

Efeitos do uso de aditivos cristalizantes na reação álcali-agregado e absorção das argamassas

Hygor Thairony Parreira Vilela¹, Marcos Gonçalves Teixeira Filho², Tiago Ferreira Campos Neto³

Resumo

A reação álcali-agregado é uma manifestação patológica que, quando constatada, é irreversível, sendo geralmente prejudicial à integridade da estrutura, podendo levá-la ao colapso. Sua importância não deve ser limitada apenas às estruturas de concreto, pois é muito comum sua ocorrência em argamassas de revestimento, causando fissuras mapeadas. Portanto, esta pesquisa tem o objetivo de avaliar os efeitos do uso de aditivo cristalizante no comportamento de argamassas com foco nos ensaios de reação álcali-agregado e absorção. Foram produzidas argamassas com 0,0%, 1,0% e 2,0% de aditivo cristalizante e os ensaios nos estados fresco e endurecido foram executados de acordo com as respectivas normas vigentes. Os teores utilizados apresentaram melhora no desempenho mecânico, no índice de vazios e absorções por capilaridade e porosidade. Entretanto, o uso do aditivo cristalizante acelerou o processo de reação álcali-agregado nas misturas em elevadas proporções.

Palavras-chave: Reação álcali-agregado. Ensaios acelerados. Aditivo cristalizante. Argamassas.

1. Introdução

Nos últimos anos, houve um significativo avanço no que se trata do estudo da durabilidade das edificações. Esses estudos ajudam a demonstrar como se comportam aqueles materiais perante sua comunicação no meio a que estão inseridos, além de determinar outros aspectos e o cumprimento da vida útil do projeto. Dentre vários tipos de degradação das obras, tem-se a reação álcali-agregado (RAA). De modo geral, este é um problema relacionado a propriedades mineralógicas e químico-físicas, sendo que o resultante dessas três categorias combinadas gera um efeito muito prejudicial ao concreto ou às argamassas. Trata-se de um fenômeno de alto grau de complexidade, pois não se consegue eliminá-lo, tornando-se necessário evitar a sua ocorrência (JUNIOR; FERRO, 2016).

¹ hygorengcivil@outlook.com, graduando em Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde, Campus Rio Verde, Fazenda Fontes do Saber, Caixa Postal 104. CEP: 75.901-970 – Rio Verde - GO.

² marcosgerwal@gmail.com, graduando em Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde, Campus Rio Verde, Fazenda Fontes do Saber, Caixa Postal 104. CEP: 75.901-970 – Rio Verde - GO.

³ tiagocampos@unirv.edu.br, Professor Mestre, Faculdade de Engenharia Civil, Universidade de Rio Verde, Campus Rio Verde, Fazenda Fontes do Saber, Caixa Postal 104. CEP: 75.901-970 – Rio Verde – GO.

A RAA é um dos fenômenos patológicos que mais agride estruturas de composição cimentícia e um dos mais relevantes, tratando-se de durabilidade. De modo resumido, pode ser definida como uma reação química entre alguns componentes do agregado com os hidróxidos alcalinos presentes dentro dos poros do concreto. Geralmente, estas reações podem ser classificadas de dois modos: álcali-carbonato (RAC) e álcali-sílica (RAS). Essas variações não possuem tempo definido para o surgimento, pois estão ligadas a vários fatores, como: quantidade de álcali no cimento, temperatura ambiente, a reatividade do agregado e a natureza do material, conforme a Figura 1 (SILVA, 2007).



Figura 1 – Fatores condicionantes do fenômeno
Fonte: Junior e Ferro (2016).

A RAC é proveniente da reação dos hidróxidos alcalinos do cimento Portland ou de outras fontes em que o agregado seja constituído de rocha calcário dolomítico argiloso, quando ocorre a desdolomitização, em algumas condições, podem causar a expansão deletéria da argamassa. Já a RAS também pode ser proveniente do cimento Portland ou de agregados com matéria siliciosa em sua composição, como opalas, quartzo, vidro vulcânico, dentre outras, que, por fim, geram um gel álcali-sílica expansivo dentro da argamassa, ocasionando fissuras, de acordo com a NBR 15577-1 (ABNT, 2018). Para esta pesquisa foi analisada a RAS que será abordada como RAA de modo geral.

No ano de 2005 a RAA foi descoberta em blocos de fundações de diversos edifícios nos grandes centros de Recife. Algumas fissurações eram tão intensas que tinham a escala de centímetros (SILVA, 2007). Em nível nacional, existem vários casos: podendo haver mais de 500 ocorrências em vários tipos de estruturas (NETO; QUITETE; BATTAGIN, 2018).

O cimento possui uma boa influência na ocorrência deste problema, pois, quando hidratado, libera partes de álcalis que ficam acessíveis nos poros. Pode surgir, também, devido a minerais alcalinos dos agregados, de pozolanas dentro do cimento e até mesmo da água utilizada. Logo que o cimento é hidratado, inicia-se a produção de etringita e de

Ca(OH)_2 , que permitem ocasionar expansões no concreto até o seu sétimo dia de fabricação. Caso o concreto tenha uma alta relação água/cimento, ou seja, um concreto poroso, os géis formados pela RAA podem se abrigar nestes poros, ocasionando uma compensação nas expansões (ROLIM, 2010).

O Penetron Admix é um aditivo cristalizante muito utilizado em outros países, principalmente para reservatórios, sistemas de esgoto e estações de tratamento de água, dentre outros. Alguns projetos famosos onde foi utilizado incluem a Estátua da Liberdade e o terminal de aeroporto Singapura Changi (CADERSA; ZEPHIR, 2014). Nesta pesquisa, este material será utilizado para analisar sua eficiência contra RAA.

1.1. Objetivos

- Objetivo Geral:
 - Avaliar a eficácia do uso de diferentes teores de aditivo cristalizante no combate da reação álcali-agregado em argamassas.
- Objetivos Específicos:
 - Avaliar a capacidade cristalizante do aditivo por meio de ensaios de absorção capilar e porosidade;
 - Analisar o desempenho mecânico de argamassas incorporadas com aditivo cristalizante.

2. Material e métodos

2.1. Estruturação da pesquisa

Para a melhor análise do estudo realizado, o mesmo será apresentado conforme fluxograma da Figura 2.

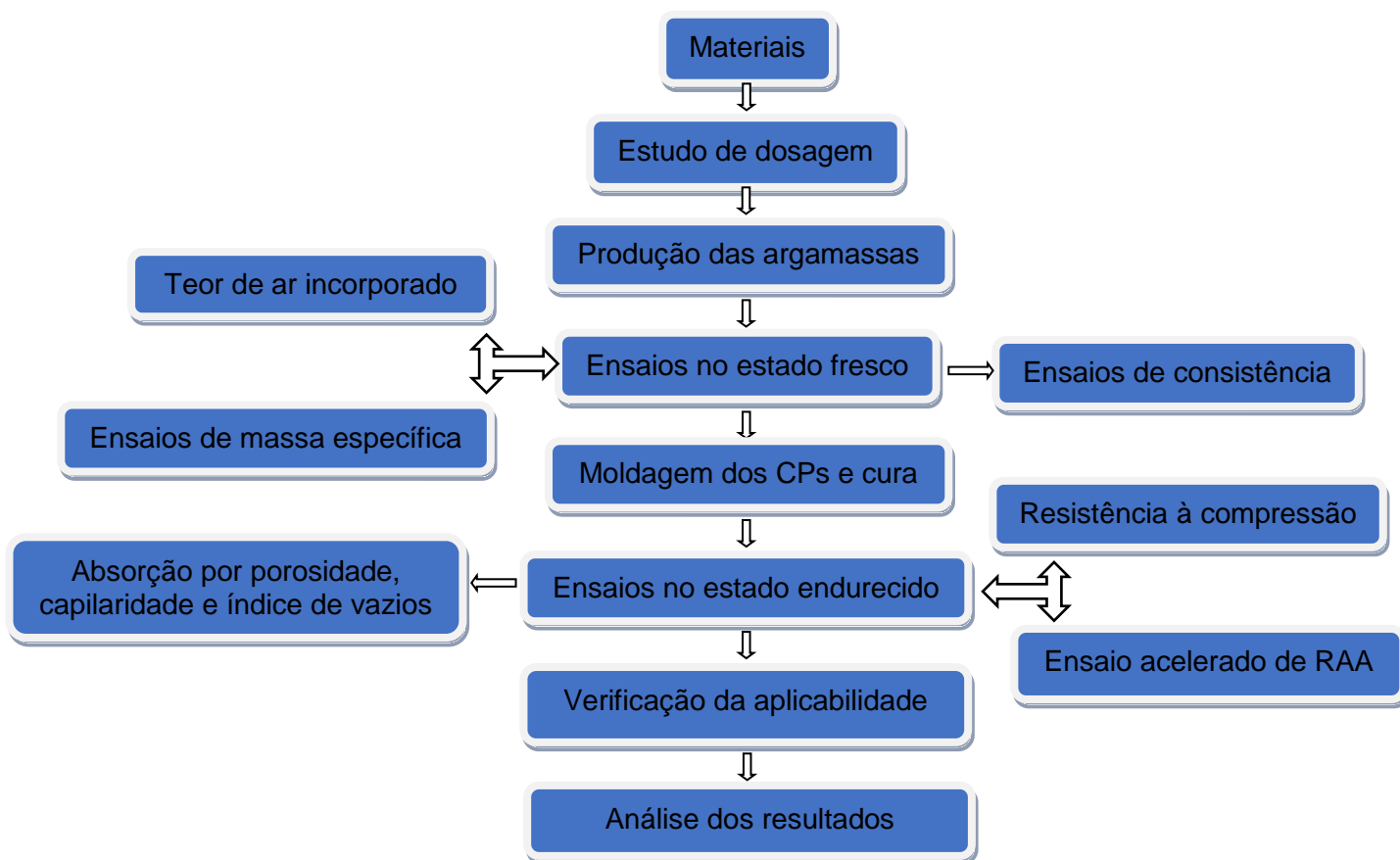


Figura 2 – Fluxograma metodológico da pesquisa
Fonte: Próprio autor (2019).

2.1. Materiais

- Cimento

Utilizou-se o cimento CPV-ARI, devido à sua pureza, evitando qualquer tipo de alteração no resultado da reatividade da areia. É um dos cimentos mais propensos à ocorrência da RAA devido ao seu menor teor de escória e menor finura nos compostos, as propriedades físicas do cimento utilizado estão apresentadas na Tabela 1 atendendo especificações da NBR 16697 (ABNT, 2018).

Tabela 1 – Ensaio físicos do cimento

Características de ensaio	Norma de referência	Especificação de norma	Resultado	Unidade de medida
Resíduo na peneira #200	ABNT NBR 11579:2012	≤ 6,0	5,4	%
Massa Específica	ABNT NBR 16605:2017	Não aplicável	3,0	g/cm ³

Fonte: Próprio autor (2019).

- Agregado Miúdo

Os agregados miúdos foram utilizados conforme referência a Tabela 2, atendendo às quantidades ideais de cada fração. Para que fosse possível atender a esta relação foi necessário utilizar dois agregados miúdos distintos, que estão a um raio de aproximadamente 170 km de Rio Verde – GO.

Tabela 2 – Granulometria requerida do material para ensaio

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

Fonte: ABNT NBR 15577-4 (2018)

Para atingir as quantidades de cada granulometria foram realizados ensaios de massa específica e massa unitária e ensaios de granulometria conforme NBR NM 52 (ABNT, 2003), NBR NM 45 (ABNT, 2006) e NBR NM 248 (ABNT, 2009), respectivamente, execução dos ensaios apresentados na Figura 3. Os resultados obtidos estão conforme Tabela 3, sendo a granulometria conforme Figuras 4 e 5.

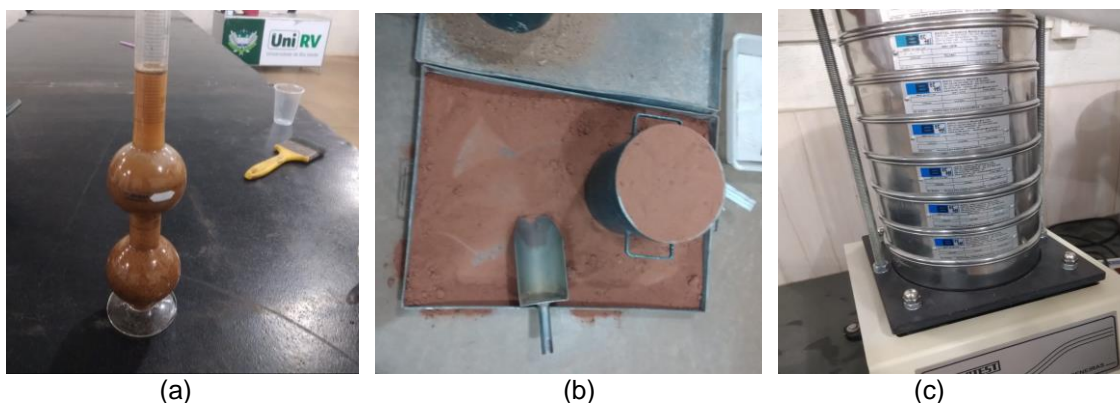


Figura 3 – Massa específica (a), massa específica unitária (b), granulometria (c)

Fonte: Próprio autor (2019).

Tabela 3 – Massa específica, unitária e módulo de finura

Agregado	Massa específica	Massa unitária	Módulo de finura
Areia fina	2.630 kg/m ³	1.513 kg/m ³	1.42
Areia grossa	2.621 kg/m ³	1.579 kg/m ³	2.54

Fonte: Próprio autor (2019).

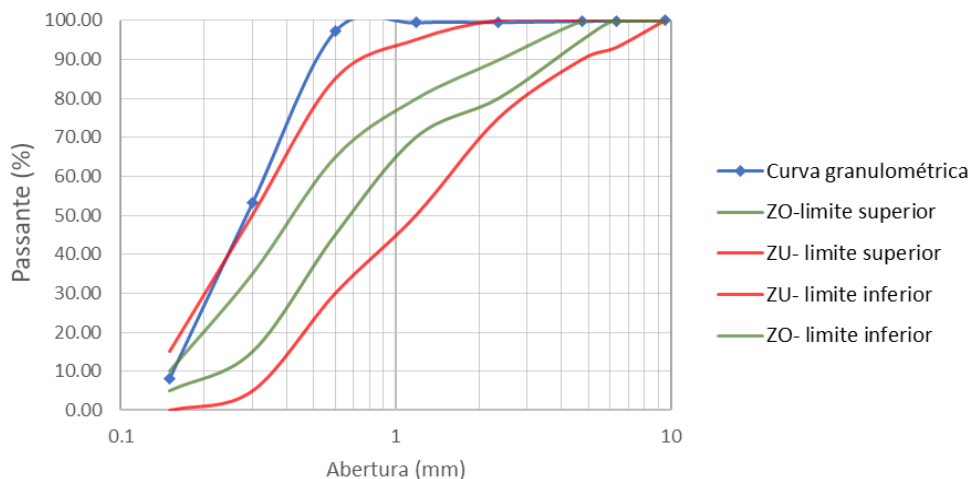


Figura 4 – Granulometria areia fina
Fonte: Próprio autor (2019).

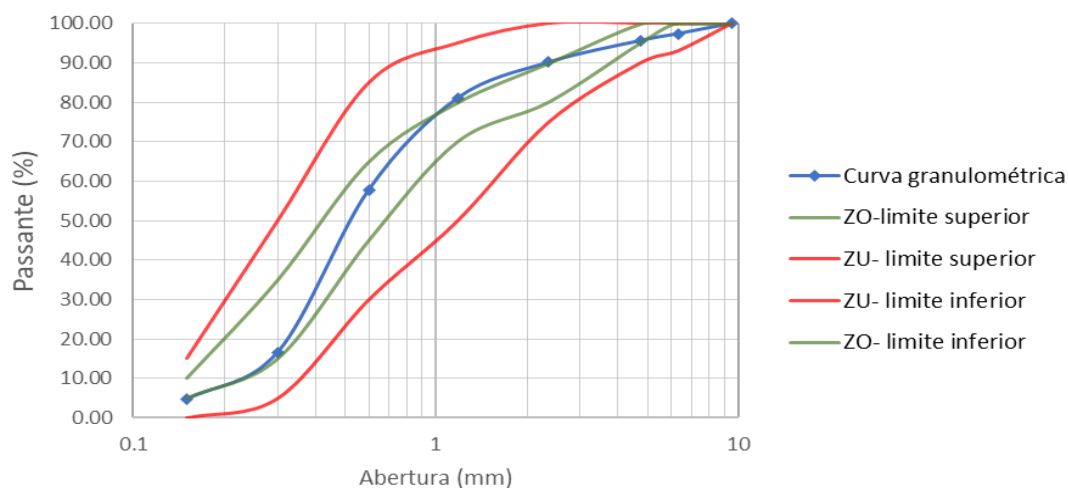


Figura 5 – Granulometria areia grossa
Fonte: Próprio autor (2019).

- Aditivo

O teor do aditivo Penetron Admix foi definido em função da massa de cimento das argamassas, sendo que a fabricante indica teores de 0,8% a 1,2%, Cardesa e Zephir (2014) utilizou os teores de 2,0% e 3,0% e, por fim, Takagi, Lima e Helene (2012) utilizaram 2,5%. Todos os pesquisadores obtiveram resultados satisfatórios no que tange à cristalização e impermeabilização das misturas, sendo assim, o ensaio será realizado com os teores de 1 e 2% do aditivo. A Tabela 4 e 5 apresenta os dados do aditivo fornecidos pela própria fabricante.

Tabela 4 – Características do aditivo Penetron Admix

Característica	Valores Correspondentes	Unidades de medida
PH	10 – 13	%
Ponto de fusão	1000	°C
Aspecto	Sólido em pó cinza	-
Massa específica	1,1	g/cm ³
Odor e limite de odor	Característico de cimento	-

Fonte: Penetron (2018).

Tabela 5 – Composição química do aditivo

Nome Químico	CAS N°	%
Cimento Portland	65997-15-1	65 a 80
CTS-15-1*	Segredo Industrial	10 a 30
CTS-15-2*	Segredo Industrial	5 a 10
Hidróxido de cálcio e magnésio (CaMg(OH) ₄)	39445-23-3	1.5 a 6
Óxido de hidróxido de magnésio e cálcio (Ca(Mg(OH) ₂ O)	58398-71-3	1.5 a 6
Hidróxido de cálcio	1305-62-0	1 a 2

*Segredo Industrial - A porcentagem exata (concentração) da composição foi retida como secreto industrial.

Fonte: Penetron (2018).

2.2. Métodos

Todos os métodos a seguir têm por finalidade atender os requisitos e exigências da NBR 15577-4 (ABNT, 2018).

- Determinação do Traço

Para a determinação da expansão da argamassa pelo método acelerado, o traço é composto por uma parte de cimento, 2,25 partes de agregado e relação água/cimento (a/c) de 0,47. Para a moldagem de três barras de argamassa, cuja massa específica do agregado (d) seja maior ou igual a 2,45 g/cm³, deve-se adotar as frações abaixo:

- 440 g de cimento;
- 990 g de agregado.

Sendo assim, a elaboração dos ensaios conforme especificado no fluxograma da Figura 2, os traços adotados conforme a Tabela 6, onde um traço de referência, seguido de 2 traços com os teores de 1 e 2% do aditivo cristalizante para uma avaliação dos resultados. Seguindo as especificações fornecidas pela Admix Penetron, o aditivo foi diluído junto a água de amassamento, conforme Figura 6.

Tabela 6 – Traços de argamassas de revestimento a serem ensaiadas

Traço	Cimento	Areia	Água	Aditivo Cristalizante
AR	1	2.25	0.47	-----
AA1	1	2.25	0.47	0.01
AA2	1	2.25	0.47	0.02

Fonte: Próprio autor (2019).



Figura 6 – Aditivo cristalizante diluído em água
Fonte: Próprio autor (2019).

- Ensaios no estado fresco

O ensaio de massa específica e teor de ar incorporado foi realizado conforme NBR 13278 (ABNT, 2005), seguindo todos os seus procedimentos com a utilização de uma balança de alta precisão, um recipiente cilíndrico e uma colher. Para a determinação do teor de ar incorporado utilizou se dos resultados da massa especifica obtida no ensaio em relação a massa especifica teórica da argamassa estimada. Analisando sua consistência conforme recomendações da NBR 13276 (ABNT, 2016), através do preenchimento de um molde troncônico, depositando-o na mesa de fluidez e, posteriormente, o espalhamento ocorrido da argamassa, conforme será devidamente apresentado ao decorrer deste trabalho, parte do ensaio está retratado na Figura 7.



Figura 7 – Ensaio de consistência
Fonte: Próprio autor (2019).

- Moldagem dos corpos de prova e cura

Para a moldagem dos corpos de prova cilíndricos, medindo 50mm de diâmetro e 100mm de altura, foram realizados conforme NBR 7215 (ABNT, 2019). Os corpos de prova prismáticos para o ensaio de resistência a tração na flexão foram moldados seguindo a NBR 13729 (ABNT, 2005), onde estes tiveram as dimensões de 40x40x160mm e foram adensados na mesa de adensamento. Os corpos de prova prismáticos medindo 30x25x285mm foram moldados de acordo com a NBR 15577-4 (ABNT, 2018), em duas camadas, cada uma delas adensada com 20 golpes do soquete.

Para o ensaio acelerado de RAA são necessárias ao menos três barras de argamassa para cada agregado utilizado. As barras passaram por uma cura em câmara úmida a 23°C, por um período de 24 horas, com suas faces protegidas de respingos. Após esse período, as argamassas foram removidas das fôrmas e colocadas em um banho. A última etapa é parte integrante do procedimento de ensaio no estado endurecido.

- Ensaios no estado endurecido

Conforme estabelecido na NBR 15577-4 (ABNT, 2018), os moldes de argamassa passariam por um período de 30 dias imersos em solução de hidróxido de sódio (Na(OH)), 1M a uma temperatura de 80 °C. Nestes moldes, foram realizadas ao menos oito medições das dimensões dos corpos de prova, sendo obrigatoriamente uma aos 16 dias e outra aos 30 dias após a moldagem. No entanto, devido às condições para a realização do ensaio, este foi realizado com os corpos de prova imersos a temperatura ambiente, conforme apresenta a Figura 8.

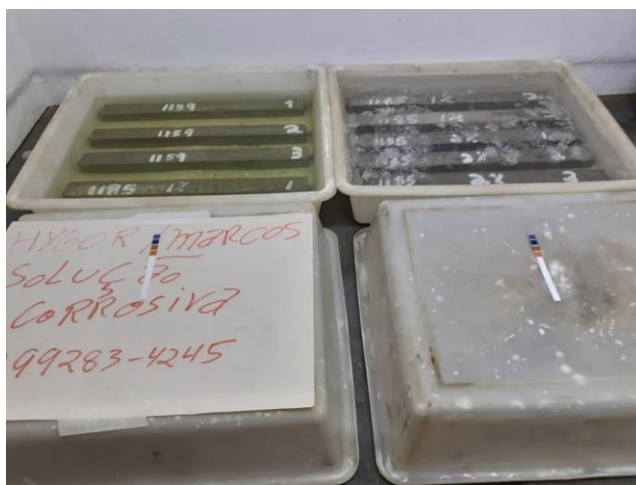


Figura 8 – Corpos de prova imersos em solução de Na(OH)
Fonte: Próprio autor (2019).

O ensaio de resistência à compressão foi realizado com os corpos de prova cilíndricos seguindo a NBR 7215 (ABNT, 2019) e o ensaio de resistência a tração na flexão foram realizados conforme NBR 13279 (ABNT, 2005), por meio do ensaio de corpos de prova prismáticos, ambos na prensa hidráulica, conforme Figura 9.



Figura 9 – Ensaio de resistência a compressão (a), Ensaio de resistência a tração na flexão (b)

Fonte: Próprio autor (2019).

Os ensaios de absorção por capilaridade, índices de vazios e absorção por porosidade foram realizados de acordo com a NBR 15295 (ABNT, 2005) e a NBR 9778 (ABNT, 2005), respectivamente. Esses ensaios foram executados com o intuito de se avaliar o efeito cristalizante do aditivo e relacioná-lo ao possível retardamento da RAA nas argamassas.

- Análise de resultados

Todos os dados pertinentes ao ensaio acelerado de RAA foram analisados e comparados seguindo as tabelas fornecidas pela NBR 15577-1 (ABNT, 2018), onde são determinados a reatividade potencial do agregado, grau de risco de ocorrência, consequências e determinação da classe de reatividade, conforme a Figura 10. Para maiores esclarecimentos, as tabelas supracitadas estão apresentadas no Apêndice A. Os demais ensaios citados anteriormente na Figura 2 foram analisados visando identificar a interferência do aditivo empregado, se ele será capaz de melhorar o desempenho mecânico da argamassa, evitar ou acelerar o processo de RAA, para então determinar a sua viabilidade de utilização em argamassa.

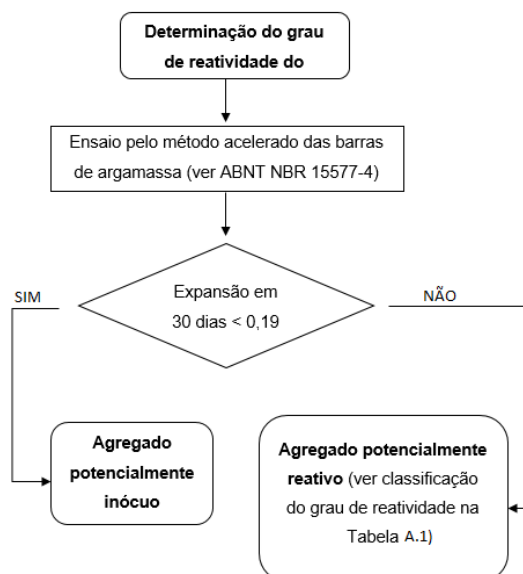


Figura 10 – Determinação do grau de reatividade do agregado
Fonte: Adaptada de NBR 15577-1 (ABNT, 2018).

3. Resultados e discussão

3.1. Ensaio no estado fresco

Conforme Tabela 7 é possível notar que o aditivo impactou na argamassa no estado fresco, sendo possível avaliar a sua influência quanto à massa específica, abatimento e teor de ar incorporado, em relação ao quanto de aditivo empregado.

Tabela 7 – Análises no estado fresco

Traço	Massa Específica	Espalhamento	Teor de ar incorporado
AR	2216.87 kg/m ³	267 mm	1.05 %
AA1	2226.51 kg/m ³	278 mm	0.34 %
AA2	2228.92 kg/m ³	283 mm	0.09 %

Fonte: Próprio autor (2019).

A massa específica da argamassa no estado fresco obteve um pequeno aumento tanto para os traços com 1% quanto para os com 2% de aditivo, possivelmente devido ao aditivo ser mais um fino incorporado na mistura, e não tendo cristalizado de imediato, preenchendo os vazios como um fíler.

Quanto ao espalhamento, o aditivo agiu como plastificante, haja vista que o espalhamento aumentou de acordo com a quantidade de aditivo empregado nos traços, pela mesma ideia de ser um composto com módulo de finura menor ao agregado empregado, ele trabalha permitindo uma melhor fluidez entre agregado e matriz cimentícia, o que explica o porquê de aumentar o espalhamento mesmo tendo um teor de ar incorporado menor.

No quesito teor de ar incorporado, o traço com 2% de adição obteve o melhor resultado, sendo este de 0,09% de ar incorporado na argamassa reduzindo a quantidade de

ar presente na mistura, e que posteriormente poderá impactar na porosidade da argamassa endurecida.

Por ser um aditivo a base de cimento e outros produtos alcalinos, acredita-se que este aditivo age tardiamente, por ser mais um fino incorporado à mistura, e este material ocupar os espaços vazios e assim reduzir o teor de ar incorporado e melhorar a sua consistência.

3.2. Ensaio no estado endurecido

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos referente à resistência à compressão das argamassas ensaiadas, onde é possível notar que a argamassa AA2 obteve o melhor desempenho, seguido pela AA1 e AR, respectivamente. Para este ensaio foram utilizados três corpos de provas para cada traço.

É notável uma similaridade nos resultados com 7 dias, possivelmente, devido ao aditivo cristalizante não ter reagido o necessário nesta idade. O que leva a entender que ao atingir os 28 dias, o traço com 2% de aditivo obteve um resultado superior tendo um ganho de resistência a compressão de aproximadamente 25% em relação à referência, seguido pelo traço com 1% de aditivo, sendo que obteve um ganho de pouco mais que 6%, também em relação ao traço referência. Acreditando-se que este ganho de resistência mecânica foi devido a sua cristalização no interior do corpo de prova.

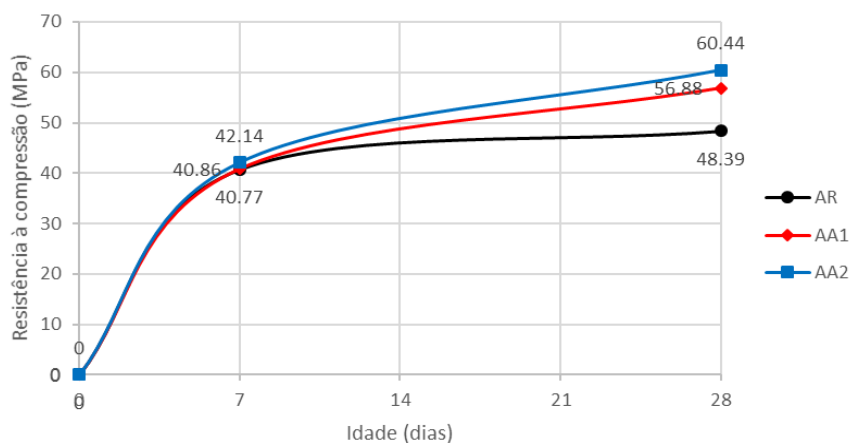


Figura 11 – Resultado de resistência à compressão
Fonte: Próprio autor (2019).

A Figura 12 apresenta os resultados referente ao ensaio de resistência à tração na flexão, onde foi possível observar que o traço com 1% de aditivo obteve uma redução na sua resistência de aproximadamente 10% em relação ao traço AR. Sendo que, novamente, o traço AA2 obteve o melhor resultado, com um desempenho de pouco mais que 1% maior em relação ao mesmo traço, porém, esta melhoria não foi de grande significância, ficando muito próximo ao resultado alcançado pelo traço de referência. Logo, observa-se que, no

que se refere à resistência à tração na flexão, o aditivo não apresentou contribuição para melhora do desempenho.

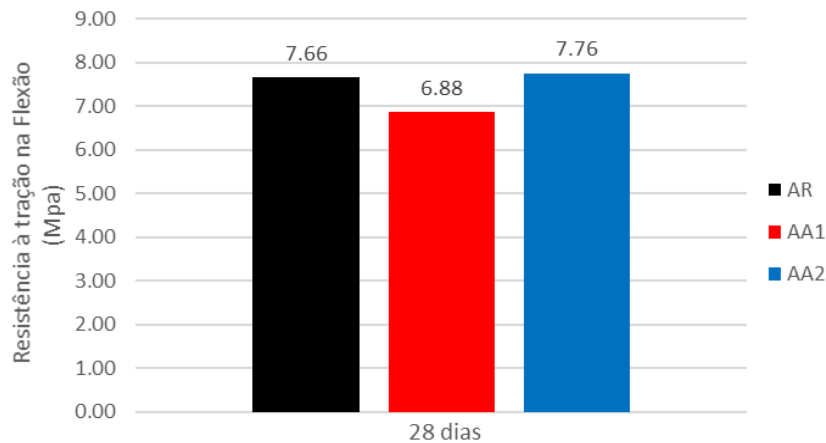


Figura 12 – Resultado de resistência à tração na flexão
Fonte: Próprio autor (2019).

A Figura 13 apresenta uma mancha visualizada por meio de um microscópio em um corpo de prova prismático após rompimento, acredita-se que esta mancha é oriunda do aditivo cristalizante após sua ativação, onde este apresenta a capacidade de fechar fissuras de até 0,5 mm. Tendo em vista que o corpo de prova apresenta algumas irregularidades internas possivelmente ocasionadas por problemas gerados pelo processo de moldagem, este aditivo deve ter reagido de forma a preencher os espaços vazios dentro do corpo de prova e que apresentam uma configuração menor que a sua capacidade de cicatrização. Na área cristalizada não existem grandes concentrações de agregados miúdos, o que fortalece a constatação da cristalização.

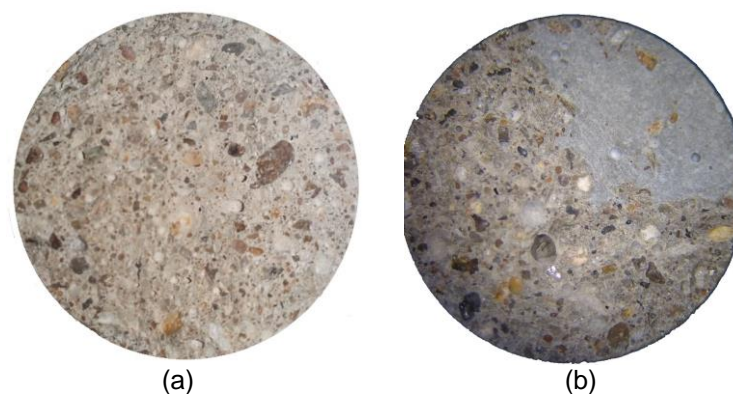


Figura 13 – Imagem microscópica de corpo de prova sem aditivo, (b) Análise microscópica do aditivo cristalizante após reação

Fonte: Próprio autor (2019).

As Figuras 14 e 15 apresentam os resultados obtidos através do ensaio de absorção de água e índices de vazios, sendo estes resultados, a média obtida da medição de 3 corpos de prova prismático, seguindo conforme indicação da NBR 9778 (ABNT, 2005). É possível notar que, os traços com 1% de aditivo obtiveram melhor resultado, confirmando que a melhor dosagem é com a quantidade de aditivo dentro dos padrões estipulados pela fabricante, de 0,8% a 1,2%. Sendo que o traço AA1 obteve uma redução de 5% tanto absorção de água quanto no índice de vazios em relação à referência, e o traço com 2% de aditivo obteve uma redução de aproximadamente 3,5% para os mesmos parâmetros e em relação ao traço AR.

O que leva a observar que para obter melhores resultados no que tange à diminuição de índices de vazios e absorção, é melhor adotar os teores dentro das especificações fornecidas pela Adimix Penetron. Porém, caso seja utilizado uma quantidade de aditivo maior, este continua beneficiando a argamassa, entretanto os resultados não são tão satisfatórios.

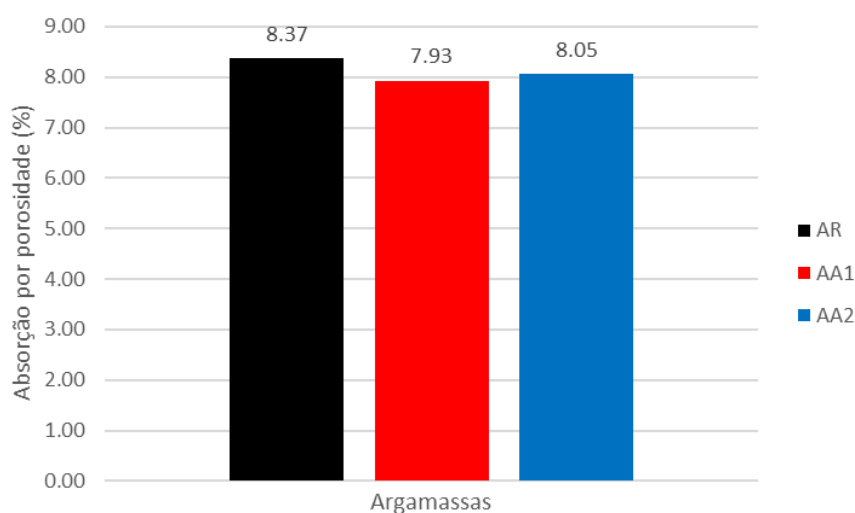


Figura 14 – Resultado absorção de água por porosidade
Fonte: Próprio autor (2019).

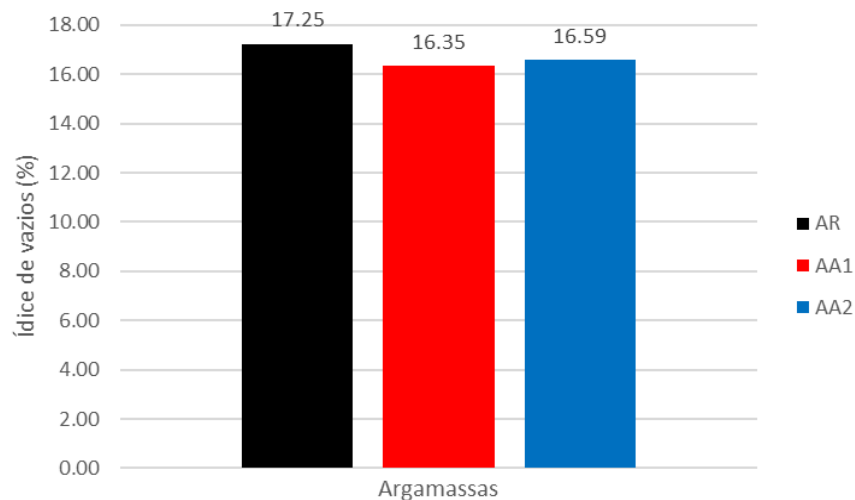


Figura 15 – Resultado índice de vazios
Fonte: Próprio autor (2019).

As Figuras 16 e 17 apresentam os resultados obtidos do ensaio de absorção por capilaridade realizado conforme NBR 15295 (ABNT, 2005), onde foi possível determinar a absorção de água e o coeficiente de capilaridade.

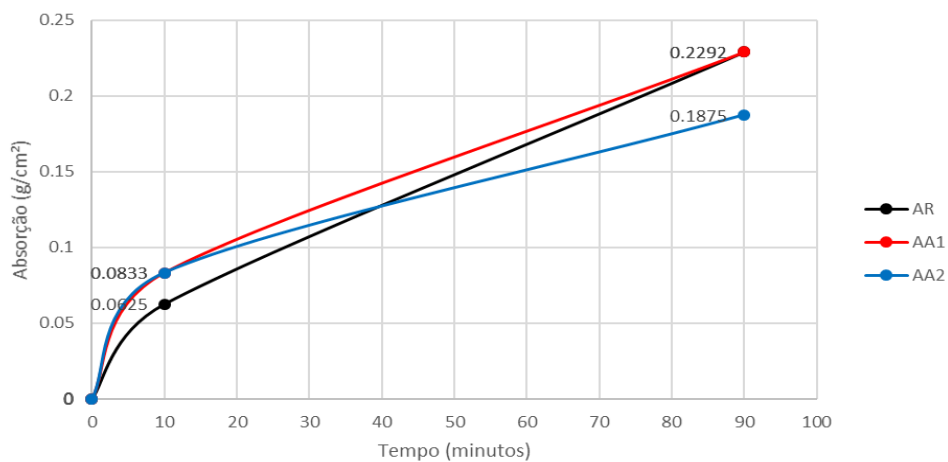


Figura 16 – Absorção de água por capilaridade
Fonte: Próprio autor (2019).

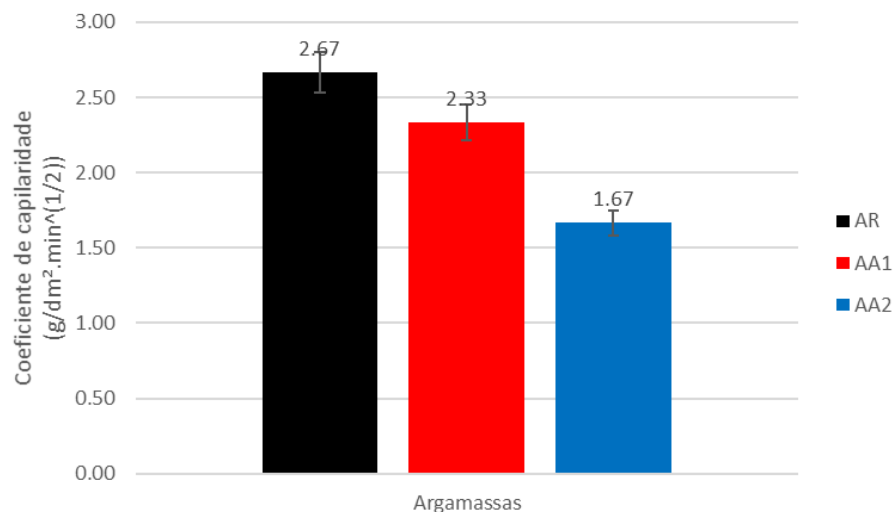


Figura 17 – Coeficiente de capilaridade

Fonte: Próprio autor (2019).

Comprovando a eficiência do aditivo cristalizante, os corpos de prova com teor de 2% de aditivo obtiveram uma melhoria de 22,24% com relação ao traço referência no que tange à absorção de água e uma redução de 37,45% do coeficiente de capilaridade. Já os corpos de prova com teor de 1%, a absorção por capilaridade igualou-se à referência, entretanto, seu coeficiente de capilaridade reduziu em 12,73%, indicando que a absorção por capilaridade tende a reduzir em função do tempo, tornando-se menos permeável que a argamassa referência.

A Figura 18 apresenta o resultado referente às medições realizadas nos corpos de prova utilizados para o ensaio acelerado de RAA em argamassas. Os corpos de prova com o aditivo apresentaram uma grande variação inicial na segunda medição, o que leva a entender que o aditivo possui um tempo de ativação de aproximadamente uma semana. Antes deste período o mesmo se comporta como material inerte, o que explica sua influência no espalhamento e teor de ar incorporado no estado fresco. Já nos corpos de prova do traço referência, houve um aumento gradativo, mesmo não atingindo a expansão mínima necessária para ser classificado como potencial inócuo de grau R1, conforme Tabela A.1, todas apresentaram como sendo de potencial inócuo de grau R0, com potencial de ocorrência desprezível.

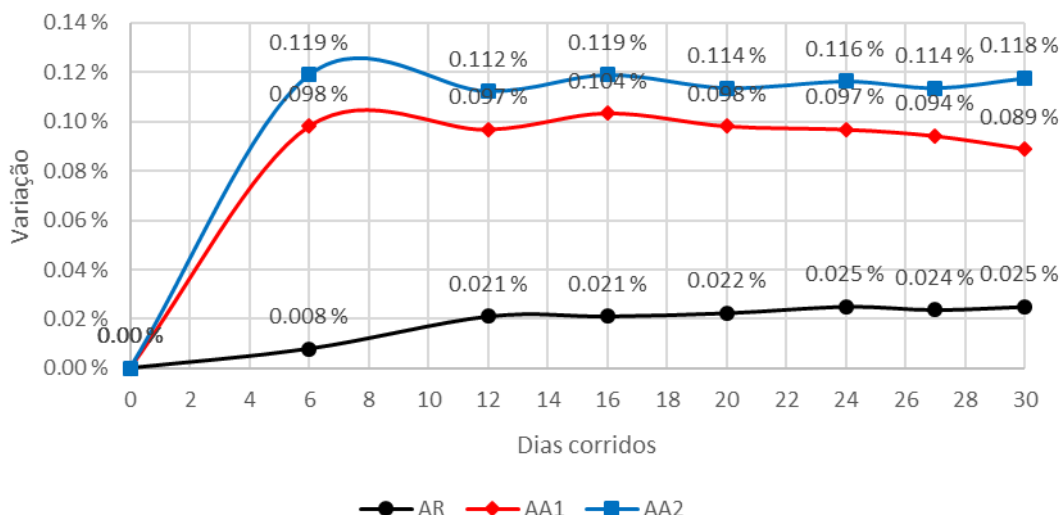


Figura 18 – Expansão dos corpos de prova do ensaio de RAA em porcentagem

Fonte: Próprio autor (2019).

No entanto, foi possível notar que, ao incorporar o aditivo, o mesmo intensificou a expansão ocorrida. Possivelmente, devido à composição do aditivo, apresentado anteriormente no Quadro 1, onde o mesmo possui compostos alcalinos que favorecem a ocorrência de RAA.

O aditivo foi capaz de acelerar a reação de tal forma que as expansões obtidas na segunda medição que ocorreu com 6 dias após a moldagem dos corpos de prova, o traço com 1% de aditivo obteve uma expansão aproximada de 1100% em relação ao traço referência, sendo este com uma expansão média de 0,008% para o AR e de 0,098% para o AA1. Já o traço com 2% de aditivo obteve uma expansão de mais de 1300% também em relação ao traço referência, onde sua medição foi de 0,119%. Notou-se que no caso o AA1, houve uma redução da reatividade com o passar do tempo, pois a primeira medição foi de 0,098% e a última de 0,089%. Logo, o gel cristalizante, dentro dos limites de dosagem, pode colaborar para a redução da expansão em função do tempo. No traço com 2% não houve redução, bem como no traço referência.

Lembrando que estas variações foram constatadas em copos de prova com medidas de 30x25x285mm, o que torna estas expansões mínimas em laboratório. Entretanto, para aplicações em grande escala, deve se atentar para estas expansões iniciais, pois podem gerar problemas imediatamente após as concretagens, sendo necessário o uso de produtos inibidores de reação álcali-agregado, como por exemplo, produtos pozolânicos. Haja vista que após a ativação do aditivo cristalizante, este estabiliza o processo de expansão devido ao preenchimento dos poros capilares e aberturas até 0,5 mm, reduzindo a quantidade de água presente e mitigando a RAA.

Sugere-se que sejam utilizadas adições pozolânicas em conjunto ao aditivo cristalizante, pois a adição elevaria a resistência química à reação álcali-agregado, visto que as pozolanas reagiriam com os compostos alcalinos presentes na mistura e na composição do aditivo. A reação pozolânica reduziria a quantidade de álcalis disponíveis para a RAA, entretanto mais pesquisas devem ser realizadas de maneira a identificar os teores adequados para os diferentes tipos de pozolanas.

Seu uso seria interessante juntamente com sílica ou nano-sílica, com a intenção de tratar o composto contra a reação, tendo em vista que as sílicas reagiria com os hidróxidos provenientes do aditivo e diminuiria a disponibilidade de materiais alcalinos para propiciar a reação álcali-agregado, no entanto, o quanto de adição e como ela reagiria fica como sugestão para pesquisas futuras.

Por fim, quanto ao desempenho mecânico, o traço com 2% de aditivo apresentou os melhores resultados, obtendo uma resistência a compressão 25% maior que o traço sem aditivo, além de, no estado fresco, apresentar maior trabalhabilidade, menor teor de ar incorporado, o que melhoraria seu uso *in loco*. No entanto, o traço com 1% de aditivo apresentou melhor resultado quando analisado a porosidade e absorção de água, que o tornaria mais adequado a sua utilização em obras sujeitas à ação da água.

No quesito de análise de permeabilidade dos corpos de prova pelo ensaio de capilaridade, o traço AA2 obteve melhor resultado com relação aos demais traços, comprovando que a cristalização do aditivo foi capaz de torná-lo menos permeável. Porém, seu uso no combate ao RAA não se mostrou eficiente, sendo necessário novas pesquisas para analisar diferentes teores do aditivo cristalizante juntamente com produtos inibidores de reação álcali-agregado.

4. Conclusões

Pode concluir-se que o aditivo cristalizante não minimizou o risco de ocorrência de RAA, pelo contrário, acelerou. O que leva a ideia de seu uso se restringir a pequenas estruturas, caixas d'água e piscinas. Para uso em estruturas maiores, como por exemplo em barragens, são necessários mais estudos, avaliando seu comportamento em meio a misturas com adições pozolânicas, que já são empregadas na intenção de reduzir a probabilidade de ocorrência de RAA.

Entretanto, mais pesquisas devem ser realizadas, visto que a expansão pode ter sido ocasionada pela presença de magnésio na composição do aditivo. Ensaio laboratoriais com equipamentos que possibilitem a análise microestrutural das misturas devem ser realizados de forma a identificar a causada das expansões iniciais causadas pelo uso do aditivo estudado.

Referências

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7215**: Cimento Portland - Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro, 2019.

_____. **NBR 9778**: Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água por imersão - Índice de vazios e massa específica. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR 13276**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação do índice de consistência. Rio de Janeiro, 2016.

_____. **NBR 13278**: Argamassa para assentamento de paredes e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa e do teor de ar incorporado. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 13279**: Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15295**: Argamassas para assentamento e revestimento de paredes e tetos – Determinação da absorção de água por capilaridade e do coeficiente de capilaridade. Rio de Janeiro, 2005.

_____. **NBR 15577-1**: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 1: Guia para avaliação de reatividade potencial e medidas preventivas para uso de agregados com concreto. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 15577-4**: Agregados - Reatividade álcali-agregado Parte 4: Determinação da expansão em barras de argamassa pelo método acelerado. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR 16697**: Cimento Portland - Requisitos. Rio de Janeiro, 2018.

_____. **NBR NM 45**: Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios. Rio de Janeiro, 2006.

_____. **NBR NM 52**: Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente. Rio de Janeiro, 2009.

_____. **NBR NM 248**: Agregados - Determinação da composição granulométrica. Rio de Janeiro, 2003.



CADERSA, A S; ZEPHIR, D. Effect of Penetron Admix on the Properties of concrete. **University Of Mauritius Research Journal**. Réduit. 2 jun. 2014.

JUNIOR, Aguinaldo Brito; FERRO, Ivan Passuelo. CONGRESSO BRASILEIRO DE PATOLOGIA DAS CONSTRUÇÕES, 2016, Belém. **REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO: UM BREVE ESTUDO DA OCORRÊNCIA NOS BLOCOS DA PONTE PAULO GUERRA – RECIFE/PE**. Belém: Alconpat, 2016. 10 p.

NETO, Claudio Sbrighi; QUITETE, Eduardo Brandau; BATTAGIN, Arnaldo Forti. **Guia de prevenção da reação álcali-agregado**. São Paulo: IBRACON, 2018. 25 p.

PENETRON. **Penetron Admix**. Lorena: Penetron, 2018.

ROLIM, Paulo Henrique Borba. **Reação álcali-agregado: avaliação do método químico de ensaio**. 2010. 109 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

SILVA, Patrícia Neves. **Reação álcali-agregado nas usinas hidrelétricas do complexo Paulo Afonso / CHESF.:** Influência da Reação nas Propriedades do Concreto. 2007. 241 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

TAKAGI, Emilio Minoru; LIMA, Maryangela Geimba de; HELENE, Paulo Roberto do Lago. Contribuição para estudo do efeito da autocicatrização em concretos ativado por catalisadores cristalinos em estruturas de túneis submetidas à exposição contínua de água. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE TÚNEIS E ESTRUTURAS SUBTERRÂNEAS, 3., 2012, São Paulo. **Seminário Internacional “South American Tunnelling – SAT 2012”**. São Paulo: CBT, 2012.

APÊNDICE A

A classificação do tipo da estrutura é representada pelo Quadro A.1, onde cada classe recebe a consequência e exemplos de ocorrência. Para este trabalho, a estrutura será da classe B, por se tratar da aplicação da argamassa em construções corriqueiras.

Quadro A.1 – Classificação das estruturas

Classificação da Estrutura	Consequência da RAA	Exemplos
Classe A	Consequências pequenas ou insignificantes do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança.	Estruturas temporárias (menor que anos de vida útil), elementos não expostos a umidade, elementos não estruturais o interior de edifícios, canteiros de obra.
Classe B	Consequências moderadas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança apenas se ocorrer deterioração generalizada.	Calçadas, calhas, telhas, muros etc.
Classe C	Consequências significativas do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Pavimentos de concreto, elementos de fundação, tubos, postes, alvenarias de vedação, tubulões, barreiras de segurança, elementos pré-fabricados com altos custos de reposição, estradas de baixo volume de tráfego, dormentes etc.
Classe D	Consequências sérias e de gravidade do ponto de vista econômico, ambiental e de segurança mesmo se ocorrer pequena deterioração.	Grandes pontes, estádios, hidrelétricas, estruturas de obras de arte, barragens, instalações nucleares, torres eólicas, instalações de tratamento de água, instalações de tratamento de resíduos, túneis, elementos estruturais de difícil inspeção ou reparo.

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

Na Tabela A.1 são apresentados os diferentes graus de reatividade do agregado quanto ao tempo de moldagem dos corpos de prova. Nesta, a variação do tamanho é o indicador para o quão reativo e qual o potencial reativo dos agregados.

Tabela A.1 – Classificação do grau de reatividade do agregado

Classificação da reatividade potencial do agregado¹	Expansão das barras de argamassa aos 30 dias² %
Potencialmente inócuo grau R0	Menor que 0,19 %
Potencialmente inócuo grau R1	Entre 0,19 e 0,40 %
Potencialmente inócuo grau R2	Entre 0,41 e 0,60 %
Potencialmente inócuo grau R3	Maior que 0,60 %

¹ Valor com base na experiência brasileira.

² Valores extraídos da ASTM C 1778-16

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

Tendo classificado o potencial reativo dos agregados, é possível analisar o risco de ocorrência do RAA quanto às dimensões das estruturas e condições de exposição, conforme a Tabela A.2.

Tabela A.2 – Grau de risco de ocorrência da RAA

Dimensões e condições de exposição dos elementos estruturais de concreto	Classe de reatividade do agregado			
	R0	R1	R2	R3
Não maciço em ambiente seco ¹	Desprezível	Desprezível	Mínimo	Moderado
Maciço ² em ambiente seco	Desprezível	Mínimo	Moderado	Alto
Todas as estruturas geralmente externas, expostas a umidade do ar, enterradas e imersas	Desprezível	Moderado	Alto	Muito alto
Todas as estruturas em contato com álcalis ³ em condições de serviço	Desprezível	Alto	Muito alto	Muito alto

¹ Ambiente seco correspondente ao ambiente com umidade relativa do ar menor que 60%, geralmente encontrado nos interiores das edificações.

² Elemento maciço é aquele cuja menor dimensão da seção transversal é maior ou igual a 1m.

³ Exemplos de estruturas exposta a álcalis em serviço incluem estruturas em contato com a água do mar, solos contaminados, lençóis freáticos contendo sais alcalinos, entre outros.

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