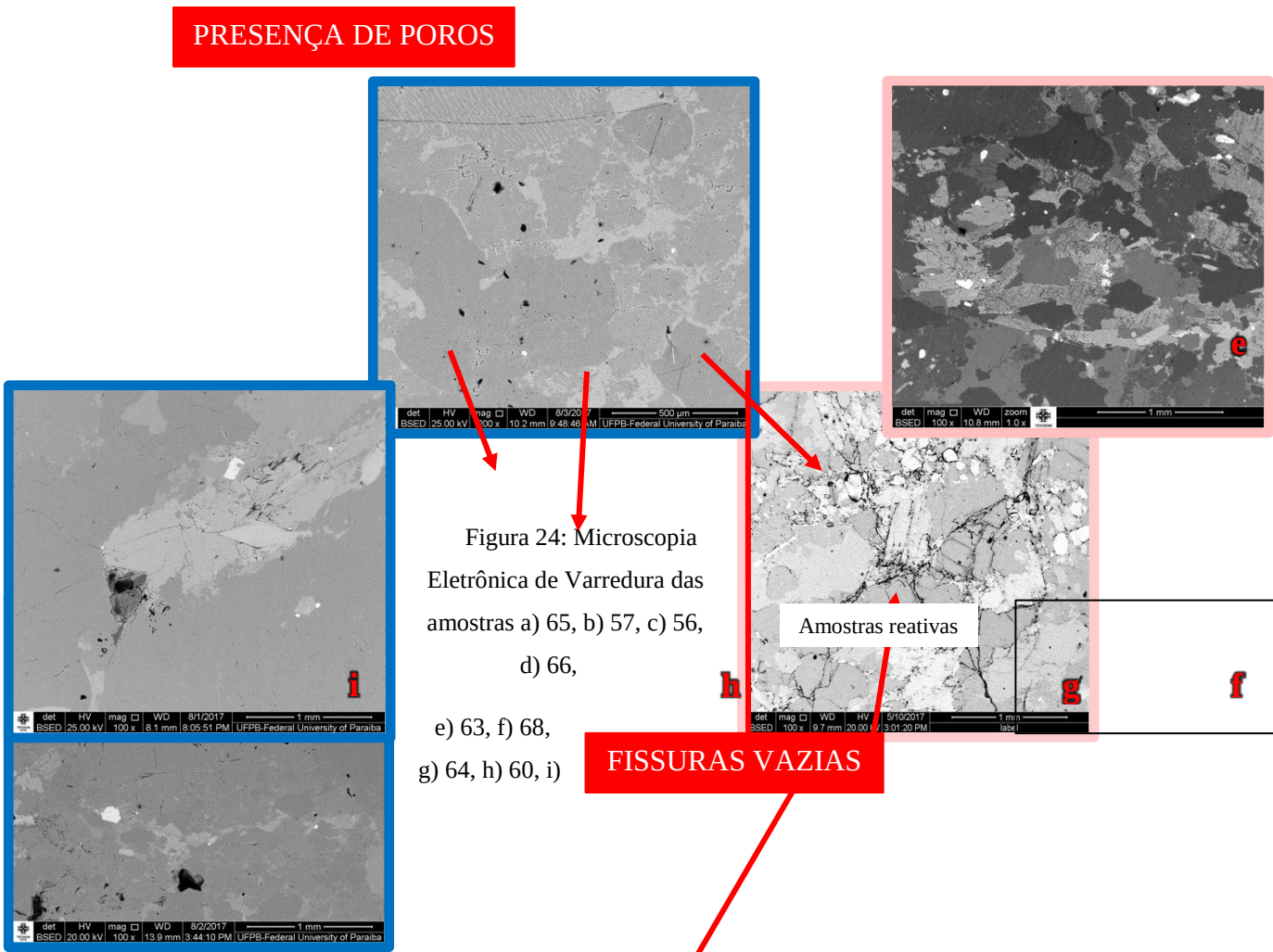


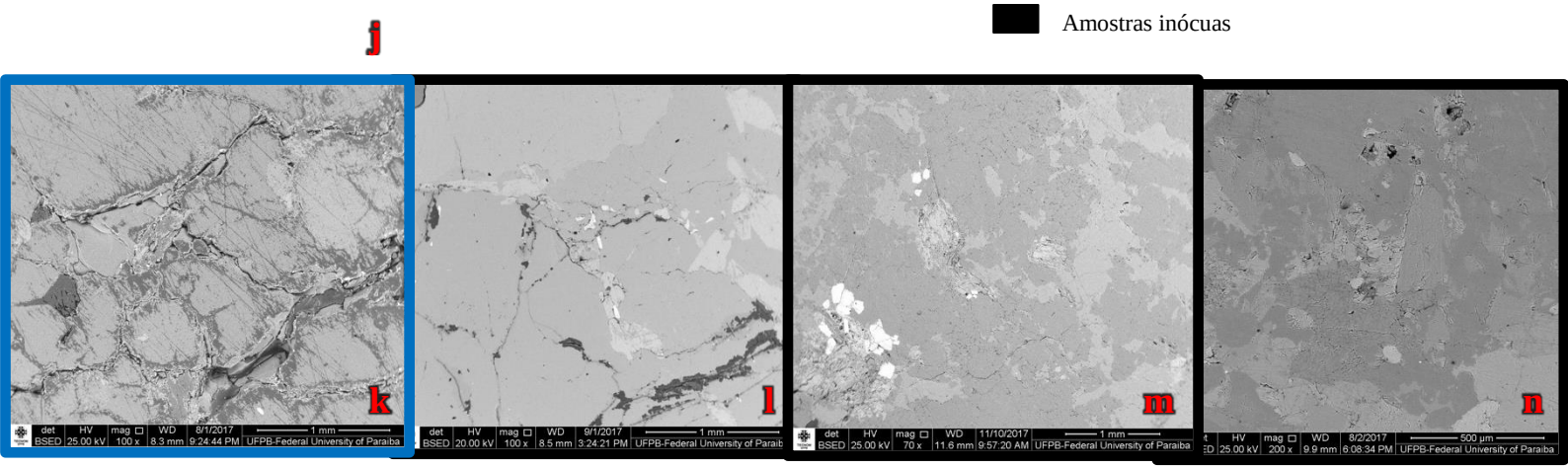
Figura 24: Microscopia Eletrônica de Varredura das amostras a) 65, b) 57, c) 56, d) 66, e) 63, f) 68, g) 64, h) 60, i)

59, j) 58, k) 61, l) 69, m) 55, n) 62

Legenda:

Amostras possivelmente reativas

Amostras inócuas



Uma borda com um gradiente que quanto mais reativa, mais forte é a cor vermelha da borda foi desenhada para auxiliar a visualização. Esse gradiente foi colocado nas amostras consideradas reativas de acordo com a NBR15577-4 que coloca o limite de 0,04. Porém esses experimentos possuem incertezas e, portanto, existe o desvio padrão que mede a dispersão da amostra, as amostras que estão perto da borda e, portanto, o seu desvio padrão também as colocam dentro do grupo das amostras reativas, elas foram marcadas de azul e podem também ser estudas com características de reatividade. As amostras não reativas foram destacadas com uma borda preta. Essa mesma simbologia da borda também será utilizada para o estudo das amostras pelo DRX mais adiante no ponto 4.2.2.

Podemos perceber três características particulares das amostras reativas: uma morfologia característica laminar com formação de veios, uma maior presença de poros e fissuras. Os três pontos serão explicados mais adiante.

Pode-se perceber que nas duas amostras mais reativas há veios característicos por toda amostra. As suas fases são distribuídas pela amostra em uma forma lamelar. É interessante observar que essa morfologia microscopia também é observada numa análise visual macroscópica em que as amostras são achatadas e em forma de lâminas.

A foliação é consequência da ação das tensões dirigidas no metamorfismo regional, e pode estar relacionada com a presença de certos minerais com hábito tabular/lamelar, como as micas. Estas, sob ação de tensões dirigidas, tendem a ficar orientadas numa posição perpendicular à da tensão que afetou a rocha. A foliação da rocha pode ser muito evidente ou mais sutil, sendo necessária, por vezes, uma observação ao microscópio para atestar a sua classificação quanto a forma com uma maior precisão.

Essa foliação é normalmente encontrada em rochas metamórficas que resfriaram rapidamente e não dispuseram de um tempo suficiente para sua cristalização, com isso os silicatos são encontrados em uma forma mais amorfa do que cristalina. A sílica amorfa, por sua vez é bem mais responsável pela Reação Álcali Agregado do que a sílica cristalina, portanto essa formação lamelar pode ser uma característica de agregados que possuam uma maior probabilidade da RAA.

Outro ponto a ser observado são as fraturas, elas são limiares para que os álcalis penetrem mais na amostra e reajam com a fonte de sílica amorfa presente no agregado. Além do mais, as fraturas aumentam a face de contato entre a amostra e os álcalis. Pode se observar, nas imagens das amostras marcadas que elas se apresentam muito fraturadas, portanto isso pode ser um indício de que as fraturas são facilitadoras da reação álcali agregado.

O último aspecto observado é a porosidade, a razão desse ponto proporcionar a patologia é que a porosidade é um fator facilitador para entrada de água com os álcalis na amostra. Então, enquanto em um material liso a reação se concentra na borda externa do agregado, em um material poroso os álcalis conseguem penetrar na amostra e aumentar os efeitos da reação.

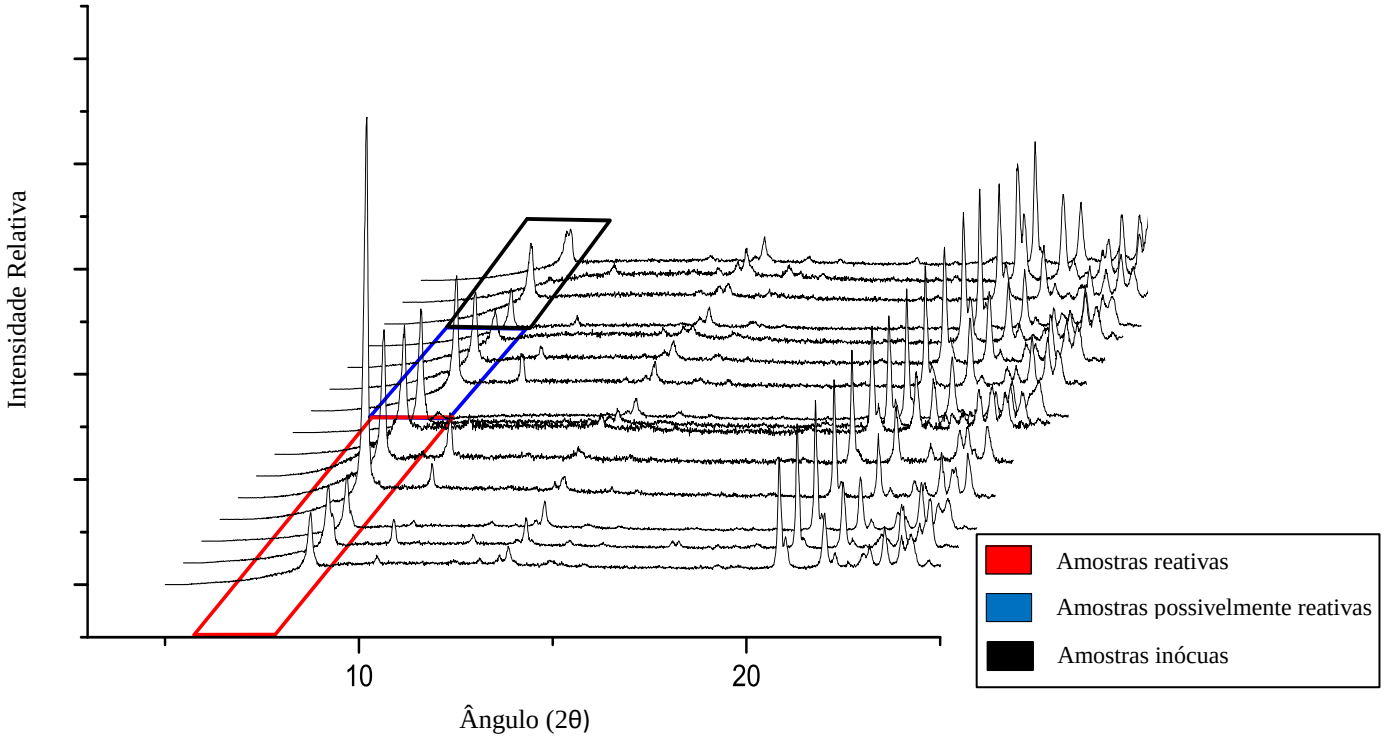
4.2.2. Difratometria de Raios X

Como forma de obtenção de difratogramas, onde se exprime os minerais localizados nas diversas fases encontradas nos agregados, utilizou-se as amostras de pó, preparadas inicialmente. Parte desse material foi queimado à 500^{o}C e à 1000^{o}C como uma tentativa de quebrar os minerais da mica.

Os ensaios de Difração de Raios X foram realizados no Laboratório de Novos Materiais do IDEP/UFPB.

Foram analisadas no difratômetro os 15 tipos de amostras de agregados in natura, o resultado pode ser observado na figura 25 a seguir.

Figura 25: Resultados do DRX para cada amostra



As amostras, assim como no MEV, foram separadas em ordem crescente de reatividade em três grupos. O grupo vermelho são as amostras reativas, o grupo azul são as amostras que pelo desvio padrão podem se encaixar como reativas conhecidas como *borderline samples* e o grupo preto são as amostras que são inócuas.

O gráfico do DRX foi ampliado entre os ângulos 5^{o} e 25^{o} especificamente, pois uma razão em especial merece ser destacada. Essa região marcada no gráfico corresponde a mica e ao analisarmos o gráfico percebemos picos maiores de mica nas amostras reativas e nas amostras juntas a "*borderline*". Percebe-se, assim, uma provável relação entre a quantidade de mica na amostra e a reação álcali agregado.

Diante dessa relação, foram pensadas soluções de quebrar os minerais da mica e assim comparar a reatividade das amostras. A solução adotada foi a queima das amostras a uma temperatura de 500^{o}C e 1000^{o}C, pois é notório que acima dessa temperatura os minerais da mica são quebrados. Após a queima foram feitas difratometrias das amostras, esses resultados podem ser vistos nas figuras 27 e 28, o gráfico da amostra *in natura* foi também exposto como forma de auxílio na figura 26.

Figura 26: Resultados do DRX para cada amostra in natura

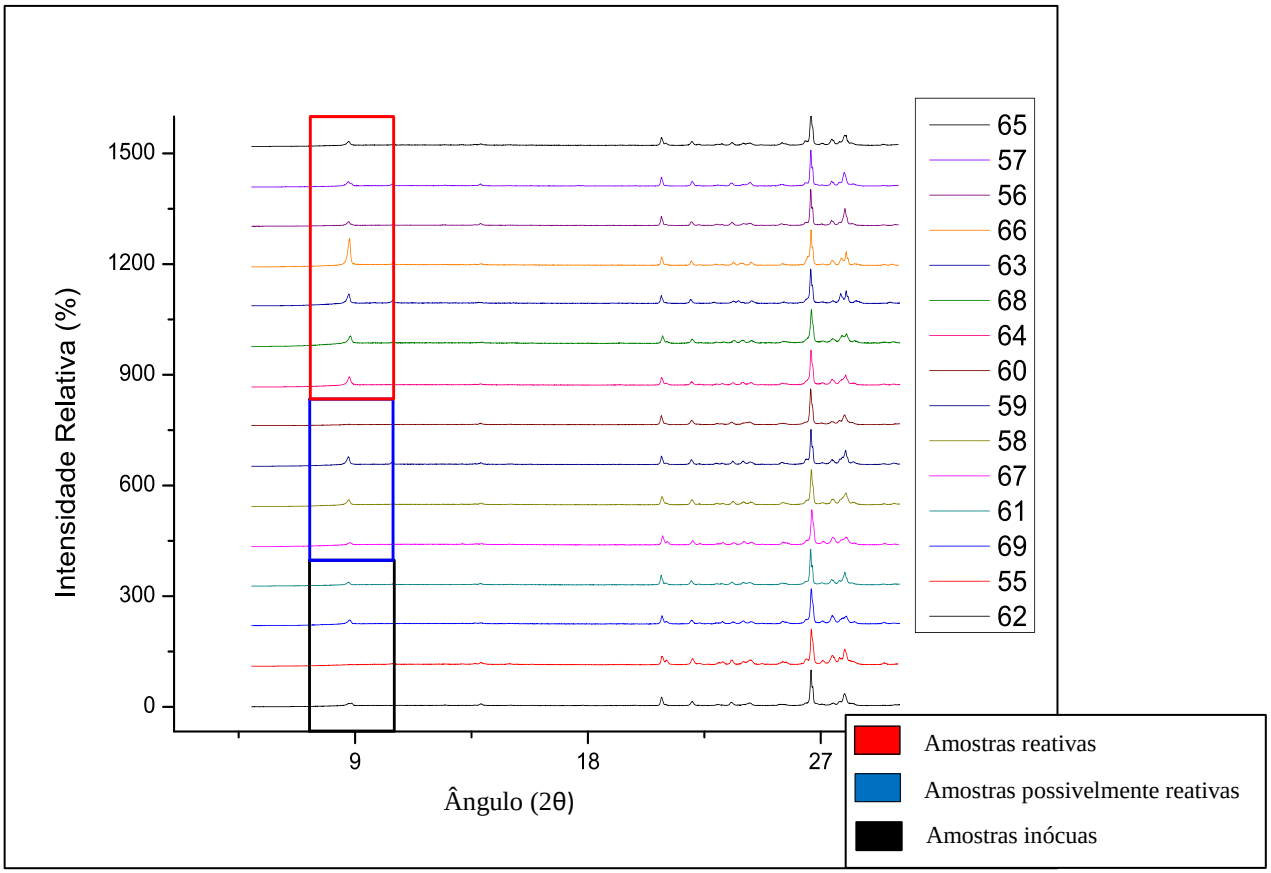


Figura 27: Resultados do DRX para cada amostra queimada à 500^{o}C

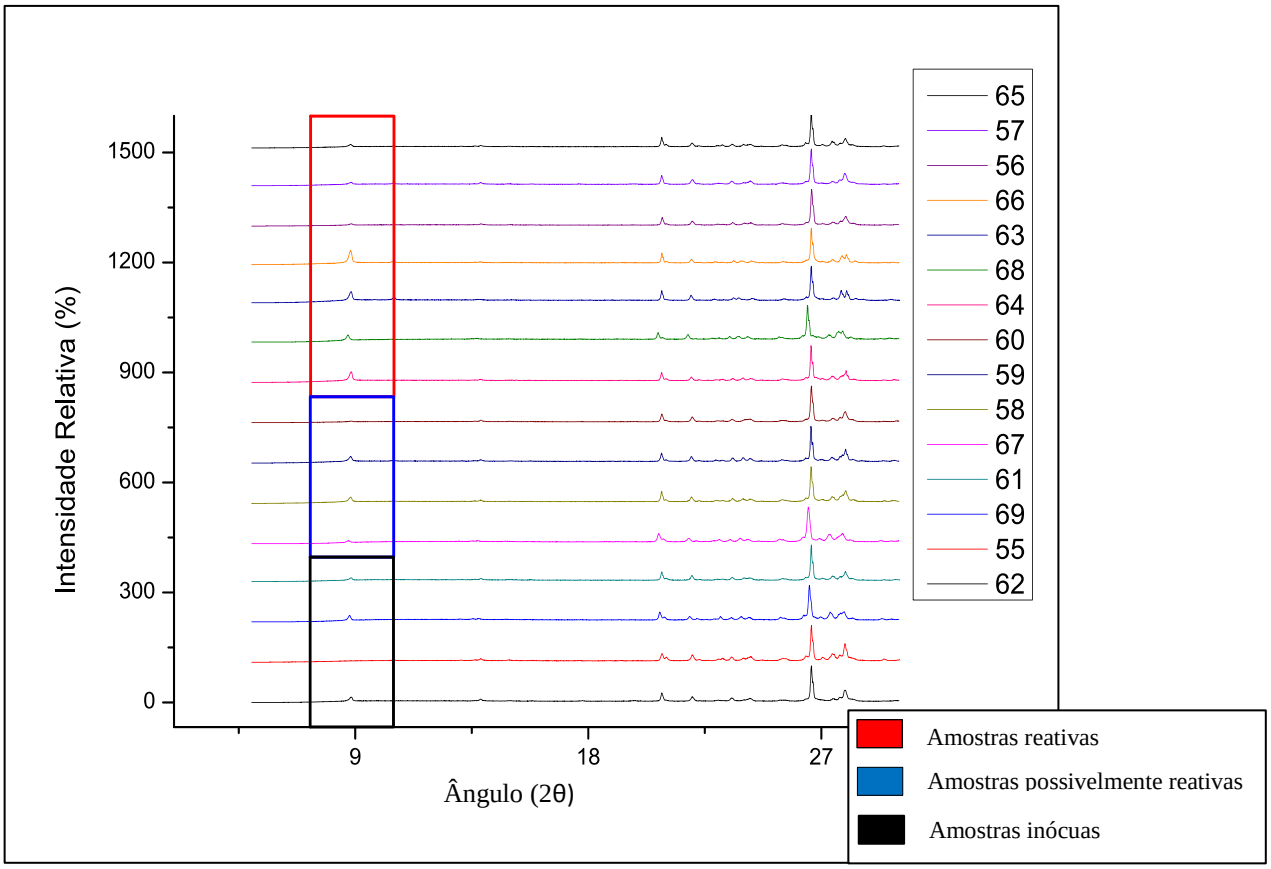
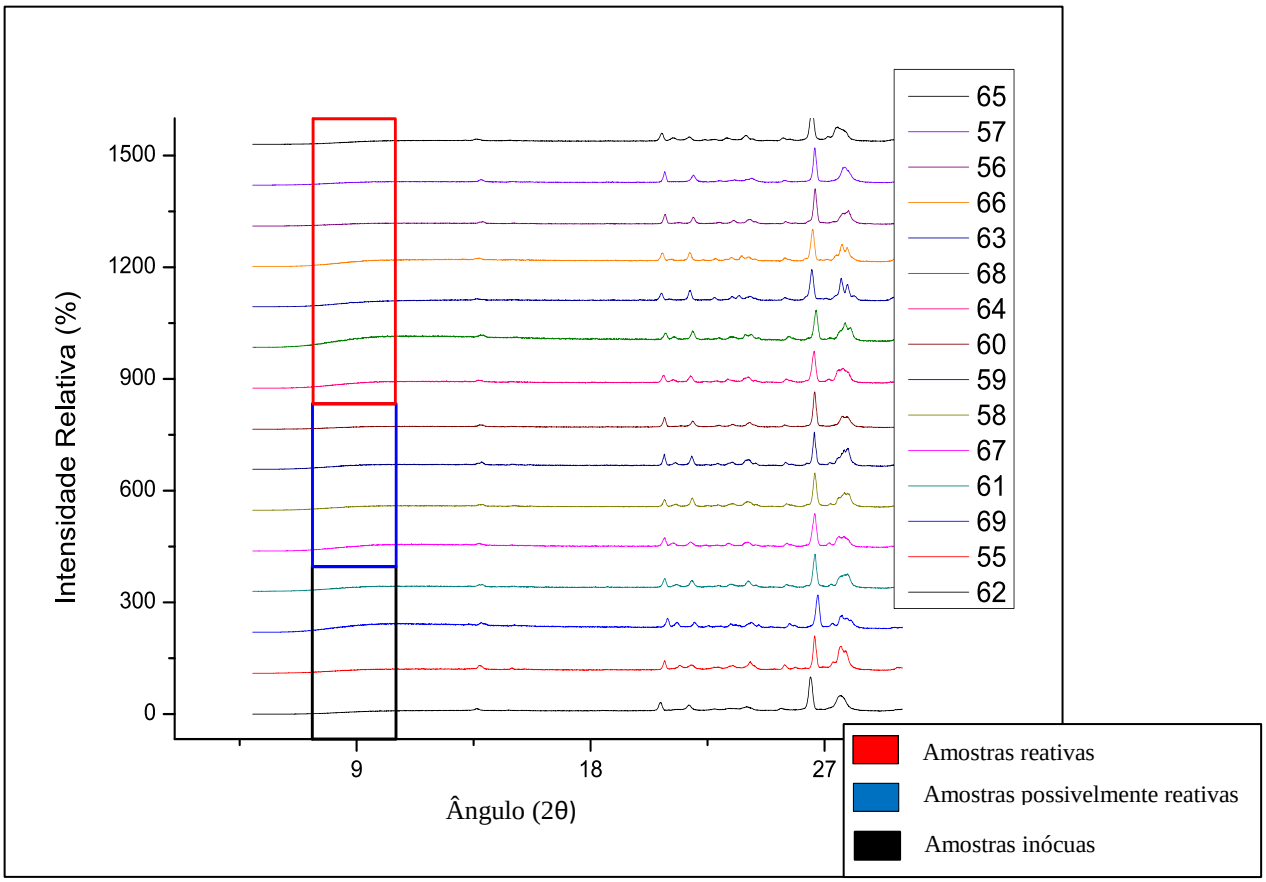


Figura 28: Resultados do DRX para cada amostra queimada à 1000°C



Percebe-se claramente o desaparecimento da mica nos resultados e a formação de outros picos. Portanto o próximo passo seria o estudo da reatividade dessas amostras in natura, queimada à 500^{o}C e à 1000^{o}C, o método escolhido foi dissolução e ataque com hidróxido de sódio. Porém infelizmente, não tivemos tempo hábil para a continuação desse passo e, portanto, esse próximo passo fica como sugestão para trabalhos futuros.

4.2.3. Fluorescência de Raios X

Os ensaios de Fluorescência de Raios X foram realizados no Laboratório de Solidificação Rápida (LSR) da UFPB.

A análise química fornece dados fundamentais para caracterização de materiais, apesar de não permitir uma avaliação completa da composição mineralógica. As determinações mais usuais estão na forma dos óxidos mais estáveis dos elementos químicos presentes nas composições das fases constituintes das matérias primas e dos géis formados após o processo de reação, como: SiO_2, Al_2O_3, TiO_2, Fe_2O_3, MgO, Na_2O, K_2O.

A análise química foi realizada no equipamento *Sequential X-ray Fluorescence Spectrometer*, Modelo XRF-1800 da Shimadzu. Através de Fluorescência de Raios-X foram obtidos os percentuais dos compostos dos agregados como pode ser visto nas tabelas 4 e 5 abaixo.

Tabela 5. Resultados do FRX das amostras

	Óxidos						
Amostra	Dióxido de Silício (SiO_2)	Óxido de Alumínio (Al_2O_3)	Óxido de Sódio (Na_2O)	Óxido de Potássio (K_2O)	Óxido de Cálcio (CaO)	Óxido de Ferro (Fe_2O_3)	Óxido de Magnésio (MgO)
65	75.11%	11.29%	4.74%	3.47%	1.87%	1.79%	0.90%
57	74.03%	10.90%	5.01%	2.27%	3.05%	2.84%	1.28%
56	77.63%	10.20%	4.71%	2.48%	1.96%	1.74%	0.76%
66	68.62%	11.83%	3.64%	3.01%	3.72%	5.19%	2.59%
63	65.91%	11.72%	3.27%	2.43%	4.69%	6.89%	3.51%
68	77.17%	11.87%	2.96%	1.49%	2.07%	2.68%	0.73%
64	69.30%	11.14%	3.31%	4.05%	2.67%	5.93%	1.79%
60	77.47%	10.73%	5.27%	2.55%	1.68%	1.37%	0.44%
59	71.13%	11.14%	4.39%	2.89%	3.83%	3.80%	1.64%
58	71.75%	11.02%	4.21%	3.22%	3.57%	3.66%	1.40%
67	73.94%	11.55%	3.47%	4.56%	1.76%	2.99%	0.71%
61	75.40%	10.76%	4.36%	3.50%	2.06%	2.31%	0.80%
69	68.96%	11.46%	3.76%	3.14%	4.08%	4.97%	1.51%
55	74.77%	11.22%	5.34%	3.76%	2.19%	1.56%	0.43%
62	74.84%	11.35%	5.01%	2.62%	2.07%	2.17%	1.20%

A partir dos resultados podemos perceber que todos os materiais apresentam teores representativos de sílica (SiO_2), o que leva a crer que essas amostras tenham uma quantidade suficiente de sílica amorfa disponível para a reação álcali agregado.

Observa-se também que os materiais são ricos em alumina (Al_2O_3), sendo o segundo óxido mais representativo em todas as amostras. Esse óxido está presente na mica e pode ser um provável óxido facilitador da reação.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Devido ao crescente número de ocorrências de estruturas afetadas pela RAA é interessante que haja o incentivo a busca por respostas que impeçam o seu surgimento, visto que embora não exista ainda uma solução corretiva definitiva, pode-se evitar que novas estruturas manifestem essa patologia utilizando métodos eficientes na prevenção.

Esse trabalho auxiliou através de uma comparação entre os métodos convencionais e novos métodos que surgem no meio acadêmico, na busca por soluções como forma de obter um grande impacto sobre as soluções de engenharia a serem dadas para os futuros casos de reação álcali agregado, que deverão surgir em blocos de fundação, não só no Estado de Pernambuco, mas em outras cidades brasileiras.

A partir das análises dos resultados obtidos nos ensaios experimentais realizados nesta pesquisa para a reação álcali agregado, pode-se atentar para as considerações a seguir:

Ao analisar os resultados obteve-se uma correlação entre os resultados obtidos nos ensaios não convencionais com os ensaios de expansão, tanto no método acelerado das barras de argamassa, quanto pelo método dos prismas de concreto.

Nenhum estudo tinha sido realizado e ensaios em agregados da região nordeste, utilizando o método de ensaio dos prismas de concreto. Portanto, a partir dos resultados pudemos verificar a correlação entre os ensaios. Os ensaios de prismas de concreto mostraram uma alta reatividade dos agregados da região nordeste. Além disso, os ensaios mostraram que existem amostras falso-positivas e falso-negativas.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Como sugestões para trabalhos a serem desenvolvidos a partir deste, tem-se a realização de ensaios com um número maior de agregados da região nordeste, obtendo assim dados mais precisos e representativos da região.

Sugere-se uma ampliação dos ensaios de caracterização dos materiais como, por exemplo, espectroscopia de infravermelho, análise termogravimétrica e análise petrográfica dos agregados como forma de obter uma maior amplitude de análise e dados mais precisos.

Indica-se estudos mais aprofundados sobre a taxa de variação das expansões em função do tempo como uma forma de analisar com uma maior precisão os padrões das curvas reativas e inócuas e a verificação de alguma relação entre as mesmas.

Recomenda-se também a realização de um estudo mais aprofundado nos ensaios de barra de argamassa e prisma de concreto sobre a discrepância dos valores para as amostras 64 e 68.

Além disso, sugere-se a continuação do estudo comparativo entre as amostras in natura, queimadas a 500^{o} C e a 1000^{o} C como forma de obter uma relação entre os minerais da mica e reatividade das amostras pelo método escolhido de dissolução e ataque com hidróxido de sódio para a continuação da análise.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR DNIT 053/2004: Pavimento rígido – Determinação da retração de concreto por secagem – método de ensaio, Rio de Janeiro, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. NBR 15577: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto Rio de Janeiro, 2008.

ANDRADE, T.; FIGUEIRÔA, J. P. O Ataque da Reação Álcali Agregado sobre as Estruturas de Concreto. A descoberta pioneira da ocorrência do problema em fundações de pontes e edifícios na Região Metropolitana do Recife. Recife: Universitária- UFPE, 2007.

ANDRADE, T.; SILVA, J. J. R.; ALMEIDA R.; FIGUEIRÔA, J. P.; KIHARA, Y.; PECCHIO, M. Diagnóstico de Reação Álcali-Agregado em Blocos de Fundação de um Edifício Público situado na Cidade do Recife/PE. In: II SIMPÓSIO SOBRE RAA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. IBRACON, 2006.

ANDRADE, T. Histórico de Casos de RAA Ocorridos Recentemente em Fundações de Edifícios na Região Metropolitana do Recife. In: II SIMPÓSIO SOBRE RAA EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. IBRACON, 2006.

Comitê de Especialistas do Ibracon para Reações Expansivas em Estruturas de Concreto/2º semestre de 2005

Deng, M. and M.S. Tang, *formation and expansion of ettringite crystals,* Cement and Concrete Research (1993).

D. Chen, S. Mahadevan, *Chloride-induced reinforcement corrosion and concrete cracking simulation,* Cement & Concrete Composites (2008)

FIGUEIRÔA, J. P.; ANDRADE, TIBÉRIO. O ataque da reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto – Editora Universitária – UFPE, 2007.

FREARSON A., 2016 *heralds beginning of the "megatall"* skyscraper era, Disponível em: < https://www.dezeen.com /2016/01/22/2016-megatall-skyscraper-era-council-tall-buildings-urban-habitat-ctbuh/>. Acesso em: Outubro 2017.

GOMES, K. C., Potencial de Ativação Alcalina de Materiais Residuais Aluminosilicosos no Desenvolvimento de Matrizes Cimentícias. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal da Paraíba, 2008

L.G. Baquerizo, et al., *Impact of water activity on the stability of ettringite,* Cem. Concr. Res. (2015),

M. A. Maleque and M. S. Salit, *Materials Selection and Design,* SpringerBriefs in Materials,

M. Collepardi, *Ettringite Formation and Sulfate Attack on Concrete* (2001).

Manhattanização, Disponível em: < https://pt.wikipedia.org/wiki/Manhattaniza%C3%A7%C3%A3o/>. Acesso em: Outubro 2017.

OBERHOLSTER, R. E.; DA VIES, G. An *Accelerated Method for Testing the Potential Alkali- Reactivity o f Siliceous Aggregates*. Cement and Concrete Research, USA, v. 16, n.2, p. 181-189, 1986.

PAVIA, D. L., LAMPMAN, G. M., & KRIZ, G. S. (1979). *Introduction to spectroscopy: a guide for students of organic chemistry*. Philadelphia, W.B. Saunders Co

Revista Tecnhe, Disponível em: < www.revistatechne.com.br/engenharia-civil/125>. Acesso em: Outubro 2017.

Revista Tecnhe, Disponível em: <http://techne17.pini.com.br/engenharia-civil/160/artigo 287763-2.aspx>. Acesso em: Outubro 2017.

R. Komatsu, N. Mizukoshi, K. Makida, K. Tsukamoto, *In-situ observation of ettringite crystals*, Journal of Crystal Growth (2008).

SANCHEZ, L. F. M. Contribuição ao estudo dos métodos de ensaio na avaliação das reações álcali-agregado em concretos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. 2008.

S. Macdonald, *Building Pathology*, by Blackwell Science Ltd (2003)

Souza, Vicente Custodio De, T. Rippe, Patologia recuperação e reforco de estruturas de concreto, Pini 1998.

Stanjek, H. & Häusler, *Basics of X-ray Diffraction* (2004)

Swenson, E.G. (1957) *A reactive aggregate undetected by ASTM tests*. ASTM Bulletin No. 226.

VALDUGA, L. Influência das condições de ensaio da ASTM C 1260 na verificação da reação álcali-agregado. 2007. Tese (Doutorado em Engenharia) -Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, UFRGS, Porto Alegre.

Zdenek P. Bazant, Warren J. Raftshol, *Effect of cracking in drying and shrinkage specimens* (1982).