

JÉSSICA FERREIRA MARINS

**DISCUSSÃO SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DA REATIVIDADE
DE AGREGADOS GRAÚDOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO
DE CONCRETOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil da Universidade Católica de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Engenharia das Construções

Orientador: Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva

Recife

2021

**UNIVERSIDADE CATÓLICA DE PERNAMBUCO PROGRAMA
DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL**

JÉSSICA FERREIRA MARINS

**Discussão Sobre a Caracterização da Reatividade de
Agregados Graúdos Utilizados na Fabricação de Concretos**

Comissão Examinadora:

Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva

Orientador - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Prof. Dr. Ângelo Just da Costa e Silva

Examinador Interno - Universidade Católica de Pernambuco - UNICAP

Antônio Augusto Costa de Azevedo

Examinador Externo – Instituto Federal de Pernambuco - IFPE

Aprovado em 19 de fevereiro de 2021

M339d

Marins, Jéssica Ferreira

Discussão sobre a caracterização da reatividade de agregados
graúdos utilizados na fabricação de concretos / Jéssica Ferreira
Marins, 2021.

73 f. : il.

Orientador: Fernando Artur Nogueira Silva
Dissertação (Mestrado) - Universidade Católica de
Pernambuco. Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil.
Mestrado em Engenharia Civil, 2021.

1.Concreto. 2.Agregados (Materiais de construção). 3. Reação
álcalis-agregado I. Título.

CDU 666.972.11

Mércia Nascimento - CRB-4/788

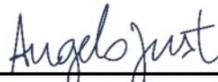
TERMO DE APROVAÇÃO

JÉSSICA FERREIRA MARINS

DISCUSSÃO SOBRE A CARACTERIZAÇÃO DA REATIVIDADE DE AGREGADOS GRAÚDOS UTILIZADOS NA FABRICAÇÃO DE CONCRETOS

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil na Universidade Católica de Pernambuco, como parte dos requisitos necessários para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, com ênfase em Materiais de Construção Civil.

Defesa realizada os dezenove dias do mês de fevereiro do ano de dois mil e vinte e um, às dez horas, em Recife-PE.



Prof. Dr. Angelo Just da Costa e Silva



Prof. Dr. Antônio Augusto Costa de Azevedo



Prof. Dr. Fernando Artur Nogueira Silva
Presidente da Banca Examinadora

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a Deus pelo dom da vida. Pela força que eu nem imaginava que tinha, por todas as oportunidades que vieram até mim. Principalmente agradeço por ter plantado em meu coração essa vontade de seguir na carreira acadêmica e por ter me ensinado que tudo acontece na hora certa.

Ao meu orientador, Fernando Artur, por ter confiado em mim desde a época que eu era uma aluna de graduação recém-chegada à Recife, procurando meu espaço. Sou eternamente grata pela oportunidade de iniciar meu caminho na pesquisa pelo PIBIC sob sua orientação. Foi um caminho muito trabalhoso e desafiante, mas chegamos até aqui e hoje, concluindo o mestrado, meu coração é pura gratidão pela amizade, pelos elogios e críticas, pois tudo isso me ajudou a crescer.

A CAPES pela concessão da bolsa de mestrado que auxiliou no desenvolvimento deste trabalho.

Aos meus pais por todo amor, carinho e paciência. Por serem capazes de compreender minha ausência em momentos tão importantes por estar correndo atrás dos meus sonhos. Muito obrigada por tudo, por todo esforço dedicado a mim e por nunca deixar faltar nada. Apesar da distância sempre senti que tenho um lar para onde sempre poderia voltar.

A minha avó por diversas vezes ter sido meu abrigo, por ter cuidado tão bem de mim por todos esses anos. Por toda a companhia, amor e carinho. Por ser a pessoa que mais acreditou que eu seria capaz e por sempre me incentivar a seguir em frente firme e forte, apesar de todas as dores da vida.

Aos professores que passaram por mim ao longo desses anos, pelo conhecimento e experiências compartilhadas. Um agradecimento especial ao professor Ângelo Just, pela paciência, amizade e por viabilizar a realização de alguns ensaios que foram essenciais para a realização deste trabalho.

Aos trabalhadores da Universidade que sempre estiveram dispostos a ajudar. Um agradecimento especial a Washington Espósito e Gleizer Pereira, por toda paciência, assistência e amizade.

A todos envolvidos direta e indiretamente, cada um foi muito importante para a realização desse sonho.

Aos meus amigos por sempre estarem ao meu lado, por diversas vezes sofrerem junto comigo, por rir meu riso e vibrar a cada conquista minha. Um pouco desse trabalho eu devo a vocês. Agradeço especialmente a Elanny Amorim por ter me incentivado a fazer minha inscrição no programa de mestrado e por sempre estar ao meu lado me apoiando, estudando e crescendo comigo.

Ao meu avô por me ensinar sobre persistência. Ao longo desses dois anos eu pude aprender com ele o valor da vida, das pessoas e dos nossos sonhos. Aprendi a não deixar nada para amanhã, porque infelizmente o amanhã talvez não chegue.

A banca avaliadora de mestrado pela presença e contribuição técnico-científica, possibilitando um crescimento pessoal frente à avaliação e sugestões a serem incrementadas neste trabalho.

RESUMO

MARINS, J. F. **Discussão Sobre a Caracterização da Reatividade de Agregados Graúdos Utilizados na Fabricação de Concretos**. 2021. ____f. Dissertação (mestrado em engenharia) Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil, Universidade Católica de Pernambuco, Recife, Brasil.

A reação álcali-agregado (RAA) é uma reação química deletéria que envolve os íons de sódio e potássio, provenientes principalmente do cimento Portland, e algumas fases minerais que podem estar presentes em agregados graúdos ou miúdos que em presença de água podem causar expansões nas estruturas de concreto. Conhecer a mineralogia do agregado é fundamental, uma vez que evitando o uso de agregado reativo, evita-se o surgimento dessa manifestação patológica. Esse trabalho tem como objetivo, realizar uma comparação entre as diferentes metodologias do ensaio para determinação da expansão dos prismas de concreto pelo método acelerado, norma brasileira NBR 15577-7:2018 com a RILEM AAR-4.1:2016 e a AASHTO T 380:2018 modificado. As metodologias propostas pela NBR e pela RILEM são muito similares, diferindo apenas na quantidade de agregados e consumo de cimento. Já o método proposto pela AASHTO difere no acondicionamento e no tempo do ensaio. Como a intenção dessa pesquisa é avaliar as condições do ambiente de ensaio foi mantido o mesmo tamanho de molde para todas as metodologias avaliadas. Para a execução de todos os ensaios foi utilizado agregado graúdo reativo e agregado miúdo inócuo. Os corpos de prova ensaiados pelo método da NBR15577-7:2018 e da RILEM AAR-4.1:2016 apontaram que o agregado graúdo utilizado é reativo logo na primeira leitura, onde a variação dimensional dos prismas foi maior que 0,03%, limite proposto por ambas às normas. Os prismas obtiveram comportamento com relação à expansão muito similar. As metodologias propostas pela NBR e pela RILEM tem duração de vinte semanas, com intervalo de cinco semanas para cada leitura. Analisando os resultados encontrados no ensaio que foi executado com o ambiente de acondicionamento como proposto pela AASHTO T380:2018 é possível concluir que velocidade de ocorrência da expansão é maior que na outras metodologias. Isso pode ocorrer devido às condições do ensaio serem muito agressivas. Este tem duração de 56 dias, as leituras são realizadas com pequenos intervalos entre as idades. Após a realização dos ensaios propostos e análise dos dados encontrados é possível constatar que todas as normas estudadas cumprem com o objetivo principal de caracterizar o agregado quanto à reatividade álcali sílica.

Palavras-Chave: Reação Álcali - Agregado; Método de teste de prisma de concreto; Potencial de reatividade.

ABSTRACT

MARINS, J. F. **Comparative analysis of standards NBR 15577: 2018, AASHTO T 380: 2018 and RILEM AAR-4.1: 2016 for characterization of the reactivity of coarse aggregates used in concrete manufacturing.** 2021. ___p. Engineering Master Thesis in Civil Engineering Graduate School, Catholic University of Pernambuco, Recife, Brazil.

The alkali-aggregate reaction (AAR) is a deleterious chemical reaction that involves sodium and potassium ions, mainly from Portland cement, some mineral phases that may be present in large aggregates or small amounts that in the presence of water can cause expansions in concrete structures. Knowing the mineralogy of the aggregate is fundamental, because avoiding the use of reactive aggregate prevents the appearance of this pathological manifestation. The objective of this work is to make a comparison between the different test methodologies for determining the expansion of concrete prisms by the accelerated method, Brazilian standard NBR 15577-7:2018 with RILEM AAR-4.1:2016 and modified AASHTO T 380:2018. The methodologies proposed by NBR and RILEM are very similar, differing only in the amount of aggregates and cement consumption. The method proposed by AASHTO differs in the packaging and time of the test. As the intention of this research is to evaluate the conditions of the test environment the same mold size was maintained for all evaluated methodologies. For the execution of all tests it was used a reactive large aggregate and innocuous small aggregate. The specimens tested by the NBR and RILEM methods pointed out that the large aggregate used is reactive at first reading, where the dimensional variation of the prisms was greater than 0.03%, the limit proposed by both standards. The prisms behaved in relation to the very similar expansion. The methodologies proposed by NBR and RILEM last 20 weeks, with an interval of 5 weeks for each reading. Analyzing the results found in the test that was obtained with the packaging environment as proposed by AASHTO T380: 2018 it is possible to conclude that the speed of occurrence of the expansion is greater than in the other methodologies. This is because the test conditions are very aggressive. This lasts for 56 days, readings are taken with small intervals between ages. After conducting the proposed tests and analyzing the data found, it is possible to verify that all the studied standards fulfill the main objective of characterizing the aggregate in terms of alkali silica reactivity.

Keywords: Alkalis Aggregate Reaction; Concrete prism test method; Reactivity potential.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 01	15
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Problema de Pesquisa e Justificativa	16
1.2 Objetivo Geral	18
1.3 Objetivos Específicos	18
1.4 Organização da Dissertação	19
CAPÍTULO 02	20
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Principais fatores influentes	20
2.1.1 A influência dos agregados	22
2.2 Ensaios normatizados para caracterização do agregado quanto a Reação Álcali Sílica.	25
2.2.1 Análise petrográfica do agregado	28
2.2.2 Ensaio pelo método acelerado das barras de argamassa	29
2.2.3 Ensaio pelo método acelerado a 60°C dos prismas de concreto	31
2.3.4 Ensaio pelo método dos prismas de concreto em miniatura	34
2.3.5 Principais diferenças normativas nos métodos propostos pela AASHTO, NBR e RILLEM	37
CAPÍTULO 03	38
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL	38
3.1 Equipamentos	39
3.2 Materiais	42
3.3 Metodologia dos prismas de concreto	45
3.3.1 Procedimento experimental das Famílias F1 e F2	46
3.3.2 Procedimento experimental das Famílias F3 e F5	46
3.3.3 Procedimento experimental da Família F4	49
CAPÍTULO 04	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
CAPÍTULO 05	67

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	67
CAPÍTULO 06	69
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	69
ANEXO 1 – ENSAIOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MECÂNICOS DO LOTE REFERENTE AO CIMENTO UTILIZADO	72
APÊNDICE 1 – ENSAIOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA	73
APÊNDICE 2 – CÁLCULO PARA DETERMINAR A QUANTIDADE DE NAOH A SER ADICIONADA À ÁGUA DE AMASSAMENTO PARA AUMENTAR O TEOR DE ÁLCALIS:	74

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Resumo de minerais reativos	22
Tabela 2: Relação de ensaios de laboratório para prevenção da RAA	24
Tabela 3: Conclusões dos pesquisadores para limites e períodos da análise para o método acelerado em prismas de concreto	30
Tabela 4: Granulometria requerida do material para ensaio	34
Tabela 5: Comparação entre os métodos da AASHTO T 380:2018, RILLEM AAR-4.1:2016 e a NBR 15577-7:2018	36
Tabela 6: Resumo dos ensaios realizados	37
Tabela 7: Ensaios químicos do cimento	42
Tabela 8: Granulometria requerida do material para ensaio	43
Tabela 9: Resumo dos ensaios em prismas de concreto	44
Tabela 10: Traço unitário em massa dos corpos de prova das famílias F1 e F2	45
Tabela 11: Traço unitário em massa dos corpos de prova das famílias F3 e F5	46
Tabela 12: Traço unitário em massa dos corpos de prova da família F4	48
Tabela 13: Variação dimensional das barras de argamassa fabricadas com agregado miúdo, em solução alcalina	53
Tabela 14: Variação dimensional das barras de argamassa fabricadas com agregado graúdo, em solução alcalina	54
Tabela 15: Variação dimensional dos prismas de concreto obtidos através dos ensaios	57
Tabela 16: Expansão média dos prismas de concreto nas primeiras idades	62
Tabela 17: Expansão média dos prismas de concreto nas últimas idades	62

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Interação que é necessária para ocorrência da RAA	21
Figura 2: Mecanismo da RAS	21
Figura 3: Característica do agregado antes e depois da reação	22
Figura 4: Representação das principais zonas de falhas de Pernambuco	24
Figura 5: Ensaio para caracterização do agregado	27
Figura 6: Representação do acondicionamento dos corpos de prova durante o ensaio	33
Figura 7: Representação de Relógio comparador digital	40
Figura 8: Barra-padrão encaixada ao suporte do relógio comparador	40
Figura 9: Recipiente de acondicionamento	41
Figura 10: Detalhe da instalação da resistência	41
Figura 11: Corpos de prova acomodados no tanque	42
Figura 12: Leitura do comprimento com o deflectometro	48
Figura 13: Tanque com corpos de prova da F2	48
Figura 14: Aspecto geral de um dos fragmentos de rocha	50
Figura 15: Aspecto geral da rocha vista sob o aumento da objetiva 2,5X	51
Figura 16: Seção delgada sob o aumento da objetiva 2,5X	52
Figura 17: Detalhe de um cristal de Feldspato sob o aumento da objetiva 10 X	53
Figura 18: Corpos de prova da família F4 ao final do ensaio	65
Figura 19: Exsudação do gel nos corpos de prova da família F4 ao final do ensaio	66

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Evolução da expansão média pela idade, das barras de argamassa ensaiadas	54
Gráfico 2: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto	58
Gráfico 3: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto nas famílias F3 e F5	59
Gráfico 4: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto nas famílias F1 e F2	60
Gráfico 5: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto na família F4	61
Gráfico 6: Evolução da velocidade média dos prismas de concreto nas primeiras idades	62
Gráfico 7: Evolução da velocidade média dos prismas de concreto nas últimas idades	63

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABCPT – Método acelerado brasileiro de prismas de concreto

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACPT - Método acelerado de prismas de concreto

AMBT - Método acelerado de barras de argamassa

ASTM - American Society for Testing and Materials

Ca (OH)₂ - Hidróxido de cálcio

CPs - Corpos-de-prova

CPT - Método de prismas de concreto

CP V-ARI: cimento Portland de alta resistência inicial

MBT - Método de barras de argamassa

MEV – Microscopia eletrônica de varredura

MPa - Mega Pascal

Na⁺ - Cátion sódio

Na₂O - Óxido de sódio

Na₂O_{eq} - Equivalente alcalino

NaOH - Hidróxido de sódio

NBRI – National Building Research Institute

OH⁻ - Íons hidroxilas

pH - Potencial de hidrogênio

RAA – Reação álcali-agregado

RAC – Reação álcali-carbonato

RAS – Reação álcali-sílica

RASS – Reação álcali-silicato

SiO₂ - Sílica

UR – Umidade relativa

CAPÍTULO 01

1 INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da indústria da construção civil, que utiliza em larga escala o concreto como material de sua linha de produção, é a garantia da durabilidade e desempenho das construções. Esse aspecto ganhou mais relevância no Brasil a partir do ano de 2013 com a publicação da norma de desempenho - NBR 15575 - que estabelece padrões de desempenho para os diversos subsistemas que integram um empreendimento habitacional. Neste particular, merecem destaques os seus requisitos de durabilidade que devem ser observados ao longo da vida útil do empreendimento que têm uma relação muito estreita com a qualidade de fabricação e execução do concreto estrutural.

Cerca de 70% do volume do concreto é composto por agregados. O uso de agregados inadequados traz como consequência uma rápida deterioração das estruturas de concreto quando sujeito a condições ambientais adversas. Os agregados não devem reagir com o cimento originando produtos expansivos que possam criar tensões internas na massa de concreto, que alterem ou diminuam as resistências mecânicas ou durabilidade dos materiais.

A reação álcalis-agregado (RAA) é uma reação química deletéria que ocorre em argamassas ou concretos. Esta pesquisa trata da Reação Álcali sílica (RAS) que é um tipo de reação que ocorre quando a sílica ativa é envolvida pelo hidróxido de cálcio dissolvido a partir dos álcalis que reagem para formar um gel amorfo. Quando em contato com água este gel expande, causando forças de tração interna que ocasionam processos de fissuração em estruturas de concreto.

Diferentes métodos têm sido propostos para a caracterização da reatividade dos agregados graúdos e miúdos utilizados na produção de concreto. Em geral, estes métodos possuem como principal objetivo averiguar a reatividade álcali-agregado de um determinado agregado num período curto de tempo.

Atualmente, vários centros de pesquisa têm estudado diversas formas de diagnosticar a presença da reação em estruturas degradadas e avaliar previamente o potencial reativo dos agregados empregados nas obras civis (MIZUMOTO, Camilo, 2009).

Pode-se considerar que a reação álcali-agregado possui um comportamento químico ainda pouco conhecido por ser uma reação que envolve elementos existentes tanto no cimento quanto no agregado. A recuperação de peças afetadas pela RAS demanda muitos custos e não tem garantia de eficácia e durabilidade. Por isso a adoção de estratégias visando à minimização dos efeitos de sua instalação nos elementos de concreto tem ganhado importância ao longo dos anos.

Como alternativa para evitar o surgimento da RAS, a maioria dos estudos desenvolvidos em laboratório visam o aprimoramento de ensaios realizados em agregados a serem empregados no concreto.

1.1 Problema de Pesquisa e Justificativa

Para a ocorrência da reação álcali-agregado é preciso presença simultânea de agregado reativo e umidade suficiente (entre 80 e 85%) e alta concentração de hidróxidos alcalinos nos poros do concreto. Quando os fatores intervenientes estão presentes, uma manifestação patológica expansiva se instala no elemento de concreto e o seu tratamento envolve operações detalhadas de elevada complexidade e custos que dificulta sua implementação na prática construtiva corriqueira.

Segundo Marzouk & Langdon (2003), elementos de concreto convencionais deteriorados pela RAA podem apresentar uma queda de 20 a 30% da resistência à compressão, e o módulo de elasticidade pode cair em até 80%. Sahmaran e Li (2016), diz que a pressão de expansão é tipicamente entre 3 a 4 MPa, porém há casos onde são atingidos 8 Mpa.

Apesar do impacto pouco significativo na resistência à compressão (Andrade et al., 2006) a perda na resistência à tração é relevante podendo, em geral, ser superior a 30% (Swamy e Al-Asali, 1988; Andrade et al, 2006; Figueirôa e Andrade, 2007; Sobrinho, 2012; Noel et al, 2016).

O aumento da ocorrência de manifestações patológicas em estruturas de concreto oriundas da reação álcali-agregado tem sido motivo de preocupação no meio técnico nacional. A falta de ensaios eficazes para avaliação dos materiais utilizados na elaboração dos concretos e argamassas e o desconhecimento do meio técnico a respeito do assunto, podem ser considerados como os fatores responsáveis pelo agravamento da atual situação (PECCHIO et al, 2006).

A ação preventiva necessária para evitar danos decorrentes da reação álcali-agregado está intimamente ligada ao grau de risco de sua ocorrência em função das condições de exposição e do tipo de estrutura ou elemento de concreto no qual o agregado vai ser empregado (ABNT NBR 15577-1:2018).

Existem alguns métodos que são utilizados para caracterização de reatividade do agregado. O método acelerado em barras de argamassa (AMBT – “Accelerated Mortar Bar Test”) é um dos métodos mais difundidos e utilizados no mundo todo, porém não há consenso entre o meio técnico sobre a confiabilidade desta avaliação para se estimar o potencial de reatividade em concretos estruturais.

O método acelerado em barras de argamassa vem demonstrando certa inconfiabilidade, pois têm sido encontrados resultados falso-negativos (agregados classificados como inócuos pelo ensaio e que ocasionaram efeitos deletérios em campo) e falso-positivos (agregados classificados como reativos pelo ensaio e que desempenharam bom comportamento em campo) (Sanchez, 2008).

O método de prismas de concreto (CPT – “Concrete Prism Test”) é considerado mais seguro, entretanto o tempo para a sua realização – um ano – tem inviabilizado sua utilização para a prática construtiva de estruturas de concreto.

Em junho de 2018, a Associação Brasileira de Normas Técnicas atualizou a norma NBR 15577, a principal alteração foi o acréscimo de um novo ensaio para caracterização de agregados quanto a RAS. O método para determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.

Existem diferentes metodologias de ensaios que podem ser realizados em concreto. Identificar qual metodologia é capaz de avaliar o grau de reatividade do agregado de forma mais assertiva ainda é um grande desafio.

Tornar os métodos mais rápidos de maneira segura e confiável é fundamental para inserir ensaios de caracterização de agregado na rotina das construções brasileiras. Após longos anos de estudos, já é consenso no meio técnico/científico que a solução ideal para combater a RAA é a prevenção (Sanchez, 2008).

1.2 Objetivo Geral

A pesquisa tem como objetivo realizar uma discussão sobre a caracterização da reatividade dos agregados graúdos utilizados na fabricação de concreto segundo as Normas NBR 15577:2018, AASHTO T 380:2018 Modificado e RILEM AAR-4.1:2016.

1.3 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos o trabalho se propõe a:

- Identificar as convergências e divergências existentes entre NBR 15577-7:2018, na recomendação RILEM AAR-4.1:2016 e na norma americana AASHTO-T-380:2018 modificado;
- Confeccionar corpos de prova de concreto conforme especificações recomendadas pela NBR 15577-7:2018 e submeter esses corpos de prova aos ensaios de reatividade preconizados;
- Confeccionar corpos de prova de concreto conforme especificações recomendadas pela RILEM AAR-4.1:2016 e submeter esses corpos de prova aos ensaios de reatividade preconizados;
- Confeccionar corpos de prova de concreto conforme especificações recomendadas pela AASHTO T 380:2018 e submeter esses corpos de prova aos ensaios de reatividade preconizados;
- Propor estratégias para aprimorar os métodos de caracterização do agregado quanto à reatividade álcali - agregado.

1.4 Organização da Dissertação

A Dissertação está estruturada em 6 (seis) capítulos. Nesse primeiro, são apresentadas a introdução, a declaração do tema da pesquisa e sua justificativa, a declaração do objetivo geral e dos objetivos específicos, as delimitações do trabalho e a organização da dissertação.

No Capítulo 2, apresenta-se a revisão bibliográfica com um estudo sobre a influência dos agregados na reação, características geológicas da região de onde o agregado foi retirado, o que é fundamental para entender porque Recife é um sítio rico para essa manifestação patológica. Por fim são apresentados métodos normatizados pela ACI, RILEM, ABNT e AASHTO. Estas são as principais metodologias utilizadas em diferentes partes do mundo para caracterizar o agregado quanto à reatividade álcali agregado.

No Capítulo 3 é apresentado o programa experimental, os materiais utilizados para a realização dessa dissertação. Caracterização do cimento, do agregado graúdo e miúdo utilizados na confecção dos concretos em cada tipo de ensaio. Em cada metodologia aplicada há o estudo do traço, para que haja um melhor entendimento da influência dos materiais em casa método.

No quarto Capítulo são apresentados os Resultados e discussões. Os resultados estão expressos em tabelas e a avaliação do comportamento dos corpos de prova é realizada através dos gráficos gerados com os resultados encontrados após o tratamento dos dados coletados no decorrer dos ensaios.

No Capítulo 5, apresentam-se as conclusões obtidas no desenvolvimento desta dissertação, sugerindo assim, alguns temas para desenvolvimento futuro.

Por último, no Capítulo 6 são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para obtenção de dados científicos citados nesta pesquisa.

CAPÍTULO 02

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Principais fatores influentes

A Reação Álcali-agregado é complexa e existem muitos fatores interagindo e parâmetros interdependentes que influenciam sua ocorrência. A primeira referência às expansões característica da reação álcali-agregado foi feita por HOLDEN (1935). Segundo Swamy (1992) não existe um único teste que possa garantir que nunca mais uma estrutura será afetada pela RAA. Até os dias atuais, não existe uma solução em termos proteção, recuperação e/ou reforço que seja consenso no meio técnico/científico (Sanchez, 2008).

Segundo GLASSER e TAYLOR (1997 apud HASPARYK, 2005) os álcalis (sódio e potássio) encontram-se no cimento na forma de sulfatos (solúveis) ou incorporados nas fases silicatos e aluminatos do clínquer (insolúveis), mas também podem ser fornecidos por fontes externas, como soluções de sulfato de sódio (Na_2SO_4), cloreto de sódio (NaCl), adições minerais ou mesmo agregados.

A RAA só se processa em presença de água, sendo que, no caso das estruturas de concreto, a fonte de água pode ser externa (meio ambiente) ou interna (excesso de água de amassamento que não participou da hidratação do cimento) (FIGUEIRÔA E ANDRADE, 2007).

A umidade necessária para ocorrência da reação é superior a 80%. Sabe-se que para a ocorrência da RAA é preciso presença simultânea de agregado reativo, umidade suficiente e uma quantidade mínima de álcalis, podendo ser provenientes do cimento ou de outras fontes, como mostra a Figura 1.

A concentração e distribuição dos componentes necessários para a ocorrência da reação, além da temperatura ambiente, têm significativa influência na taxa de reação e no seu efeito deletério ocasionado (ACI COMMITTEE 221, 1998).



Figura 1: Interação que é necessária para ocorrência da RAA

Fonte: Marins, 2021

A umidade é responsável pelo carregamento dos cátions de sódio e potássio e dos íons hidroxila para as partículas de sílica reativa existentes no agregado. Na Figura 2 é possível observar o mecanismo da Reação Álcali sílica (RAS).

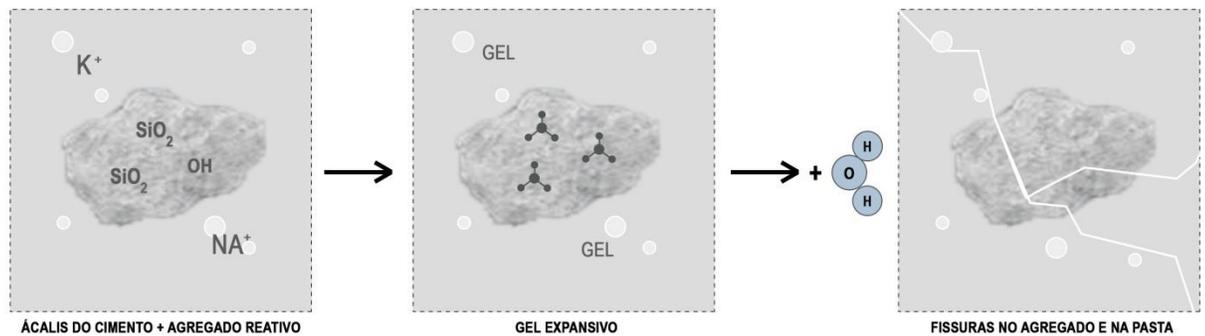


Figura 2: Mecanismo da RAS

Fonte: Marins, 2021

Uma vez que o gel é formado, este preenche os vazios que existem no concreto. A água presente no sistema “alimenta” esse gel que se torna um material expansivo e passa a exercer pressão no corpo ao seu redor, gerando tensões de tração no concreto. Esse processo pode durar vários anos e se não for tratado, pode de forma

progressiva, gerar deterioração grave nas estruturas acometidas. A Figura 3 ilustra as características do agregado antes e depois de sofrer a reação.

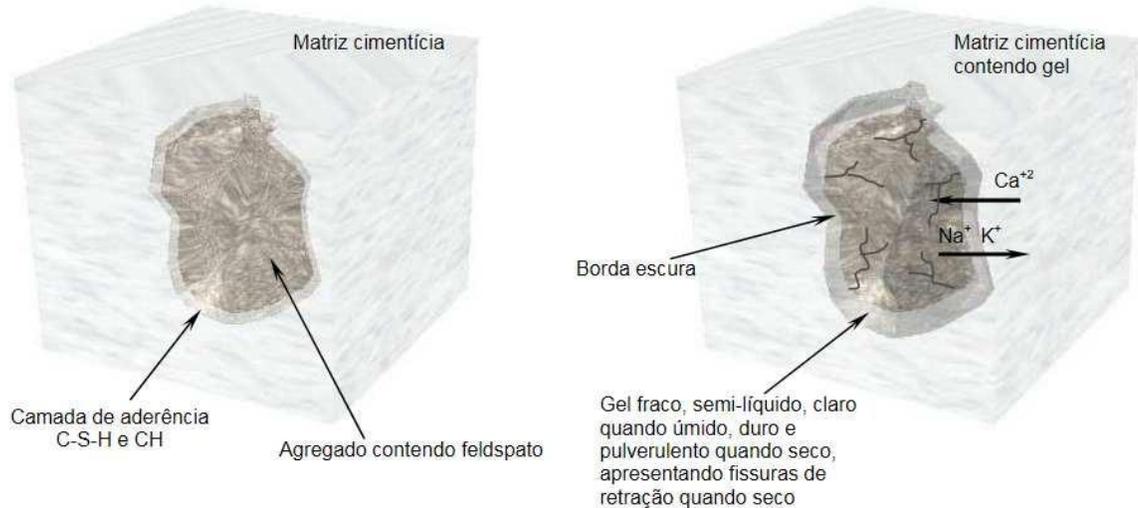


Figura 3: Característica do agregado antes e depois da reação

Fonte: COUTO, 2008

Uma baixa relação água/cimento reduz a porosidade do concreto e a movimentação da umidade interna. No entanto, maior será a concentração de íons alcalinos na solução dos poros e menor a quantidade de espaços vazios. Desse modo, a acomodação das tensões será menor, favorecendo a fissuração (MEHTA, P. K E MONTEIRO, P. J. M, 2014).

2.1.1 A influência dos agregados

A participação do agregado na RAA se dá na maioria das vezes, através da sílica. Este é o mineral dióxido de silício, está presente nas rochas, areias, quartzo, quartzito e em outros materiais. É muito presente nas jazidas de todo o mundo, tendo em vista que o silício é um elemento bastante abundante na crosta terrestre. Com base nos dados apresentados na parte 3 da NBR 15577:2018, podem-se resumir os minerais reativos como na Tabela 1.

Alguns agregados silicosos, quando constituídos de sílica amorfa mal cristalizada são atacados pela solução intersticial dos poros do concreto. A sílica liberada pelo

ataque reage, em seguida, com os álcalis Na⁺ e K⁺ desta solução intersticial, gerando, ao final, um gel (CARLES-GIBERGUES; HORMAIN, 2014).

Tabela 1: Resumo de minerais reativos

Mineral	Composição Química	Característica Física
Opala	(SiO ₂ .nH ₂ O)	Formado por um arranjo de esferas de sílica com estrutura cristalina pouco definida
Calcedônia	(SiO ₂)	Criptocristalina com expressivo número de poros submicroscópicos preenchidos por água e ar
Quartzo deformado	(SiO ₂)	Quartzo que apresenta deformações intracristalinas decorrentes de processos tectônicos
Quartzo microgranular	(SiO ₂)	Quartzo microcristalino
Tridimita e Cristobalita	(SiO ₂)	Polimorfos de alta temperatura do quartzo
Vidro ou produtos de devitrificação	Argilominerais e feldspato alcalino,	Vidro ou material criptocristalino
Vidro vulcânico	Composição silicática	Sem estrutura cristalina definida, ou seja, cristalograficamente amorfo.

Fonte: Adaptado da NBR 15577:2018

A escolha do agregado para as estruturas de concreto é de grande responsabilidade e não deve ser negligenciada. Para entender a complexidade dessa tarefa basta citar que alguns tipos de rochas ígneas, granitos e riolitos também podem ser fonte fornecedora de álcalis, por conter potássio ou sódio.

Em relação ao quartzo é importante observar que em geral não é reativo, porém a origem geológica das rochas representam distinções com relação à reatividade. Quando a rocha de origem sofre algum tipo de estresse, ou seja, pressão devido a movimentos tectônicos ocorre um metamorfismo dinâmico, chamado de catáclase. Esse processo provoca a trituração e a fragmentação das rochas, e então aparece o quartzo tensionado, que é reativo. (FIGUEIRÔA; ANDRADE, 2007)

A partir dos movimentos tectônicos surgem as falhas geológicas, onde o quartzito tensionado é largamente encontrado. O estado de Pernambuco tem uma grande falha conhecida como Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE). A Figura 4 ilustra as principais zonas de falhas existentes no estado de Pernambuco.

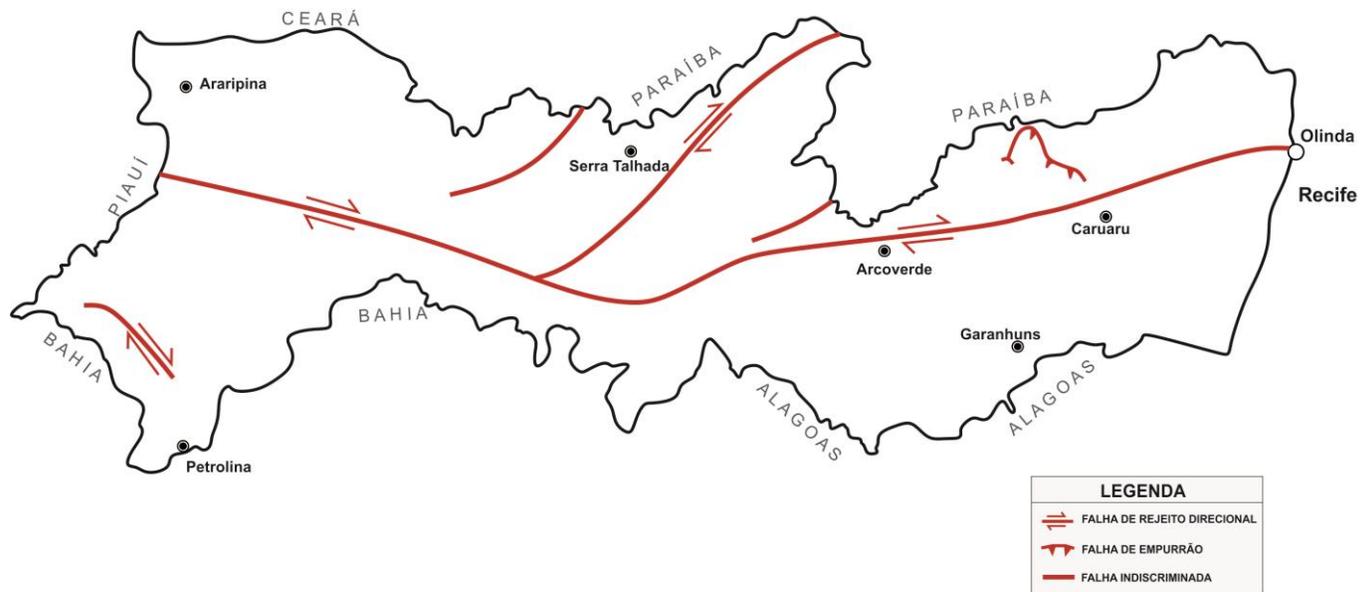


Figura 4: Representação das principais zonas de falhas de Pernambuco

Fonte: Marins, 2021

Esse fator geológico somado ao alto nível do lençol freático faz de Recife uma cidade muito propícia a sofrer com a RAS.

2.2 Ensaios normatizados para caracterização do agregado quanto a Reação Álcali Sílica.

A Tabela 2 apresenta uma relação de ensaios de laboratório desenvolvidos no mundo.

Tabela 2: Relação de ensaios de laboratório para prevenção da RAA

Tipo do método	Duração do ensaio
Análise Petrográfica ASTM C295:2019, RILEM AAR-1.1 e 1.2:2016, NBR 15577-3:2018	1 dia
Métodos das barras de argamassa	
ASTM C227:2010 (este método de teste foi retirado em outubro de 2018 devido ao seu uso limitado pela indústria)	6 meses/ 1 ano
AFNOR P 18-594:2015	2 a 4 semanas
RILEM AAR-2:2016	4 semanas
ASTM 1260:2014	4 semanas
NBR15577-4:2018	4 semanas
Métodos de Prismas de Concreto	
ASTM 1293:2020	1 ano
RILEM AAR-3:2016	1 ano
AFNOR P 18-587	8 meses
RILEM AAR-4.1:2016	5 meses
ASTM 1293	3 meses
NBR 15577-6: 2018	1 ano
NBR 15577-7: 2018	5 meses
Métodos de Mini Prismas de Concreto	8 semanas

Fonte: Marins, 2021

De acordo com a NBR 15577:2018, RILEM AAR-0: 2016 e a maioria das normas em vigor, o primeiro procedimento a ser realizado é a análise petrográfica do agregado, se nessa fase for encontrado minerais que caracterizam o agregado como potencialmente reativo, o próximo passo é a realização do ensaio pelo método acelerado das barras de argamassa.

Para uma melhor análise do potencial reativo é sugerida a realização do ensaio pelo método acelerado dos prismas de concreto, se esta metodologia apontar o agregado como reativo é indicado realizar alguma medida de mitigação como a troca do cimento, ou realizar adição mineral, também é considerado trocar o agregado, mas antes de optar pela troca do agregado, pode ser realizado o ensaio pelo método de longa duração dos prismas de concreto. As normas indicam que os ensaios devem seguir uma ordem de realização para uma caracterização adequada do agregado. A NBR 15577:2018 apresenta um fluxograma (Figura 5) que ilustra de maneira resumida a ordem dos ensaios.

Este fluxograma contém informações importantes para uma montagem adequada de planejamento de ensaios para a caracterização do agregado quanto à reatividade. Os limites de expansão e as idades dos ensaios apresentados neste fluxograma são análogos a outras normas vigentes no mundo.

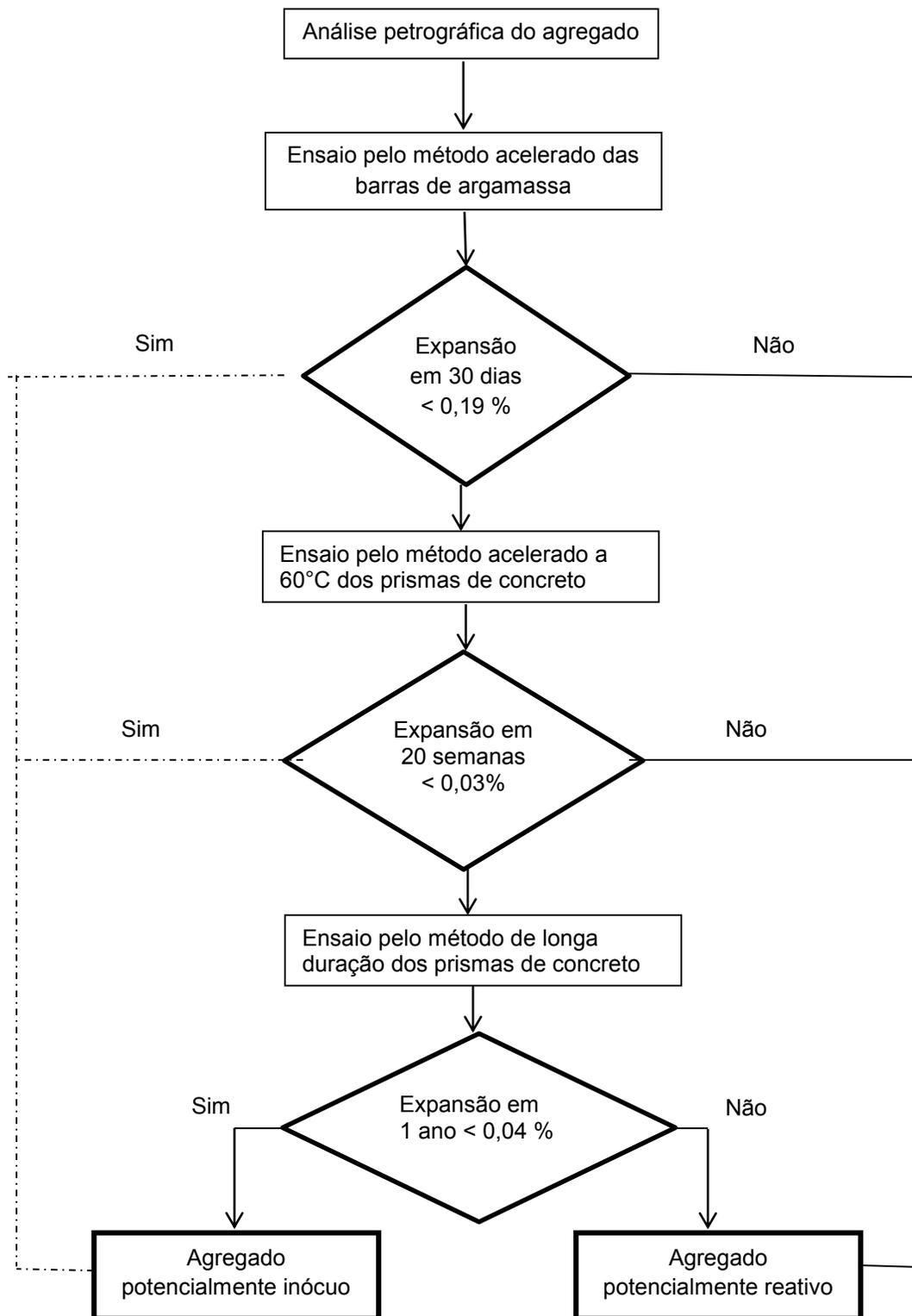


Figura 5: Ensaio para caracterização do agregado
Fonte: Adaptado da NBR 15577:2018

2.2.1 Análise petrográfica do agregado

Para conhecer o potencial reativo dos agregados a serem utilizados, a análise petrográfica é o primeiro ensaio que deve ser realizado. Esse método é preconizado pela norma americana ASTM C 295 pela brasileira NBR 15577 – 3 (ABNT, 2018); pela RILEM AAR – 1.1:2016.

Segundo as principais associações de normas técnicas ao redor do mundo, tais como a ASTM, RILEM e ABNT a investigação petrográfica pode ser realizada em quatro etapas: Análise macroscópica, análise através do microscópio estereoscópico (aumento de 16 vezes), do microscópio ótico (aumento de 200 a 400 vezes) e do microscópio eletrônico de varredura (MEV) (aumento de 1500 a 2000 vezes), segundo Silva (2007).

Trata-se de um ensaio rápido, identifica potencialidade reativa do agregado, mas não revela se este irá causar expansão. Deve-se realizar a análise com todos os microscópios (integração das diversas etapas) para obter dados e resultados confiáveis.

Em relação aos concretos, além de classificar os agregados, a análise petrográfica determina a ocorrência de feições ou características provenientes da reação álcali-agregado, tais como gel nos poros, bordas de reação ao redor dos agregados e presença de microfissuras.

A análise petrográfica isolada, cujo principal objetivo é a caracterização mineralógica da rocha, não é suficiente para avaliar a expansão potencial deletéria devido a RAS, mas fornece informações indispensáveis sobre as características geológicas do agregado como a presença de algum mineral que possa vir a causar reações expansivas.

2.2.2 Ensaio pelo método acelerado das barras de argamassa

Esse ensaio é descrito pela norma ASTM C 1260. A norma brasileira que preconiza esse método é a NBR 15577-4: 2018 e teve como principal referência à norma americana.

Na Europa esse método foi originalmente preparado por RILEM TC 106-AAR (Reação de álcali-agregado - testes acelerados) como TC 106-2, e tem sido revisado por RILEM TC 191-ARP (Reatividade alcalina e Prevenção - Avaliação, Especificação e Diagnóstico) e RILEM TC 219-ACS (Reação álcalis-agregado em Estruturas de Concreto) como AAR-2. Esta metodologia foi baseada no Método sul-africano do NBRI (National Building Research Institute).

O método acelerado de barras de argamassa (AMBT) foi desenvolvido por OBERHOLSTER & DAVIES (1986) no NBRI (National Building Research Institute), também conhecido como método sul-africano. Este é atualmente o método mais difundido e utilizado no Brasil e no mundo.

A finalidade deste método é caracterizar o agregado de forma rápida. Este consiste em investigar a reação álcali-agregado por meio da variação de comprimento das barras de argamassa.

O ensaio sugere a confecção de três barras de argamassa de dimensões 25 X 25 X 285 mm, sendo (250,00 +/- 2,5)mm de comprimento efetivo. No Brasil para fabricação da argamassa utiliza-se um cimento indicado pela Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), que contém um elevado equivalente alcalino para acelerar e padronizar o ensaio. O agregado empregado deve ser preparado cuidadosamente e seguindo as frações granulométricas descritas na norma. Todas as normas que preconizam esse ensaio afirmam a importância da utilização de cimento com alto teor de álcalis para a ocorrência da reação.

As barras de argamassa são moldadas com uma relação água/cimento de 0,47 em massa fixa e nas primeiras 24 horas são estocadas em imersão em água a 80°C. Após esse período as barras são depositadas em uma solução alcalina de NaOH com concentração 1N e temperatura de 80° C. Isto com o objetivo de simular as "condições péssimas" para submissão do agregado.

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

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

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

O método acelerado em barras de argamassa é largamente utilizado no mundo. Porém sua confiabilidade vem sendo questionada no meio acadêmico devido a incoerências em alguns resultados com certos tipos de agregado.

Segundo Fournier, Nkinamubanzi, Lu, Thomas, Folliard e Ideker (2006), através da análise de vários agregados, puderam concluir que: Quando da utilização desse método, pode-se ter dois tipos de erros de classificação: Falso-negativos e falso-positivos.

Vale citar que são conhecidas algumas estruturas de concreto, como as barragens do complexo hidrelétrico de Paulo Afonso, que foram deterioradas pela RAA, que tiveram seus agregados testados por esse método e no ensaio de laboratório foi apresentado resultados expansivos menores do que 0,19% aos 30 dias (Limite proposto pela NBR 15577).

O intuito desse método é acelerar o processo químico da RAA. Porém para isso foi criada uma exposição dos prismas de argamassa a uma agressividade ambiente muito elevada. Segundo LEE, LIU & WANG (2004), o método AMBT é muito rigoroso, podendo penalizar agregados que possuem desempenho em campo satisfatório.

Segundo FOURNIER, NKINAMUBANZI, LU, THOMAS, FOLLIARD e IDEKER (2006), o ambiente proporcionado pelo ensaio AMBT é bastante agressivo (NaOH- 1N a 80° C).

2.2.3 Ensaio pelo método acelerado a 60°C dos prismas de concreto

Em 1992 Ranc e Debray propuseram aumentar a temperatura do método dos prismas de concreto para 60°C, com a finalidade de aumentar a taxa de expansão e assim, tornar o ensaio mais rápido. Dando assim origem a uma nova metodologia de pesquisa que despertou diversos pesquisadores, como mostra a tabela 3, a aplicarem o método em diferentes tipos de agregado, de muitas localidades com o intuito de encontrar limites para tornar possível uma correta classificação dos agregados quanto à reatividade a partir da relação tempo x expansão. Na Tabela 3 é possível observar alguns dos resultados encontrados por esses pesquisadores.

Tabela 3: Conclusões dos pesquisadores para limites e períodos da análise para o método acelerado em prismas de concreto

Autores	Limites de referência (expansão X tempo)	Limite proposto a 60°
Ranc e Debray (1992)	0,04% aos 8 meses (38°C)	0,015% a 4 semanas, ou 0,08% a 8 semanas
Bolotte (1992)	0,04% aos 8 meses (38°C)	0,024% a 8 semanas
Murdock e Blanchette (1994)	0,04% aos 12 meses (38°C)	0,02% a 8 semanas ou 0,03% a 13 semanas
De Grosbois e Fontaine (2000)	0,04% aos 12 meses (38°C)	. 0,04% a 13 semanas para agregados carbonáticos; . 0,025% para agregados ígneos e metamórficos
Touma et al. (2001)	0,04% aos 12 meses (38°C)	0,04% a 13 semanas

Fonte : Fournier, Chevrier, Grosbois, Lisella, Shehata, Folliard, Ideker, Thomas, Baxter, 2004

Embora seu desenvolvimento tenha iniciado em meados de 1992 por Ranc e Debray, este método ainda não é largamente utilizado. No Brasil este foi introduzido a partir da norma NBR 15577-7 no ano de 2018. É um ensaio que transmite confiabilidade, tendo em vista que o meio ambiente criado, os corpos de prova ficam expostos à umidade em uma temperatura constante de 60°C, não é tão agressivo quanto no método acelerado em barras de argamassa, onde os corpos de prova ficam imersos em solução alcalina a 80°C, e tende a ser mais próximo da realidade pelo fato de os corpos de prova serem fabricados utilizando concreto. A elaboração dessa parte da norma brasileira foi baseada na Norma RILEM Recommended Test Method AAR-4.1, com algumas pequenas diferenças.

O equivalente alcalino do concreto deve ser igual a 1,25% na massa, sendo dissolvido NaOH a 1N na água de amassamento. Essa adição alcalina é introduzida devido à necessidade da obtenção de teores alcalinos mais elevados, no intuito de se acelerar o início da expansão em prismas de concreto.

Ambas as normas sugerem que sejam moldados pelo menos 3 corpos de prova prismáticos, utilizando cimento com alto teor alcalino. Os prismas são submetidos a um ambiente úmido, com temperatura igual a 60°C. A norma brasileira sugere que o traço para fabricação do concreto tenha consumo de cimento = $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$ e relação água cimento = 0,45. Já na RILEM, o consumo de cimento deve ser = 440 kg/m^3 e a relação a/c = 0,50.

Tanto na metodologia proposta por RILEM AAR-4.1:2016, quanto na NBR 15577-7:2018 os corpos de prova não ficam submersos como no método acelerado em barras de argamassa, aqui nesse método em concreto é criado um ambiente com umidade suficiente como é ilustrado na Figura 6 para a ocorrência da RAA. Os moldes para a realização desse ensaio devem ter seção quadrada, com $(75,00 \pm 0,7) \text{ mm}$ de lado e com $(250,00 \pm 2,5) \text{ mm}$ de comprimento efetivo, como proposto pela NBR 15577 – 7:2018 e RILEM AAR-4.1:2016.

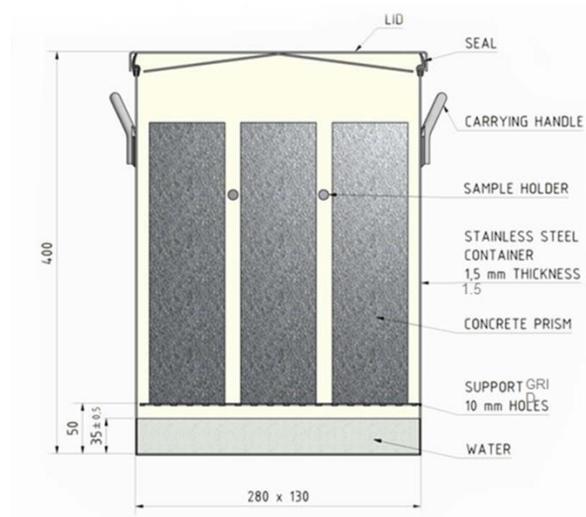


Figura 6: Representação do acondicionamento dos corpos de prova durante o ensaio

Fonte: RILEM

O limite de expansão para um agregado ser considerado reativo segundo a NBR 15577-7:2018 é 0,03% em 20 semanas, assim como na RILEM AAR-4.1:2016.

2.2.4 Ensaio pelo método de longa duração dos prismas de concreto

O método que apresenta resultados mais confiáveis é o método dos prismas de concreto (CPT), porém é um ensaio pouco realizado devido ao tempo de espera para avaliação de possíveis reações, que varia de um a dois anos. Esse método é preconizado pela ASTM C 1293, CSA A23.2-14A e NBR 15577-6:2018, consiste em avaliar, por meio da variação do comprimento de prismas de concreto, a susceptibilidade de um agregado em participar ou não da reação.

Para a realização do ensaio, são confeccionados 3 corpos de prova prismáticos de concreto com dimensões de (75 x 75 x 285)mm. A relação a/c deve ser = 0,45 em massa, o consumo de cimento deve ser de 420 kg/m³ e um equivalente alcalino de 1,25% na massa, sendo dissolvido NaOH a 1N na água de amassamento.

De acordo com a ASTM C 157, os prismas de concreto devem ser estocados em recipiente hermeticamente fechado, numa sala com ambiente de atmosfera saturada de vapor de água, a uma temperatura de 38°C.

Para avaliar a reatividade potencial do agregado graúdo, utilizar agregado miúdo não reativo. A leitura de referência deve ser realizada após o desmolde dos prismas na idade de 24 horas em câmara úmida, permanecendo as amostras em ambiente climatizado com temperatura de (38 ± 2) °C durante 1 ano. Serão feitas leituras aos 7, 28 e 56 dias assim como aos 3, 6, 9 e 12 meses. Caso seja necessário realizar leituras adicionais, sugere-se que sejam feitas em intervalos de 2 meses.

O limite de expansão pela NBR 15577-6: 2018 é 0,04% ao fim do ensaio, ou seja, se o resultado obtido for maior ou igual a 0,04% o agregado é considerado reativo.

2.3.4 Ensaio pelo método dos prismas de concreto em miniatura

A falta de confiabilidade do teste normatizado pela ASTM C 1260 (método acelerado das barras de argamassa) devido a agressividade ambiente criada no ensaio (NaOH- 1N a 80° C), estimulou o desenvolvimento de novos procedimentos de testes que são rápidos e considerados confiáveis na avaliação da reatividade do agregado e eficácia das medidas de mitigação da RAS.

O método dos prismas de concreto em miniatura (MCPT) foi desenvolvido incorporando recursos selecionados dos métodos de teste ASTM C 1260 e ASTM C 1293 (método de longa duração dos prismas de concreto) para garantir uma previsão confiável do desempenho da expansão dos agregados e de mitigação da RAS enquanto obtém os resultados dentro de um prazo razoável e de valor para a indústria da construção.

Esse método foi normatizado em abril de 2016 pela American Association of State Highway and Transportation Officials, AASHTO T 380, que é uma Associação Norte-Americana de especialistas rodoviários e de transporte. É um órgão de definição de padrões que publica especificações, protocolos de testes e diretrizes que são usadas no projeto e construção de rodovias nos Estados Unidos.

O ensaio tem como objetivo avaliar o potencial de um agregado graúdo ou miúdo para se expandir de maneira prejudicial devido à reatividade álcali-silica. A metodologia consiste em moldar prismas de concreto em miniatura, tem duração de 56 dias (8

semanas). Podendo ser estendido por mais 28 dias (4 semanas), quando o agregado pode ser considerado com baixa reatividade.

O procedimento deste método baseia-se em moldar corpos de prova prismáticos, os moldes devem estar em conformidade com as normas ASTM C157/ C157M e ASTM C490 C490M e devem ter seção transversal quadrada de 50,00 +/- 0,7 mm. Para avaliar a reatividade de um agregado graúdo deve-se utilizar um agregado miúdo inócuo, que desenvolveu uma expansão no método MCPT menor que 0,030% aos 56 dias. Para realização do ensaio deve-se realizar o preparo correto dos agregados.

A granulometria pode ter grande influência nos resultados e a AASHTO T 380 indica que para avaliar o agregado graúdo, a maior fração granulométrica do agregado deve ser de 12,5 mm. O agregado graúdo deve passar por peneiramento e a sua fração granulométrica dever ser como conta na tabela 4.

Tabela 4: Granulometria requerida do material para ensaio de mini prismas de concreto

Peneira com abertura de malha		Quantidade de material em massa
Passante	Retido	%
12,5 mm	9,5 mm	57,5
9,5 mm	4,75 mm	42,5

Fonte: AASHTO T 380:2018

O concreto é fabricado com relação água/cimento igual a 0,45 em massa, o consumo de cimento deve ser de 420 kg/m³ e um equivalente alcalino de 1,25% na massa, sendo dissolvido NaOH a 1N na água de amassamento. Nesse método os corpos de prova ficam totalmente imersos em solução de NaOH com concentração 1N e temperatura de 60° C. Para a grande maioria dos agregados, este método caracteriza a reatividade do agregado em 8 semanas. As leituras devem ser realizadas nas idades 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42 e 56 dias. Com agregados de reação lenta, medições adicionais podem ser necessárias a 70 e 84 dias.

Com o objetivo de melhorar a eficácia do método, a AASHTO T380:2018 utiliza as seguintes diretrizes utilizadas na classificação dos agregados:

- a) Agregados muito altamente reativos: São considerados aqueles agregados que quando presentes em concreto com carga alcalina típica exibem sinais de desgaste de RAS no campo, normalmente em uma idade inferior a 5 anos;
- b) Agregados reativos moderados: São aqueles que quando presentes em concreto com carga alcalina típica exibem sinais de desgaste de RAS no campo, normalmente entre 5 e 10 anos;
- c) Agregados com baixa ou lenta reatividade: São aqueles que quando presentes em concreto com carga alcalina típica exibem sinais de desgaste de RAS no campo, tipicamente com idade superior a 10 anos.

É sugerido que em todos os estágios do ensaio, quando as leituras são realizadas, efetuar simultaneamente a pesagem dos corpos de prova. A mudança de peso na amostra de teste não é usada para caracterizar o agregado quanto à reatividade álcali-agregado, mas pode servir como um indicador para estabelecer a consistência dos resultados do ensaio e para identificar o início de qualquer comportamento inesperado dos corpos de prova durante o andamento do ensaio.

Critérios propostos pela AASHTO T 380:2018 de avaliação aos 56 dias:

- Não reativo se: Expansão $<0,03\%$
- Baixa reatividade se: $0,031\% < \text{Expansão} < 0,04\%$
- Reativo moderado se: $0,041\% < \text{Expansão} < 0,12\%$
- Altamente reativo se: $0,121\% < \text{Expansão} < 0,24\%$
- Muito altamente reativo se: Expansão $> 0,24\%$

Quando as expansões neste método de ensaio são maiores que o limite $0,040\%$, o agregado é considerado como reativo. No caso de agregados de baixa reatividade, expansão percentual entre $0,031$ e $0,040\%$, faz-se necessário um adicional de 28 dias (4 semanas) para avaliar seu potencial reativo com base na taxa de expansão.

2.3.5 Principais diferenças normativas nos métodos propostos pela AASHTO, NBR e RILLEM

Há diferentes metodologias sendo estudadas atualmente com o objetivo de obter mais conhecimento sobre a reação álcali-agregado. Para realização deste trabalho foram analisadas as metodologias propostas pela AASHTO, por RILLEM e pela NBR.

A AASHTO T 380:2018 promete classificar um agregado como reativo ou inócuo em apenas 8 semanas. Prazo inferior que o proposto pelo método CPT (365 dias), e pelos métodos acelerados propostos pela ABNT NBR e por RILLIEM.

A RILLEM AAR-4.1:2016 e a NBR 15577-7:2018 possuem grandes similaridades, porém as pequenas diferenças que existem entre elas podem apontar para o elemento de maior significância dentro da reação.

Tabela 5: Comparação entre os métodos da AASHTO T 380:2018, RILLEM AAR-4.1:2016 e a NBR 15577-7:2018

Metodologia	Corpo de prova	Água/Cimento	Tempo de duração	Condições de cura
AASHTO T 380:2018	(50,0)mm de lado e 285 mm de comprimento	0,45	56 dias	Corpos de prova imersos em solução alcalina a 60° C
RILLEM AAR-4.1:2016	(75,0 ± 0,7)mm de lado e 285 mm de comprimento	0,50	20 semanas	Corpos de prova em ambiente úmido a 60°C
NBR 15577-7:2018	(75,0 ± 0,7)mm de lado e 285 mm de comprimento	0,45	20 semanas	Corpos de prova em ambiente úmido a 60°C

O procedimento do método proposto pela AASHTO T 380:2018 consiste em moldar corpos de prova prismáticos, com moldes de seção quadrada, com (50,00) mm de lado e com (285) mm de comprimento, sendo (250,00 +/- 2,5)mm de comprimento efetivo.

CAPÍTULO 03

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

O programa experimental abordou a caracterização do agregado graúdo através dos métodos de prismas de concreto conforme a tabela 6.

Tabela 6: Resumo dos ensaios realizados

Família de corpos de prova	Ensaio realizado para caracterização quanto à reatividade do agregado (3 corpos de prova por família)
Família 1 (F1)	Corpos de prova de referência utilizando o traço proposto pela AASHTO T 380:2018 e pela NBR 15577-7:2018.
Família 2 (F2)	Copos de prova de referência com traço proposto pela RILEM AAR-4.1:2016.
Família 3 (F3)	Método acelerado a 60° dos prismas de concreto, utilizando a proposta da RILEM AAR-4.1:2016.
Família 4 (F4)	Método dos prismas de concreto com as condições do ambiente de acondicionamento dos corpos de prova como proposto pela norma AASHTO T 380:2018, porém adotando molde prismático de seção quadrada, com (75,00 +/- 0,7) mm de lado e com (250,00 +/- 2,5)mm de comprimento efetivo.
Família 5 (F5)	Método acelerado a 60° dos prismas de concreto, utilizando a proposta da NBR 15577-7:2018.

O método acelerado a 60° dos prismas de concreto passou a ser utilizado no Brasil após a normatização do método pela ABNT no ano de 2018. Esta metodologia é apresentada na parte 7 da NBR 15577:2018, teve como inspiração a RILEM AAR-4.1:2016. Já o método dos mini prismas de concreto proposto pela AASHTO T 380:2018 não é realizado no Brasil, o que inviabilizou a realização deste ensaio utilizando os moldes dos corpos de prova como a AASHTO indica. Além disso, o principal objetivo deste trabalho é avaliar o comportamento do agregado graúdo reativo

no concreto quando exposto às diferentes condições ambientes propostas pelas normas estudadas.

Por conseguinte é importante salientar que os moldes utilizados para a realização das metodologias dos ensaios em prismas de concreto foi o molde proposto pela NBR 15577 – 7:2018 e RILEM AAR-4.1:2016 Prismático de seção quadrada, com $(75,00 \pm 0,7)$ mm de lado e com $(250,00 \pm 2,5)$ mm de comprimento efetivo.

A análise petrográfica foi realizada de maneira paralela no agregado graúdo com o intuito de comprovar que a amostra escolhida era potencialmente reativa e estava apta para ser utilizada no programa proposto por esse trabalho, através da detecção de minerais potencialmente reativos contidos nas amostras do agregado graúdo utilizado. Os agregados graúdo e miúdo também foram submetidos ao ensaio de barras de argamassa. Visto que para avaliar o comportamento do concreto fabricado com agregado graúdo reativo é fundamental utilizar um agregado miúdo inócuo.

3.1 Equipamentos

Para execução dos ensaios propostos foram utilizados os seguintes equipamentos:

- a) Relógio comparador digital
- b) Barra-padrão
- c) Recipiente de acondicionamento
- d) Moldes

As variações de comprimento dos prismas de concreto foram determinadas por meio de um relógio comparador digital com resolução de 0,001 mm, representado na Figura 7.

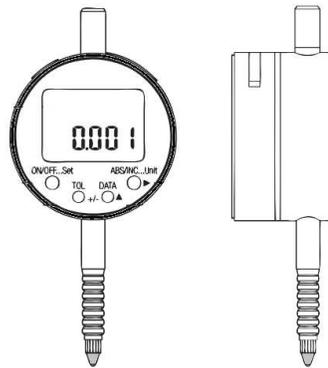


Figura 7: Representação de Relógio comparador digital

Fonte: Marins, 2021

A barra-padrão (Figura 8) tem a função de verificar o comparador de comprimento. Para um controle adequado, a barra deve ter comprimento total de $(295,0 \pm 1,5)$ mm, e seu coeficiente de dilatação linear não pode ser maior do que $2 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$. A barra-padrão deve ter suas extremidades polidas para se adaptar às extremidades do suporte do comparador.



Figura 8: Barra-padrão encaixada ao suporte do relógio comparador

Fonte: Marins, 2021

O recipiente utilizado foi um tanque fabricado com material resistente a elevadas temperaturas. Com o intuito de evitar contato entre os corpos de prova e o equipamento, foi instalada uma chapa de polietileno de alta densidade com furos para acomodação dos corpos de prova, como mostra a Figura 9. Foi instalado neste tanque uma resistência e um termostato, apresentados na Figura 10, para que a temperatura se mantivesse constante (60°C) por todo o ensaio.

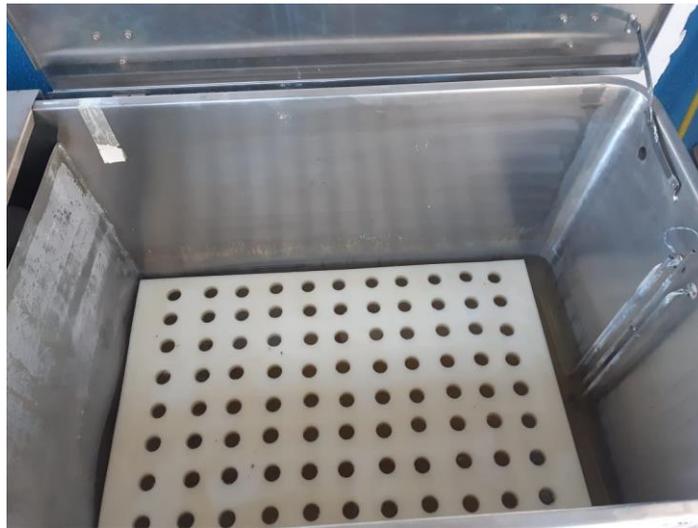


Figura 9: Recipiente de acondicionamento

Fonte: Marins, 2021



Figura 10: Detalhe da instalação da resistência

Fonte: Marins, 2021

Para o andamento deste trabalho foi realizada uma divisão central no tanque, para criação de dois ambientes diferentes como mostra a Figura 11. Essa divisão fez-se necessária devido ao ambiente de exposição ser diferente nas metodologias estudadas.



Figura 11: Corpos de prova acomodados no tanque

Fonte: Marins, 2021

Como os prismas de concreto devem ter seção quadrada, com $(75,0 \pm 0,7)$ mm de lado e 285 mm de comprimento. O comprimento efetivo de medida do molde prismático é $(250,0 \pm 2,5)$ mm.

3.2 Materiais

Para a fabricação do concreto e execução dos ensaios propostos foram utilizados os seguintes materiais:

- a) Cimento
- b) Agregado miúdo
- c) Agregado graúdo
- d) Hidróxido de sódio

O cimento adotado para execução dos ensaios foi o cimento Portland do tipo/ classe CP V – ARI. Esse tipo de cimento foi escolhido por ser o tipo de cimento brasileiro com maior conteúdo alcalino.

A caracterização do cimento foi obtida junto ao fabricante, os resultados encontrados podem ser observados na tabela 7.

Tabela 7: Ensaio químicos do cimento

%SiO ₂	Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%SO ₃	%Na ₂ O	%K ₂ O
NBR 14656:01							
NA (*)	NA (*)	NA (*)	NA (*)	≤6,50	≤ 4,5	NA (*)	NA (*)
18,11	4,58	2,27	59,77	4,98	4,32	0,17	0,91
NA: Sem exigência de norma							
(*) ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Requisitos - primeira edição: 03.07.2018 - Aprovada pelo Comitê ABNT.							

Para encontrar o equivalente alcalino do cimento aplica-se a fórmula de equivalente alcalino (EA), expressa pela equação de Bogue ($Na_2O_{eq} = Na_2O\% + 0,658 * K_2O\%$), sendo o teor de Na₂O encontrado na análise química igual a 0,17% e o teor de K₂O é 0,91%. Fazendo as devidas substituições na fórmula o resultado obtido foi de 0,768%.

O agregado miúdo utilizado na fabricação do cimento foi uma areia natural, grossa, inócua, ensacada, comercializada em Recife. Para caracterização física do agregado foram realizados os ensaios de granulometria, determinação de materiais finos, e teor de argila e torrões. A partir destes ensaios foram encontrados os seguintes resultados:

- Dimensão máxima característica = 4,75mm;
- Determinação do material fino que passa através da peneira 75µm, por lavagem = 2,04%;
- Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis = 0,57%.

As fórmulas utilizadas para obtenção dos resultados desses ensaios encontram-se nas tabelas do Apêndice 1.

Para avaliação do agregado miúdo quanto à reatividade foi realizado o ensaio acelerado em barras de argamassa. Para a realização desse ensaio é fundamental o preparo adequado dos agregados. Estes precisam obedecer a granulometria requerida pela norma (Tabela 8).

Tabela 8: Granulometria requerida do material para ensaio

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1)		Quantidade de material em massa	
Passante	Retido	%	g
4,75 mm	2,36 mm	10	99,0
2,36 mm	1,18 mm	25	247,5
1,18 mm	600 µm	25	247,5
600 µm	300 µm	25	247,5
300 µm	150 µm	15	148,5

Fonte: ABNT NBR 15577 – 4:2018

O ensaio acelerado em barras de argamassa foi executado seguindo as recomendações da norma NBR 15577-4:2018. A execução do ensaio consiste na moldagem de 3 barras de argamassa com relação água cimento igual a 0,47 em massa, 440 gramas de cimento e 990 gramas de agregado. Os corpos de prova foram moldados utilizando moldes prismáticos com dimensões 25 X 25 X 285 mm como recomenda a norma.

O agregado graúdo utilizado é proveniente de uma pedreira situada na rodovia BR – 232, do município de Vitória de Santo Antão – PE, região localizada na Zona de Cisalhamento Pernambuco Leste (ZCPE). Para caracterização física foi realizado o ensaio de granulometria e de massa específica. A partir destes ensaios foram encontrados os seguintes resultados:

- Dimensão máxima característica = 19,00mm;
- Massa unitária no estado compactado seco = 1,379 kg/L.

Para execução do programa experimental foi realizada análise petrográfica no agregado graúdo. A análise foi executada, tendo como base a parte 3 da norma NBR 15777: 2018. O microscópio utilizado foi o Olympus BX40. O material utilizado para análise foi coletado de duas frentes de lavras. Foram recolhidos dois fragmentos de rocha fresca, do tipo pedra britada. Os fragmentos mediam 19 cm X 17 cm X 9 cm e 21

cm X 8 cm X 7 cm. A partir desses fragmentos foram preparadas as lâminas delgadas para observação com microscópio petrográfico. Nesta fase do programa experimental foram encontrados minerais potencialmente reativos, que estão apresentados no capítulo 4.

Para uma maior confiabilidade nos resultados da pesquisa, foi realizado ensaio acelerado em barras de argamassa também no agregado graúdo. O teste foi executado seguindo todas as recomendações da parte 4 da norma NBR 15577: 2018.

Com o objetivo de elevar o teor de álcalis do concreto nos métodos dos prismas, foi utilizado hidróxido de sódio em pérolas na água de amassamento do concreto. Para o método sugerido pela AASHTO T380:2018, este foi utilizado também na água para criar uma solução alcalina, onde os corpos de prova permaneceram por todo o ensaio.

3.3 Metodologia dos prismas de concreto

Os ensaios nos prismas de concreto foram realizados utilizando três diferentes metodologias, propostas por normas utilizadas em diferentes países. Para melhor entendimento do procedimento experimental foi desenvolvida a Tabela 9.

Tabela 9: Resumo dos ensaios em prismas de concreto

Família	Acondicionamento dos Corpos de prova	Relação Água/ Cimento	Consumo de cimento	Tempo de duração	Metodologia
F1	Corpos de prova imersos em água a temperatura ambiente	0,45	430 kg/m ³	56 dias/ 20 semanas	Referência – Utilizando os traços: AASHTO T 380:2018 modificado* e NBR 15577-7:2018
F2	Corpos de prova imersos em água a temperatura ambiente	0,50	440 kg/m ³	20 semanas	Referência - Traço: RILLEM AAR-4.1:2016
F3	Corpos de prova em ambiente úmido a 60°C	0,50	440 kg/m ³	20 semanas	RILLEM AAR-4.1:2016

F4	Corpos de prova imersos em solução de NaOH (1,0 ± 0,1)N a 60° C	0,45	430 kg/m ³	56 dias	AASHTO T 380:2018 modificado*
F5	Corpos de prova em ambiente úmido a 60°C	0,45	430 kg/m ³	20 semanas	NBR 15577-7:2018

* AASHTO T 380:2018 modificado devido à alteração realizada na seção transversal dos corpos de prova para: (75,00+/- 0,7) mm de lado e com (250,00 +/- 2,5)mm de comprimento efetivo.

3.3.1 Procedimento experimental das Famílias F1 e F2

Os corpos de prova das famílias F1 e F2 foram fabricados para realização das leituras de referência. Os traços utilizados para fabricação do concreto utilizado nas famílias F1 e F2 encontram-se na Tabela 10.

Tabela 10: Traço unitário em massa dos corpos de prova das famílias F1 e F2

Família	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (kg)
F1	1	1,83	2,25	0,45
F2	1	1,79	1,88	0,50

Os corpos de prova foram desmoldados após cura de 24 horas em câmara úmida. Após a desmoldagem estes foram colocados em um recipiente com água em temperatura ambiente, onde permaneceram por todo o ensaio. Sendo retirados apenas para realização das leituras.

3.3.2 Procedimento experimental das Famílias F3 e F5

O concreto dos corpos de prova da família F3 foram fabricados seguindo as especificações da RILLEM AAR-4.1:2016. Já os corpos de prova da família F5 foram fabricados utilizando o traço proposto pela NBR 15577-7:2018.

Durante a execução do concreto de ambas as famílias, com o objetivo de elevar o teor de álcalis do concreto para 1,25% de Na₂O, como é imposto pelas normas, foi

dissolvido uma quantidade específica de hidróxido de sódio (NaOH) na água de amassamento. O cálculo para determinar a quantidade de NaOH a ser adicionada à água de amassamento para aumentar o teor de álcalis encontra-se no apêndice 2.

A Tabela 11 apresenta os traços utilizados para fabricação dos concretos das famílias F3 e F5.

Tabela 11: Traço unitário em massa dos corpos de prova das famílias F3 e F5

Família	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (kg)	NaOH (kg/m ³)
F3	1	1,79	1,88	0,50	2,74
F5	1	1,83	2,25	0,45	2,67

Os corpos de prova da F5 foram moldados em um único dia e os corpos de prova da F3 foram moldados no dia seguinte. Ambas as famílias foram expostas as condições de cura nos moldes em câmara úmida durante as primeiras 24 horas. Após esse período, os corpos de prova foram desformados e identificados de forma que as leituras fossem feitas sempre na mesma posição.

A primeira leitura foi realizada logo após a desmoldagem dos corpos de prova, estes foram devidamente pesados e medidos com o relógio comparador, como mostra a Figura 12. Após a realização da primeira leitura, os corpos de prova foram imersos em água em temperatura ambiente por 30 minutos e o processo de leitura e pesagem foi repetido.



Figura 12: Leitura do comprimento com o deflectometro

Fonte: Marins, 2021

Após a realização das leituras iniciais, os corpos de prova foram colocados no recipiente para armazenamento (Figura 13), conforme ambas as normas, os prismas foram dispostos verticalmente dentro do tanque. Após terem sido colocados no ambiente criado dentro do tanque, com umidade suficiente e temperatura constante de 60°C, os corpos de prova eram retirados apenas para realização das leituras e pesagens. As leituras foram realizadas nas idades 5, 10, 15 e 20 semanas.



Figura 13: Tanque com corpos de prova da F3

Fonte: Marins, 2021

3.3.3 Procedimento experimental da Família F4

Esse teste é uma adaptação do método proposto pela AASHTO T 380:2018. Todo o procedimento foi executado segundo a norma, porém, o tamanho dos moldes utilizados na execução desse ensaio foi diferente do especificado devido à dificuldade em encontrar os moldes no Brasil e também para manter as mesmas características físicas em todos os corpos de prova. O molde utilizado foi o mesmo em todas as metodologias, prismático de seção quadrada, com $(75,00 \pm 0,7)$ mm de lado e com $(250,00 \pm 2,5)$ mm de comprimento efetivo, como já citado anteriormente.

Para fabricação do concreto utilizado, o traço unitário em massa utilizado está apresentado na Tabela 12.

Tabela 12: Traço unitário em massa dos corpos de prova da família F4

Família	Cimento (kg)	Agregado miúdo (kg)	Agregado graúdo (kg)	Água (kg)	NaOH (kg/m ³)
F4	1	1,83	2,25	0,45	2,67

Os corpos de prova da F4 foram moldados em um único dia, curado nos moldes em câmara úmida durante as primeiras 24 horas. Desmoldado após o período de cura e colocados em água a 60°C por mais 24 horas.

Após o banho termo-regulador, os corpos de prova foram devidamente pesados e foi realizada a primeira leitura no relógio comparador. Após a realização da medição, os corpos de prova foram colocados em um tanque totalmente imersos em solução alcalina a 60°C, onde permaneceram até o fim do ensaio. As idades de leitura e pesagem foram 3, 7, 10, 14, 21, 28, 42 e 56 dias.

CAPÍTULO 04

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise Petrográfica

Durante a realização da análise mesoscópica da rocha utilizada nesta pesquisa foi constatado a presença de manchas cinza claro a brancas, representadas por fenocristais prismáticos e/ou eventualmente arredondados de feldspato. Os fenocristais de feldspato, juntamente com lamelas de micas escuras, em sua maioria estão alinhados com a estrutura foliada da rocha. A Figura 14 retrata esses aspectos.



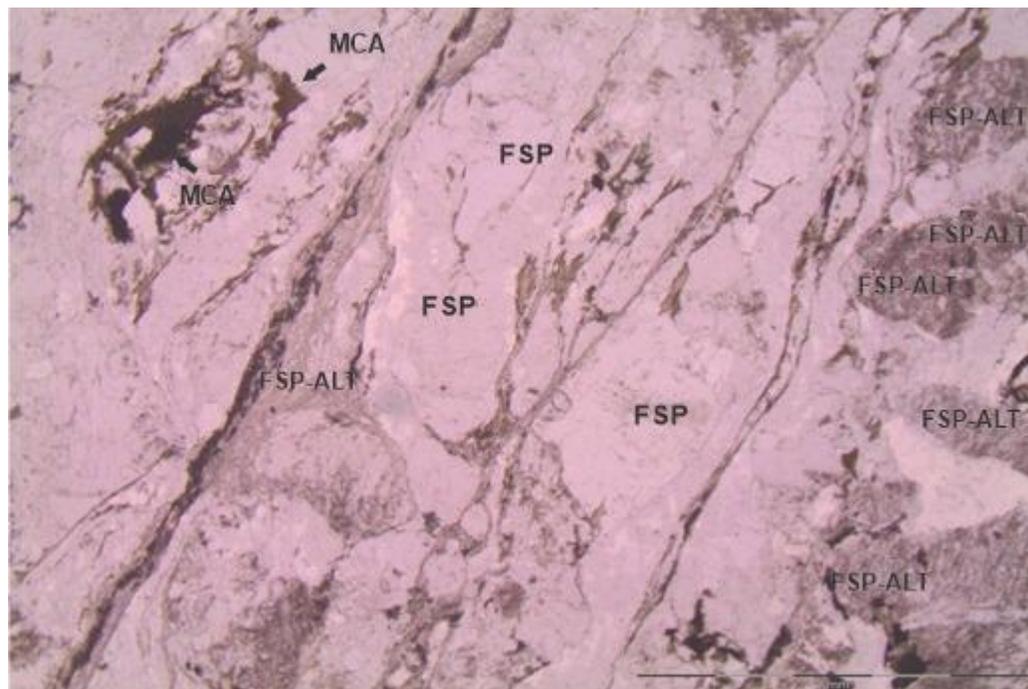
Figura 14: Aspecto geral de um dos fragmentos de rocha

Fonte: Marins, 2021

Devido à localização da pedreira (zona de cisalhamento Pernambuco leste) onde as amostras de rocha foram retiradas era esperado que a análise petrográfica indicasse que o agregado graúdo escolhido para esta pesquisa fosse potencialmente reativo. Os aspectos observados, como a formação de fenocristais de feldspato indicam que houve uma aparente recristalização sofrida pela rocha, sugerindo um processo de blastese,

que consiste na germinação e no crescimento de minerais da rocha, quando atingida determinadas condições termodinâmicas.

A Figura 15 ilustra a fotomicrografia com aumento da objetiva em 2,5 vezes. Nesta imagem é possível observar que alguns cristais de feldspato estão alterados para argilominerais (apontado na imagem como fenocristais de feldspatos alterados) e os filetes, responsáveis pela foliação, são de mica verde a marrom.

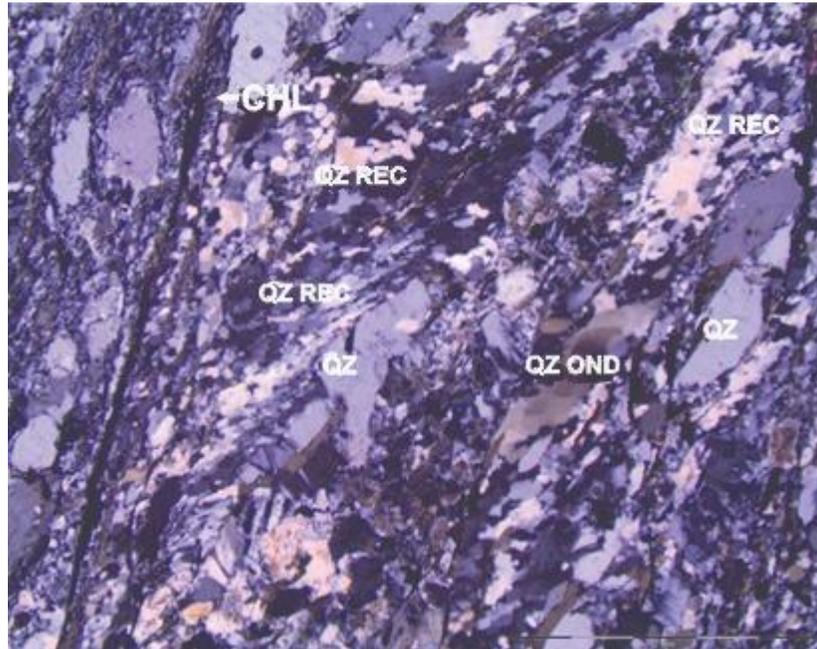


FSP = Fenocristais de feldspatos frescos, sem alteração;
FSP – ALT = Fenocristais de feldspatos alterados;
MCA = Micas.

Figura 15: Aspecto geral da rocha vista sob o aumento da objetiva 2,5X

Fonte: Marins, 2021

Em alguns locais da lâmina observa-se quartzo recristalizado (em granulometria milimétrica), exibindo extinção ondulante e direcionado em ângulo com os filetes de clorita, formando uma faixa que sofreu intensa recristalização dentro da rocha, constituído por porfiroclastos de feldspatos rodeados por quartzo cominuído e filetes de clorita, conforme pode ser visualizado na Figura 16.



QZ REC = Quartzo recristalizado;

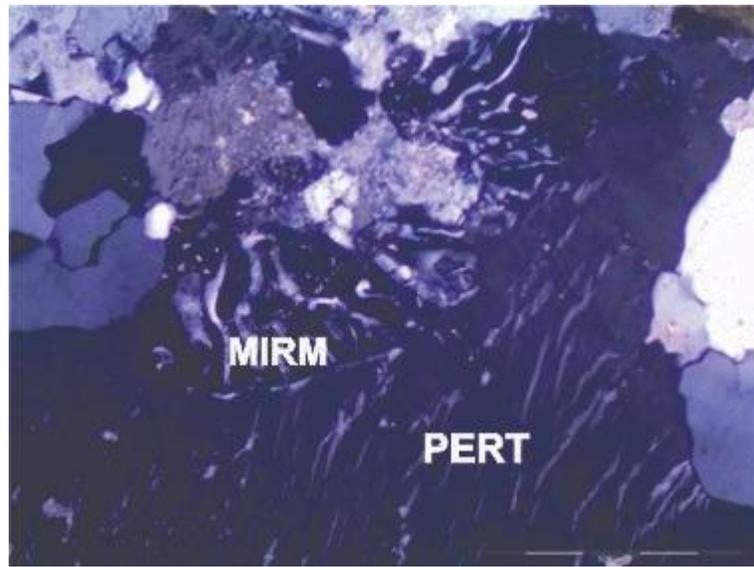
CHL = Filetes de clorita;

QZ OND = Grãos milimétricos de quartzo exibindo extinção ondulante.

Figura 16: Seção delgada sob o aumento da objetiva 2,5X

Fonte: Marins, 2021

Foram também observados a presença de intercrescimentos mirmequíticos, bem como cristais de K-feldapato com intercrescimentos perfiticos, dos tipos “strings” e “flame”, se constituindo em feições que favorecem a possibilidade de reação álcali-agregado, conforme mostra a figura 17.



**Pert = Intercrescimentos pertíticos no estilo "strings";
Mirm = Leques mirmequíticos entre feldspato e quartzo.**

Figura 17: Detalhe de um cristal de Feldspato sob o aumento da objetiva 10 X

Fonte: Marins, 2021

Pelas características apresentadas conclui-se que a rocha em análise sofreu deformação plástico-rutural, com sinais evidentes de recristalização, tanto dos feldspatos (especialmente os K-feldspatos) quanto do quartzo, recristalizado em grãos maiores, exibindo extinção ondulante. O percentual de quartzo cominuído, recristalizado e nas microtexturas mirmequíticas, juntamente com as micas constituem cerca de 50% do volume da rocha.

O restante do volume da rocha é composto por fenocristais, alguns recristalizados em formas ovaladas, outros apresentando formas indefinidas com bordas nitidamente quebradas.

Tendo em vista que a percentagem de material fraturado/quebrado entre grãos minerais resistentes, não moídos presentes na rocha, foi de aproximadamente 50% do seu volume, a rocha analisada pode ser classificada como um protocataclasito (Sibson, 1977).

Por conter quartzo microcristalino, quartzo macrogranular fraturado e/ou deformado (extinção ondulante) e agregados de quartzo microcristalino em contato com outros grãos maiores (textura mortor), o agregado é classificado como potencialmente reativo pela NBR 15577-3:2018.

4.2 Ensaio acelerado em barras de argamassa

O ensaio acelerado em barras de argamassa foi realizado tanto no agregado miúdo quanto no agregado graúdo. Pois para avaliar os métodos estudados nesta pesquisa foi definido que seria utilizado agregado graúdo com potencial reativo.

As metodologias aplicadas no desenvolvimento desta pesquisa sugerem que para avaliação do agregado graúdo, o agregado miúdo deve ser inócuo. Então com o objetivo de aumentar a confiabilidade dos resultados encontrados nos métodos acelerados de primas de concreto, fez-se necessário a realização de ensaios complementares, que são largamente utilizados mundialmente para a caracterização dos agregados quanto à reatividade álcali-agregado.

O ensaio foi realizado seguindo as orientações da NBR 15577-4:2018. A partir do tratamento dos dados coletados durante o ensaio dos corpos de prova fabricados com o agregado miúdo, conclui-se que a variação dimensional média durante o ensaio foi menor que 0,19% (limite proposto pela NBR 15577-4:2018). Os resultados encontrados para o agregado miúdo estão expressos na Tabela 13.

Tabela 13: Variação dimensional das barras de argamassa fabricadas com agregado miúdo, em solução alcalina.

VARIAÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	11	16	18	21	23	25	30
Variação dimensional média (%)	0,00	0,00	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,04	0,04	0,05	0,06

Avaliando os resultados obtidos no ensaio do agregado graúdo conclui-se que a variação dimensional média das barras de argamassa durante o ensaio foi maior que 0,19% (limite proposto pela NBR 15577-4:2018). Na Tabela 14, onde se encontra a variação dimensional das barras de argamassa fabricadas com agregado graúdo, observa-se que a partir do 16° dia de ensaio é possível caracterizar o agregado graúdo como potencialmente reativo.

Tabela 14: Variação dimensional das barras de argamassa fabricadas com agregado graúdo, em solução alcalina.

VARIÇÃO DIMENSIONAL DAS BARRAS DE ARGAMASSA EM SOLUÇÃO ALCALINA											
Idade (dias)	2	4	7	9	11	16	18	21	23	25	30
Varição dimensional média (%)	0,00	0,04	0,07	0,10	0,13	0,19	0,21	0,24	0,26	0,28	0,32

O Gráfico 1 ilustra o comportamento da variação dimensional das barras de argamassa fabricadas com agregado miúdo e com agregado graúdo.

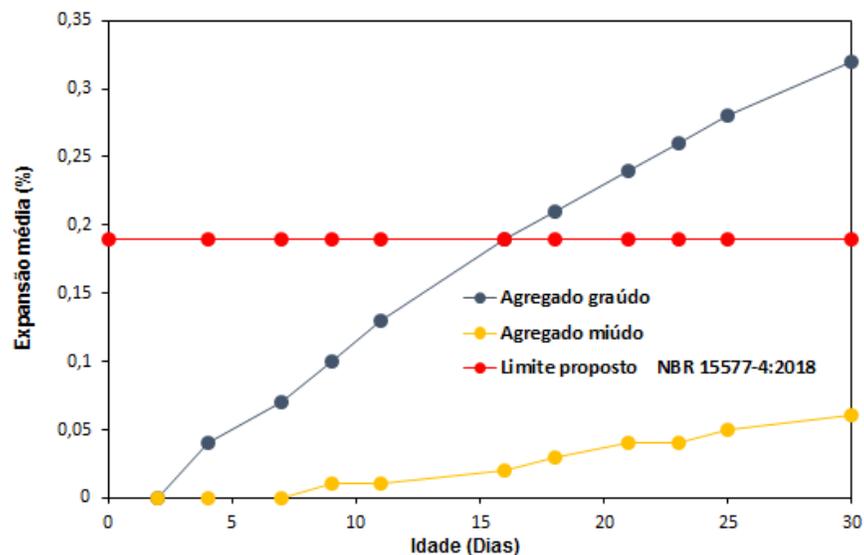


Gráfico 1: Evolução da expansão média pela idade, das barras de argamassa ensaiadas

Como era esperado, os resultados expressos no Gráfico 1 demonstram que a velocidade da expansão é maior nos corpos de prova fabricados com o agregado graúdo. Nota-se que a velocidade da expansão foi constante durante todo o ensaio, o que demonstra que não houve nenhum momento de estagnação da expansão, com isso pode-se concluir que o agregado graúdo utilizado neste ensaio apresenta uma grande capacidade expansiva. O ensaio foi finalizado aos 30 dias, que é a idade proposta pela norma, mas para um maior conhecimento quanto à capacidade reativa deste agregado sugere-se aumentar o tempo de ensaio até uma possível estagnação da variação dimensional das barras.

Observa-se que houve uma pequena variação no tamanho da barra fabricada com o agregado miúdo, porém a variação média encontrada ao final do ensaio é de 0,06%, abaixo do limite estabelecido pela norma brasileira. O agregado miúdo apresentou nas leituras evidências de expansão, mas estas foram muito pequenas e tomando como referência os limites impostos pela norma, essa variação dimensional sofrida pelo agregado miúdo é irrelevante e não prejudicial para estruturas de concreto.

4.3 Ensaio acelerados em prismas de concreto

A variação de comprimento de cada prisma de concreto em uma determinada idade representa a diferença entre seu comprimento na idade considerada (C_t) e seu comprimento inicial (C_0), expressa em porcentagem do comprimento efetivo de medida, ou seja, em cada período de leitura dos resultados, deve ser calculada a diferença entre a leitura zero e a leitura realizada no dia. Calcular os valores de variação do comprimento para cada amostra com aproximação de 0,001% e com estes resultados calcular a expansão média das três amostras ensaiadas.

É importante ressaltar que são necessários dados de pelo menos três prismas (amostras) a qualquer idade de forma a constituir um ensaio válido para cada idade. A variação dimensional das amostras em qualquer idade é calculada com a Equação 1:

Equação 1:

$$VC = \frac{C_t - C_0}{l} \times 100$$

Onde:

VC é a variação de comprimento, expressa em milímetros (mm);

C_0 é o comprimento inicial, expresso em milímetros (mm);

C_t é o comprimento na idade considerada, expresso em milímetros (mm);

l é o comprimento efetivo do prisma, expresso em milímetros (mm).

É sugerido pela norma que em todas as idades paralelamente a leitura de variação de comprimento, seja realizado a pesagem dos corpos de prova. Embora a

mudança de peso no prisma não seja usada para caracterizar a reatividade do agregado neste método, ela serve como um indicador para estabelecer consistência dos resultados do teste e identificar o início de qualquer deterioração significativa que possa vir a ocorrer nas amostras.

A variação de massa de cada prisma de concreto em uma determinada idade representa a diferença entre sua massa na idade considerada (M_t) e sua massa inicial (M_0), expressa em porcentagem da massa inicial, com aproximação de 0,01%. A variação de massa média dos três prismas de concreto em uma determinada idade deve ser expressa com aproximação de 0,1%. A variação média da massa das amostras em qualquer idade é calculada com a Fórmula 2:

Fórmula 2:

$$VM = \frac{M_t - M_0}{M_0} \times 100$$

Onde:

VM é a variação de massa, expressa em gramas (g);

M_0 é a massa inicial, expressa em gramas (g);

M_t é a massa na idade considerada, expressa em gramas (g).

A partir das leituras coletadas durante a execução dos ensaios, foi obtida a variação de comprimento de cada prisma pela fórmula apresentada anteriormente. A Tabela 15 resume os resultados encontrados através de todas as metodologias estudadas nesta pesquisa, junto com os limites de expansão propostos por cada norma.

Tabela 15: Variação dimensional dos prismas de concreto obtidos através dos ensaios

F1 - NBR 15577-7:2018 e AASHTO T380:2018	Dias	7	35	70	105	140			
	Expansão média (%)	0	0,04	0,04	0,04	0,04			
F2 - RILEM AAR-4.1:2016	Dias	7	35	70	105	140			
	Expansão média (%)	0	0,06	0,06	0,06	0,06			
F3 - RILEM AAR-4.1:2016	Dias	7	35	70	105	140			
	Expansão média (%)	0	0,06	0,07	0,07	0,09			
F4 - AASHTO T380:2018	Dias	3	7	10	14	21	28	42	56
	Expansão média (%)	0	0	0,01	0,02	0,02	0,03	0,06	0,07
F5 - NBR 15577-7:2018	Dias	7	35	70	105	140			
	Expansão média (%)	0	0,05	0,07	0,07	0,09			
Limites de expansão dos prismas de concreto em cada norma									
Limite AASHTO 13380:2018: Expansão Moderada 0,041% a 0,12%	Dias		0	35	70	105	140		
	Expansão média (%)		0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	0,041	
Limite AASHTO 13380:2018: Baixa reatividade: 0,031% a 0,04%	Dias		0	35	70	105	140		
	Expansão média (%)		0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	0,031	
Limite RILEM AAR-4.1:2016 e NBR 15577-7:2018	Dias		0	35	70	105	140		
	Expansão média (%)		0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	

O Gráfico 2 condensa os resultados das expansões medidas em todos os corpos de prova confeccionados para cada uma das normas estudadas. Trata-se de um gráfico das expansões médias (%) em relação ao tempo (dias).

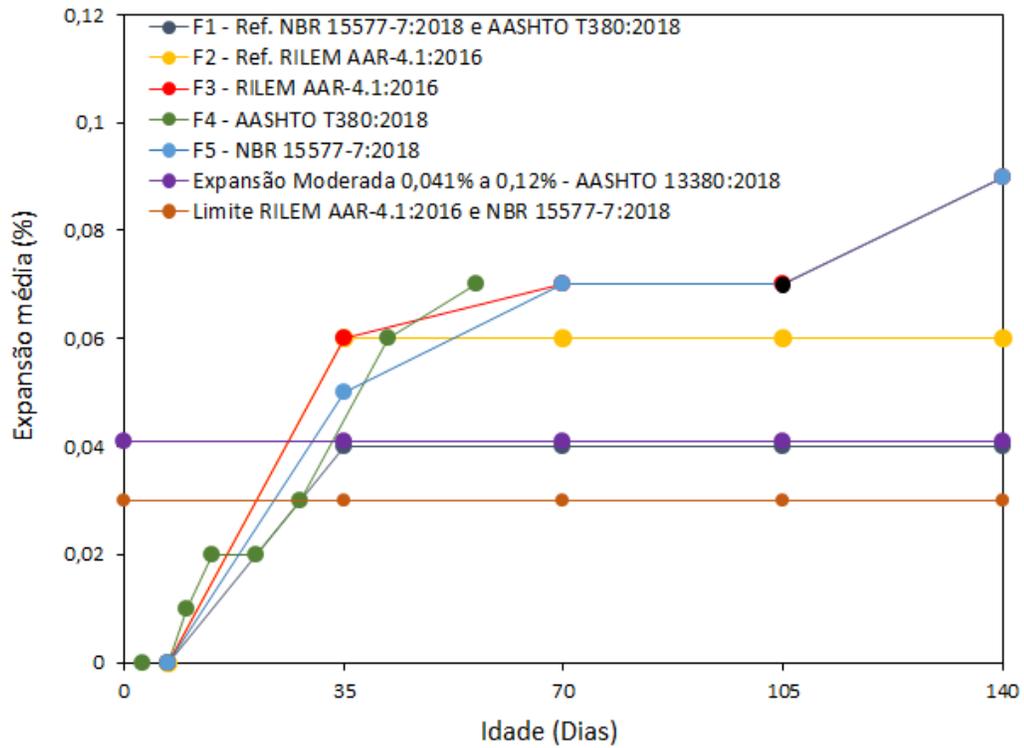


Gráfico 2: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto

A partir dos dados expressos no gráfico 2 nota-se que o comportamento apresentado pelos corpos de prova em relação à expansão são bastante similares. Porém, comparando os resultados dos prismas que foram ensaiados utilizando as recomendações da NBR 15577-7:2018 (Família F5) com os prismas fabricados com as recomendações da RILEM AAR-4.1:2016 (Família F3) observa-se que os corpos de prova da família F5 apresentam uma maior velocidade no final do ensaio.

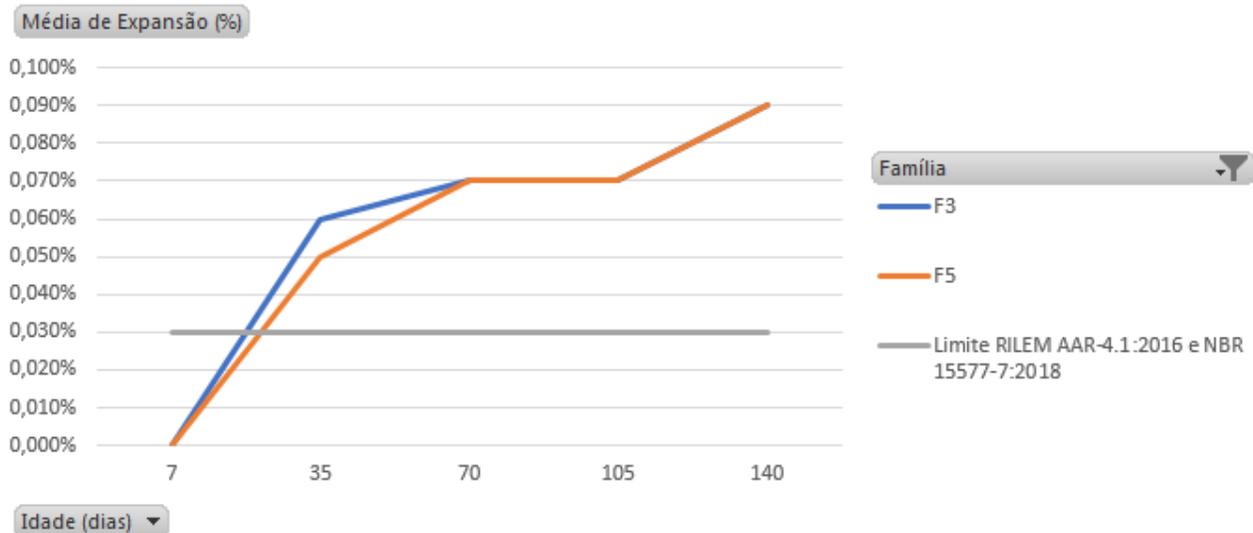


Gráfico 3: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto das famílias F3 e F5

Com isso pode-se concluir que a NBR 15577-7:2018 cria condições para velocidades maiores em idades tardias. Isso pode ocorrer devido à relação água/cimento (a/c) do concreto deste método, que é fixado pela norma em ($a/c = 0,45$), ser menor que a relação a/c adotada pela RILEM AAR-4.1:2016 ($a/c = 0,50$). Este fenômeno pode ser explicado da seguinte forma: Um concreto com maior relação água/cimento tende a apresentar maior porosidade. Considerando uma maior porosidade a partir do fator a/c mais elevado, pode-se concluir que nas primeiras idades do ensaio, um concreto mais poroso permite um maior ingresso de íons alcalinos, desencadeando mais rapidamente a reação. Por outro lado, uma maior porosidade acomodará melhor os produtos formados na reação, o que pode retardar o surgimento de fissuras. Em concretos com baixa relação água cimento, o gel não tem espaço para se acomodar então este passa a exercer pressões contra a massa ao seu redor, iniciando mais rapidamente um processo fissuratório.

Mas não se pode afirmar que a relação a/c seja um fator de alta influência nos ensaios, porque na idade de 140 dias, ao fim do ensaio, ambas as famílias (F3 e F5) obtiveram o mesmo resultado expansivo, igual a 0,09%.

As famílias F1 e F2 são corpos de prova referência, sendo assim não foram submetidos a uma condição agressiva e ainda assim houve expansão média na família

F1 igual a 0,04% e na família F2 igual a 0,06%, sendo ambas superiores aos limites propostos pelas normas. Como pode ser observado no gráfico 4.

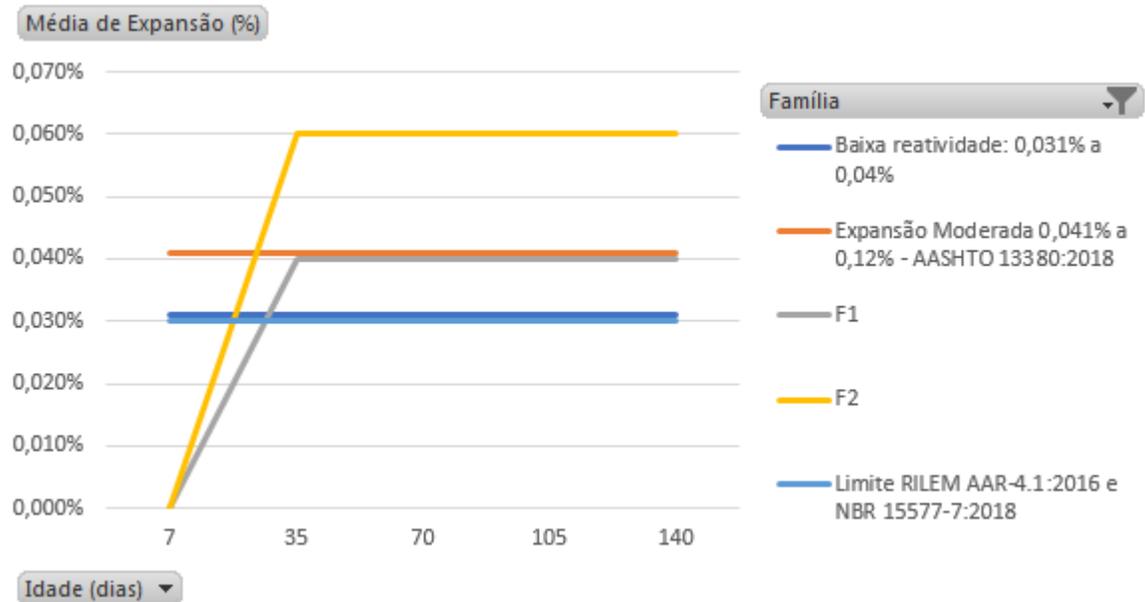


Gráfico 4: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto das famílias F1 e F2

Na família F2, onde o consumo de cimento é maior, houve também maior expansão média, este fato indica que o cimento utilizado no desenvolvimento desta pesquisa (CPV), contém álcalis suficientes para desencadear a RAS. Os resultados encontrados nesta pesquisa levam a concluir que a presença de álcalis tem maior influência na reação que a quantidade de agregado reativo. Isso pode ser explicado devido ao comportamento dos corpos de prova usados como referência, onde os prismas da família F2, que apresentaram maior expansão, contém menor volume de agregados que os prismas da família F1.

O ensaio proposto pela AASHTO 13380:2018 (Família F4) tem duração de 56 dias, sendo mais curto que os métodos propostos pela RILEM AAR-4.1:2016 e pela NBR 15577-7:2018. Por se tratar de uma metodologia muito diferente das demais estudadas, o gráfico 5 trata apenas o comportamento dos corpos de prova da família F4.

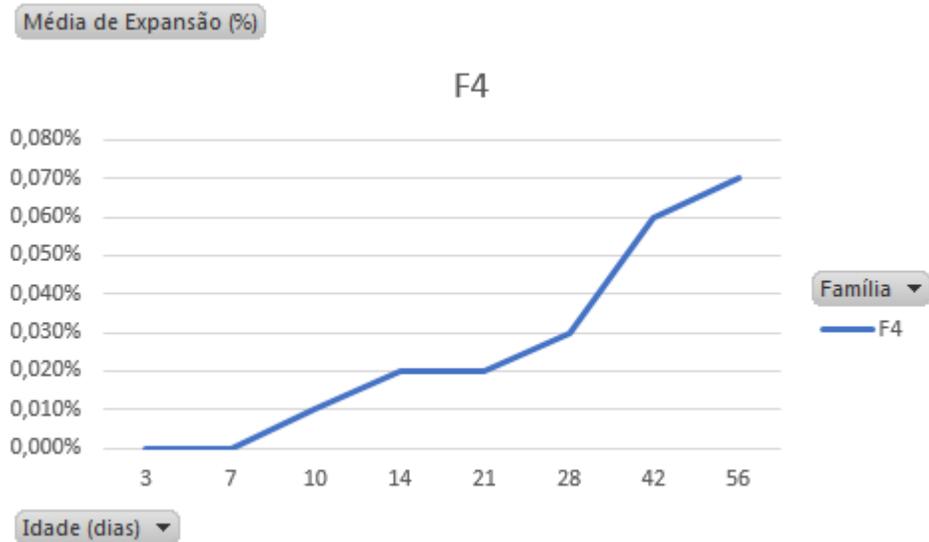


Gráfico 5: Evolução da expansão média pela idade, dos prismas de concreto da família F4

A partir do gráfico 4 é possível analisar que a velocidade do crescimento da expansão nessa metodologia não foi constante. Houve um crescimento no início do ensaio e entre as idades 14 e 21 dias houve uma estagnação. Após esse período houve um crescimento acelerado da expansão. Isso pode ser explicado devido ao comportamento do gel que nas primeiras idades teve sua formação e acomodação nos poros do concreto, após esse estágio da reação o gel ocupou os vazios e isso acarretou na geração de tensões de tração contra a massa, o que ocasionou microfissuras no concreto e resultou no aumento da velocidade da expansão.

Nos prismas da família F4 há uma diferença considerável entre a expansão média nas idades 28 e 42 dias. Aos 56 dias de ensaio a expansão média é de 0,07%. Comparando com os limites propostos pelas metodologias da RILEM AAR-4.1:2016 e da NBR 15577-7:2018, o agregado quando submetido a este ensaio pode ser caracterizado como reativo. Foram utilizados os limites propostos pela NBR e RILEM para caracterização do agregado da família F4, devido à alteração no tamanho dos corpos de prova na realização deste trabalho.

Até a idade de 35 dias foi realizado um ajuste linear dos valores obtidos nos ensaios das famílias F3, F4 e F5 com o objetivo de se determinar o gradiente da expansão com o tempo, resultado que é exibido no gráfico 6. O mesmo foi realizado

com as idades finais do ensaio, o resultado é exibido no gráfico 7. Os dados utilizados para elaboração dos gráficos constam nas Tabelas 16 e 17 respectivamente.

Tabela 16: Expansão média dos prismas de concreto nas primeiras idades

F3 - RILEM AAR-4.1:2016	Dias	7	35		
	Expansão média (%)	0	0,06		
F4 - AASHTO T380:2018	Dias	3	7	10	14
	Expansão média (%)	0	0	0,01	0,02
F5 - NBR 15577-7:2018	Dias	7	35		
	Expansão média (%)	0	0,05		

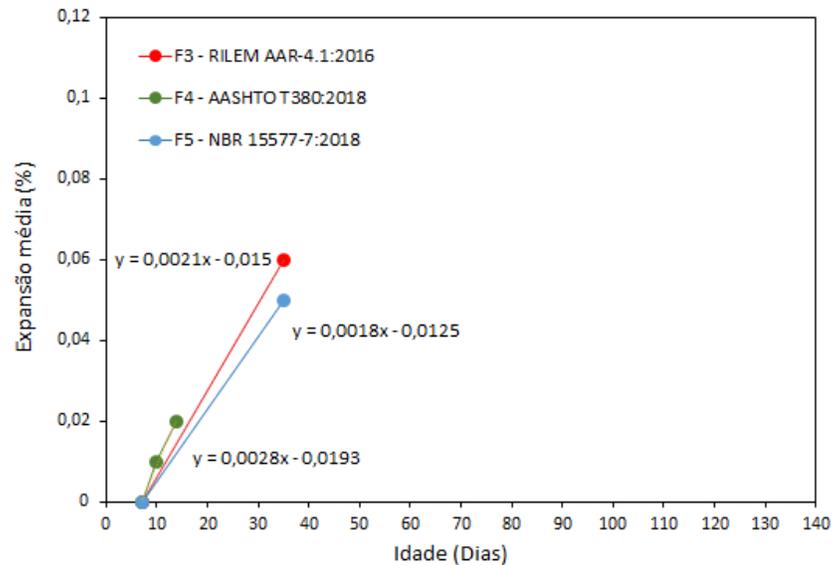


Gráfico 6: Evolução da velocidade média dos prismas de concreto nas primeiras idades

Tabela 17: Expansão média dos prismas de concreto nas últimas idades

F3 - RILEM AAR-4.1:2016	Dias	70	105	140		
	Expansão (%)	0,07	0,07	0,09		
F4 - AASHTO T380:2018	Dias	21	28	42	56	
	Expansão (%)	0,02	0,03	0,06	0,07	
F5 - NBR 15577-7:2018	Dias	70	105	140		
	Expansão (%)	0,07	0,07	0,09		

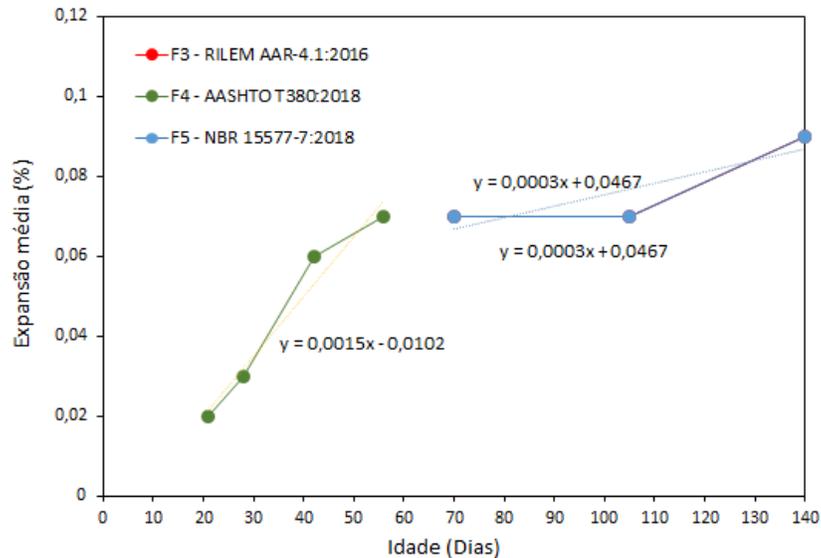


Gráfico 7: Evolução da velocidade média dos prismas de concreto nas últimas idades

A metodologia proposta pela AASHTO T380:2018 apresenta a maior velocidade de ocorrência da expansão, isso ocorre devido às condições do ensaio serem muito agressivas. Sabe-se que o aumento na temperatura aumenta a energia cinética das partículas dos reagentes, aumentando a velocidade das reações. Então neste caso, o fato de os corpos de prova estarem imersos em solução alcalina acelerou o processo da reação álcali sílica.

No Gráfico 7, as retas das famílias F3 e F5 se sobrepõem, indicando que a expansão nas metodologias propostas pela RILEM AAR-4.1:2016 e pela NBR 15577-7:2018 apresentam o mesmo comportamento, o que leva a concluir que as mudanças que a norma brasileira fez em relação à RILEM não foram muito relevantes nesse trabalho, com esse tipo de agregado graúdo.

Comparando os resultados encontrados nos ensaios propostos conclui-se que todas as normas estudadas foram eficientes em identificar o agregado quanto à reatividade.

Embora a AASHTO proponha que o ensaio tenha 56 dias de duração, os prismas foram mantidos no tanque, imersos em solução alcalina a 60°C por cinco meses, mas neste período final não foram realizadas leituras dos corpos de prova. Ao final do período de todos os ensaios, apenas os prismas da família F4 apresentaram fissuras visíveis, como mostra a Figura 18. Isso comprova que imersos em solução,

alcalina como é proposto pela AASHTO T380:2018, gera um ambiente muito agressivo e isso pode não ser um evento positivo porque difere de situações reais, onde as estruturas de concreto não sofrem este tipo de agressividade ambiente.



Figura 18: Corpos de prova da família F4 ao final do ensaio

Fonte: Marins, 2021

O comportamento observado pelos prismas da família F4 levanta um questionamento sobre a lixiviação dos álcalis. Embora o ambiente de ensaio seja controlado e a alcalinidade tenha se mantido constante por todo o ensaio, foi possível observar a exsudação sofrida pelo gel resultante da RAS como mostra a Figura 19.

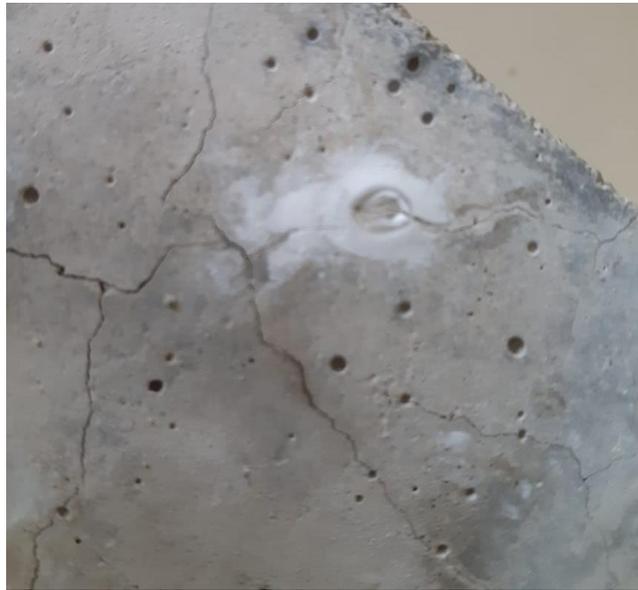


Figura 19: Exsudação do gel nos corpos de prova da família F4 ao final do ensaio

Fonte: Marins, 2021

Mais testes devem ser realizados utilizando todas essas metodologias para que haja uma criação de banco de dados. Reação álcali sílica ainda tem muitas faces há serem descobertas. Os resultados confirmam que a elevação da temperatura tem grande relevância na aceleração do ensaio, mas outros fatores como a exposição dos corpos-de-prova à solução com variadas concentrações de NaOH, diferentes traços e uma amostragem maior de agregados, precisam ser testados.

CAPÍTULO 05

5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com esta pesquisa é possível ver a complexidade do fenômeno da RAS e a dificuldade de limitar parâmetros para evitar sua ocorrência. Conclui-se que todos os fatores do sistema são importantes para a ocorrência da RAS, mas também foi possível perceber que alguns fatores podem ser mais relevantes que outros. Todos estes conhecimentos são muito importantes na hora de diagnosticar a RAS e suas consequências.

Ao fim deste estudo é possível constatar que todas as normas estudadas cumprem com o objetivo principal de caracterizar o agregado quanto à reatividade álcali sílica. Porém a metodologia que se mostrou mais confiável e coerente com a realidade foi à proposta pela RILEM AAR-4.1:2016.

Embora o comportamento dos prismas da família F3 e da família F5 serem muito parecidos, os corpos de prova da família F3 foram mais fáceis de fabricar devido ao fator água cimento ser igual a 0,5. O concreto em estado fresco da família F3 apresentou comportamento mais plástico, excluindo assim a necessidade de utilização de aditivos plastificantes e facilitando a moldagem dos corpos de prova. Um fator água cimento igual a 0,5 se compara com concretos utilizados nas obras de construção civil, o que torna o ensaio mais coerente com a realidade.

Para obter resultados mais consistentes, sugere-se realizar medidas de expansão em idades intermediárias às previstas na norma e medir a barra padrão em cada medida da expansão de cada corpo de prova, pois o aparelho utilizado para realização da leitura é muito sensível e qualquer alteração no ambiente pode ter influência nos resultados.

Fica como recomendações para trabalhos futuros, testar estas metodologias com diferentes tipos de agregados, para maior conhecimento do comportamento do concreto com diferentes tipos de minerais reativos.

Alterar a relação água/cimento e/ou o volume de materiais secos também pode ser uma estratégia para buscar classificar a relevância de cada componente do sistema na reação álcali-sílica.

CAPÍTULO 06

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AASHTO – American Association of State Highway and Transportation Officials. T380-18¹: Potential Alkali Reactivity of Aggregates and Effectiveness of ASR Mitigation Measures (Miniature Concrete Prism Test, MCPT). Washington, D.C., (2018).

ACI Committee 221. State-of-the-art report on alkali-aggregate reactivity (ACI 221.1 R, 2008)

Andrade, T.; Silva, J. J. R.; Almeida, R.; Figuerêda, J. P.; Kihara, Y.; Pecchio, M., 2006. Diagnóstico de reação álcali-agregado em blocos de fundação de um edifício público situado na cidade de Recife/PE, IBRACON, RAA-2006.

Andrade, T.; Silva, J. J. R.; Hasparyk, N. P.; Silva, C. M. Investigação do potencial de reatividade para o desenvolvimento de RAA dos agregados miúdos e graúdos comercializados na Região Metropolitana do Recife. In: II SIMPÓSIO SOBRE REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO EM ESTRUTURAS DE CONCRETO. 2006, Rio de Janeiro.

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR-15577-1: Agregados – Reatividade álcali-agregado-Parte 1: Guia para avaliação da reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados em concreto”. Rio de Janeiro, (2018).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR-15577-3: Agregados – Reatividade álcali-agregado-Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concreto”. Rio de Janeiro, (2018).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR-15577-4: Agregados – Reatividade álcali-agregado-Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado”. Rio de Janeiro, (2018).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. “NBR-15577-6: Agregados – Reatividade álcali-agregado-Parte 6: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado”. Rio de Janeiro, (2018).

Associação Brasileira de Normas Técnicas. "NBR-15577-7: Agregados – Reatividade álcali-agregado-Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto". Rio de Janeiro, (2018).

ASTM C1260, 1994, Standard test method for potential alkali reactivity of aggregates (mortar-bar method), American Society for Testing and Materials, Philadelphia, USA.

Bazant, Z. P., and A. Steffens. Mathematical model for kinetics of alkali-silica reaction in concrete." *Cement and Concrete Research*, 30, 419-428, 2000.

BERNARDES, H. M. Retroanálise do efeito estrutural das reações álcali-agregado em barragens de concreto. 2000. 142 f. Tese (Doutorado)-Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2000.

Capra, B., Bournazel, J. P., Modeling of induced mechanical effects of alkali aggregate reactions. *Cement and Concrete Research*, 28, 251-260, 1998.

Castro, N. Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. Study of the relationship between aggregate petrographic properties versus expansion tests. Thesis for the degree of Philosophiae Doctor, Faculty of Engineering Science and Technology Department of Geology and Mineral Resources Engineering, 2012.

CSA, 2009, Standard practice to identify degree of alkali-reactivity of aggregates and to identify measures to avoid deleterious expansion in concrete, CSA A23.2-27A, Canadian Standards Association, Mississauga, Ontario, Canada.

Figueirôa, J. P.; Andrade, T., 2007. O ataque de reação álcali-agregado sobre as estruturas de concreto. Editora Universitária, UFPE.

Fournier, B & Bérubé, M. (2011). Alkali-aggregate reaction in concrete: A review of basic concepts and engineering implications. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 27. 167-191. 10.1139/cjce-27-2-167.

Fournier B. & Bérubé, M.A. 2000. Alkali-aggregate reaction in concrete: a review of basic concepts and engineering implications. *Can. J. Civ. Eng.*,27: 167 – 191.

Mehta, P. K.; Monteiro, p. j. m. concreto estrutura, propriedades e materiais. ed.:Pini. ISBN.: 85-7266-040-2. Português. 1994

Noel, M., Sanchez, L., Martin, R., Fournier, B., Bastien, J., Mitchell, D., 2016. Structural implications of internal swelling reactions in concrete: a review, 15th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction, IBRACON, São Paulo.

Oberholster, R. E. Alkali reactivity of silicious rock aggregates: diagnosis of the reaction testing of cement and aggregate and prescription of preventive measures. 6th International Conference of Alkalies in Concrete - Research and Practice. Copenhagen, 419-433, 1983.

RILEM Recommendations for the Prevention of Damage by Alkali-Aggregate Reactions in New Concrete Structures. Technical Committee 219-ACS. "AAR-4.1: Detection of Potential Alkali-Reactivity—60 °C Test Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms"

Sahmaran, M.; Li, V. C., 2016. Suppressing alkali-silica expansion. ACI, Concrete International, No. 5, Maio, pp. 47-52.

Svensson, S. E. Eigenstresses generated by diffusion in a spherical particle embedded in an elastic medium. International Journal of Mechanical Sciences, 33, 211-233, 1991.

Swamy, R. N., Al-Asali, M. M., 1988. Engineering properties of concrete affected by alkali-silica reaction, ACI Material Journal, Sep-Oct, pp. 367-374.

Swenson, E. G., Gillott, J. E., Alkali-carbonate rock reaction. Highway Research Board, 45, 1964.

Teixeira, Cristiane Marques de Lima. Evolução crustal dos domínios central e Pernambuco-Alagoas da província Borborema na folha Vitória de Santo Antão (Pernambuco – Nordeste do Brasil). 192 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, 2015.

Wigum, Børge. (2018). Alkali Aggregate Reactions (AAR) in Concrete. Testing, Mitigation & Recommendations. The Norwegian approach during 15 years of research.

ANEXO 1 – ENSAIOS QUÍMICOS, FÍSICOS E MECÂNICOS DO LOTE REFERENTE AO CIMENTO UTILIZADO

DIA/MÊS		ENSAIOS QUÍMICOS										ENSAIOS FÍSICOS E MECÂNICOS								RESISTÊNCIA A COMPRESSÃO - NBR 7215 - 28.02.19			
		P.F - Perda ao Fogo	R.I - Res. insolúvel	%SiO ₂	%Al ₂ O ₃	%Fe ₂ O ₃	%CaO	%MgO	%SO ₃	%Na ₂ O	%K ₂ O	# 0,075mm (#200)	# 0,044mm (#325)	Blaine	Massa Específica	Água (C N)	Início de Pega	Fim de Pega	Expans.	1 Dia ≥ 14 Mpa	3 Dias ≥ 24 Mpa	7 Dias ≥ 34 Mpa	28 Dias ≥ (NA)
		NM 18/12	NM 15/12	NBR 14656/01							12826/14		NBR 16372/15	NM 23/01	NM 65/03	NM 65/03	11582/12	MÍNIMO INTERNO ESPECIFICADO(Mpa)					
		≤ 6,30 %(*)	≤ 3,50 %(*)	NA(*)	NA(*)	NA(*)	NA(*)	≤ 6,50	≤ 4,5	NA(*)	NA(*)	≤ 12,0 %	N.A (%)	≥ 3000 Cm ² /g	g/cm ³	%	≥ 1 h	≤ 10 h	≤ 5 mm	≥ 24	≥ 37	≥ 44-46	≥ 52
08/08/2019		3,20	0,73	18,55	4,68	2,40	60,24	5,04	4,20	0,17	0,92	0,2	0,8	5230	3,07	31,4	2:25	3:10	0,5	24,2	37,6	44,8	53,4
10/08/2019		3,54	0,70	18,40	4,60	2,39	59,96	5,21	4,21	0,16	0,91	0,1	0,7	5100	3,07	31,5	2:25	3:05	0,0	24,6	37,0	44,0	52,0
17/08/2019		3,55	0,66	18,53	4,63	2,34	59,26	5,55	4,45	0,17	0,93	0,1	0,8	5200	3,07	31,2	2:20	3:15	0,5	24,2	37,5	44,0	52,3
20/08/2019		3,55	0,69	18,27	4,56	2,33	59,93	5,35	4,34	0,16	0,92	0,1	0,8	5430	3,07	31,4	2:00	3:00	0,0	26,1	38,2	44,6	53,0
21/08/2019		3,53	0,69	18,58	4,70	2,31	59,41	5,37	4,41	0,18	0,91	0,1	0,8	5260	3,07	31,2	2:05	3:00	0,0	25,8	37,8	44,5	53,0
23/08/2019		3,30	0,53	18,75	4,66	2,32	59,39	5,38	4,48	0,18	0,93	0,1	0,5	5000	3,07	31,0	2:25	3:05	0,5	24,8	37,4	44,1	53,4
02/09/2019		3,54	0,70	18,98	4,66	2,31	59,51	5,07	4,56	0,21	0,89	0,1	0,8	5080	3,07	31,2	2:00	3:00	0,0	24,0	37,0	44,0	54,0
03/09/2019		3,55	0,66	17,93	4,48	2,28	59,07	4,96	4,11	0,17	0,88	0,1	0,9	5030	3,07	31,1	2:25	3:10	0,0	24,1	37,3	44,6	53,0
04/09/2019		3,46	0,89	18,37	4,56	2,33	60,30	5,35	4,23	0,16	0,92	0,1	0,8	5010	3,07	31,1	2:20	3:00	0,0	24,7	37,3	44,0	52,7
10/09/2019		3,73	0,50	17,97	4,38	2,36	60,71	5,09	4,22	0,13	0,83	0,1	0,5	5250	3,07	31,4	2:00	2:45	0,0	24,0	38,3	44,7	53,0
12/09/2019		4,02	0,73	17,74	4,47	2,28	60,53	4,99	4,42	0,15	0,82	0,1	0,5	5240	3,07	31,1	2:15	3:00	0,0	24,3	37,6	44,2	53,8
16/09/2019		4,08	0,50	18,18	4,61	2,24	59,58	5,28	4,43	0,18	0,84	0,1	0,6	5180	3,07	31,0	2:15	2:55	0,5	24,0	38,6	44,0	54,0
17/09/2019		4,14	0,74	18,16	4,62	2,28	59,67	5,22	4,30	0,18	0,84	0,1	0,9	5100	3,07	31,0	2:10	3:00	0,5	23,5	37,3	44,0	53,0
19/09/2019		4,15	0,87	18,02	4,46	2,32	60,03	5,14	4,33	0,16	0,80	0,1	0,7	5600	3,07	31,2	2:05	2:55	0,0	25,5	38,4	44,1	52,8
20/09/2019		4,61	0,87	18,09	4,62	2,22	59,22	5,19	4,42	0,17	0,88	0,1	0,7	5220	3,07	31,2	2:00	3:05	0,0	25,0	38,8	44,9	53,4
26/09/2019		4,38	0,66	18,31	4,67	2,19	59,78	4,43	4,52	0,17	0,98	0,1	0,8	5550	3,07	31,2	2:00	3:00	0,5	26,2	39,2	44,7	52,0
30/09/2019		4,23	0,92	17,96	4,58	2,26	60,80	4,36	4,26	0,17	0,89	0,1	0,7	5570	3,07	31,2	2:00	3:00	0,5	26,3	38,3	44,2	52,3
08/10/2019		4,87	0,89	18,03	4,61	2,25	59,49	4,79	4,24	0,17	0,96	0,1	0,8	5880	3,07	31,6	2:00	2:45	0,5	25,6	38,6	44,0	52,8
10/10/2019		4,90	0,90	18,18	4,58	2,21	58,98	5,02	4,37	0,18	0,98	0,1	0,6	5810	3,07	31,5	2:15	3:00	0,5	26,8	39,3	44,2	53,0
11/10/2019		5,00	1,24	18,10	4,46	2,31	59,26	4,97	4,37	0,13	0,85	0,1	0,7	5800	3,07	31,5	2:15	2:55	0,0	24,5	37,4	44,4	53,4
16/10/2019		4,91	1,22	17,81	4,37	2,22	59,99	4,84	4,42	0,13	0,91	0,1	0,8	5580	3,07	31,4	2:10	3:00	0,0	24,8	38,8	44,6	
17/10/2019		4,93	1,15	18,05	4,63	2,18	59,53	4,78	4,17	0,18	0,94	0,1	1,0	5480	3,07	31,2	2:05	2:55	0,5	24,4	37,5	44,0	
18/10/2019		4,97	1,23	17,82	4,48	2,26	60,22	4,91	3,95	0,13	0,85	0,1	0,6	5440	3,07	31,4	2:00	3:05	0,5	26,2	38,4	44,9	
23/10/2019		5,03	1,21	18,03	4,79	2,18	59,83	4,77	3,84	0,18	0,94	0,1	0,7	5510	3,07	31,3	2:00	3:00	0,5	25,5	38,4	45,0	
24/10/2019		5,03	1,18	17,94	4,77	2,17	59,50	4,47	4,34	0,19	1,01	0,1	0,7	5510	3,07	31,3	2:00	3:00	0,5	24,3	37,8	44,0	
26/10/2019		5,05	0,80	17,21	4,43	2,18	60,76	4,52	4,16	0,15	0,94	0,1	0,7	5490	3,07	31,3	2:10	3:00	0,5	24,6	37,1	44,2	
31/10/2019		4,98	1,69	17,91	4,53	2,25	59,38	4,71	4,55	0,18	0,94	0,1	0,8	5390	3,07	31,3	2:05	2:55	0,0	25,0	37,3	44,7	
05/11/2019		4,68	1,47	17,94	4,66	2,22	59,52	4,73	4,53	0,18	0,95	0,1	0,8	5310	3,07	31,2	2:00	3:05	0,0	25,2	37,6		
MÉDIA		4,25	0,89	18,11	4,58	2,27	59,77	4,98	4,32	0,17	0,91	0,1	0,7	5348	3,07	31,3	2:08	3:00	0,3	24,9	37,9	44,3	53,0
MÍNIMO		3,20	0,50	17,21	4,37	2,17	58,98	4,36	3,84	0,13	0,80	0,1	0,5	5000	3,07	31,0	2:00	2:45	0,0	23,5	37,0	44,0	52,0
MÁXIMO		5,05	1,69	18,98	4,79	2,40	60,80	5,55	4,56	0,21	1,01	0,2	1,0	5810	3,07	31,6	2:25	3:15	0,5	26,8	39,3	45,0	54,0
DESVPAD.		0,65	0,30	0,38	0,11	0,07	0,52	0,31	0,17	0,02	0,05	0,02	0,13	220	0,00	0,2	0:09	0:06	0,3	0,86	0,67	0,35	0,59

(*) ABNT NBR 16697:2018 - Cimento Requisitos - primeira edição: 03.07.2018 - Aprovada pelo Comitê ABNT.

NA - sem exigência de norma

Alhandra-PB, 11 de novembro de 2019

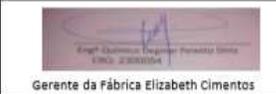


Av. Gleba Andreza Mucatu, S/N, Lote Parcela 4A
Zona Rural - Alhandra - PB - Brasil | CEP 58320-000
Fone/Fax: 55 (83) 3565.5001 | grupoelizabeth.com.br

**Bom pra obra.
Bom pra vida.**



Gerente da Fábrica Elizabeth Cimentos



Gerente da Fábrica Elizabeth Cimentos

APÊNDICE 1 – ENSAIOS REALIZADOS PARA CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DA AREIA

ABNT NBR NM 46: 2003 - AGREGADOS - DETERMINAÇÃO DO MATERIAL FINO QUE PASSA ATRAVÉS DA PENEIRA 75µm, POR LAVAGEM		
PARÂMETROS	1ª DETERMINAÇÃO	2ª DETERMINAÇÃO
Massa original da amostra seca (Mi)	500,00 g	500,00 g
Massa da amostra seca após a lavagem (Mf)	490,00 g	489,60 g
Porcentagem de material	2,00%	2,08%
TEOR DE MATERIAIS FINOS		2,04%

ABNT NBR 7218: 2010 - AGREGADOS - Determinação do teor de argila em torrões e materiais friáveis		
PARÂMETROS	1ª DETERMINAÇÃO	2ª DETERMINAÇÃO
Massa original da amostra seca (Mi)	200,00 g	200,00 g
Massa da amostra seca após a lavagem (Mf)	198,90 g	198,80 g
Porcentagem de material	0,55%	0,60%
TEOR DE ARGILA EM TORRÕES E MATERIAIS FRIÁVEIS		0,57%

APÊNDICE 2 – CÁLCULO PARA DETERMINAR A QUANTIDADE DE NAOH A SER ADICIONADA À ÁGUA DE AMASSAMENTO PARA AUMENTAR O TEOR DE ÁLCALIS:

Para a Família F3:

- Consumo de cimento por 1 m³ de concreto = 440 kg;
- Quantidade de álcalis no concreto = 440 kg × 0,768% = 3,38 kg;
- Quantidade de álcalis especificada para o concreto = 440 kg × 1,25 % = 5,50 kg;
- Quantidade de álcalis a ser adicionada ao concreto = 5,37 kg – 3,30 kg = 2,12 kg.

A diferença (2,12 kg) é a quantidade de álcalis, expressa como Na₂O equivalente, a ser adicionada à água de amassamento.

Quantidade de NaOH necessária = 2,12 × 1,291 = 2,74 kg/m³.

Para as Famílias F5 e F6:

- Consumo de cimento por 1 m³ de concreto = 430 kg;
- Quantidade de álcalis no concreto = 430 kg × 0,768% = 3,30 kg;
- Quantidade de álcalis especificada para o concreto = 430 kg × 1,25 % = 5,37 kg;
- Quantidade de álcalis a ser adicionada ao concreto = 5,37 kg – 3,30 kg = 2,07 kg.

A diferença (2,07 kg) é a quantidade de álcalis, expressa como Na₂O equivalente, a ser adicionada à água de amassamento. A Tabela A.1 apresenta o cálculo do fator de conversão de Na₂O para NaOH.

Quantidade de NaOH necessária = 2,07 × 1,291 = 2,67 kg/m³.

Tabela A.1 – Fator de conversão de Na₂O para NaOH

Na ₂ O + H ₂ O → 2 NaOH	
Composto	Peso molecular
Na ₂ O	61,98
NaOH	39,997
Fator de conversão = 2 × 39,997/61,98 = 1,291	