

**UNIVERSIDADE DO EXTREMO SUL CATARINENSE - UNESC
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA, PÓS-GRADUAÇÃO,
INOVAÇÃO E EXTENSÃO - PROPIEX
PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS - PPGCEM
MESTRADO EM CIÊNCIA E ENGENHARIA DE MATERIAIS**

ADRIANO DAMASIO SOTERIO

**ESTUDO DE MECANISMO DE INIBIÇÃO DA REAÇÃO
ÁLCALI-AGREGADO E DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM
CONCRETO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC, como requisito parcial para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Fabiano Raupp-Pereira

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Helene

**CRICIÚMA
2022**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação

S717e Soterio, Adriano Damasio.

Estudo de mecanismo de inibição da reação álcali-agregado e de autocicatrização em concreto / Adriano Damasio Soterio. - 2022.
92 p. : il.

Dissertação (Mestrado) - Universidade do Extremo Sul Catarinense, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais, Criciúma, 2022.

Orientação: Fabiano Raupp-Pereira.
Coorientação: Paulo Helene.

1. Cimento Portland. 2. Concreto - Estrutura.
3. Reação álcalis-agregado. 4. Concreto - Aditivos. I. Título.

CDD 23. ed. 620.136

Bibliotecária Eliziane de Lucca Alosilla - CRB 14/1101
Biblioteca Central Prof. Eurico Back - UNESC

ADRIANO DAMASIO SOTERIO

**ESTUDO DE MECANISMO DE INIBIÇÃO DA REAÇÃO
ÁLCALI-AGREGADO E DE AUTOCICATRIZAÇÃO EM
CONCRETO**

Esta dissertação foi julgada e aprovada para obtenção do Grau de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais na área de concentração de Tecnologia de Materiais, no Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais da Universidade do Extremo Sul Catarinense.

Criciúma, 30 de março de 2022.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adriano Michael Bernardin

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Eduardo Junca

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Prof. Dr. Matheus Vinícius Gregory Zimmermann

Universidade do Extremo Sul Catarinense - UNESC

Dedico este trabalho à minha esposa
e meus filhos, pelo apoio e
compreensão, com muito amor.

AGRADECIMENTOS

Expresso aqui meus mais sinceros agradecimentos para aqueles que com muito carinho estiveram comigo na trajetória deste trabalho.

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me abençoado com saúde, permitindo-me superar todos os obstáculos encontrados.

Com muito amor agradeço a minha esposa Laine, meus filhos Jhonatan, Larissa e Maryana, que me apoiaram em cada etapa, me dando forças e atenção em cada momento.

Agradeço ao meu orientador, o Prof^o Dr. Fabiano Raupp, por quem tive o privilégio de ser orientado, no qual incansavelmente dedicou seu apoio e dedicação para finalização deste trabalho, contribuindo com seu grande conhecimento em cada etapa, sempre firme em cada posicionamento, mas ao mesmo tempo muito amigo e conselheiro.

Agradeço ao meu coorientador, o Prof^o Dr. Paulo Helene, que me apoiou desde início deste trabalho, antes mesmo de começarmos, com seus conselhos e opiniões sábias que tenho como exemplo profissional e pessoal em minha vida.

Agradeço ao Prof. MSc Emílio Takagi, que é um exemplo pessoal e profissional, me apoiando em muitas etapas e trocas de informações preciosas a este trabalho, sempre disposto a compartilhar seu grande conhecimento na área de autocicatrização, sendo ele meu grande incentivo para este trabalho.

Agradeço ao coordenador titular do PPGCEM o Prof^o Dr. Eduardo Junca, pelo apoio, conselhos e ajuda que foi prestada com muito carinho e preocupação, possibilitando vencer cada etapa deste trabalho.

Agradeço com muito carinho a equipe da Qualify Laboratório, que me ajudaram em todas as etapas de laboratório, onde dedicaram seu tempo e atenção a cada ensaio realizado, permitindo a este trabalho a apresentação dos resultados. Muito obrigado!

Por fim agradeço a todos os professores do PPGCEM pela dedicação e sabedoria na qual nos foi transmitido em cada disciplina, agregando a cada etapa conhecimentos que possibilitaram o avanço e finalização deste trabalho.

Se cheguei até aqui, foi por que me apoiei no ombro dos gigantes.

Isaac Newton

RESUMO

Apesar de o concreto ser um dos materiais mais utilizados no mundo, ainda existem muitas manifestações patológicas que podem ser relacionadas ao projeto, à execução e à seleção dos materiais constituintes. Entre essas manifestações patológicas estão as fissuras provocadas pela reação álcalis-agregado (RAA), fenômeno químico que desenvolve um gel sílico-alcálico de caráter expansivo a partir da reação da sílica presente no agregado com os íons alcalinos da pasta cimentícia. Os mecanismos de colmatagem das fissuras patológicas que surgem no decorrer do processo da RAA foram estudados inicialmente a partir de um traço de argamassa de referência especificado pela ABNT NBR 15577-3:2018 para escolha do agregado inócuo e o reativo. Posteriormente, foi utilizado o traço de concreto especificado pela ABNT NBR 15577-7:2018 e da reatividade dos seus constituintes. Medidas comparativas de expansão do traço de argamassa foram realizadas variando o tipo de agregado: (i) agregado potencialmente reativo com a pretensão de provocar o desenvolvimento de fissuras patológicas pela reação álcalis-agregado e (ii) agregado inócuo para o estabelecimento de um traço de referência sem qualquer reação expansiva. Para além do fator reatividade dos agregados, estes foram utilizados com granulometria miúda e graúda. A partir do traço de argamassa para o qual se comprovou a geração de fissuras (uso de agregados reativos), foram dosados os traços de concreto e moldadas as barras para os ensaios de expansão. Com esses concretos, foram realizadas adições de aditivos minerais cristalinos para a observação da colmatagem das fissuras. Com a comparação entre o traço de concreto com e sem agregado reativo, observou-se que o mecanismo de colmatagem ocorrido por meio da cicatrização autógena ligada a causas químicas apresentou, aos 56 dias de idade, uma redução da expansão nas barras de concreto com a adição de aditivo cristalino.

Palavras-chave: Cimento Portland. Concreto estrutural. Reação álcalis-agregado. Aditivo cristalino autocicatrizante.

ABSTRACT

Although concrete is one of the most used materials in the world, there are still many constructive pathologies that can be related to the design, execution and selection of constituent materials. Among these pathologies are cracks caused by the alkali-aggregate reaction (AAR), a chemical phenomenon that develops an expansive silica-alkali gel from the reaction of the silica present in the aggregate with the alkaline ions of the cement paste. The mechanisms of clogging of pathological cracks that arise during the AAR process were initially studied from a reference mortar trace specified by ABNT NBR 15577-3:2018 to choose the innocuous and reactive aggregate. Subsequently, the concrete mix specified by ABNT NBR 15577-7:2018 and the reactivity of its constituents were used. Comparative measures of expansion of the mortar mix were carried out by varying the type of aggregate: (i) potentially reactive aggregate with the intention of provoking the development of pathological cracks by the alkali-aggregate reaction and (ii) innocuous aggregate for the establishment of a trace of reference without any expansive pathology. In addition to the reactivity factor of the aggregates, they were used with fine and coarse granulometry. From the mortar mix for which the generation of cracks was verified (use of reactive aggregates), the concrete mixes were dosed and the bars were molded for the expansion tests. With these concretes, additions of crystalline mineral additives were carried out to observe the clogging of the cracks. Comparing the concrete mix with and without reactive aggregate, it was observed that the clogging mechanism occurred through autogenous healing linked to chemical causes, at 56 days of age, a reduction in expansion in the concrete bars with the addition of crystalline additive.

Keywords: Portland cement. Structural concrete. Alkali-aggregate reaction. Self-healing crystalline additive.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Base do sistema composicional de argamassas e concretos.....	25
Figura 2 – Possíveis mecanismos de colmatção natural de fissuras.	26
Figura 3 – Imagem obtida por microscopia óptica mostrando grãos de quartzo (QM) que, associados às fases cristalinas formadas a base de quartzo (QR), conferem caráter reativo. F = Feldspato.....	30
Figura 4 – Fatores condicionantes para geração das RAA em estruturas de concreto.....	34
Figura 5 - Fluxograma representativo dos materiais e ensaios de caracterização.....	35
Figura 6 - Barras de argamassa (a) desenvolvidas para o estudo e (b) em imersão na solução de hidróxido de cálcio.....	39
Figura 7 - Imagens das barras moldadas de concreto (a) CAI, (b) CAR com aditivo e (C) CAR sem aditivo.....	42
Figura 8 – Fluxograma do ensaio de expansão em barras de concreto.	43
Figura 9 - Distribuição granulométrica de ARM e AIM.	49
Figura 10 - Distribuição granulométrica de ARG e AIG.	50
Figura 11 - Difratoograma de raios X do AR e AI.....	54
Figura 12 - Ensaio de RAA de AR e AI.....	55
Figura 13 - Expansibilidade das barras de concreto.....	56
Figura 14 - Valores de absorção capilar dos concretos estudados (a) em g/cm^3 e (b) em percentual.....	58
Figura 15 - Massa específica dos concretos estudados.	60
Figura 16 - Resistência mecânica dos concretos estudados.	61
Figura 17 - Difratoograma de raios X do CAI e CAR com e sem aditivo.	62
Figura 18 - Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura de CAI com ampliação de 3000x.	63
Figura 19 - Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura de CAR com aditivo com ampliação de 3000x.....	64
Figura 20 - Análise de Microscopia Eletrônica de Varredura de CAR sem aditivo com ampliação de 3000x.....	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Limites de distribuição granulométrica dos agregados miúdos.	28
Tabela 2 – Limites de distribuição granulométrica dos agregados graúdos.	29
Tabela 3 – Diferentes aditivos por origem/característica mineral.	32
Tabela 4 – Classificação do potencial grau de reatividade do agregado em relação às medidas de expansão de barras de argamassa e concreto.	34
Tabela 5 – Dosagem de preparo do concreto CAI.	40
Tabela 6 – Dosagem de preparo do concreto CAR sem aditivo.	40
Tabela 7 – Dosagem de preparo do CAR com aditivo.	40
Tabela 8 - Caracterização física dos cimentos (valores médios).	47
Tabela 9 - Caraterização física de ARM e AIM.	48
Tabela 10 - Caraterização física de ARG e AIG.	50
Tabela 11 – Composição química dos cimentos CP V-ARI e padrão ABCP (valores médios).	51
Tabela 12 – Composição química do AR e AI.	52
Tabela 13 – Composição química do aditivo de colmatção.	53
Tabela 14 - Resultados obtidos quanto à realização do ensaio de ultrassom.	57

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

221-SHC	<i>Self-healing phenomena in cement-based materials</i>
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AI	Agregado inócuo
AIG	Agregado inócuo graúdo
AIM	Agregado inócuo miúdo
AR	Agregado reativo
ARG	Agregado reativo graúdo
ARM	Agregado reativo miúdo
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
C ₂ S	Silicato bicálcico
C ₃ A	Aluminato tricálcico
C ₃ S	Silicato tricálcico
C ₄ AF	Ferro aluminato tetracálcico
CAI	Concreto com agregado inócuo
CAR	Concreto com agregado reativo
CP V	Cimento Portland classe CP V-ARI
DRX	Difração de raios X
FRX	Fluorescência de raios X
ICP-OES	Espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado
indutivamente	
Iparque	Parque Científico e Tecnológico
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
NBR	Norma Brasileira
NM	Norma Mercosul
RAA	Reação álcalis-agregado
RAS	Reação álcalis-sílica
RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
SSS	Condição saturado com superfície seca

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	21
2 OBJETIVOS	23
2.1 OBJETIVO GERAL	23
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
3.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND AUTOCICATRIZANTE	25
3.2 CIMENTO PORTLAND	26
3.3 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS	27
3.3.1 Agregados inócuos	30
3.3.2 Agregados reativos	31
3.4 ADIÇÕES MINERAIS	31
3.5 REAÇÕES ALCALIS AGREGADOS	33
4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 MATERIAIS	35
4.1.1 Cimento	35
4.1.2 Agregados	36
4.1.3 Aditivo	36
4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE ESTUDO	36
4.2.1 Caracterização física	36
4.2.2 Caracterização química	37
4.2.3 Caracterização mineralógica	38
4.3 ARGAMASSA.....	38
4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA.....	39
4.4.1 Ensaios de expansão	39
4.5 CONCRETO	39
4.6 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO	42
4.6.1 Ensaios de expansão	42
4.6.2 Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas	43
4.6.3 Absorção de água por capilaridade	44
4.6.4 Determinação da massa específica	44
4.6.5 Resistência mecânica	44
4.6.6 Difração de raios X (DRX)	45
4.6.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
5.1 MATERIAIS	47
5.1.1 Caracterização física	47
5.1.1.1 Cimento	47

5.1.1.2 Agregado miúdo.....	48
5.1.1.3 Agregado graúdo.....	49
5.1.2 Caracterização química.....	51
5.1.2.1 Cimento.....	51
5.1.2.2 Agregados.....	52
5.1.2.3 Aditivo.....	52
5.1.3 Caracterização mineralógica.....	53
5.2 ARGAMASSA.....	54
5.2.1 Caracterização de expansibilidade.....	54
5.3 CONCRETO.....	55
5.3.1 Caracterização de expansão.....	55
5.3.2 Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas.....	57
5.3.3 Absorção de água.....	57
5.3.4 Determinação da massa específica do concreto.....	59
5.3.5 Determinação da resistência mecânica.....	60
5.3.6 Difração de raios X (DRX).....	61
5.3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	63
6 CONCLUSÃO.....	65
REFERÊNCIAS.....	67

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a construção civil vem passando por grandes mudanças na tecnologia construtiva, buscando por uma maior durabilidade e vida útil das estruturas de concreto, tendo como principal objetivo a diminuição das manifestações patológicas e a sustentabilidade das obras (DE MEDEIROS; ANDRADE; HELENE, 2011)

Os problemas patológicos estão associadas a falhas ocorridas durante as etapas de construção, seja no projeto, execução ou na utilização, e podem se manifestar durante a obra, uso ou até mesmo anos após sua conclusão (HASPARYK, 2005).

Entre as manifestações patológicas deletérias do concreto está o fenômeno da reação álcali-agregado (RAA), que se destaca por gerar um quadro de fissuração desordenada e por deformações diferenciais nas estruturas de concreto, gerando grandes custos para recuperação/reforço e, em alguns casos, condenando a estrutura (FARNY; KERKHOFF, 2007).

A RAA tem como principal agravante a sua manifestação contínua, ampliando a degradação do concreto com o passar do tempo (MIZUMOTO, 2009).

Estudos comprovam que o uso de adições (como sílica ativa e metacaulim) ao concreto proporciona ganhos de resistência mecânica, melhoria na qualidade do concreto no estado fresco e diminuição na quantidade de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2). A eficiência dessas adições minerais como inibidores da reação álcalis-agregado pode ser relacionada com o tipo e a quantidade do agregado e ao cimento utilizados nos concretos formulados (CARMO; PORTELLA, 2008).

A RAA foi descoberta há quase 80 anos, mas ainda assim existem dificuldades para se entender plenamente o fenômeno de interação química entre os constituintes do concreto (HASPARYK, 2005). Nesse processo microestrutural do concreto, a sílica do agregado interage com os íons alcalinos presentes após o contato com a umidade do ambiente. O resultado dessa reação é um gel sílico-alcalino, frequentemente visível na interface pasta/agregado e no interior do concreto, causando a expansão do corpo cimentício (FARNY; KERKHOFF, 2007).

Com a grande evolução tecnológica, estudam-se vários métodos e produtos para inibição da RAA e para o aumento da durabilidade das estruturas de concreto armado, como a tecnologia de autocicatrização (DRY, 1994).

Em 2005 foi criado pela União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção

(RILEM, do inglês *International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures*) o comitê técnico 221-SHC (*Self-healing phenomena in cement-based materials*) (DE ROOIJ et al., 2013) para estudar os fenômenos de autocicatrização em materiais de base cimentícia e com isso alcançar um novo tipo de concreto com capacidade de reparar suas próprias fissuras (TAKAGI, 2013).

Entre os estudos está a cicatrização autógena, que tem como base a melhoria do mecanismo de colmatação natural do concreto, uma capacidade de cura onde a sua cicatrização é intrínseca, desenvolvida a partir dos componentes do material cimentício. Os compostos químicos ativos reagem com a umidade do concreto fresco e com os produtos da hidratação do cimento formando uma estrutura cristalina insolúvel nos poros e capilares do concreto. Dessa maneira, o concreto poderá apresentar capacidade de estar selado contra a penetração de água ou de outros líquidos e protegido da deterioração causada por agentes agressivos da atmosfera (CAPPELLESSO, 2018).

Diante disso, a utilização de aditivos cristalino como componente para inibição da reação álcali-agregado em concretos, tema do presente trabalho, é relevante no âmbito da autocicatrização. Por meio da colmatação das fissuras e fechamento dos vazios no interior do concreto, a passagem da umidade necessária para a RAA é impedida e, por consequência, a expansão do concreto também.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a inibição da reação álcalis-agregado em um traço de concreto padrão especificado conforme a ABNT NBR 15577-7:2018 a partir do uso de um aditivo de colmatação de base química para a formação de produtos hidratados como componente funcional de autocicatrização das fissuras resultantes dessas reações expansivas.

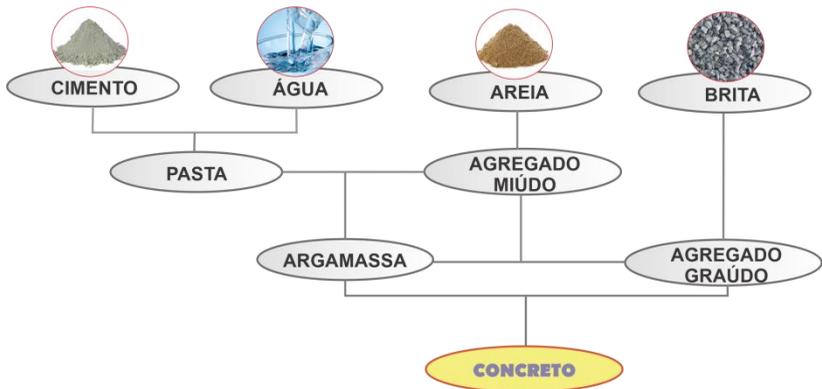
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Selecionar agregados minerais de sílica reativo e inócuo com características adequadas para a investigação de mecanismos de formação (ou não) de produtos hidratados em concretos;
- Estudar o aditivo de colmatação como componente funcional da formação de produtos hidratados de autocicatrização de fissuras provenientes de reações álcali-agregados;
- Discutir os mecanismos de inibição de RAA a partir de traços de concreto padrão, (como referência patológica, utilizando agregado reativo e inócuo selecionados com e sem o aditivo funcional de colmatação).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

A estruturação desta seção parte da representação do produto concreto apresentada na Figura 1, sendo esta estabelecida entre os seus componentes característicos: cimento/ligante, agregados (miúdos e graúdos), aditivos/adjuvantes e água.

Figura 1 – Base do sistema composicional de argamassas e concretos.



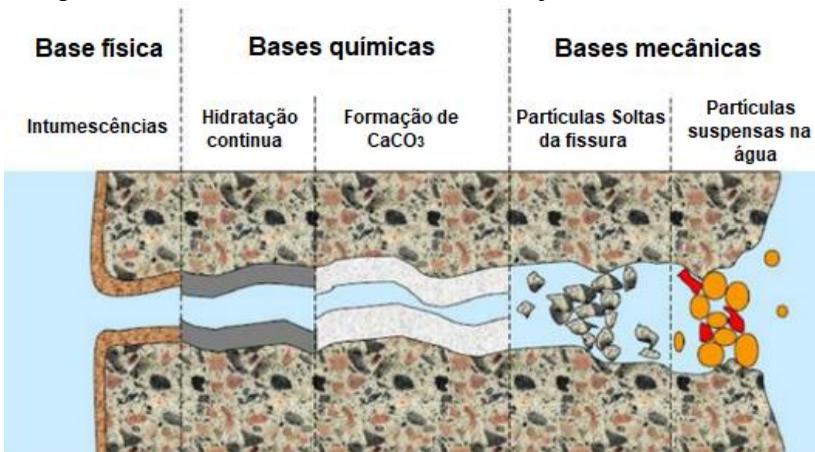
Fonte: Autor (2022).

3.1 CONCRETO DE CIMENTO PORTLAND AUTOCICATRIZANTE

O concreto de cimento Portland é o material estrutural mais utilizado na construção civil (HELENE; ANDRADE, 2017). Em sua mistura, é composto por cimento Portland (CP), água e agregados, podendo conter adições de aditivos que promovam maior durabilidade ou até mesmo outras características no estado fresco ou endurecido (HELENE; ANDRADE, 2017). O aditivo cristalino deste estudo, adicionado para a colmatação de fissuras patológicas provocadas pela reação álcali-agregado (RAA), pode ser inserido nesse contexto.

A autocicatrização é qualquer processo pelo qual o concreto se recupera de algum tipo de dano anterior, ocasionando melhora de performance com referência à sua característica original por meio de um mecanismo natural ou de autorregeneração (autógena ou autônoma). O fenômeno resulta da hidratação dos grãos de cimento Portland anidros presentes no compósito e promove o fechamento das fissuras que surgem ao longo de sua vida útil (TAKAGI, 2013). A Figura 2 ilustra os mecanismos que podem conduzir à colmatação natural das fissuras.

Figura 2 – Possíveis mecanismos de colmatção natural de fissuras.



Fonte: Adaptado de Reinhardt et al. (2013).

O efeito da cicatrização autógena, definido no objetivo deste estudo, está ligado aos mecanismos químicos, com formação de CaCO_3 no interior do concreto pelo aditivo cristalino utilizado (TAKAGI, 2013).

A autocicatrização autógena refere-se a uma capacidade curativa onde a cicatrização é intrínseca, provocada por componentes do material cimentício (TITTELBOOM et al., 2011).

Os concretos autocicatrizantes podem impermeabilizar integralmente toda a estrutura de concreto com a aplicação de um impermeabilizante à base de aditivos cristalinos (MORI et al., 1996).

O aditivo cristalino eleva a alcalinidade da água dentro das fissuras, favorecendo a formação de produtos hidratados estáveis nas faces internas das fissuras estáticas com abertura de até 0,4 mm (TAKAGI, 2013).

Do ponto de vista técnico-financeiro, acredita-se que evitar a formação de fissuras por meio da eficiência no projeto estrutural, da escolha dos materiais, da formulação/dosagem do concreto, da correção dos processos de lançamento e do adensamento e cura devem ser consideradas condições preponderantes para o desenvolvimento da área da tecnologia em concreto.

3.2 CIMENTO PORTLAND

Cimento Portland é o nome dado ao cimento obtido pela mistura de calcário, argila ou outros materiais silicosos, alumina e óxido de ferro.

Essa mistura é processada na temperatura de clínquerização (1450 °C), sendo o clínquer o material resultante (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Destacam-se os quatro principais constituintes do clínquer/cimento: C_3S (silicato tricálcico), C_2S (silicato bicálcico), C_3A (aluminato tricálcico) e C_4AF (ferro aluminato tetracálcico). Os compostos C_3S e C_2S são os mais importantes, pois são responsáveis pela resistência da pasta de cimento hidratada. Já o C_3A contribui pouco para a resistência do cimento, exceto nas primeiras idades. O C_4AF está presente em pequenas quantidades e não afeta significativamente a composição do cimento, mas ele reage com a gipsita formando o sulfoferrito de cálcio, podendo acelerar a hidratação dos silicatos (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A quantidade de sulfato de cálcio adicionada ao clínquer é importante e depende dos teores de C_3A e álcalis do cimento (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Existem no cimento compostos secundários, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O , que normalmente correspondem a um percentual pequeno na massa de cimento. Desses compostos, os óxidos de sódio e potássio (Na_2O e K_2O , respectivamente), constituintes alcalinos podem reagir com a sílica reativa (sílica amorfa na forma de opala; calcedônia; cristobalita; tridimita; entre outras) presente em alguns agregados, gerando as chamadas reações álcalis-agregado (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Para evitar a reação álcalis-sílica (RAS), recomenda-se o uso de cimentos Portland com teor de álcalis inferior a 0,6% ou, em relação ao componente cimento no concreto, que a taxa de álcalis seja inferior a 3,0 kg/m^3 (MEHTA; MONTEIRO, 2014). Portanto, a opção pelo uso do cimento Portland CP V em pesquisas com esse objetivo investigativo está relacionada com adições de filler calcário em sua composição em um teor de 6 a 10%. Ressalta-se que esse tipo de cimento não é indicado para aplicação em meios agressivos e com agregados com potencial de reação com álcalis.

3.3 CARACTERÍSTICAS DOS AGREGADOS

Segundo Neville e Brooks (2013), $\frac{3}{4}$ do volume do concreto são ocupados por agregados e por este motivo, entende-se que a qualidade destes materiais é de grande importância. Nesse sentido, as caracterizações físicas e químicas dos agregados são determinantes para atestar as características pré-estabelecidas pela ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009a). Limites de 10% de material fino passante em peneira

com abertura de malha de 0,075 mm são estabelecidos para o agregado britado submetido a desgaste superficial e de 12% para concreto protegido do desgaste superficial. De acordo com a Tabela 1, a mesma norma técnica também aplica limites para a distribuição granulométrica dos agregados miúdos usados em concretos e argamassas.

Tabela 1 – Limites de distribuição granulométrica dos agregados miúdos.

Peneira com abertura de malha (ABNT NBR NM ISO 3310-1) (ABNT, 2010)	Porcentagem em massa, retido acumulado			
	Limites inferiores		Limites superiores	
	Zona utilizável	Zona ótima	Zona ótima	Zona utilizável
9,5 mm	0	0	0	0
6,3 mm	0	0	0	7
4,75 mm	0	0	5	10
2,36 mm	0	10	20	25
1,18 mm	5	20	30	50
600 µm	15	35	55	70
300 µm	50	65	85	95
150 µm	85	90	95	100

Nota 1: O módulo de finura da zona ótima varia de 2,20 a 2,90.

Nota 2: O módulo de finura da zona utilizável inferior varia de 1,55 a 2,20.

Nota 3: O módulo de finura da zona utilizável superior varia de 2,90 a 3,50.

Fonte: (ABNT, 2009a).

A distribuição granulométrica avalia uma amostra de agregado em frações de partículas de mesma dimensão, objetivando determinar a graduação ou distribuição das dimensões do agregado. Nessa avaliação, uma amostra de agregado é classificada por meio da agitação ou vibração de uma série de peneiras organizadas em ordem decrescente, de maneira que o material retido em cada peneira represente a fração maior que a peneira subsequente (NEVILLE; BROOKS, 2013).

A distribuição granulométrica pode ser apresentada pelo cálculo da soma das porcentagens retidas acumuladas em massa nas peneiras da

série normal (módulo de finura dos agregados) (NEVILLE; BROOKS, 2013).

Na Tabela 2 estão listados os limites granulométricos para os agregados graúdos para uso em concretos.

Tabela 2 – Limites de distribuição granulométrica dos agregados graúdos.

Peneira com abertura de malha (ABNTNBR NM ISO 3310-1)	Porcentagem em massa, retido acumulado.				
	Zona Granulométrica d/D ^a				
	4,75/12,5	9,5/25	19/31,5	25/50	37,5/75
75 mm	---	---	---	---	0 – 5
63 mm	---	---	---	---	5 – 30
50 mm	---	---	---	0 – 5	75 – 100
37,5 mm	---	---	---	5 – 30	90 – 100
31,5 mm	---	---	0 – 5	75 – 100	95 – 100
25 mm	---	0 – 5	5 – 25 ^b	87 – 100	---
19 mm	---	2 – 15 ^b	65 ^b – 95	95 – 100	---
12,5 mm	0 – 5	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	---	---
9,5 mm	2 – 15 ^b	80 ^b – 100	95 – 100	---	---
6,3 mm	40 ^b – 65 ^b	92 – 100	---	---	---
4,75 mm	80 ^b – 100	95 – 100	---	---	---
2,36 mm	95 – 100	---	---	---	---

^a Zona granulométrica correspondente à menor (d) e à maior (D) dimensão do agregado graúdo.

^b Em cada zona granulométrica deve ser aceita uma variação de no máximo cinco unidades percentuais em apenas um dos limites marcados com 2). Essa variação pode também estar distribuída em vários desses limites.

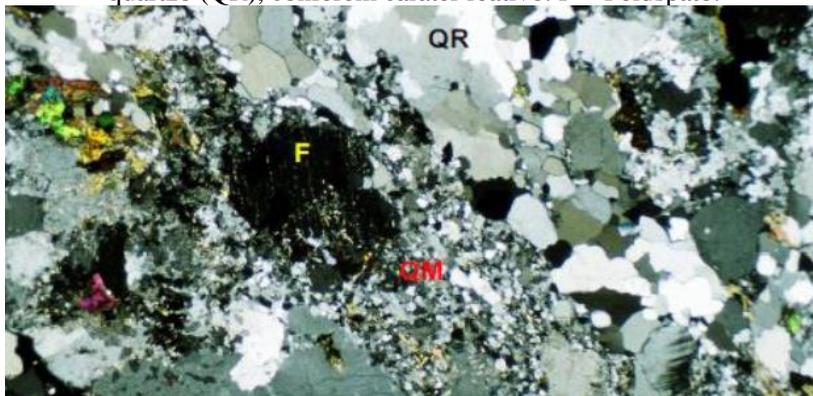
Fonte: (ABNT, 2009a).

3.3.1 Agregados inócuos

Segundo a ABNT NBR 15577-3 (ABNT, 2018a), os valores máximos aceitáveis de uma ou mais fases reativas geralmente adotados para classificar um agregado potencialmente inócuo são: 5% de quartzo microgranular ou deformado, 3% de calcedônia, 1% de tridimita ou cristobalita, 3% de vidro vulcânico ou 0,5% de opala. Acima desses valores, os agregados são considerados como potencialmente reativos. Ressalta-se que esse mineral é abundante, sendo encontrado em rochas ígneas, sedimentares e metamórficas, apresentando os polimorfos alfa (α , estável à temperatura atmosférica até 573 °C) e betha (β , estável de 573 °C a 870 °C). Acima de 870 °C, manifesta-se numa condição metaestável (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 2000).

Quanto ao agregado reativo, Munhoz (2007) afirma que depende da quantidade de fases cristalizadas desenvolvidas, pois, devido ao aumento da área de contato entre as estruturas abertas e a solução dos poros, as RAA ocorrem somente com fases pouco cristalinas e amorfas, conforme Figura 3.

Figura 3 – Imagem obtida por microscopia óptica mostrando grãos de quartzo (QM) que, associados às fases cristalinas formadas a base de quartzo (QR), conferem caráter reativo. F = Feldspato.



Fonte: Munhoz (2007).

Schovanz (2019) demonstra que os agregados da região de Porto Alegre - RS e Novo Hamburgo - RS alcançaram reatividades, aos 30 dias, de 0,61% e 0,57%, respectivamente. Ressalta-se que o ensaio de RAA (ABNT, 2018b) preconiza que quando o agregado possui massa específica superior a 2,45 g/cm³, utiliza-se uma massa de agregados finos

de 990 g. Nos casos em que a massa específica é inferior a $2,45 \text{ g/cm}^3$, deve-se recalcular o quantitativo de agregados miúdos que será utilizado.

Para os ensaios com os concretos autocicatrizantes, segundo Takagi (2013), este tipo de concreto tem caráter de alta durabilidade por meio da colmatação de fissuras de até 4 mm, conferindo redução nas propriedades de permeabilidade para o concreto, evitando a passagem de agentes agressivos do meio para o concreto.

3.3.2 Agregados reativos

Todos os agregados reativos possuem SiO_2 como maior componente e têm uma estrutura cristalina “aberta” e com defeitos. Quanto mais desordenada e instável for a estrutura dos minerais (caráter amorfo) que compõem um agregado, mais reativo ele será (CHATTERJI, 2005).

Quanto à reatividade a álcalis, os minerais apresentam estruturas desordenadas amorfas (opala e vidro), ordenadas em microcristalina a criptocristalina (calcedônia), metaestável (tridimita e cristobalita) e cristalina (quartzo e feldspato deformados e filossilicatos alterados) (GOMES NETO; BARRETO, 2013).

Esse mineral de forma cúbica é encontrado em duas condições (α , instável à temperatura atmosférica até $200\text{-}275 \text{ }^\circ\text{C}$ e β , forma estável desde $1470 \text{ }^\circ\text{C}$ até o seu ponto de fusão, $1713 \text{ }^\circ\text{C}$) (DEER; HOWIE; ZUSSMAN, 2000).

3.4 ADIÇÕES MINERAIS

Comumente são utilizados diversos tipos de adições minerais ativas no concreto para evitar as reações álcalis-agregado. Esses minerais exercem função preventiva de problemas patológicos nas estruturas (FRAGA; SILVA, 2017). A Tabela 3 relaciona alguns desses minerais.

Tabela 3 – Diferentes aditivos por origem/característica mineral.

Adições minerais		Benefícios	Tipos de soluções
Cimentantes	Escória granulada de alto-forno	Técnicos	Plasticidade e coesão ao concreto;
Cimentantes e pozolânicas	Cinzas volantes com alto teor de cálcio		diminuição da exsudação e segregação no concreto; menor porosidade = maior durabilidade;
Superpozolanas	Sílica ativa, metacaulim e cinzas de casca de arroz		ganhos de resistência mecânica; menor calor de hidratação; resistência a sulfatos
Pozolanas comuns	Cinzas volantes com baixo teor de cálcio, argilas calcinadas e materiais naturais (origem vulcânica e sedimentar)	Ecológicos	Gerados de subprodutos industriais; menor liberação de CO ₂
Pozolanas pouco reativas	Escória de alto-forno resfriada lentamente, cinzas de forno, escória de caldeira e palha de arroz queimada em campo		
Adições inertes (fíler)	Calcário, pó de cálcio, pó de pedra	Econômicos	Substituição parcial do cimento

Fonte: Mehta e Monteiro (2008).

Sobre os benefícios para o concreto endurecido, principalmente em relação à manifestação patológica das RAA, as adições minerais podem diminuir a absorção de água e a porosidade, conferindo redução de permeabilidade e impedindo a passagem de agentes agressivos do ambiente/local para o concreto. Assim, ocorre a redução dos álcalis por substituição parcial e consumo de parte deles pela reação pozolânica (ADORNO; LANGARO; DE MEDEIROS, 2018).

3.5 REAÇÕES ALCALIS AGREGADOS

A RAA tem como principal agravante a sua manifestação contínua, ampliando a degradação do concreto com o passar do tempo (MIZUMOTO, 2009).

A expansão ocasionada pela RAA promove, na maioria das vezes, fissuração do concreto, comprometendo as suas propriedades, durabilidade e vida útil, podendo causar deslocamentos e movimentação das estruturas. Dependendo do nível de fissuração, pode ocorrer a entrada de outros agentes agressivos, gerando diferentes fenômenos deletérios de outra natureza (HASPARYK, 2005).

Em geral, são três os fatores condicionantes que juntos causam a RAA deletéria em estruturas de concreto: a presença de agregado reativo; a concentração elevada de hidróxidos alcalinos (como cátions Na^+ e K^+ combinados com ânion OH^-) na solução dos poros do concreto e a presença de umidade (Figura 4) (DA SILVA, 2019).

Estudos de Perim (2013) e Lacerda & Helene, (2005) comprovam que o uso de adições como sílica ativa e metacaulim no concreto proporciona ganhos de resistência mecânica, melhoria na qualidade do concreto no estado fresco e diminuição na quantidade de hidróxido de cálcio livre (portlandita, $\text{Ca}(\text{OH})_2$). A demonstração de eficiência dessas adições minerais como inibidores da reação álcali-agregado pode ser realizada relacionando o tipo e quantidade de agregado utilizado nos concretos formulados e a quantidade e tipo de cimento.

Entre as possíveis causas da redução da durabilidade e deterioração das estruturas de concreto, a reação álcali-agregado (RAA) tem sido motivo de preocupações ao meio técnico nacional. A RAA, resumidamente, consiste em reações químicas que ocorrem entre agregados reativos (minerais silicosos reativos) e os hidróxidos alcalinos dissolvidos na solução dos poros do concreto, gerados na fase de hidratação do cimento Portland (PEREIRA et al., 2018). A Tabela 4 ilustra a classificação do potencial grau de reatividade do agregado em relação às medidas de expansão de barras de argamassa e concreto.

Figura 4 – Fatores condicionantes para geração das RAA em estruturas de concreto.



Fonte: Autor (2022).

Tabela 4 – Classificação do potencial grau de reatividade do agregado em relação às medidas de expansão de barras de argamassa e concreto.

Classificação da reatividade potencial do agregado (c)	Expansão das barras de argamassa (a)	Expansão dos prismas de concreto (b)
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19%	Menor que 0,04%
Potencialmente inócuo grau R1	Entre 0,19% e 0,40%	Entre 0,04% e 0,12%
Potencialmente inócuo grau R2	Entre 0,41% e 0,60%	Entre 0,13% e 0,24%
Potencialmente inócuo grau R3	Maior que 0,60%	Maior que 0,24%

(a) Valores com base na experiência brasileira.

(b) Valores extraídos da ASTM C 1778-16.

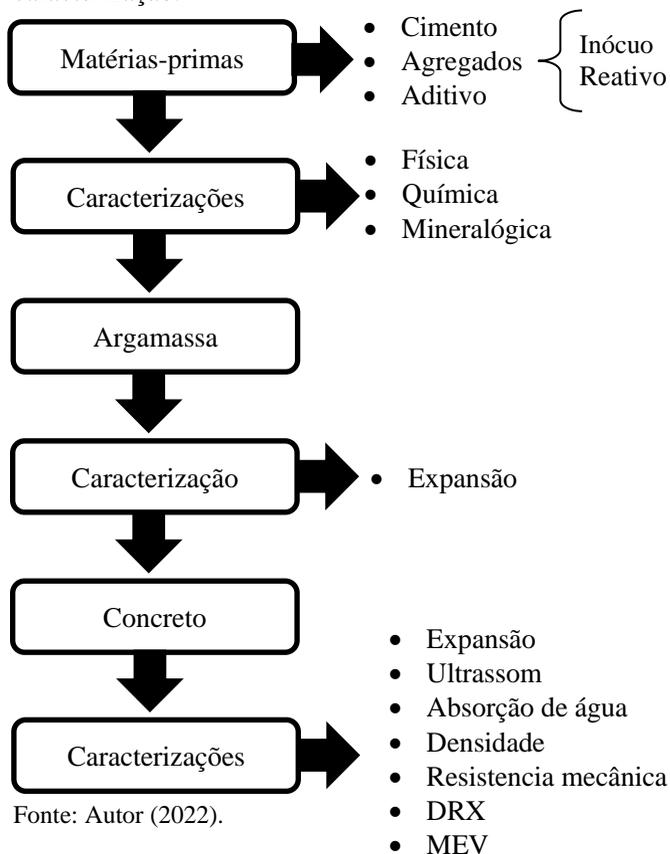
(c) Até o momento de edição desta Norma, não se dispunha de dados estatísticos suficientes para classificar o grau de reatividade do agregado segundo o método acelerado de prismas de concreto previsto na ABNT NBR 15577-7 (ABNT, 2018c).

Fonte: ABNT NBR 15577-1 (ABNT, 2018d).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Os materiais utilizados no desenvolvimento deste trabalho e os ensaios de caracterização realizados são apresentados na Figura 5.

Figura 5 - Fluxograma representativo dos materiais e ensaios de caracterização.



Fonte: Autor (2022).

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Cimento

Os cimentos de referência devem possuir uma área de superfície específica (Blaine de $4900 \pm 200 \text{ cm}^2/\text{g}$), equivalente alcalino total de 0,90

$\pm 0,10\%$, expresso em $\text{Na}_2\text{O}_{\text{eq}}$ ($0,658 \text{ K}_2\text{O}\% + \text{Na}_2\text{O}\%$), e uma expansão de autoclave inferior a $0,20\%$ (MOREIRA, 2021).

Neste estudo, foi utilizado o cimento Portland de alta resistência inicial (CP V-ARI) como ligante hidráulico. A escolha foi baseada em sua ampla utilização na fabricação de argamassas, estruturas de concreto armado, pisos industriais e pavimentos de concreto. Sua composição é formada por 90% a 94% de clínquer e gesso e 6% a 10% de material carbonático ou filer, com destaque para a ausência de aditivos minerais (ABNT, 1991).

Esse tipo de cimento é de uso comercial em toda a região sul do Brasil e apresenta características físicas e químicas próximas às do cimento padrão solicitado pela ABNT NBR 15577-5 (ABNT, 2018e).

4.1.2 Agregados

Além do agregado de referência, foram utilizados um agregado inócuo (AI), estabelecido normativamente pela norma técnica ABNT NBR 15577-5 (ABNT, 2018e), e outro potencialmente reativo (AR) estudado inicialmente por Schovanz (2019), do qual apresenta reatividade adequada para o objetivo desta pesquisa, alcançando reatividades de até $0,61\%$ aos 30 dias.

4.1.3 Aditivo

O aditivo de colmatação utilizado como agente de inibição de RAA (PENETRON ADMIX® LÍQUIDO) comercializado como um produto de impermeabilização de concretos. Esse produto de base química reage com a umidade de concretos frescos e, conseqüentemente, com os produtos da sua hidratação no desenvolvimento de reações catalíticas de cristalização no concreto.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS DE ESTUDO

4.2.1 Caracterização física

O cimento foi analisado fisicamente para avaliação de sua finura, por meio das peneiras #200 ($74 \mu\text{m}$) e #325 ($44 \mu\text{m}$), conforme a ABNT NBR 11579 (ABNT, 2012a). O tempo de início e fim de pega, foi realizado conforme a ABNT NBR 16607 (ABNT, 20018). A avaliação da área específica (método de Blaine), foi realizado conforme ABNT NBR 16372 (ABNT, 2015a).

Os ensaios de caracterização dos agregados miúdos e graúdos, para uso na composição do traço de concreto, foram realizados em conformidade com a norma técnica ABNT NBR 16915 (ABNT, 2021a). Num primeiro momento, foram separados aproximadamente 5 kg de agregado miúdo e 5 kg de agregado graúdo que por meio de quarteamo, foram reduzidos a 1 kg para cada. As amostras foram secas em estufa (Sterilifer/SX1.3DTMS) a $105 \text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5 \text{ }^{\circ}\text{C}$ por 24 horas para eliminar a umidade.

Os ensaios de caracterização granulométrica dos agregados miúdos e graúdos foram realizados de acordo com a norma técnica ABNT NBR NM 248 (ABNT, 2003).

Os agregados miúdos, foram submetidos ao procedimento de peneiramento, em peneiras 6,3 mm; 4,75 mm; 2,36 mm; 1,18 mm; 0,60 mm; 0,30 mm; 0,15 mm e 0,075 mm. Calcularam-se os percentuais retidos e módulos de finura de cada amostra, sendo o procedimento realizado para duas amostras da mesma areia (amostras A e B - ensaios de prova e contra prova).

Já os agregados graúdos, passaram pelo processo de peneiramento nas peneiras 25 mm; 19 mm; 12,5 mm; 9,5 mm e fundo, dos quais foram calculados os percentuais retidos e módulo de finura para duas amostras de cada material.

Para os agregados miúdos, a determinação do teor de absorção de água foi realizada conforme a ABNT NBR 16916 (ABNT, 2021b).

Também foram realizados ensaios de determinação da massa específica e massa específica aparente para os agregados miúdos e graúdos. Esses ensaios foram realizados conforme a ABNT NBR 16916 (ABNT, 2021b) e ABNT NBR 16917 (ABNT, 2021c), respectivamente.

Para ambos os agregados, foram determinadas as massas unitárias e os volumes de vazios de acordo com a norma ABNT NBR 16972 (ABNT, 2021d).

Por fim, foi realizada a determinação do material passante em peneira com abertura de malha de 0,075 mm (ABNT, 2021e), onde as partículas de argila e outros materiais que se dispersam por meio de lavagem e materiais solúveis em água são removidos do agregado durante o ensaio.

4.2.2 Caracterização química

O CP V-ARI foi caracterizado quimicamente pelos métodos Padrão da *National Institute of Standards and Technology* (NIST, 1989,

2005): *Standart Reference Material 1885 – Cement Composition* e *Standart Reference Material 114p – Portland Cement Fineness Standart*.

Os agregados AI e AR foram caracterizados por fluorescência de raios X (FRX) em um equipamento EDX 7000 (Shimadzu), pelo método semi-quantitativo para amostras sólidas e com determinação de amostras preparadas com o teste de perda ao fogo, segundo a D7348-21 (ASTM, 2021).

O aditivo de colmatação foi caracterizado por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES), método 3120 B/PO-248 para a realização simultânea de varredura composicional.

4.2.3 Caracterização mineralógica

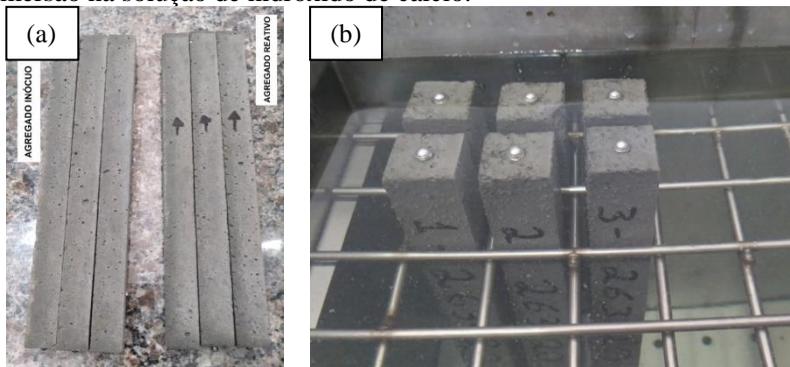
As fases cristalinas do AI e do AR foram identificadas por difração de raios X (DRX) em um difratômetro Phillips X'Pert MDP operando com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54060 \text{ \AA}$), voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA. A análise foi realizada no intervalo em 2θ de 4° a 70° , com velocidade de goniômetro de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$.

4.3 ARGAMASSA

A argamassa para os ensaios de RAA em barras foi preparada conforme o preconizado na ABNT NBR 15577-4 (ABNT, 2018b) onde os agregados miúdos são classificados por peneiramento e posteriormente lavados em água corrente, afim de eliminar materiais pulverulentos. Para a dosagem foi utilizado um fator A/C de 0,47 e os corpos de prova prismáticos moldados nas dimensões de 25 x 25 x 285 mm (Figura 6 a). O procedimento de moldagem foi realizado em duas camadas com aplicação de vinte golpes de soquete e leves golpes nos cantos das formas para fechar o máximo de vazios, bem como a fixação dos pinos nas extremidades das barras.

As barras de argamassa permaneceram em imersão em hidróxido de cálcio por 30 dias (Figura 6 b) a fim de acelerar o processo da reação álcali-agregado (RAA), uma vez que o hidróxido de cálcio é um dos fatores críticos para a formação do RAA (CARDE; FRANÇOIS, 1997).

Figura 6 - Barras de argamassa (a) desenvolvidas para o estudo e (b) em imersão na solução de hidróxido de cálcio.



Fonte: Autor (2022).

4.4 CARACTERIZAÇÃO DA ARGAMASSA

4.4.1 Ensaio de expansão

Para avaliação da reação álcali-agregado (RAA), o ensaio de expansão nas barras de argamassa foram realizados, conforme a ABNT NBR 15577-4 (ABNT, 2018b) e com corpos de prova do tipo prismático moldados para cada amostra. Foi utilizado uma câmara de banho com aquecimento (Solotest).

A reatividade relativa de uma determinada forma de sílica é determinada pelo número de ligações silício-oxigênio-silício interrompidas, uma questão de superfície específica e "buracos" devido a arranjos atômicos desordenados. O ataque cáustico à sílica reativa na presença de excesso de cal produz um complexo cal-alcalino-sílica que não intumescce se o equilíbrio químico for alcançado (POWERS; STEINOUR, 1955).

4.5 CONCRETO

Foram desenvolvidos concretos com aplicação do agregado inócuo (CAI) e com o agregado reativo (CAR), sendo esse avaliado com e sem a utilização do aditivo de colmatção. As dosagens são ilustradas na Tabela 5 para CAI, Tabela 6 para CAR com o aditivo e Tabela 7 para CAR sem aditivo. Os corpos de prova foram moldados nas dimensões de 75 x 75 x 285 mm (Figura 7) para ensaios de longa duração, segundo a ABNT NBR

15577-7 (ABNT, 2018c). Para cada amostra, foram moldados três corpos de prova, sendo a moldagem realizada em uma camada com adensamento manual.

Tabela 5 – Dosagem de preparo do concreto CAI.

Insumo	Quantidade – SSS* (kg/m³)	Quantidade para 20 L – SSS (kg)
AIM	706	14,05
AIG	1256	25,21
Cimento CP V – ARI	420	8,48
Água	189	4,17
Adição de NaOH	1,898	0,03832

* Condições saturado com superfície seca.

Fonte: Autor (2022).

Tabela 6 – Dosagem de preparo do concreto CAR sem aditivo.

Insumo	Quantidade – SSS* (kg/m³)	Quantidade para 20 L – SSS (kg)
AIM	668	13,18
AIG	1193	23,75
Cimento CP V – ARI	420	8,48
Água	189	4,45
Adição de NaOH	1,898	38,33 (g)
Aditivo	-	-

* Condições saturado com superfície seca.

Fonte: Autor (2022).

Tabela 7 – Dosagem de preparo do CAR com aditivo.

Insumo	Quantidade – SSS* (kg/m³)	Quantidade para 20 L – SSS (kg)
AIM	668	13,18
AIG	1193	23,75
Cimento CP V – ARI	420	8,48
Água	189	4,45
Adição de NaOH	1,898	38,33(g)
Aditivo	8,40	169,60 (g)

* Condições saturado com superfície seca.

Fonte: Autor (2022).

Os quantitativos dos traços seguiram a orientação do item 7 da norma:

- Dimensão máxima característica do agregado graúdo: 19 mm;
- Dimensão mínima do agregado graúdo: 12,5 mm;

- Módulo de finura do agregado miúdo: $2,7 \pm 0,2$;
- Agregados saturados com superfície seca ou com sua absorção de água compensada;
- Consumo de cimento: $420 \pm 10 \text{ kg/m}^3$;
- Relação água/cimento: 0,45;
- O volume do agregado graúdo, no estado compactado seco, deve ser de $70,0 \pm 0,2\%$ do volume total do concreto;
- O teor de argamassa normalmente situa-se na faixa de $50 \pm 3\%$, sendo definido no ajuste do traço e calculado conforme a Equação 1.

$$Arg = \frac{1+a}{1+m} \times 100 \quad (1)$$

Onde:

Arg é teor de argamassa;

a é a quantidade, em massa, de agregado miúdo na mistura, expressa em gramas (g); e

m é a quantidade total dos agregados na mistura (soma das quantidades, em massa, de agregados miúdos e graúdos), expressa em gramas (g).

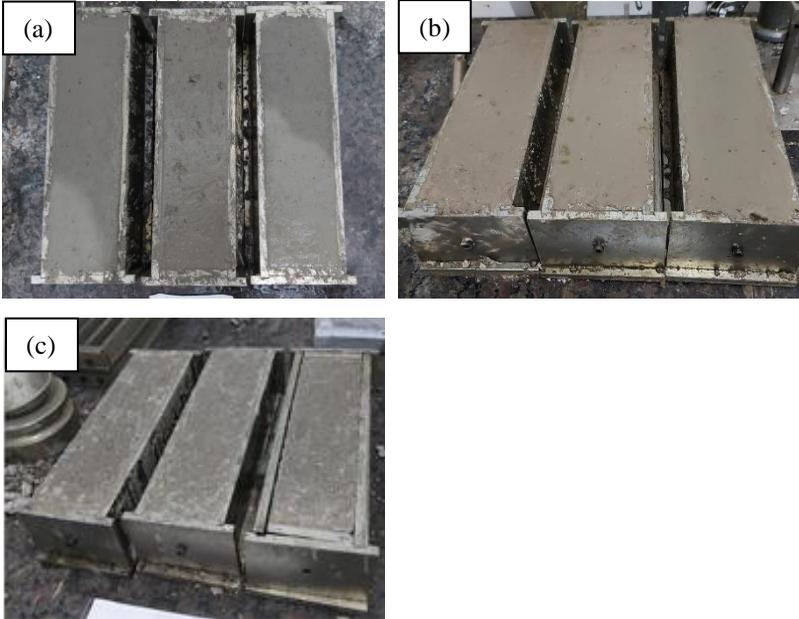
A mistura foi separada em três etapas, sendo 3 minutos iniciais, seguidos de 3 minutos de descanso com proteção da boca da betoneira para evitar evaporações e terminando com mais 2 minutos de mistura.

A moldagem dos corpos de prova foi realizada conforme orientação da ABNT NBR 5738 (ABNT, 2015b), com adensamento em uma camada aplicando 75 golpes com a haste de *slump test* de maneira uniforme. Posteriormente, foram adicionados golpes com martelo de borracha em seu entorno, com intuito de expulsar possíveis vazios nas laterais da forma/molde.

Após a moldagem, os corpos de prova foram acondicionados por 24 horas em bandejas cobertas por pano úmido, sendo então desformados e identificados. Após esse processo, foram acondicionados em recipientes fechados com lâmina d'água de $20 \pm 5 \text{ mm}$ acima do fundo e mantidos em estufa (Sterilifer/SX1.3DTMS) com temperatura controlada de $60 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$. As medidas de comprimento dos prismas foram realizadas nas idades de 1, 7, 28 e 56 dias.

Todos os corpos de prova foram retirados da estufa e mantidos em temperatura ambiente ($24 \text{ }^\circ\text{C}$) por 48 horas antes de cada leitura e levados novamente à estufa na sequência.

Figura 7 - Imagens das barras moldadas de concreto (a) CAI, (b) CAR com aditivo e (C) CAR sem aditivo



Fonte: Autor (2022).

4.6 CARACTERIZAÇÃO DO CONCRETO

4.6.1 Ensaio de expansão

A reatividade alcalina do agregado pode encontrar sua expressão quantitativamente na medida de expansão, mas as conclusões geralmente são obtidas após seis meses a um ano (ou três meses para dizer o mínimo) (MING-SHU; SU-FEN; SHI-HUA, 1983).

Para análise da RAA em barras de concreto, foi realizado ensaio de expansão conforme orientação da NBR 15577-7 (ABNT, 2018f).

Os ensaios de expansão com as barras (prismas) de concreto seguiram o fluxograma da Figura 8. Os corpos prismáticos de 285 x 75 x 75 mm, padronizados pela NBR 15577-7 (ABNT, 2018f) a qual estabelece a adição de hidróxido de sódio na água de amassamento para incremento do tempo de resposta com relação à determinação da reatividade potencial do agregado. O ensaio foi realizado em cura térmica a 60°C por um período de 20 semanas.

Figura 8 – Fluxograma do ensaio de expansão em barras de concreto.



Fonte: Autor (2022).

4.6.2 Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica é padronizado pela norma NBR 8802 (ABNT, 2019), a qual afirma que este ensaio consiste na avaliação de velocidade de propagação de ondas, obtidas por pulsos ultrassônicos, através de dois pontos estabelecidos. O aparelho de ultrassom é responsável por fornecer o tempo em que o pulso leva de um ponto ao outro, a distância entre os dois pontos e, a partir disso, a velocidade da onda é obtida (PIAZZA et al., 2020).

A partir das velocidades de propagação da onda ultrassônica pôde-se avaliar a qualidade e homogeneidade do concreto, utilizando o critério exposto no Quadro 1.

Quadro 1 - Critério utilizado para a avaliação da qualidade do concreto.

Velocidade de propagação de onda ultrassônica no concreto (m/s)	Qualidade do concreto
> 4500	Excelente
3500 a 4500	Bom
3000 a 3500	Regular
2000 a 3000	Ruim
< 2000	Péssimo

Fonte: Adaptado de Cánovas, (1988).

Com este ensaio também pode-se determinar o módulo de elasticidade do concreto, sua massa específica, estimativa de resistência a compressão e determinar a profundidade de fissuras em uma estrutura de concreto.

Neste estudo foi realizado o ensaio de ultrassom com o equipamento de ondas ultrassônica da marca WINTEST, modelo IWIN 910, utilizando 2 corpos de prova para cada leitura.

4.6.3 Absorção de água por capilaridade

O meio mais frequente de agentes agressivos entrarem em contato com o concreto é através dos poros, que possuem como vetor a água através do mecanismo de absorção capilar (HELENE, 1993).

Para avaliação desse comportamento, foi realizado o teste de absorção de água por capilaridade, em conformidade com a norma técnica NBR 9779 (ABNT, 2012b).

O ensaio foi realizado em 3 prismas de concreto mantidos em reservatório com uma lâmina de água de 5 ± 1 mm acima da face inferior do corpo de prova, durante um período de 72 horas.

4.6.4 Determinação da massa específica

O procedimento de obtenção da massa específica do concreto pesquisado foi baseado na NBR 9778 (ABNT, 2009b).

Para tal, foram pesados (balança BALMAK, modelo ELC 6/15/30 de precisão de 0,02 g) 3 corpos de prova de cada amostra de concreto preparada. Após a obtenção das massas, e medições das dimensões dos corpos de prova para a obtenção do volume, foram realizados os cálculos de massa específica.

4.6.5 Resistência mecânica

A resistência mecânica é a principal propriedade avaliada em concretos estruturais. A medida da resistência à compressão qualifica o concreto mecanicamente, permitindo detectar modificações na uniformidade, proporcionamento e natureza dos materiais por meio de sua variação (ESTACECHEN, 2020).

O ensaio de resistência a compressão axial foi realizado em obediência a NBR 5739 (ABNT, 2018g) a partir da extração de 2 testemunhos de cada prisma, seguindo as orientações da NBR 7680 (ABNT, 2015), e preparação da superfície da base e topo por retificação. Os ensaios mecânicos foram realizados em uma prensa hidráulica da marca FORTEST, modelo FT200.

4.6.6 Difração de raios X (DRX)

A técnica de difração de raios X (DRX) tem sido amplamente utilizada para investigar as transformações de fases cristalinas após a hidratação e cura de concreto (SCRIVENER et al., 2004; SILVA et al., 2020).

A análise de DRX foi realizada nas amostras CAI, CAR (com e sem aditivo), para avaliar o comportamento da colmatagem após 56 dias de cura. Para esse ensaio, foi utilizado um difratômetro Shimadzu modelo XRD 6000, operando com radiação $\text{CuK}\alpha$ ($\lambda=1,54060 \text{ \AA}$), voltagem de 40 kV e corrente de 30 mA. A análise foi realizada no intervalo em 2θ de 10° a 80° , com velocidade de goniômetro de $2^\circ/\text{min}$ e passo de $0,02^\circ$.

A identificação das fases do ensaio de difração de raio-X fora realizada através do Software X'Pert HighScore Plus. Os dados para identificação dos picos foram obtidos no banco de dados do Software.

4.6.7 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura tem vantagens distintas na caracterização da microestrutura do concreto, cimento e agregados e na interpretação das causas da deterioração do concreto. A imagem de microscópio eletrônico de varredura facilita a identificação de constituintes de pasta de cimento endurecido com maior contraste e maior resolução espacial do que para métodos ópticos e fornece capacidade auxiliar para análise de elementos e geração de imagens. Informações quantitativas podem ser extraídas desses dados, como composição, abundância de fases e distribuição (STUTZMAN, 2000).

Para verificar o comportamento microestrutural das amostras, as mesmas foram analisadas por MEV (Zeiss, EVO MA10).

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 MATERIAIS

5.1.1 Caracterização física

5.1.1.1 Cimento

A Tabela 8 ilustra as características físicas do cimento CP V-ARI, comparado com modelo de cimento padrão da ABCP (Associação Brasileira de Cimento Portland). É possível observar que o cimento utilizado no estudo apresenta características similares às do cimento padrão da ABCP.

O cimento CP V-ARI é um tipo de cimento que em sua maioria não contém nenhum tipo de adição na sua composição, onde em casos excepcionais podem contar no máximo 5% de adição de material carbonático, característico com sua capacidade de obtenção de resistências iniciais (DE ARAÚJO JR. *et al.*, 2016).

O cimento Padrão ABCP é produzido a partir de um cimento Portland de alta resistência inicial – CP V-ARI, que atende integralmente aos requisitos da NBR 16697 (ABNT, 2018h), com área específica de (4900 ± 200) cm²/g determinada de acordo com a NBR 16372 (ABNT, 2015a), equivalente alcalino total expresso em Na₂O_{eq} (0,658 %K₂O + %Na₂O) de $(0,90 \pm 0,10)$ %, determinado de acordo com a NBR NM 17 (ABNT, 2012c) e expansão em autoclave inferior a 0,20%, determinada pelo método prescrito pela ASTM C 151 (ASTM, 2010).

Tabela 8 - Caracterização física dos cimentos (valores médios).

		Cimento	
		CP V-ARI	Padrão ABCP
Expansibilidade a quente		0,22 mm	0,2 mm
	Início	03h52min	03h27min
Tempo de pega	Fim	05h18min	04h09min
Consistência normal		29,40%	30%
Blaine		4,157 cm ² /g	4,385 cm ² /g
#200		0,07%	0,06%
#325		0,45%	0,43%

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

Fonte: Autor (2022).

5.1.1.2 Agregado miúdo

Observa-se pela caracterização física (Tabela 9) que para ambos agregados (ARM e AIM) o teor de pulverulento passante em peneira com abertura de malha de 0,075 mm está acima do percentual máximo indicado na ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009a), que é 12% para concretos protegidos de desgastes superficial. Percebe-se que a distribuição granulométrica (Figura 9) desses agregados atende aos requisitos estabelecidos pela mesma norma, estando dentro dos limites utilizáveis e ótimo da curva. Para ARM, ressalta-se apenas uma saída na peneira com abertura de malha de 0,15 mm, que pode ser facilmente ajustada em um desenvolvimento de traço de concreto. Já para AIM, verifica-se uma descontinuidade nas peneiras com abertura de malha de 0,3 mm e 0,15 mm, que também pode ser corrigida no desenvolvimento de traços de concreto.

Tabela 9 - Caracterização física de ARM e AIM.

Ensaio		ARM		AIM	
Material pulverulento passante em peneira com abertura de 0,075mm		14,97%		15,78%	
Massa específica		2,809 g/cm ³		2,949 g/cm ³	
Massa unitária		1,524 g/cm ³		1,580 g/cm ³	
Índice de vazios		45,6%		46,6%	
Absorção de água		2,26%		1,39%	

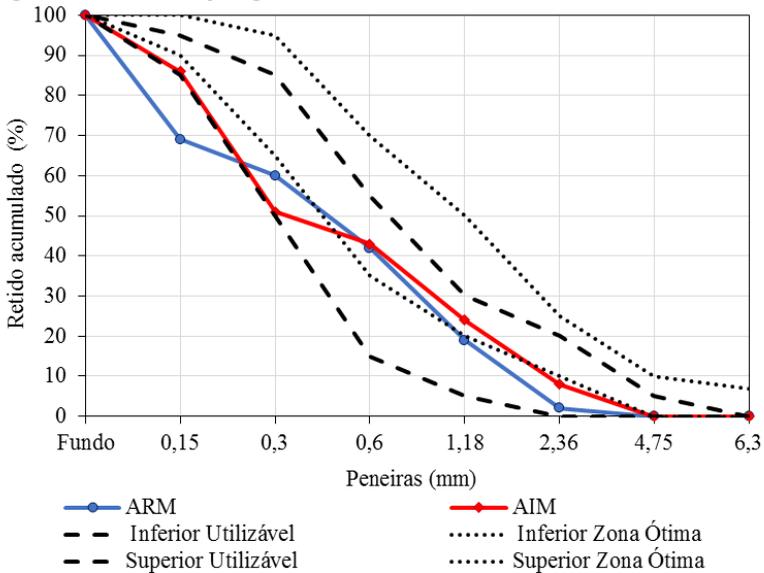
Número	Peneiras Abertura (mm)	Média retido (g)		Retido (%)		Acumulado (%)	
		ARM	AIM	ARM	AIM	ARM	AIM
3/8"	9,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
1/4"	6,3	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
4	4,75	15,9	1,8	1,6	0,2	0,0	0,0
8	2,36	176,2	76,3	17,4	7,5	2,0	8,0
16	1,18	228,7	162,5	22,6	15,9	19,0	24,0
30	0,6	186,0	189,8	18,4	18,6	42,0	43,0
50	0,3	93,9	79,6	9,3	7,8	60,0	51,0
100	0,15	130,9	354,7	13,0	34,7	69,0	86,0
200	0,075	67,8	57,7	6,7	5,6	82,0	----
Fundo		110,5	99,6	10,94	9,75	100	100
Total		1009,8	1009,8	-----	-----	-----	----
		8					

Fonte: Autor (2022).

Os grãos dos agregados com formato arredondado aumentam a compacidade do concreto e melhoram a trabalhabilidade, além de

influenciar o ângulo de atrito interno dos grãos de areia, melhorando a dispersão. Além disso, os grãos mais arredondados reduzem o consumo de água necessário para a consistência desejada da mistura (BARBOSA; SANTOS; COURA, 2018). As partículas angulares produzem um compósito cimentício mais resistente, permitindo maior adesão entre elas, porém, devido à maior área específica, tendem a exigir mais água para a mesma trabalhabilidade (BARBOSA et al., 2021).

Figura 9 - Distribuição granulométrica de ARM e AIM.



Fonte: Autor (2022).

5.1.1.3 Agregado graúdo

A caracterização física de ARG e AIG são apresentados na Tabela 10, revelando que ambos os agregados atendem aos requisitos da ABNT NBR 7211 (ABNT, 2009a). A distribuição granulométrica é apresentada na Figura 10, onde é possível observar que AIG fica fora dos limites indicados, com maior desvio nas peneiras com abertura de 12,5 mm e 9,5 mm.

Ressalta-se que características dos agregados, como tamanho, gradação, forma, textura da superfície e fração volumétrica, têm efeitos significativos na reologia do concreto (HU; WANG, 2011).

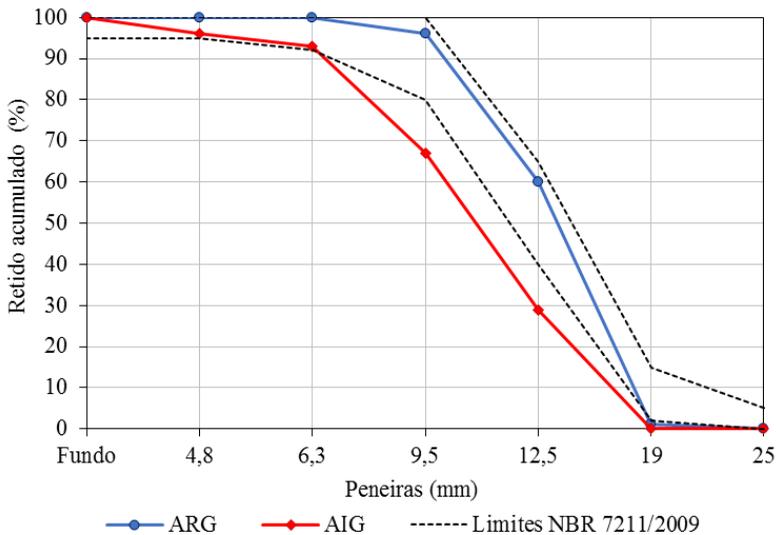
Tabela 10 - Caracterização física de ARG e AIG.

Ensaio		ARG		AIG	
Material pulverulento passante em peneira com abertura de 0,075mm		0,69%		1,26%	
Massa específica		2,806 g/cm ³		2,97 g/cm ³	
Massa unitária		1,428 g/cm ³		1,55 g/cm ³	
Índice de vazios		48,9%		47,90 %	
Absorção de água		1,40%		0,58 %	

Número	Abertura (mm)	Média retido (g)		Retido (%)		Acumulado (%)	
		ARG	AIG	ARG	AIG	ARG	AIG
1"	25	0,0	0,0	0,0	0,0	0	0,0
¾"	19	58,0	4,7	1,2	0,1	1	0,0
½"	12,5	2932,5	1490,6	58,7	28,9	60	29,0
3/8"	9,5	801,6	1979,4	36,1	38,4	96	67,0
¼"	6,3	196,1	1337,3	3,9	25,9	100	93,0
4	4,75	2,7	141,6	0,1	2,7	100	96,0
Fundo		110,5	206	0,1	4,0	100	100
Total		1009,8	5159,5	-----	-----	-----	-----

Fonte: Autor (2022).

Figura 10 - Distribuição granulométrica de ARG e AIG.



Fonte: Autor (2022).

5.1.2 Caracterização química

5.1.2.1 Cimento

A composição química do cimento CP V-ARI, utilizado no estudo, é apresentado juntamente com o padrão da ABCP na Tabela 11. É possível observar que o cimento utilizado está com a característica química muito similar aos valores médios do padrão ABCP, tendo majoritariamente óxido de cálcio (CaO) com 59,2% seguido da sílica (SiO₂) com 17,4%, e em teores menores, a alumina (Al₂O₃) com 4,2% e óxido de ferro (Fe₂O₃) com 2,8%. Esses óxidos estão associados aos quatro compostos principais do cimento Portland: silicato tricálcico (3CaO·SiO₂), silicato dicálcico (2CaO·SiO₂), aluminato tricálcico (3CaO·Al₂O₃), e aluminoferrita tetracálcica (4CaO·Al₂O₃·Fe₂O₃) (TENÓRIO et al., 2003). Também consta a presença do óxido de magnésio (MgO) com 6,1%, que tem função de estabilização dimensional da pasta após a eliminação da água (SILVA; GOMES, 2019) e por fim uma pronunciada perda ao fogo devido a decomposição do calcário liberando CO₂, conforme Equação 2 (SILVA; BORGES; BARAÑANO, 2021).



Tabela 11 – Composição química dos cimentos CP V-ARI e padrão ABCP (valores médios).

	Teor (%)	
	CP V-ARI	Padrão ABCP
Al ₂ O ₃	4,2	4,2
SiO ₂	17,4	18,9
Fe ₂ O ₃	2,8	2,7
CaO	59,2	60,7
MgO	6,1	4,1
SO ₃	2,8	2,9
Perda ao fogo	5,5	3,3
CaO livre	0,6	0,7
Resíduo insolúvel	1,7	0,8
Equivalente alcalino	0,68	0,71

ABCP: Associação Brasileira de Cimento Portland

Fonte: Autor (2022).

5.1.2.2 Agregados

A composição química do AR e AI, determinadas por FRX, são apresentadas na Tabela 12. É possível observar que ambos os agregados ilustram teores dos óxidos muito similares, tendo a sílica (SiO_2) como maior percentual (56,43 e 50,16). Na sequência Fe_2O_3 (14,26% e 17,38%) e Al_2O_3 (13,34% e 13,80%) são óxidos com teores mais relevantes. Esses óxidos, bem como CaO (7,12% e 9,56%) e MgO (2,91% e 2,90%).

É possível observar a presença de álcalis (Na_2O e K_2O) em teores somados de 2,9% para AR e 3,1% para AI. O aumento do teor alcalino pode ser nocivo as propriedades mecânicas do concreto (SMAOUI et al., 2005).

Tabela 12 – Composição química do AR e AI.

Óxidos	Teor (%)	
	AR	AI
SiO_2	56,43	50,16
Fe_2O_3	14,26	17,38
Al_2O_3	13,34	13,80
CaO	7,12	9,65
MgO	2,91	2,90
Na_2O	1,66	1,92
TiO_2	1,52	1,87
K_2O	1,24	1,22
MnO	0,23	0,28
SO_3	0,15	0,13
Perda ao fogo	0,98	0,50

Fonte: Autor (2022).

5.1.2.3 Aditivo

A caracterização química do aditivo de colmatação (Tabela 13) revelou majoritariamente a presença de alumínio, cálcio, magnésio e sódio. Esses constituintes indicam a ação de ativação alcalina (de caráter químico) para o aditivo.

Tabela 13 – Composição química do aditivo de colmatação.

Análise	Unidade	LQ*	Resultado
Boro	mg/L	0,10	0,40
Fosfato	mg/L	0,30	< 0,30
Alumínio	mg/L	0,10	25,00
Cálcio	mg/L	0,10	25,70
Ferro total	mg/L	0,05	8,82
Lítio	mg/L	0,01	0,30
Magnésio	mg/L	0,01	25,22
Potássio	mg/L	0,10	2,60
Sódio	mg/L	0,10	1536,70

*Limite de quantificação.

Fonte: Autor (2022).

5.1.3 Caracterização mineralógica

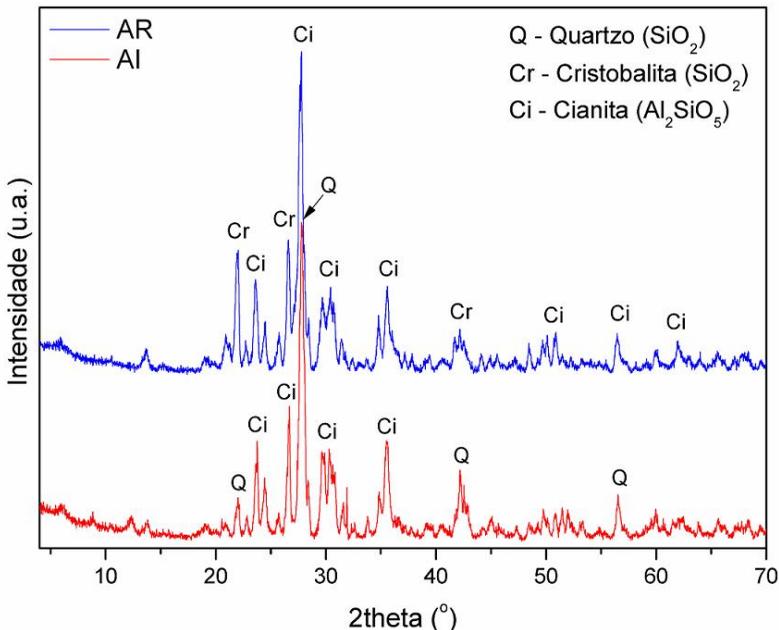
Na caracterização mineralógica dos agregados (DRX, Figura 11), AI apresentou a fase estável da sílica (quartzo, SiO_2 - cartão PDF 46-1045) e cianita (Al_2SiO_5 - cartão PDF 11-0046). Já AR, além da cianita, revelou a fase instável da sílica (cristobalita, $\text{SiO}_2\text{-}\alpha$ - cartão PDF 01-0438).

O quartzo é quase sempre inerte quando usado como agregado no concreto (DIVYA; SHANTHINI; ARULKUMARAN, 2016; KUMAR et al., 2016). Sílica amorfa, quartzo desordenado e cristobalita meta-estável são pozolanas clássicas. Normalmente, o quartzo é considerado um material inerte, mas o quartzo ordenado de grão fino também reagirá se tiver uma área de superfície muito alta, ou seja, partículas muito finas. (MOOSBERG-BUSTNES; LAGERBLAD; FORSSBERG, 2004).

A cianita pode melhorar a capacidade da blindagem e aumentar consideravelmente a resistência mecânica do concreto (DJANGANG et al., 2015; MANN; KORKUT, 2013).

A cristobalita, é considerada uma forma altamente reativa do quartzo, causando reação álcali-sílica. Se em um agregado conter uma pequena quantidade de cristobalita (cerca de 1%), o concreto feito com este agregado é propenso a rachaduras devido à reação álcali-sílica (JÓZWIAK-NIEDZWIĘDZKA et al., 2015).

Figura 11 - Difratoograma de raios X do AR e AI.



Fonte: Autor (2022).

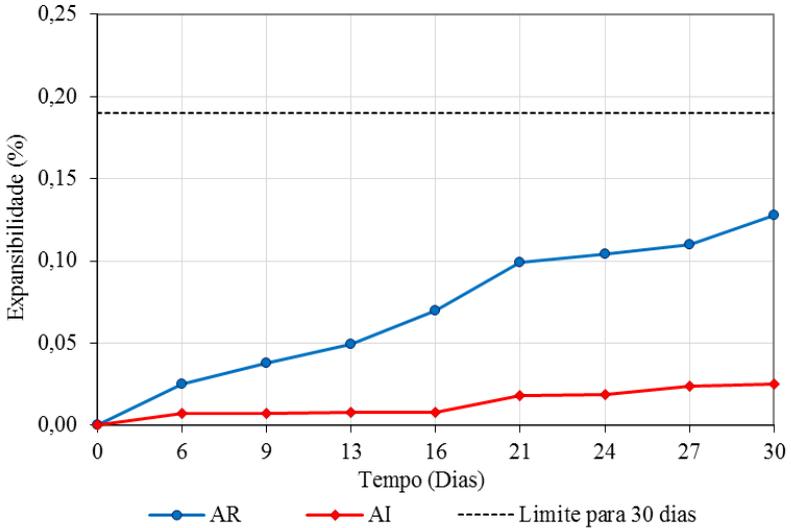
5.2 ARGAMASSA

5.2.1 Caracterização de expansibilidade

Para avaliar a reatividade dos agregados na argamassa, foi realizado o ensaio de expansão dos corpos-de-prova, sendo considerado reativo aqueles que apresentaram variação maior ou igual a 0,19% aos 30 dias de idade, conforme NBR 15577-4 (ABNT, 2018b) e NBR 15577-5 (ABNT, 2018e).

O ensaio de RAA (Figura 12), mostra que ambos os agregados ficaram abaixo do limite estabelecido de 0,190% de expansão. AR apresentou uma expansão média de 0,130%, e apesar de estar abaixo do limite especificado pela norma técnica, o material demonstra um potencial reativo pela observação da expansão crescente. Já AI teve uma média de 0,025%, descartando a possibilidade desse agregado ser reativo ao longo da vida útil do concreto.

Figura 12 - Ensaio de RAA de AR e AI.



Fonte: Autor (2022).

5.3 CONCRETO

5.3.1 Caracterização de expansão

Foi observado que todas as amostras ficaram abaixo do limite estabelecido para expansibilidade do concreto (Figura 13). CAI obteve menor expansibilidade (0,007%) aos 56 dias. Já CAR ilustrou maior expansibilidade, aproximando-se dos limites técnicos, indicado pela amostra sem aditivo que teve maior expansibilidade (0,036%), diminuindo com a adição do aditivo (0,027%).

Comparando os resultados dos ensaios de expansibilidade, observa-se que os agregados inócuos não desenvolvem RAA. Para os agregados classificados como potencialmente reativos, é possível observar leves reações álcalis-agregado, assim como aquelas das barras de argamassas, aos 30 dias. Mesmo abaixo do limite especificado pela NBR 15577-4 (ABNT, 2018b) (0,190% para barras de argamassa), essa reação revelou valores crescentes no fim do ensaio, dando fortes indícios de reatividade.

Já quando testado em barras de concreto, o agregado reativo sem adição de aditivo cristalino mostrou na medição final aos 56 dias uma

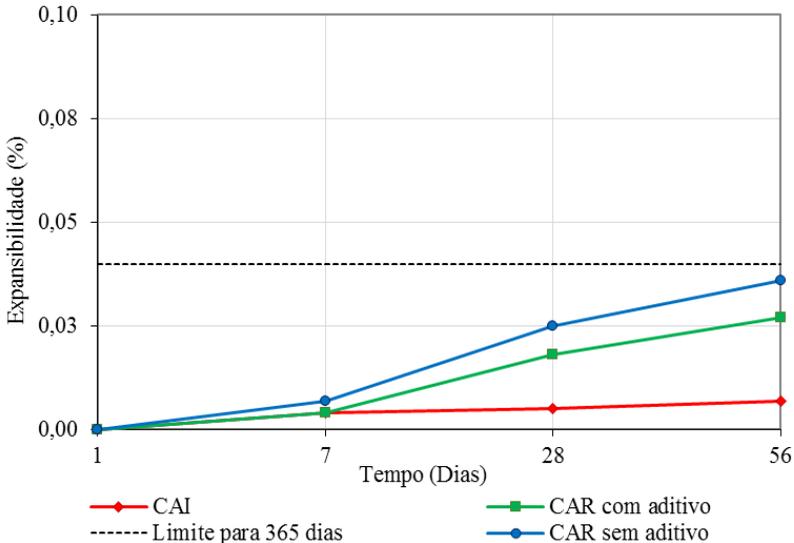
expansão de 0,036%, indicando uma variação dimensional típica destes agregados. Possivelmente, a continuidade deste estudo com os mesmos agregados revelaria uma maior expansão tanto na análise acelerada de barra de concreto quanto na análise prolongada de 12 meses.

Observando os resultados obtidos para o concreto CAR com adição do aditivo cristalino, percebe-se que o aditivo proporciona uma leve reação de inibição frente à manifestação de expansão, em comparação com a amostra CAR sem aditivo.

Por este estudo apresentar resultados com apenas 56 dias de idade, acredita-se que os resultados podem ser potencializados quando prolongada as leituras para maiores idades, podendo seguir a orientação normativa de 12 meses.

Também é possível que o concreto com adição do aditivo cristalino, quando estiver em condições de preparo e cura e aplicado, poderá potencializar os resultados de autocatrização por meio da colmatação das fissuras, inibindo consequentemente as RAA.

Figura 13 - Expansibilidade das barras de concreto.



Fonte: Autor (2022).

5.3.2 Determinação da velocidade de propagação de ondas ultrassônicas

O ensaio de velocidade de propagação de onda ultrassônica (Tabela 14), mostra que CAI manifesta-se com >4500 m/s. Em contraposto, CAR (com e sem adição do aditivo) apresentaram uma queda da velocidade de propagação (3500 a 4500 m/s). A diferença de velocidade entre CAR com e sem aditivo é muito baixa, deixando estes valores marginalmente similares, já a diferença da velocidade obtida no CAI é relevante, comprovando que se trata de concreto de poucos vazios e maior qualidade.

Tabela 14 - Resultados obtidos quanto à realização do ensaio de ultrassom.

Amostras	CP	Velocidade (m/s)	Velocidade média (m/s)
CAI	1	4810	4795
	2	4780	
CAR sem aditivo	1	4440	4360
	2	4370	
	3	4270	
CAR com aditivo	1	4340	4350
	2	4370	
	3	4340	

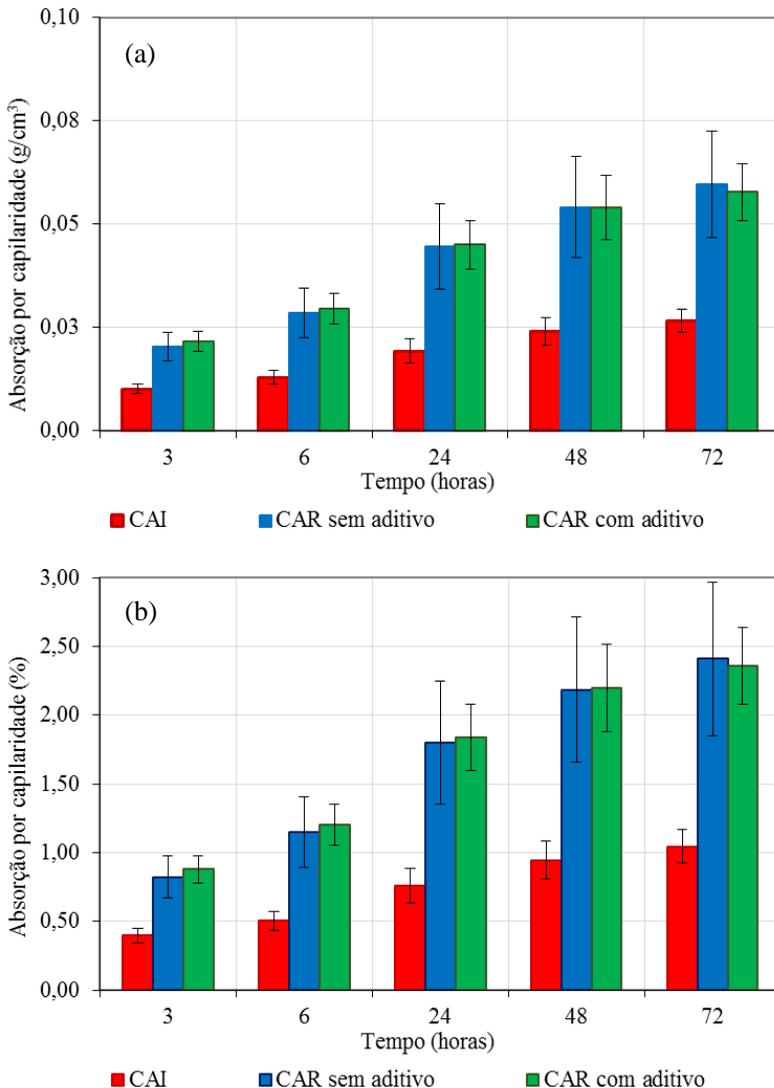
Fonte: Autor (2022).

5.3.3 Absorção de água

A Figura 14 apresenta a taxa de absorção capilar em função do tempo (em horas) medidos respectivamente com 3 horas, 6 horas, 24 horas, 48 horas e 72 horas. É possível observar que os valores de CAR (com e sem aditivo) estão marginalmente iguais, e superiores a CAI. Os valores máximos (72 horas) ilustram CAI com $\sim 0,03$ g/cm³ e já os valores de CAR (com e sem aditivo) ficaram em aproximadamente 0,06 g/cm³.

A durabilidade do concreto é inversamente proporcional à quantidade de absorção de água no corpo de prova, pois quanto maior a absorção maior será a possibilidade de ataques por agentes agressivos presentes na água (TAFAREL et al., 2016), ou seja, a durabilidade do concreto próximo a uma superfície exposta é amplamente determinada pela taxa na qual os agentes nocivos podem penetrar no concreto (KELHAM, 1988).

Figura 14 - Valores de absorção capilar dos concretos estudados (a) em g/cm^3 e (b) em percentual.



Fonte: Autor (2022).

Alguns fatores podem estar associados a absorção de água dos corpos. O primeiro pode estar associado ao tamanho dos grãos dos

agregados, onde a produção de concreto com agregados de menor tamanho reduz a absorção capilar. Isso pode ser explicado uma vez que a existência de agregados graúdos maiores no concreto contribui não só para o aumento do trajeto dos poros capilares e sua interconectividade, mas também para o aumento da zona de interface cimento-agregado porosa, onde ocorre o fenômeno de absorção de água por capilaridade (GONILHO PEREIRA; CASTRO-GOMES; PEREIRA DE OLIVEIRA, 2009). Os grãos também podem influenciar a complementação da interconectividade da estrutura porosa, consumindo Ca(OH)_2 da pasta de cimento, causando cálcio secundário, influenciando diretamente no tamanho de poros (KURDA; DE BRITO; SILVESTRE, 2019). Dentro dessa premissa, o AI apresentou uma menor absorção de água em comparação do AR.

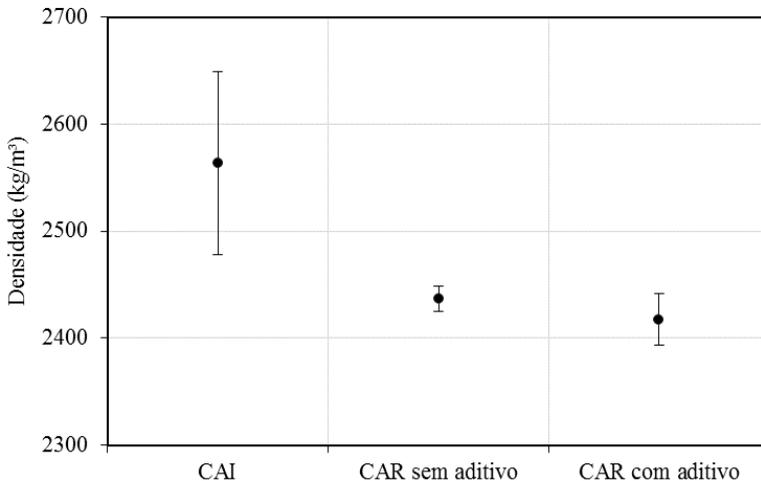
Um segundo fator, está associado às fissuras, que criam capilares até os poros. Existem principalmente dois tipos de fissuras que podem ser induzidas para testes experimentais e avaliação da influência da fissura em materiais cimentícios: fissuras artificiais e naturais. As fissuras artificiais têm características uniformes e a largura da fissura é mais fácil de controlar. As trincas naturais fornecem uma simulação mais próxima da realidade do que as trincas artificiais, com geometria tortuosa e não uniforme, mas a largura e a repetibilidade das trincas são difíceis de controlar (BOGAS; CARRIÇO; PONTES, 2019).

5.3.4 Determinação da massa específica do concreto

A massa específica expressa pela densidade dos corpos-de-prova, são apresentados na Figura 15. Torna-se possível observar que CAI apresenta maior densidade ($\sim 2.563 \text{ kg/m}^3$) e CAR (com e sem aditivo) uma redução da densidade (ambos na casa do 2.400 kg/m^3), sendo importante citar, que a massa específica é intrínseca à porosidade do material (NEVILLE, 1995).

De acordo com a NBR 8953 (ABNT, 2015c), são consideradas normais massas específicas entre 2.000 e 2.800 kg/m^3 , pois abaixo dessa faixa estão os concretos leves, e acima dela os concretos ditos densos ou pesados. Com base nessa informação, todas as amostras estão dentro do concreto comum.

Figura 15 - Massa específica dos concretos estudados.



Fonte: Autor (2022).

Em relação ao concreto CAI ter uma maior massa específica em relação aos concretos CAR com e sem aditivo, isso ocorre devido termos na composição do CAI, agregados de densidade maior que os agregados utilizados nos concretos CAR. Em relação as densidades entre o CAR sem aditivo e com aditivo, observa-se que o CAR com aditivo ,deveria ter obtido valores maiores do que o CAR sem aditivo, uma vez que a ideia do uso do aditivo era o mesmo inibir o RAA e desse modo não termos vazios entre os poros, pois imagina-se que o aditivo teve reações químicas e tendo como resultado a formação de carbonato de cálcio no seu interior.

5.3.5 Determinação da resistência mecânica

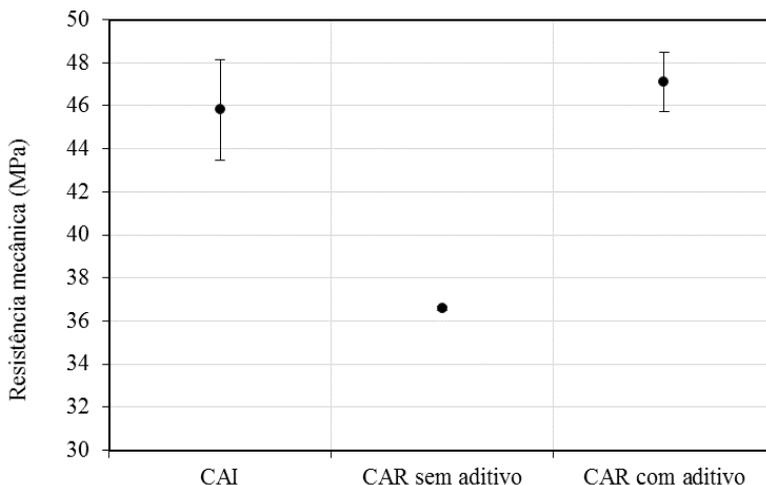
A caracterização mecânica dos concretos (Figura 16) demonstra um aumento da resistência quando adicionado o aditivo em CAR, ficando valores equivalentes a CAI (47 MPa e 46 MPa respectivamente). CAR sem a inclusão do aditivo de colmatação, ficou aproximadamente 10 MPa abaixo das demais amostras.

Quando analisamos os resultados entre as amostras, observamos que o CAR sem aditivo obteve a menor resistência entre as amostras, podendo ter ocorrido nesta amostra a formação da RAA prejudicando a resistência mecânica desta amostra.

A amostra CAR com aditivo, quando comparada com a amostra CAR Sem aditivo, pode-se observar um ganho de resistência, podendo ter ocorrido neste caso um ganho desta resistência por conta da formação de cristalização e colmatação das fissuras que possam ter ocorrido ganho de eficiência mecânica devido ao uso do aditivo.

Podemos observar também que os resultados obtidos no CAR com aditivo, que a resistência mecânica desta amostra está muito próxima a resistência obtida na amostra CAI.

Figura 16 - Resistência mecânica dos concretos estudados.



Fonte: Autor (2022).

5.3.6 Difração de raios X (DRX)

É possível observar através da caracterização mineralógica dos concretos (DRX, Figura 17a), a presença de sílica (quartzo, SiO_2 ; cartão JCPDS n° 46-1045), hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2 ; cartão JCPDS n° 01-084-1274), silicato de cálcio hidratado (C-S-H; cartão JCPDS n° 01-072-1907), aluminossilicato de cálcio hidratado (Al_2SiO_5 ; cartão JCPDS n° 01-081-1859), aluminato de cálcio hidratado (C_3AH_6 ; cartão JCPDS n° 01-071-0735), e silicato de lítio ($\text{Li(Si}_2\text{O}_6$); cartão JCPDS n° 00-034-1416).

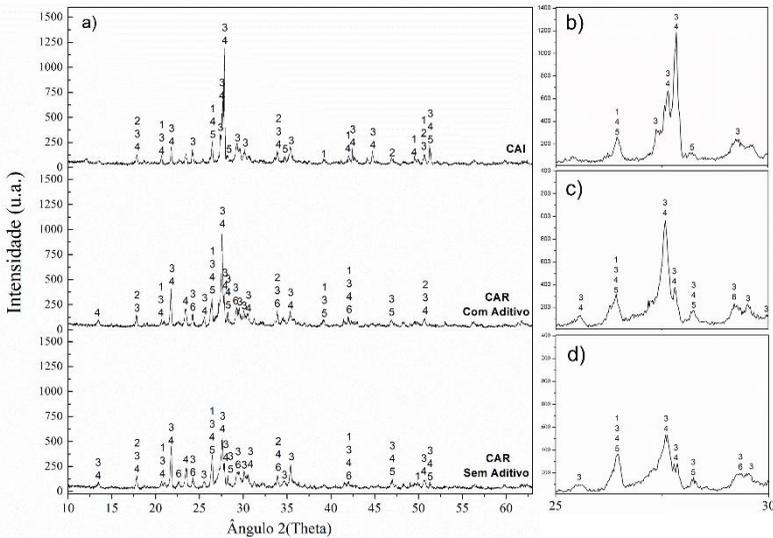
As fases referentes ao ferro contido nas análises químicas não foram identificadas no DRX, possivelmente devido as variações polimórficas de hidratação do C3A e C4AF, onde o Al^{3+} pode ser

parcialmente substituído por Fe^{3+} , e assim dificultando a sua identificação pelos picos do DRX.

Verifica-se que o hidróxido de cálcio foi mais consumido nas amostras com o agregado reativo, transformando então o hidróxido de cálcio em C-S-H (Silicato de cálcio hidratado).

A Figura 17 (b, c e d) é possível observar um alargamento dos picos (não é bem um halo amorfo) mostrando que a fase não está tão cristalina, assim então sendo mais reativa, e esse alargamento dos picos é maior na amostra CAR com o aditivo (Figura 17 c) e bem menor e menos intenso na amostra CAR sem aditivo (Figura 17 d).

Figura 17 - Difratoograma de raios X do CAI e CAR com e sem aditivo.



Fonte: Autor (2022).

A sílica apresenta vários polimorfos, além do quartzo que é cristalino e não reativo. Através das fases encontradas na análise de DRX, pode-se supor que a adição do aditivo reagiu com a sílica formando fases contendo SiO_2 amorfas e reativas (não apresentados no DRX, apenas na visão de alargamento dos picos). Verifica-se que a fase silicato de lítio também apareceu na amostra CAR sem aditivo, mostrando que possivelmente essa fase veio dos outros materiais que continham algum teor de lítio, e que essa amostra apresenta picos bem menos intensos e

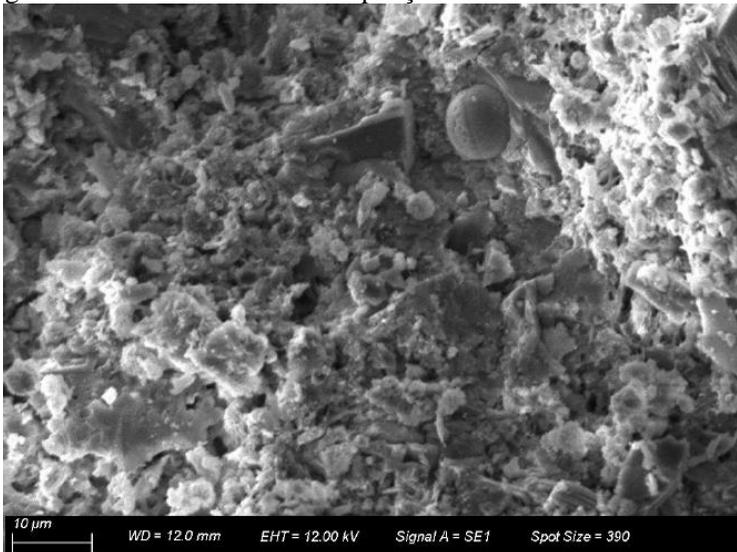
apresentando menor resistência mecânica, significando que não foi a formação dos picos com pausa da adição do aditivo que melhorou as propriedades. A amostra com a adição do aditivo ilustrou maiores intensidades e semelhante a amostra CAI, confirmando que o aditivo gera maior reatividade nas amostras.

A sílica (SiO_2) é composta por um arranjo tridimensional tetraédrico, formada por um átomo central de Si ligado a quatro átomos de oxigênio, que formam o grupo siloxano ($\equiv\text{Si-O-Si}\equiv$). O ângulo de ligação O-Si-O é fixado em 109° , mas essa ligação entre os tetraedros SiO_2 pode variar de 100° a 170° . Assim, existe uma grande quantidade de estruturas de sílica que podem ser macro-cristalinas, micro/nano-cristalinas, ou amorfas (RAJABIPOUR et al., 2015). Sendo as amorfas as mais interessantes para reatividade no concreto

5.3.7 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

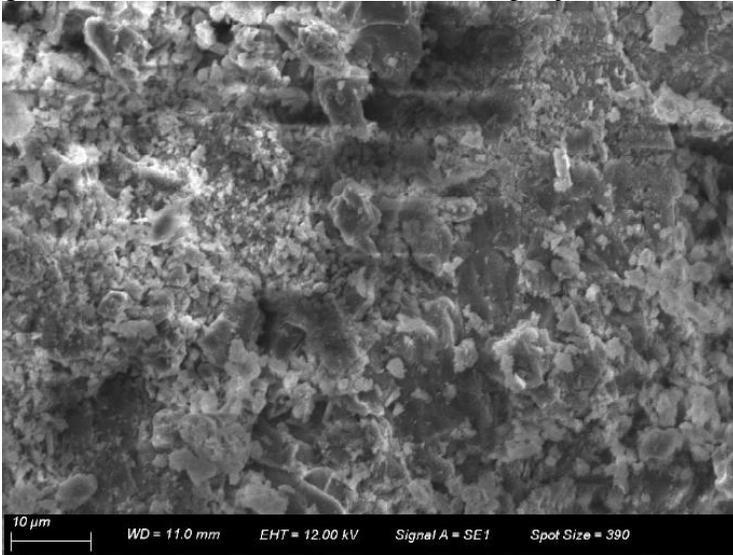
As Figura 18, Figura 19 e Figura 20, ilustram as análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) com ampliação de 3000x das amostras CAI, CAR com aditivo e CAR sem aditivo respectivamente, onde é possível observar, sobretudo nas amostras de CAR com e sem adição do aditivo, uma nítida diferença morfológica.

Figura 18 - MEV de CAI com ampliação de 3000x.



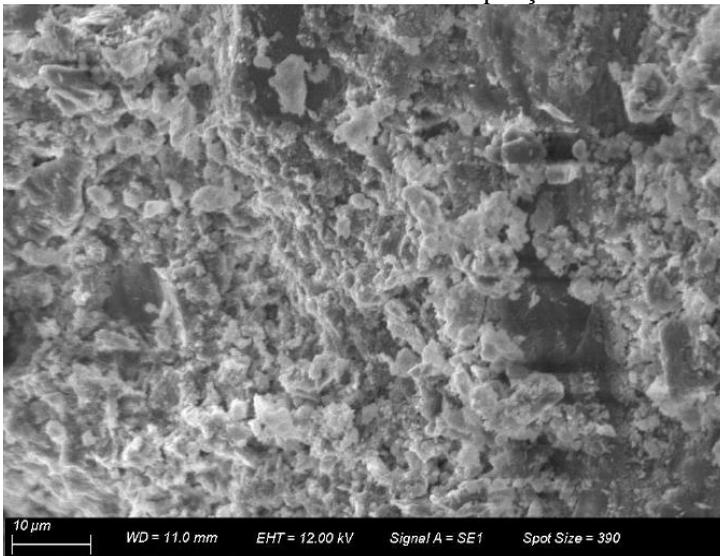
Fonte: Autor (2022).

Figura 19 - MEV de CAR com aditivo com ampliação de 3000x.



Fonte: Autor (2022).

Figura 20 - MEV de CAR sem aditivo com ampliação de 3000x.



Fonte: Autor (2022).

6 CONCLUSÃO

O intuito final desta pesquisa é mostrar se o aditivo cristalino inibe a RAA de tal forma que seja possível usá-lo como um inibidor, evitando as manifestações patológicas deletérias no concreto, principalmente com agregados potencialmente reativos, causadas por estas reações.

Os agregados classificados como inócuos, de mesma base mineral do agregado reativo, minerais de sílica, na forma estável de quartzo, foram utilizados como referência, junto aos agregados classificados como reativos para fins comparativos.

Os resultados de FRX e DRX dos agregados potencialmente reativos revelaram a predominância da fase instável da sílica, cristobalita, e uma outra de silicato de alumínio (cianita). Considerou-se a cristobalita como a fase responsável pela geração das reações álcali-sílica (RAS). Estes resultados foram de extrema importância para observar o comportamento dos agregados e, principalmente, o comportamento do aditivo cristalino frente às reações álcalis-agregado que causaram a expansão das barras de concreto. A análise por ICP-OES do aditivo cristalino revelou que ele é composto majoritariamente por alumínio, cálcio, magnésio e sódio. Esses constituintes indicam um possível mecanismo de ação ativadora de reações alcalinas.

Os resultados do concreto CAI confirmam que os agregados utilizados são inócuos, não havendo riscos de RAA com o uso destes materiais.

A expansibilidade da amostra de concreto CAR sem adição do aditivo cristalino aos 56 dias de idade ficou abaixo do limite estabelecido pela ABNT NBR 15577-1:2018, que especifica um percentual menor que 0,040% para prismas de concreto na idade de 365 dias e 0,030% para prismas com idade de 20 semanas. O CAR teve uma leve elevação quando analisado no período de 20 semanas, podendo ser o agregado classificado como potencialmente reativo e gerando a manifestação patológica da RAA.

Quando analisada a amostra do concreto CAR com adição do aditivo cristalino, a expansão de 0,027% aos 56 dias de idade mostra uma tendência de uma possível inibição da RAA, com redução de 0,009% em relação à amostra do concreto CAR sem a adição do aditivo cristalino.

Comparando os resultados das amostras de CAR sem e com a adição do aditivo cristalino, observa-se que há uma potencialidade do aditivo para realizar o efeito de inibição da RAA em concretos com agregados com as características aqui relatadas.

Como a pesquisa foi conduzida apenas até a idade de 56 dias, tem-se a possibilidade de um aumento da expansão encontrada para ambas as amostras de CAR evoluindo até a idade de 365 dias, podendo até mesmo ultrapassar o percentual estabelecido na ABNT NBR 15577-1:2018.

Em caso de aumento da expansão com o decorrer das idades, o concreto CAR com aditivo tende a inibir esta reação, mas a eficiência da adição para a inibição da RAA não fica clara neste estudo, pois não há resultados com idades dentro dos requisitos especificados pela ABNT NBR 15577-7. O estudo exige ensaios prolongados para entender melhor o comportamento desse aditivo no concreto com agregados potencialmente reativos ou até mesmo no concreto com agregados reativos de maior potencial.

REFERÊNCIAS

- ABNT. **NBR 11578 Cimento Portland composto**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 1991.
- ABNT. **NBR 16607 Cimento Portland - Determinação dos tempos de pega**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 20018.
- ABNT. **NBR NM 248: Agregados - Determinação da composição granulométrica**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2003.
- ABNT. **NBR 7211: Agregados para concreto - Especificação.**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2009a.
- ABNT. **NBR 9778 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2009b.
- ABNT. **NBR NM ISO 3310-1: Peneiras de ensaio - Requisitos técnicos e verificação. Parte 1: Peneiras de ensaio com tela de tecido metálico (ISO 3310-1, IDT)**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2010.
- ABNT. **NBR 11579: Cimento Portland - Determinação do índice de finura por meio da peneira 75 µm (nº 200).**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2012a.
- ABNT. **NBR 9779 Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por capilaridade**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2012b.
- ABNT. **NBR NM 17: Cimento Portland - Análise química - Método de arbitragem para a determinação de óxido de sódio e óxido de potássio por fotometria de chama**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2012c.
- ABNT. **NBR 16372 Cimento Portland e outros materiais em pó - Determinação da finura pelo método de permeabilidade ao ar (método de Blaine)**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2015a.

ABNT. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de provaRio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2015b.

ABNT. NBR 8953 Concreto para fins estruturais - Classificação pela massa específica, por grupos de resistência e consistênciaRio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2015c.

ABNT. NBR 15577-3: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 3: Análise petrográfica para verificação da potencialidade reativa de agregados em presença de álcalis do concretoRio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018a.

ABNT. NBR 15577-4: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método aceleradoRio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018b.

ABNT. NBR 15577-7: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método acelerado.Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018c.

ABNT. 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 - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018d.

ABNT. NBR 15577-5: Agregados - Reatividade álcali-agregado. Parte 5: Determinação da mitigação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado.Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018e.

ABNT. NBR15577-7 Agregados - Reatividade álcali-agregado - Parte 7: Determinação da expansão em prismas de concreto pelo método aceleradoRio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018f.

ABNT. NBR 5739 Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricosRio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018g.

ABNT. **NBR 16697: Cimento Portland - Requisitos**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2018h.

ABNT. **NBR 8802 Concreto endurecido - Determinação da velocidade de propagação de onda ultrassônica**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2019.

ABNT. **NBR 16915 Agregados - Amostragem**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2021a.

ABNT. **NBR 16916 Agregado miúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2021b.

ABNT. **NBR 16917 Agregado graúdo - Determinação da densidade e da absorção de água**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2021c.

ABNT. **NBR 16972 Agregados - Determinação da massa unitária e do índice de vazios**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2021d.

ABNT. **NBR 16973 Agregados - Determinação do material fino que passa pela peneira de 75 µm por lavagem**Rio de Janeiro - RJAssociação Brasileira de Normas Técnicas, , 2021e.

ADORNO, Cleberson Dos Santos; LANGARO, Eloise; DE MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias. **Efeito das adições pozolânicas de alta reatividade na reação álcali-silica**. 3º Encontro Luso-Brasileiro de degradação em estruturas de concreto armado. **Anais...**São Carlos, SP: 2018

ASTM. **C151-05: Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement**West Conshohocken, PAASTM International, , 2010.

ASTM. **D7348-21: Standard Test Methods for Loss on Ignition (LOI) of Solid Combustion Residues**West Conshohocken, PAASTM International, , 2021.

BARBOSA, Maria Teresa; SANTOS, White José Dos; LUDWIG, Zélia; SOUZA, Nelson Luis Dias De; STEPHANI, Rodrigo; OLIVEIRA, Luiz Fernando Cappa De. Optical Fiber Waste Used as Reinforcement for Concrete with Recycled Marble Aggregate. **Journal of Management and**

Sustainability, v. 11, n. 1, p. 49, 21 jan. 2021.

BARBOSA, Maria Teresa Gomes; SANTOS, White José Dos; COURA, Claudia Valéria Gávio. High quality of mortar with marble waste aggregate. **Ambiente Construído**, v. 18, n. 2, p. 387–399, abr. 2018.

BOGAS, J.A.; CARRIÇO, A.; PONTES, J. Influence of cracking on the capillary absorption and carbonation of structural lightweight aggregate concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 104, p. 103382, nov. 2019.

CÁNOVAS, M. F. **Patologia e terapia do concreto armado**. São Paulo, SP: Pini, 1988.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.

CARDE, Christophe; FRANÇOIS, Raoul. Effect of the leaching of calcium hydroxide from cement paste on mechanical and physical properties. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 4, p. 539–550, 1997.

CARMO, J. B. M. Do; PORTELLA, K. F. Estudo comparativo do desempenho mecânico da sílica ativa e do metacaulim como adições químicas minerais em estruturas de concreto. **Cerâmica**, v. 54, n. 331, p. 309–318, set. 2008.

CHATTERJI, S. Chemistry of alkali–silica reaction and testing of aggregates. **Cement and Concrete Composites**, v. 27, n. 7–8, p. 788–795, ago. 2005.

DA SILVA, Cristiane Santana. **Levantamento dos procedimentos de recuperações em elementos de fundações por problemas de reação álcali agregado: estudos de casos**. Recife, PE: Universidade Católica de Pernambuco, 2019.

DE ARAÚJO JR., Aloízio Geraldo; DA SILVA, Leandro José; PANZERA, Túlio Hallak; DA SOUZA AZEVEDO, Adriano Galvão; STRECKER, Kurt. Hydration and Dehydration of High Initial Strength Portland Cement Type CP V - ARI. **Materials Science Forum**, v. 869, p. 106–111, ago. 2016.

DE MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias; ANDRADE, Jairo José de Oliveira; HELENE, Paulo. Durabilidade e Vida Útil das Estruturas de Concreto. In: ISAIA, G. C. (Ed.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1ª ed. São Paulo - SP: IBRACON, 2011. p. 773–808.

DE ROOIJ, Mario; VAN TITTELBOOM, Kim; DE BELIE, Nele; SCHLANGEN, Erik. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. v. 11

DEER, W. A.; HOWIE, R. A.; ZUSSMAN, J. **Minerais constituintes das rochas: uma introdução**. 2. ed. Lisboa, Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian, 2000.

DIVYA, E.; SHANTHINI, R.; ARULKUMARAN, S. **Study On Behaviour Of Concrete Partially Replacing Quartz Sand As Fine Aggregate**. Disponível em: <<https://www.engineeringcivil.com/study-on-behaviour-of-concrete-partially-replacing-quartz-sand-as-fine-aggregate.html>>. Acesso em: 24 abr. 2022.

DJANGANG, Chantale N.; TEALDI, Cristina; CATTANEO, Alice S.; MUSTARELLI, Piercarlo; KAMSEU, Elie; LEONELLI, Cristina. Cold-setting refractory composites from cordierite and mullite–cordierite design with geopolymer paste as binder: Thermal behavior and phase evolution. **Materials Chemistry and Physics**, v. 154, p. 66–77, mar. 2015.

DRY, Carolyn M. **Smart multiphase composite materials that repair themselves by a release of liquids that become solids**. (V. K. Varadan, Ed.)North American Conference on Smart Structures and Materials. **Anais...**Orlando, FL, United States: SPIE 2189, 1 maio 1994Disponível em: <<http://proceedings.spiedigitallibrary.org/proceeding.aspx?articleid=958078>>

ESTACECHEN, Tatiana Alves Cecilio. Comparativo da resistência à compressão do concreto através de ensaios destrutivos e não destrutivos. **Revista Construindo**, v. 12, n. 2, p. 1–8, 2020.

FARNY, James A.; KERKHOFF, Beatrix. **Diagnosis and Control of Alkali-Aggregate Reactions in Concrete**. Skokie, IL: Skokie, Ill. : Portland Cement Association, 2007.

FRAGA, Yuri Sotero Bomfim; SILVA, Carla Mabel Medeiros de Albuquerque e. Efeitos de adições minerais para mitigação de reações

álcali-agregado no concreto: estado da arte. **Engineering Sciences**, v. 5, n. 1, p. 1–13, 15 set. 2017.

GOMES NETO, D. P.; BARRETO, L. S. **Uma discussão sobre a reação álcali-agregado (RAA), seu mecanismo e os fatores que a influenciam**. IX Congresso Internacional sobre Patologia e Recuperação de Estruturas. **Anais...** João Pessoa - PB: CINPAR 2013, 2013

GONILHO PEREIRA, Cristiana; CASTRO-GOMES, João; PEREIRA DE OLIVEIRA, Luiz. Influence of natural coarse aggregate size, mineralogy and water content on the permeability of structural concrete. **Construction and Building Materials**, v. 23, n. 2, p. 602–608, fev. 2009.

HASPARYK, Nicole Pagan. **Investigação De Concretos Afetados Pela Reação Álcali-Agregado E Caracterização Avançada Do Gel Exsudado**. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, RS. p. 326, 2005.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. In: **Materiais de Construção Civil e Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais**. 3. ed. São Paulo - SP: IBRACON, 2017. p. 960–995.

HELENE, Paulo R.L. **Contribuição ao Estudo da Corrosão em Armaduras de Concreto Armado**. [s.l.] Universidade de São Paulo, 1993.

HU, Jiong; WANG, Kejin. Effect of coarse aggregate characteristics on concrete rheology. **Construction and Building Materials**, v. 25, n. 3, p. 1196–1204, mar. 2011.

JÓŹWIAK-NIEDŹWIEDZKA, Daria; GIBAS, Karolina; BRANDT, Andrzej M.; GLINICKI, Michał A.; DĄBROWSKI, Mariusz; DENIS, Piotr. Mineral Composition of Heavy Aggregates for Nuclear Shielding Concrete in Relation to Alkali-silica Reaction. **Procedia Engineering**, v. 108, p. 162–169, 2015.

KELHAM, S. A water absorption test for concrete. **Magazine of Concrete Research**, v. 40, n. 143, p. 106–110, jun. 1988.

KUMAR, Sanjeev; GUPTA, Ramesh Chandra; SHRIVASTAVA, Sandeep; CSETENYI, Lazlo; THOMAS, Blessen Skariah. Preliminary study on the use of quartz sandstone as a partial replacement of coarse aggregate in concrete based on clay content, morphology and compressive strength of

combined gradation. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 103–108, mar. 2016.

KURDA, Rawaz; DE BRITO, Jorge; SILVESTRE, José D. Water absorption and electrical resistivity of concrete with recycled concrete aggregates and fly ash. **Cement and Concrete Composites**, v. 95, p. 169–182, jan. 2019.

LACERDA, Charles Siervi; HELENE, Paulo R.L. **Estudo da influência da substituição de cimento Portland por metacaulim em concretos: BT/PCC/419**. São Paulo, SP: [s.n.].

MANN, Kulwinder Singh; KORKUT, Turgay. Gamma-ray buildup factors study for deep penetration in some silicates. **Annals of Nuclear Energy**, v. 51, p. 81–93, jan. 2013.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2ª ed. São Paulo, SP: IBRACON, 2014.

MEHTA, Povindar Kuma;; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. São Paulo: PINI, 2008.

MING-SHU, Tang; SU-FEN, Han; SHI-HUA, Zhen. A rapid method for identification of alkali reactivity of aggregate. **Cement and Concrete Research**, v. 13, n. 3, p. 417–422, maio 1983.

MIZUMOTO, Camilo. **Investigação da reação álcali-agregado (RAA) em testemunhos de concreto e agregados constituintes**.

MOOSBERG-BUSTNES, H.; LAGERBLAD, B.; FORSSBERG, E. The function of fillers in concrete. **Materials and Structures**, v. 37, n. 2, p. 74–81, mar. 2004.

MOREIRA, Kelyva Maria de Vasconcelos. **Mitigação da reação álcali-silica em compósitos cimentícios com o uso de cinza volante e de escória granulada de alto forno do complexo industrial e portuário do Pecém (Ceará)**. [s.l.] Universidade Federal do Ceará, 2021.

MORI, Shigemichi; KURAMOTO, Yuzuru; TAKAGI, Minoru Emilio; HORIE, Moichi; TANIMOTO, Shushi. **Repairing of heavily cracked reinforced concrete bridge deck slab from underside**. 51st Annual Meeting of the Civil Engineering Society of Japan. **Anais...**Tokyo, Japan:

1996

MUNHOZ, Flávio André da Cunha. **Efeito de adições ativas na mitigação das reações álcali-silica e álcali-silicato**. São Paulo, SP: Universidade de São Paulo, 3 ago. 2007.

NEVILLE, A. M.; BROOKS, J.J. **Tecnologia do Concreto**. 2ª ed. Porto Alegre - RS: Bookman, 2013.

NEVILLE, Adam M. **Properties of concrete**. 4th. ed. London, UK: Harlow : Longman Group, 1995.

NIST. **Standart Reference Material 1885 – Cement Composition**. Gaithersburg - MD: National Institute of Standards and Technology, 1989.

NIST. **Standard Reference Material 114p - Portland Cement Fineness Standard**. Gaithersburg - MD: National Institute of Standards and Technology, 2005.

PEREIRA, Fernanda Macedo; NEVES, Paulo César Pereira Das; LENZ, Denise Maria; VERNEY, José Carlos Krause De. Avaliação da reatividade potencial de rochas utilizadas como agregados na construção civil no estado do Rio Grande do Sul. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 23, n. 3, 18 out. 2018.

PERIM, José Roberto. **Influência do metacaulim na durabilidade de concretos usuais de mercado sujeitos à carbonatação acelerada**. Goiânia, GO: Universidade Federal de Goiás, 2013.

PIAZZA, Sara Roca; PEIXOTO, Lorena Karla Soares; SOBRINHO, Francisco Rosendo; BEZERRA, Eric Matheus Fernandes. Avaliação de manifestações patológicas na Ponte Rio do Carmo através da ferramenta GUT. **Brazilian Journal of Development**, v. 6, n. 11, p. 88863–88881, 2020.

POWERS, T. C.; STEINOUR, H. H. An Interpretation of Some Published Researches on the Alkali-Aggregate Reaction Part 1-The Chemical Reactions and Mechanism of Expansion. **Journal Proceedings**, v. 51, n. 2, p. 497–516, 1955.

RAJABIPOUR, Farshad; GIANNINI, Eric; DUNANT, Cyrille; IDEKER, Jason H.; THOMAS, Michael D.A. Alkali-silica reaction: Current understanding of the reaction mechanisms and the knowledge gaps. **Cement**

and Concrete Research, v. 76, p. 130–146, out. 2015.

REINHARDT, H W; JONKERS, H; VAN TITTELBOOM, K; SNOECK, D; DE BELIE, N; DE MUYNCK, W; VERSTRAETE, W; WANG, J; MECHTCHERINE, V. Recovery against Environmental Action. In: DE ROOIJ, M. et al. (Eds.). . **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials: State-of-the-Art Report of RILEM Technical Committee 221-SHC: Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. Dordrecht: Springer Netherlands, 2013. p. 65–117.

SCHOVANZ, Dioice. **Estudo na formação da etringita tardia (DEF) em concretos com cimento Portland pozolânico e de alta resistência**. Passo Fundo, RS: Faculdade Meridional, 2019.

SCRIVENER, K.L.; FÜLLMANN, T.; GALLUCCI, E.; WALENTA, G.; BERMEJO, E. Quantitative study of Portland cement hydration by X-ray diffraction/Rietveld analysis and independent methods. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 9, p. 1541–1547, set. 2004.

SILVA, Gilson Vicente Da; BORGES, Simone Pereira Taguchi; BARAÑANO, Audrei Giménez. Propriedades físicas, químicas e mecânicas dos cimentos tipo CPI e CPV obtidos com diferentes proporções com fíler de calcário. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 13, p. e309101321272, 13 out. 2021.

SILVA, Isabela Assis Da; GOMES, Carlos Eduardo Marmorato. Influência do óxido de magnésio na retração hidráulica de argamassas de cimento Portland (tipo CP-V). **Revista dos Trabalhos de Iniciação Científica da UNICAMP**, n. 26, 14 jan. 2019.

SILVA, L. A.; NAHIME, B. O.; LIMA, E. C.; AKASAKI, J. L.; REIS, I. C. XRD investigation of cement pastes incorporating concrete floor polishing waste. **Cerâmica**, v. 66, n. 380, p. 373–378, dez. 2020.

SMAOUI, N.; BÉRUBÉ, M.A.; FOURNIER, B.; BISSONNETTE, B.; DURAND, B. Effects of alkali addition on the mechanical properties and durability of concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 35, n. 2, p. 203–212, fev. 2005.

STUTZMAN, Paul E. **Scanning Electron Microscopy in Concrete Petrography**. The Role of Calcium Hydroxide. **Anais...Anna Maria Island, Florida: American Ceramic Society, 2000**

TAFAREL, Nathann Francisco; MACIOSKI, Gustavo; CARVALHO, Karina Querne De; NAGALLI, André; FREITAS, Daiane Cristina De; PASSIG, Fernando Hermes. Avaliação das propriedades do concreto devido à incorporação de lodo de estação de tratamento de água. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 21, n. 4, p. 974–986, dez. 2016.

TAKAGI, Emilio Minoru. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalisador cristalino**. São José dos Campos, SP: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.

TENÓRIO, Jorge Alberto Soares; ARAÚJO, Fernando Gabriel da Silva; PEREIRA, Sérgio Sônego Raymundo; FERREIRA, Andréa Vidal; ESPINOSA, Denise Croce Romano; BARROS, Alexandre. Decomposição da fase majoritária do cimento Portland - Parte II: alita com adições de Fe e Al. **REM: R. Esc. Minas, Ouro Preto**, v. 56, n. 2, p. 113–117, 2003.

TITTELBOOM, K. Van; BELIE, N. De; ZHANG, P.; WITTMANN, F. H. **Self-healing of Cracks in Concrete**. (W. F. H., M. Olivier, Eds.) Proceedings of an ASMES International Workshop. **Anais...**Friburgo: Aedificatio Publishers, 2011