

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO – CAMPUS RIO VERDE.
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM
ADITIVO CRISTALIZANTE

Autor: Karolaine Ramada Neves
Orientador: Dr. Bacus de Oliveira Nahime
Coorientador: Prof. Me. Lorena Araujo Silva

Rio Verde - GO
Julho – 2021

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E
TECNOLOGIA GOIANO - CAMPUS RIO VERDE.
BACHAREL EM ENGENHARIA CIVIL.

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM
ADITIVO CRISTALIZANTE

Autor: Karolaine Ramada Neves
Orientador: Prof. Dr. Bacus de Oliveira Nahime
Coorientador: Prof. Me. Lorena Araujo Silva

Trabalho de Curso apresentado ao
Instituto Federal Goiano – Câmpus
Rio Verde, como requisito parcial
para a obtenção do Grau de Bacharel
em Engenharia Civil.

Rio Verde – GO
Julho, 2021

Sistema desenvolvido pelo ICMC/USP
Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas - Instituto Federal Goiano

NN518a Neves , Karolaine
Avaliação do desempenho de concretos com aditivo
cristalizante / Karolaine Neves ; orientador Bacus
Nahime; co-orientador Lorena Araújo. -- Rio Verde,
2021.
52 p.

Tese (Doutorado em Bacharel em Engenharia Civil) -
- Instituto Federal Goiano, Campus Rio Verde, 2021.

1. Permeabilidade . 2. Durabilidade . 3. Poros .
4. Aditivo cristalizante . 5. . I. Nahime, Bacus,
orient. II. Araújo, Lorena , co-orient. III. Título.

**TERMO DE CIÊNCIA E DE AUTORIZAÇÃO PARA DISPONIBILIZAR PRODUÇÕES
TÉCNICO-CIENTÍFICAS NO REPOSITÓRIO INSTITUCIONAL DO IF GOIANO**

Com base no disposto na Lei Federal nº 9.610/98, AUTORIZO o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano, a disponibilizar gratuitamente o documento no Repositório Institucional do IF Goiano (RIIF Goiano), sem ressarcimento de direitos autorais, conforme permissão assinada abaixo, em formato digital para fins de leitura, download e impressão, a título de divulgação da produção técnico-científica no IF Goiano.

Identificação da Produção Técnico-Científica

- | | |
|--|---|
| ☐ Tese | ☐ Artigo Científico |
| ☐ Dissertação | ☐ Capítulo de Livro |
| ☐ Monografia – Especialização | ☐ Livro |
| ☒ TCC - Graduação | ☐ Trabalho Apresentado em Evento |
| ☐ Produto Técnico e Educacional - Tipo: _____ | |

Nome Completo do Autor: Karolaine Ramada Neves

Matrícula: 2016102200840288

Título do Trabalho: Avaliação do desempenho de concretos com aditivo cristalizante

Restrições de Acesso ao Documento

Documento confidencial: ☐ Não ☒ Sim, justifique: Documento enviado para submissão na revista cerâmica

Informe a data que poderá ser disponibilizado no RIIF Goiano: 28/07/23

O documento está sujeito a registro de patente? ☐ Sim ☒ Não

O documento pode vir a ser publicado como livro? ☐ Sim ☒ Não

DECLARAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO NÃO-EXCLUSIVA

O/A referido/a autor/a declara que:

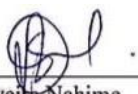
1. o documento é seu trabalho original, detém os direitos autorais da produção técnico-científica e não infringe os direitos de qualquer outra pessoa ou entidade;
2. obteve autorização de quaisquer materiais incluídos no documento do qual não detém os direitos de autor/a, para conceder ao Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano os direitos requeridos e que este material cujos direitos autorais são de terceiros, estão claramente identificados e reconhecidos no texto ou conteúdo do documento entregue;
3. cumpriu quaisquer obrigações exigidas por contrato ou acordo, caso o documento entregue seja baseado em trabalho financiado ou apoiado por outra instituição que não o Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia Goiano.

Rio Verde, 28/07/2021.

Karolaine Ramada Neves

Assinatura do Autor e/ou Detentor dos Direitos Autorais

Ciente e de acordo:



Bacus de Oliveira Nahime

Assinatura do(a) orientador(a)

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, Jesus e Nossa Senhora por toda proteção, força e benções que tem concedido em minha vida. Sem Eles nada disso seria possível;

Aos meus pais Delvano e Genelice, por estarem sempre ao meu lado em todos os momentos, for terem me dado toda força e pelos sacrifícios que fizeram para que eu continuasse este curso. Em especial ao meu irmão Gabriel, por ter me acompanhado no laboratório todas as vezes que precisei;

A professora Lorena, por todas as dicas e pela paciência que teve comigo em relação aos meus desesperos, além de partilhar todo seu conhecimento;

A minha amiga Karolayne, pelas palavras de incentivo e por sempre estar disposta a me ajudar nos ensaios laboratório, dividindo toda frustração e alegria;

Ao professor Bacus por ter aceito ser meu orientador;

E a todos os amigos e professores que estiveram comigo durante estes curso, proporcionado momentos que levarei comigo para sempre.

BIOGRAFIA DA AUTORA

Karolaine Ramada Neves, nascida em 07 de outubro de 1997 na cidade de Rio Verde, Goiás. Ingressou no Instituto Federal de Educação, Ciências e Tecnologia Federal, campus Rio Verde, no curso de bacharelado em Engenharia civil no ano de 2016, realizando a defesa de seu trabalho de conclusão de curso em julho de 2021.

ÍNDICE GERAL

	Página
ÍNDICE DE TABELAS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vii
LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES	ix
RESUMO	1
ABSTRACT	1
1 INTRODUÇÃO.....	3
1.1 Durabilidade das estruturas de concreto	4
1.2 Mecanismos de transporte atuante no concreto	5
1.2.1 Permeabilidade	5
1.2.2 Absorção capilar.....	7
1.2.3 Difusão	8
1.3 Fissuração do concreto.....	8
1.3.1 Alguns fatores que provocam fissuras no concreto.....	9
1.4 Tipos de autocicatrização.....	14
1.4.1 Autocicatrização autógena	16

1.4.2 Autocicatrização autônoma	17
1.5 Aditivo cristalizante	19
1.6 Referências Bibliográficas	22
2.1 GERAL	26
2.2 ESPECÍFICO	26
3 CAPITULO I	28
RESUMO	28
ABSTRACT	28
INTRODUÇÃO	28
MATERIAIS E MÉTODOS	29
RESULTADOS	32
CONCLUSÃO	36
REFERÊNCIAS	36

ÍNDICE DE TABELAS

Página

CAPÍTULO I

Tabela I – Caracterização do agregado graúdo e agregado miúdo	29
Tabela II – Composição química do aditivo Penetron Admix®	30
Tabela III - Composição química e física do aditivo Penetron Admix®	30
Tabela IV – Traços unitário dos concretos expresso em kg/kg de cimento	30
Tabela V – Resultado do ensaio de consistência pelo abatimento de tronco de cone	32
Tabela VI – Compressão axial dos corpos de prova com 28 dias	Erro! Indicador não definido.
Tabela VII – Tração por compressão diametral dos corpos de prova com 28 dias	Erro! Indicador não definido.

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1 - Concreto (a) impermeável (b) permeável	7
Figura 2 - Ascensão capilar de acordo com o diâmetro.	7
Figura 3 - Fissuras por cisalhamento em ponte, provocadas devido a passagem de veículos com cargas excessivas, não prevista no projeto	10
Figura 4 - Fissuração devido a movimentação térmica	11
Figura 5 - Fissuras provenientes de retração hidráulica	12
Figura 6 - Fissuras por assentamento plástico do concreto	13
Figura 7 - Recalque diferenciado por falta de homogeneizado do solo	14
Figura 8 - Fenômenos associados ao processo de colmatação	17
Figura 9 - Cicatrização autônoma por incorporação de cápsulas compostas por agentes cristalizantes	18
Figura 10 - Crescimento cristalino no concreto.....	20
Figura 11 - Cristais ao longo da fissura.....	21
CAPÍTULO I	
Figura 1 – Programa experimental aplicado.....	31

Figura 2 – Ensaio realizados e tempos de cura	32
Figura 3 – Resultado do ensaio de absorção por capilaridade dos corpos de prova com 28 dias.....	33
Figura 4 – Índice de vazios dos corpos de prova com 28 dias	34
Figura 5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão com 28 dias.....	35

LISTA DE SÍMBOLOS, SIGLAS, ABREVIACÕES E UNIDADES

Símbolo/Sigla	Significado	Unidade Medida
%	Por cento	-
ABNT	Associação Brasileira de Norma Técnica	-
ABCP	Associação Brasileira de Cimento Portland	-
ACI	American Concrete Institute	-
Ca^{+2}	Cálcio	-
CAS N°	Chemical Abstrats Service Number	-
CaCO_3	Carbonato de cálcio	-
$(\text{Ca}(\text{OH})_2)$	Hidróxido de cálcio	-
C-1	Concreto com aditivo com 0,7% de concentração, sem fissurar	-
C-2	Concreto com aditivo com 0,8% de concentração, sem fissurar	-
C-3	Concreto com aditivo com 0,9% de concentração, sem fissurar	-
CF-1	Concreto com aditivo com 0,7% de concentração, fissurado	-
CF-2	Concreto com aditivo com 0,8% de concentração, fissurado	-
CF-3	Concreto com aditivo com 0,9% de concentração, fissurado	-
CO_2	Dióxido de carbono	-
CO^{2-}_3	Íons Carbonato	-

Cp's	Corpos de prova	-
CP II F-32	Cimento Portland composto com fíler	-
Eq	Equação	-
g/cm ³	Gramas por centímetro cúbico	-
JCI	Japan Concrete Institute	-
kg	Kilograma	-
mm	Milímetros	-
MPa	Megapascal	-
NBR	Norma Brasileira	-
NM	Norma Mercosul	-
PRAH	Permeability Reducer Aditive for Concrete Exposed to Hydrostatic Conditions	-
PSA	Polímero Superabsorvente	-
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures	-
S	Concreto referência sem fissurar	-
SF	Concreto referência fissurado	-
SHC	Self Healing Phenomena in Cement	-
Tc	Technical Comitee	-
µm	Micrômetro	-

RESUMO

NEVES, KAROLAINÉ RAMADA. Instituto Federal Goiano – Campus Rio Verde – GO, junho 2021. **Avaliação do desempenho de concretos com aditivo cristalizante**. Orientador: Bacus Oliveira. Coorientadora: Lorena Araújo Silva.

O processo de degradação das estruturas de concreto vem se tornando cada vez mais precoce e frequente. Esse fato está associado à penetração de substâncias agressivas para o interior das estruturas. Nesse contexto, o aditivo cristalizante atualmente vem sendo empregado na redução da porosidade das estruturas, visto que, esse aditivo desenvolve compostos cristalinos insolúveis no interior dos poros e fissuras do concreto. O objetivo deste trabalho é compreender o desempenho físico e mecânico de concretos produzidos com aditivo cristalizante no estado fresco e endurecido. Para tanto, foi realizado ensaios de compressão, tração, capilaridade, porosidade e índice de vazios. Os resultados desses ensaios apontaram vantagens na utilização do aditivo cristalizante para a obtenção de um concreto mais durável, dado que houve diminuição de 70,75% na absorção de água, 17% dos índices de vazios, além de proporcionar aumento de 40,83% na resistência mecânica.

PALAVRAS-CHAVES: permeabilidade, durabilidade, poros, fissuras.

ABSTRACT

NEVES, Karolaine Ramada. Instituto Federal Goiano - Campus Rio Verde - GO, June 2021. Performance evaluation of concretes with crystallizing additive. Advisor: Bacus Oliveira. Co-supervisor: Lorena Araújo Silva.

The degradation process of concrete structures has become increasingly precocious and frequent, this fact is associated with the penetration of aggressive substances into the interior of the structures. In this context, the crystallizing additive is currently being used to reduce the porosity of the structures, since this additive develops insoluble crystalline compounds inside the pores and cracks in the concrete. The objective of this article is to evaluate the performance of the crystallizing additive in decreasing the permeability of concrete and its influence on the mechanical properties of the material. For this, the analysis was performed through the tests of mechanical performance, capillarity, porosity and void index. The results of these tests pointed out advantages in the use of the crystallizing additive to obtain a more durable concrete, given that there was a considerable decrease in water absorption and voids indexes and an increase in the mechanical strength of the concrete.

KEYWORDS: permeability, durability, pores, crystallizing additive, cracks.

1 INTRODUÇÃO

No início da década de 70, houve um aumento na necessidade de recuperação e reforço de várias construções pelo mundo. Isso levou a constatação da carência de critérios que abrangessem os diversos mecanismos do concreto, como permeabilidade, deformação; garantindo maior durabilidade as estruturas [1].

Um concreto durável deve preservar sua forma, qualidade e resistência originais, quando submetidos ao ambiente para o qual foram projetados. A deterioração das estruturas decorre em virtude de diversos fatores, mas está principalmente associada aos mecanismos de transporte de fluidos no concreto [2].

A durabilidade do concreto está vinculada a facilidade com que os fluidos conseguem penetrar e percolar em seu interior. A água é responsável pela maioria dos processos de degradação, tanto em sua forma pura ou com íons agressivos. Isso deve-se a sua facilidade de penetração no material [2,3].

A fomenta pelo desenvolvimento de construções menos susceptíveis ao ataque de agentes agressivos, fez com que diversas técnicas fossem elaboradas visando a redução da permeabilidade do concreto, como a diminuição da relação água/cimento, incorporação de aditivos, sistemas de impermeabilização, adições de minerais, entre outros [4].

Os impermeabilizantes têm como objetivo bloquear a passagem de fluidos para o interior do concreto, proporcionando maior proteção e durabilidade. Quando aplicados na superfície, estes produtos produzem uma barreira física que fecha os poros do concreto, impedindo a penetração de fluidos por qualquer mecanismo de transporte. Já quando

incorporados na produção do material, diminuem a sua porosidade, aumentando consequentemente a resistência ao ingresso de líquidos ou gases [5]

Dentre os diversos sistemas de impermeabilização existentes no mercado, a incorporação de aditivo impermeabilizante por cristalização no concreto vem recebendo cada vez mais destaque. Esse aditivo é hidrofílico, ou seja, reage de forma efetiva na presença de água. À medida que a água penetra o concreto, esta entra em contato com o composto cristalino no interior do material, produzindo uma reação, que forma como consequência os cristais insolúveis, que por sua vez, bloqueiam os poros e capilaridades, diminuindo a permeabilidade da estrutura [6].

O aditivo cristalizante é considerado um material cicatrizante, devido a sua capacidade de reparar pequenos danos e fissuras de materiais cimentícios com diâmetro máximo de até 5 mm. Com a abertura de fissuras, a penetração de água sucede ativando os cristais, iniciando-se assim, um processo de colmatação dessas, devido a formação de estruturas cristalinas [7].

A utilização desse aditivo implica em uma economia de custo direto, referente à reparo e manutenção das edificações, e indireto, em virtude do desuso das estruturas durante o período de manutenção. Além de que, materiais autocicatrizante contribuem para o reparo de estruturas em locais de árduo acesso para manutenção [8].

Ao se aplicar tratamento químico cristalizante, busca-se a impermeabilização, proteção e o aumento da vida útil das estruturas de concreto, além da recuperação e reabilitação de edificações existentes [7].

Por meio de dados e estudos, verificou-se que a durabilidade das estruturas de concreto está vinculada com a capacidade que fluídos e íons agressivos conseguem penetrar e percolar em seu interior. Mediante esse fato, o trabalho em questão, visa avaliar a eficácia do uso do aditivo cristalizante na diminuição da permeabilidade do concreto.

1.1 Durabilidade das estruturas de concreto

No atual cenário mundial, um grande enfoque vem sendo dado na elaboração e concepção de estruturas de concreto com maior durabilidade. Diversos fatores contribuíram para esse acontecimento, como o desenvolvimento precoce de manifestações patológicas nas

construções, a competitividade do mercado, exigência em relação à sustentabilidade no setor da construção civil, dentre outros [9].

Diversas normas foram desenvolvidas a fim de proporcionar maior durabilidade às estruturas, dentre elas a ABNT NBR 6118:2014 [10] que classifica os ambientes de acordo com o grau de agressividade e poder de deterioração da estrutura, possibilitando assim, a determinação de fatores que devem ser obedecidas durante o projeto e execução de uma obra para proteção e prolongamento da vida útil, como por exemplo a relação água/cimento, o cobrimento da armadura e a classe de resistência do concreto.

O concreto é considerado “durável”, quando possui capacidade de suportar intempéries, ou seja, ingresso de agentes agressivos e a qualquer outro vetor de degradação, conservando a resistência mecânica adequada e condições de serviço de acordo com o projeto elaborado [2].

A durabilidade das estruturas está principalmente interligada com a facilidade que fluídos, conseguem adentrar e se movimentar no interior do concreto. Portanto, quanto mais permeável o concreto for, maior a probabilidade de sua degradação [1,3].

Dentre os fluídos que promovem a degradação das estruturas de concreto, a água em certa concentração, apresenta-se como a responsável pela maioria das manifestações patológicas nas construções. Sua presença, mesmo que no estado de pureza é um problema para as armaduras contidas no interior do concreto, visto que, caso o aço esteja desprotegido, sua presença causará a corrosão da armadura. Esse líquido também atua como veículo no transportar de agentes agressivos para o interior do concreto, diminuindo consequentemente sua durabilidade. Atualmente diversos estudos e métodos vem sendo desenvolvidos a fim de evitar as agressões e deteriorações geradas por esse líquido [2,3].

Dentre as diversas pesquisas elaboradas visando a diminuição do ingresso de fluídos para o interior das estruturas, encontra-se em destaque o desenvolvimento de aditivo impermeabilizantes, que atuam no bloqueio dos poros do material, impedindo passagem de fluídos para o interior do concreto.

1.2 Mecanismos de transporte atuante no concreto

1.2.1 Permeabilidade

A permeabilidade é compreendida como sendo a facilidade com que líquidos e gases se movimentam no interior do concreto. Ela representa a interligação, rugosidade e tortuosidade dos poros, que permitem, como consequência, a permeação dos fluídos [12].

Os poros capilares são os maiores responsáveis pela permeabilidade nos materiais cimentícios, pois facilitam a interconexão entre os poros, viabilizando o transporte de elementos nocivos para o interior do concreto [12].

É importante enfatizar que, nem todos os poros no interior do concreto contribuem efetivamente para a movimentação de líquidos e gases, portanto, é necessário distinguir porosidade de permeabilidade. Porosidade é compreendida como sendo o volume total de poros ocupados no material. Quando o concreto apresenta uma quantidade relevante de poros (porosidade alta) e estes estão interligados entre si, a percolação de fluídos no interior da estrutura é efetiva, portanto, a permeabilidade do material é considerada alta. Entretanto, quando os poros apresentam-se descontínuos, são ineficazes para o transporte. Desse modo, a permeabilidade do concreto é conceituada como baixa mesmo quando sua porosidade é alta. Ou seja, todo elemento permeável pode ser poroso, mas nem todo elemento poroso é permeável, pois depende da interligação entre os poros [13]. Na

Figura 1 está demonstrada a diferença entre dois concretos na questão da permeabilidade [14].

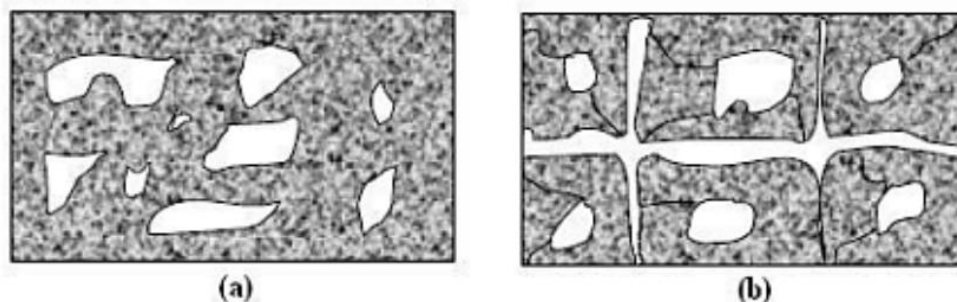


Figura 1 - Concreto (a) impermeável (b) permeável [14]

A permeabilidade é um parâmetro importante para a determinação da durabilidade das estruturas, pois é um grande indicador da capacidade de transporte de massa no interior do concreto

1.2.2 Absorção capilar

A absorção capilar está associada à força de atração dos poros da estrutura com os líquidos em contato na superfície, sendo este mecanismo um dos responsáveis por promover a entrada de água no interior do concreto. Esse fenômeno é concernente a dois fatores, a estrutura dos poros (diâmetro, tortuosidade e interligação) e as características do líquido (densidade, viscosidade e tensão superficial) [15,16].

Na figura 2 está demonstrada a atuação da absorção capilar no interior do concreto, nota-se que quanto menor for o diâmetro do poro, maior será sua força de sucção que permitirá maior ascensão de líquido em seu interior, ou seja, maior será a profundidade que o fluído alcançara no interior do concreto. Entretanto, quanto maior for o diâmetro do poro, maior será a capacidade/volume total de líquido retido em seu interior, mas menor será a profundidade alcançada no material [11,15,17].

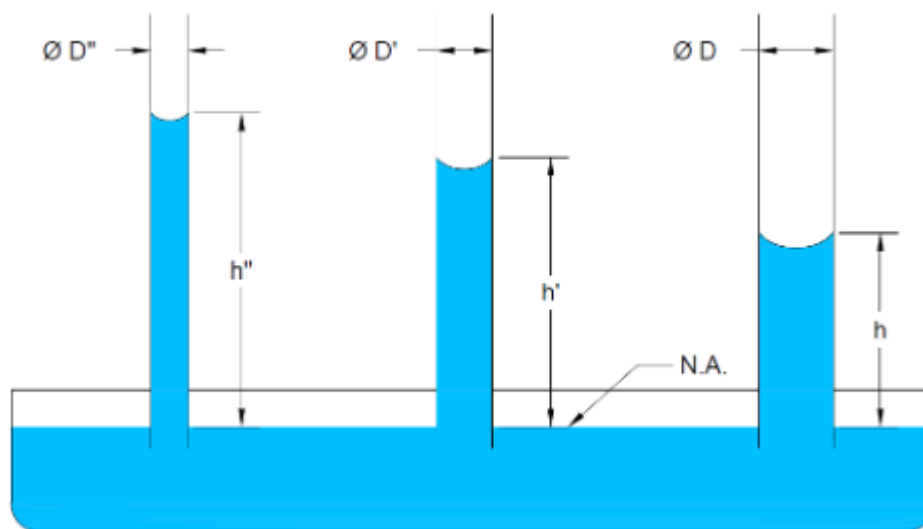


Figura 2 - Ascensão capilar de acordo com o diâmetro [17].

Contudo, concretos produzidos com baixa relação água/cimento, apesar de constituírem poros capilares com diâmetros menores, apresentam baixa intercomunicação. Resultando em menores valores de absorção e, contrariamente ao esperado, menores alturas de ascensão [17,18].

1.2.3 Difusão

A difusão é um dos fenômenos correlacionado à perda da durabilidade do concreto, carbonatação e à corrosão de armaduras. Esse mecanismo indica qual o fluxo de gases que consegue adentrar no concreto, sendo especialmente importante na análise do acesso de água na forma de vapor [19].

A difusão pode ser compreendida como sendo o deslocamento de fluídos de um local a outro, devido a um diferencial de concentração do elemento, podendo variar de acordo com um gradiente de temperatura/umidade ou de um potencial químico. Pode-se perceber, portanto, que a difusividade dos fluídos, depende, da concentração de um elemento na superfície, e se essa concentração é maior do que no interior do concreto. Pois o fluxo decorre do local de maior concentração para o de menor concentração [5].

Poros menores do que $0,1\mu\text{m}$, restringem a passagem de umidade em seu interior, ficando sujeitos ao processo de difusão gasosa [20]. Mas esta situação é menos crítica do que a capilaridade, visto que o fluxo de vapor é relativamente pequeno, caracterizando um processo mais lento, quando se comparado aos outros mecanismos de transporte no concreto, além de que poros com pequenas dimensões tendem a se fechar mais rápido devido ao processo de hidratação do cimento anidro em seu interior [21].

1.3 Fissuração do concreto

O dano mais comum apresentado no concreto é o surgimento de fissuras, seja devido as modificações internas de comportamento, da constituição do material ou em virtude dos esforços aplicados [22].

As fissuras são diferenciadas em relação ao carregamento, causada pela ação de flexão, tração ou cisalhamento, decorrendo nas regiões de tracionamento; e devido as deformações, provocadas por variações na temperatura, retração e recalques diferenciais [23].

As fissuras comprometem os edifícios na questão da durabilidade e funcionalidade, visto que se torna um caminho oportuno para o ingresso de íons agressivos para o interior das estruturas de concreto.

Quanto maiores forem os parâmetros da fissura (extensão, abertura e profundidade), maior será o impacto na estrutura. Dentre as razões apontadas, encontra-se a possibilidade de penetração da água e agentes agressivos para as camadas mais internas do concreto, juntamente com o aumento da superfície exposta [24].

Diversas pesquisas foram desenvolvidas para correlacionar a fissuração com o aumento da velocidade de degradação das estruturas. Diversos autores confirmaram em seu estudo que o tamanho das fissuras influencia significativamente no aumento da velocidade de corrosão da armadura, visto que intensifica a penetração de fluídos no concreto [25].

O objetivo do tratamento de fissuras é formar uma barreira contra o transporte nocivo de líquidos e gases para o interior das fissuras, impedindo a degradação do concreto e da armadura [1].

1.3.1 Alguns fatores que provocam fissuras no concreto

1.3.1.1 Cargas diretas

Os esforços mais comuns que promovem a fissuração do concreto são aqueles que produzem tensões de tração, como cisalhamento, torção, flexão, punção, entre outros. Essas fissuras também estão relacionadas ao dimensionamento e detalhamento incorreto das estruturas, como demonstrado na figura 3 [22].



Figura 3 - Fissuras por cisalhamento em ponte, provocadas devido a passagem de veículos com cargas excessivas, não prevista no projeto [22]

Geralmente essas fissuras não comprometem a estabilidade das estruturas, mas estão relacionadas a maior deformabilidade, comprometendo a vida útil [24].

O surgimento de fissuras acondicionadas ao carregamento, podem decorrer em qualquer momento da vida útil do material. Nas idades iniciais, seu aparecimento está associado às cargas acidentais decorrentes na execução da obra, como operação de máquinas pesadas, transporte/estocagem de materiais sobre a estrutura, dentre outras. Por outro lado, as de longo prazo estão relacionadas ao uso da estrutura ou eventos excepcionais.

1.3.1.2 Movimentações térmicas

Os elementos de uma construção estão sujeitos às alterações de temperaturas sazonais e diárias, que provocam variações dimensionais dos materiais – dilatação ou contração – que aliados às restrições existentes de movimentação, resultam em tensões que promovem o surgimento de fissuras, conforme demonstrando na figura 4. A intensidade dessas variações dimensionais, dependem das propriedades físicas do material, alteração da temperatura e o grau de restrição entre os elementos da construção [25].



Figura 4 - Fissuração devido a movimentação térmica [25]

As variações dimensionais podem decorrer tanto no estado fresco como no endurecido. No estado fresco, pode-se ocorrer das altas temperaturas devidas às reações exotérmicas no processo de hidratação do cimento e à contração diferencial pelo resfriamento. Já no estado endurecido, as movimentações térmicas estão associadas às mudanças de temperaturas do ambiente a qual a estrutura está sujeita [22].

As fissuras também podem surgir devido a diferença de movimentação térmica entre os componentes de um sistema estrutural. Essa variação de movimentação nos componentes está associada à distinção entre os coeficientes de dilatação térmica, quando sujeitos às mesmas temperaturas, como por exemplo, materiais menos solicitados podem suportar variações mais intensas do que outros materiais justapostos a eles [25].

1.3.1.3 Retração

As fissuras provenientes de retração, são advindas dos processos de movimentação dos elementos construtivos ou de seus constituintes devido a retração dos produtos à base de cimento [26]. A perda de água nas peças estruturais, promovida pelo excesso de calor de hidratação e a falta de proteção térmica, geram tensões internas que provocam a retração do

elemento, levando ao desenvolvimento de forças tracionais, que por sua vez, promovem a fissuração, como demonstrado na figura 5 [17, 27].

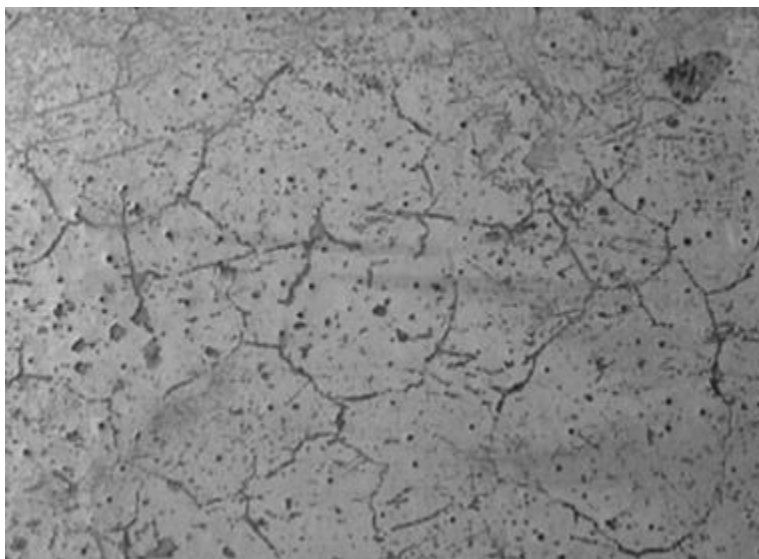


Figura 5 - Fissuras provenientes de retração hidráulica [27]

A causa principal da formação de fissuras provenientes da retração hidráulica é em função do processo incorreto de cura do concreto, aliado a perda excessiva de água de amassamento do concreto no estado fresco [1, 27].

1.3.1.4 Assentamento do concreto/ Perda de aderência

Durante o processo de concretagem, a pasta de concreto se movimenta e se acomoda naturalmente em razão do efeito da gravidade. Quando esta mobilidade se torna limitada ou impedida devido à presença de barras de aço e ao espaçamento mínimo entre elas, ocorre o processo de fissuração e perda de aderência [28].

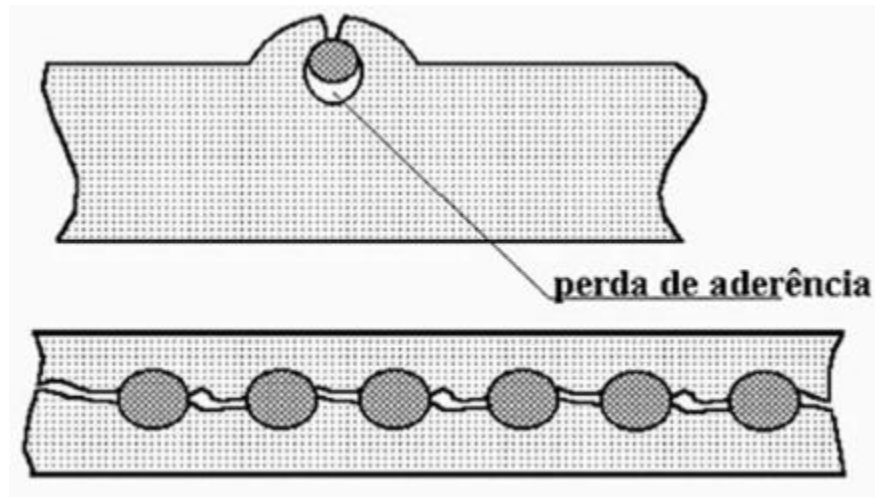


Figura 6 - Fissuras por assentamento plástico do concreto [1]

As fissuras provenientes pelo assentamento do concreto acompanham a armadura. Essas fissuras geralmente estão associadas ao efeito parede, que consiste na formação de vazios na parte inferior da barra de aço, causando perda de aderência entre a armadura e o concreto, como demonstrado na figura 6. Essa situação pode ser agravada caso haja proximidade entre as barras, pois poderá proporcionar uma conexão entre as fissuras e a perda total de aderência [1].

1.3.1.5 Fissuração por recalque

Um dos maiores responsáveis pelo surgimento de fissuras nas estruturas é o recalque diferencial. Quando os apoios de uma construção se deslocam de sua posição original, decorre o surgimento de novas tensões que não estavam previstas originalmente no projeto, levando ao surgimento de fissuras ao longo da edificação, como demonstrado na figura 7 [29,30].

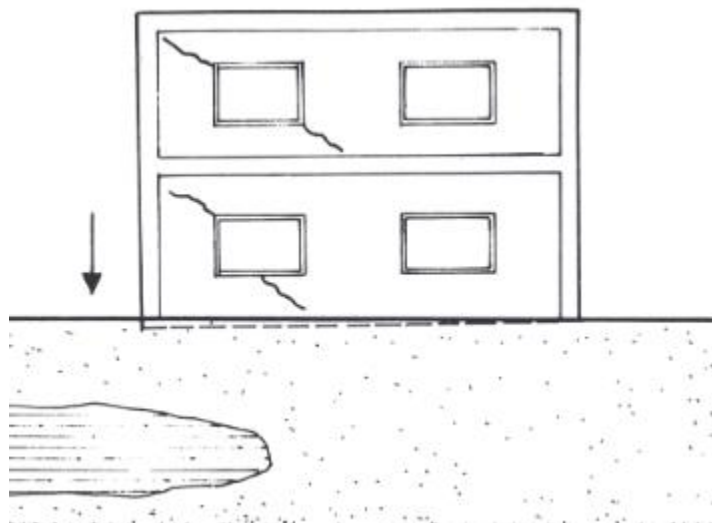


Figura 7 - Recalque diferenciado por falta de homogeneizado do solo [30]

O problema de recalque advém de diversos motivos, dentre eles: a construção de fundações em solos compressíveis, expansivos, em aterros; alteração de tensões devido à presença de construções próximas, sobrecarga ou rebaixamento do lençol freático [30].

1.4 Tipos de autocicatrização

O emprego de tecnologia autocicatrizante abrange três concepções: custo, sustentabilidade e inovação. O prolongamento da vida útil das estruturas implica diretamente na diminuição de intervenções e nos investimentos financeiros de recuperação, principalmente em edificações que se encontram expostas a meio ambientes agressivos. Bem como consolida os princípios de sustentabilidade, pois impacta na diminuição da diligência de matéria prima, que consequentemente, implica na minimização de outros fatores como consumo de energia, emissão de gases, desmatamento, dentre outros [31].

A autocicatrização pode ser um processo bastante oportuno quando associado a recuperação das propriedades físicas do concreto. Embora os custos iniciais com matérias de potencial autocicatrizante seja relativamente maior, o pequeno número de intervenções realizadas ao longo da vida útil das estruturas, diminui os custos totais investidos [31]. O fenômeno da autocicatrização vem sendo amplamente difundido como alternativa na prevenção da degradação e recuperação das estruturas de concreto [32].

A autocicatrização do concreto é denominada como a capacidade do material de reparar ou curar as próprias fissuras com autonomia, sem intervenção direta sobre o dano, através de mecanismos intrínsecos ao material ou devido à presença de elementos em sua composição apropriados para esta finalidade [33,34]. De acordo com o Comitê Técnico de RILEM 221-SHC: Self Healing Phenomena in Cement – Based Materials [35], o processo de autocicatrização pode ser categorizado em:

- Autógeno: Processo de recuperação que envolve os componentes da mistura original, ou seja, não especificamente concebidos para o processo de autocicatrização (intrínseco/ natural);
- Autônoma: Processo de recuperação advindo de material externo, ou seja, não original da mistura, que foram incorporados com intuito de promover a autocicatrização (adições de engenharia).

A cicatrização autogênica é um mecanismo natural, no qual a habilidade de autocura é proporcionada por processos que decorrem no próprio concreto, dispondo apenas dos materiais que comumente compõem o sistema, como o cimento e as substituições ou adições pozolânicas. Enquanto na cicatrização autônoma, sucede-se a incorporação de aditivos que reagem quimicamente com a matriz cimentícia ou materiais que são ativados mediante danos na peça, para proporcionar uma maior capacidade autocicatrizante, como por exemplo o uso de silicato de cálcio, agentes expansivos, aditivos químicos, bactérias, entre outros [35].

O comitê técnico JCI – TC075B: Technical Committee on Autogenous Healing in Cementitious Material [36]; possui os mesmos termos de classificação da autocicatrização no concreto do comitê RILEM 221-SHC, mas apresenta diferentes interpretações em relação ao processo. Para o RILEM, o ato de adicionar uma quantidade maior de material cimentício no concreto para aumentar o processo de auto reparação é considerada uma solução de autocicatrização autógena. Mas para JCI, a adição intencional do elemento deixa de promover o processo de autocicatrização autógena e passa a proporcionar a autocicatrização autônoma.

Na literatura, ocorre-se uma ambiguidade relacionada à identificação do processo de autocicatrização decorrente no concreto, devido a diferença demonstrada nas definições dos processos entre os comitês técnicos. Um exemplo é o aditivo cristalizante. Para alguns

autores [37,38,39], o processo de autocicatrização propiciada pelo aditivo cristalizante é o autógeno, pois consideram que esse material contribui com aumento da dissolução de íons Ca^{2+} , favorecendo o processo de cristalização e formação de CaCO_3 . Já para outros autores [40,41] o processo promovido é a autocicatrização autônoma, pois o aditivo é inserido à matriz cimentícia com a finalidade de potencializar o mecanismo de comatação natural do concreto.

Na literatura, as pesquisas que retratam a cicatrização autógena, buscam ampliar o entendimento sobre os processos existentes, tais como a hidratação residual do cimento ou a carbonatação, e de como proporcionar o fechamento de fissuras em ambientes com umidade. Já os estudos envolvendo cicatrização autônoma, empenha-se na promoção de projetos especiais ou são voltados ao uso de materiais complementares no concreto, como adições de minerais, aditivos expansivos, cianobactérias, entre outros [24].

1.4.1 Autocicatrização autógena

A cicatrização autógena é um fenômeno natural aos materiais cimentícios, de preenchimento e selagem das próprias fissuras, sem qualquer intervenção externa. Está é uma das razões pelas quais diversos edifícios e estruturas antigas continuam intactas mesmo com assistência técnica e manutenção limitadas [4].

A autocicatrização autógena decorre pela hidratação contínua dos componentes anidros, com a nucleação de carbonatos de cálcio e pela formação de cristais. Estes mecanismos são intensificados pela penetração de umidade e restrição da abertura de fissuras, [7,42].

O principal responsável pela autocicatrização autógena do concreto nas idades iniciais é a reserva de cimento não hidratado, que ao entra em contato com a água, transportada através das fissuras, reagem de forma natural formando o hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), preenchendo os espaços por onde a umidade ingressou. Já nas idades mais avançadas o mecanismo de autocicatrização autógena é interligado a formação de carbonato de cálcio, que decorre da reação entre hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) e o dióxido de carbono (CO_2), que leva a dissolução destes compostos, resultando na liberação dos íons Ca^{2+} e $(\text{CO}_3)^{2-}$, que

associados, formam o carbonato de cálcio (CaCO_3), proporcionando uma barreira sólida nas interfaces da fissuras interrompendo o fluxo de água para o interior do concreto [43,44,45].

A autocicatrização de forma natural pode decorrer por três causas como demonstrado na figura 8. Entretanto, as causas mecânicas proporcionam pouco impacto no processo de autocicatrização do concreto, sendo mais interligado ao fenômeno de inchamento ou intumescência da pasta de cimento hidratada devido a absorção de água [35].

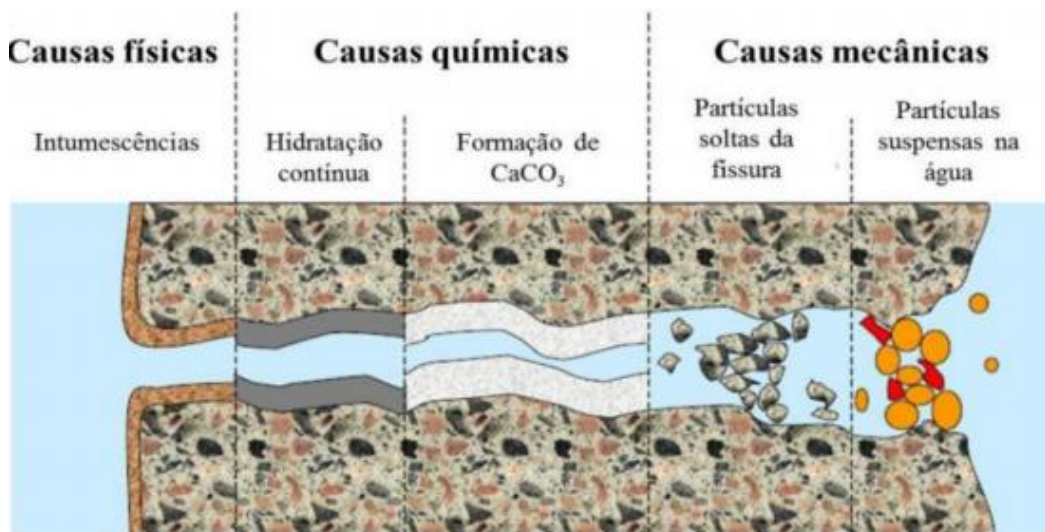


Figura 8 - Fenômenos associados ao processo de colmatação [35]

A autocicatrização autógena promove o fechamento parcial ou total das fissuras nas matrizes cimentícias; sendo associado este fenômeno, aos constituintes da própria mistura do material, junto com a presença de água, podendo-se recuperar ou não o desempenho mecânico das estruturas [38].

Apesar das diferentes definições em torno da autocicatrização autógena, que acarretam em divergências entre os pesquisadores, em relação ao principal mecanismo que viabiliza o processo de cura nos materiais cimentícios, todos concordam que para ocorrência de tal fenômeno, necessita-se da presença de água [42].

1.4.2 Autocicatrização autônoma

A autocicatrização autônoma decorre como consequência da incorporação de adições na matriz cimentícia com finalidade de selar a fissura ou acelerar o processo de cura, em um ambiente contendo umidade. O encapsulamento tem sido a técnica mais aplicada atualmente, realizando o emprego direto do agente autocicatrizante, permitindo o reparo *in situ* [4,37].

A cicatrização através de cápsulas requer a adição de agentes cristalizantes em seu interior, sendo o mecanismo liberado quando decorre-se a ruptura da cápsula na região onde sucedeu o dano, como apresentado na figura 9. Os agentes cristalizantes liberados interagem com diversos fatores internos e do ambiente, como por exemplo: umidade, calor, ar, materiais que compõem a matriz cimentícia ou outros elementos presentes na própria cápsula [38,42].

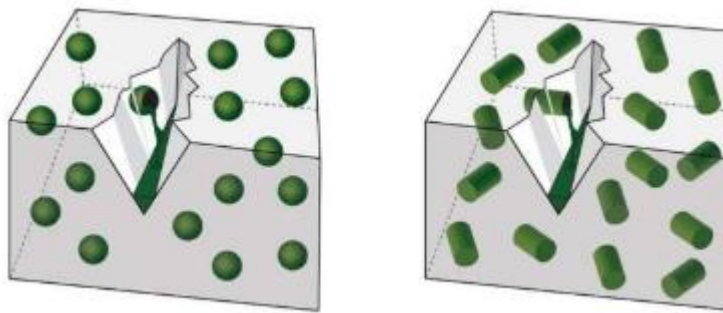


Figura 9 - Cicatrização autônoma por incorporação de cápsulas compostas por agentes cristalizantes [42]

A utilização de bactéria é outra alternativa que está se destacando, podendo ser incorporada em agregados leves, associados a agentes biológicos ou químicos, dentre outros [38].

Os métodos de cicatrização autônoma amplamente discutidos na literatura são: catalizador cristalino com agentes cicatrizantes; cicatrização microbiológica; cicatrização com polímeros superabsorventes (PSA); cicatrização com cápsulas associados a sistemas vasculares e cicatrização com materiais induzidos por estímulos físicos.

A cicatrização autônoma pode ser classificada de acordo com o seu processo de iniciação, sendo considerada ativa, quando demanda de alguma interferência para que advenha o processo de cicatrização, ou passiva, quando intercorre por meio de estímulos naturais, sem a carência de intervenção humana. Um exemplo de cicatrização ativa é a utilização de partículas que são impulsionadas por meio da temperatura, as quais necessitam de um incentivo térmico para que possam ser conduzidas e aplicadas no local onde houve a

fissuração. Já o mecanismo passivo, pode ser elucidado por meio da utilização de cápsulas ou sistemas vasculares que englobam agentes cicatrizantes, no qual mediante sua ruptura decorre a liberação do agente, que provocará a vedação das fissuras [46].

Quando se comparado os estudos da autocicatrização autônoma em relação a autocicatrização autógena, nota-se a discrepância de quantidade e avaliações recentes. Este fato está associado a pouca aplicação prática, ou ainda, pela inviabilidade econômica para implementação da autocicatrização autônoma no mercado. Os estudos tem revelado resultados bastante animadores quanto à capacidade de cicatrização de fissuras com grandes dimensões [24].

1.5 Aditivo cristalizante

A introdução do aditivo cristalizante no concreto visa diminuir e/ou impedir a entrada de água e agentes agressivos em seu interior, por meio da formação de estruturas cristalinas insolúveis, que ocupa os poros e capilaridades do material, como pode ser observado na figura 10. Nesse contexto, acaba se tornando evidente que a aplicação do aditivo nas estruturas de concreto colabora para proteção e preservação da vida útil, minimizando ou até mesmo evitando os riscos de deterioração das estruturas pelos mecanismos de transporte da água e ação de agentes agressivos [47,48].



Figura 10 - crescimento cristalino no concreto [47]

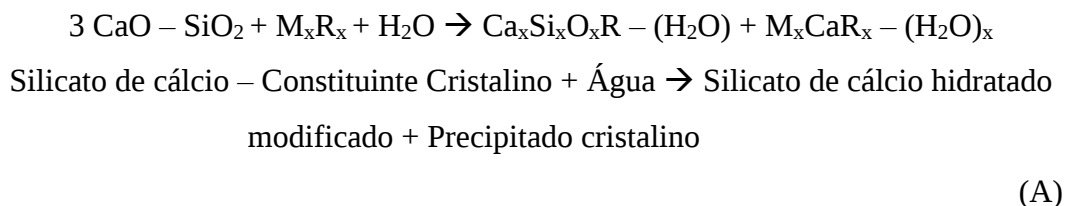
Normalmente, os sistemas convencionais utilizados para a impermeabilização das estruturas de concreto promovem uma barreira física superficial, impedindo a penetração de

fluídos no concreto. No entanto, esses sistemas apresentam grande desvantagem, uma vez que são suscetíveis a deterioração provocada pelas intempéries [47].

Os aditivos por cristalização integral vêm ganhando cada vez mais destaque no mercado, em relação aos demais sistemas convencionais, em virtude de apresentarem maior resistência aos processos de intemperismos e penetração de íons agressivos. Isso é devido a sua capacidade de proporcionar estanqueidade em nível microscópico, visto que promove a formação de cristais insolúveis no interior dos poros e capilaridades, tornando parte integrante do concreto [49].

Os aditivos cristalizantes são constituídos por diferentes combinações de elementos químicos como: cimentos, fillers, pozolanas, escórias, areias, pós silicosos e produtos químicos ativos. Grande parte dos aditivos cristalizantes comercializados no mercado da construção civil possuem composição química mantida em segredo por parte dos fabricantes [50].

O comitê do Instituto de Concreto Americano (ACI) denomina os aditivos cristalizantes pelo termo Permeability Reducer Additive for Concrete Exposed to Hydrostatic Conditions (PRAH). Segundo esse comitê, os aditivos cristalizantes são misturas hidrofílicas cristalinas que contêm componentes ativos, que ao entrarem em contato com água e com as partículas de cimentos não hidratadas do concreto, reagem formando o silicato de cálcio hidratado/ e ou precipitados cristalinos, como demonstrando na equação A, tornando parte integrante do concreto [51].



Alguns autores afirmam que a presença de umidade em certa quantidade é de extrema importância para o processo de cristalização, em virtude da natureza hidrofílica e reativa do aditivo [39].

As reações de hidratação desses aditivos cristalizantes se propagam por toda matriz porosa do concreto, proporcionando um sistema impermeável quanto a penetração de água e

agentes agressivos, devido ao fechamento dos poros e fissuras existentes do material [52]. Esse gênero de aditivo possibilita a colmatação de fissuras passivas com abertura de até 0,5mm. Esse fato sucede-se devido a abertura das fendas e a penetração de água em seu interior, iniciando-se um processo de vedação destas, devido a formação de estruturas cristalinas, como evidenciado na figura 12 [49].

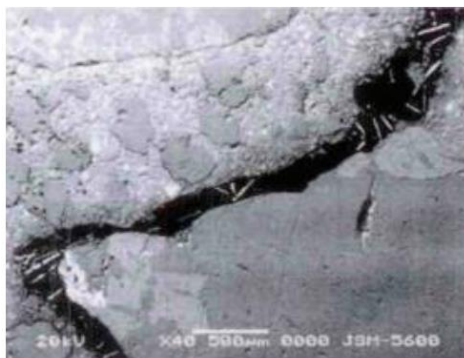


Figura 12 - Cristais ao longo da fissura.

O contato prologando com a umidade é essencial para que se obtenha melhores taxas de autocicatrização das fissuras, podendo ocorrer a vedação completa mesmo daquelas que apresentam grandes espessuras [53]. O processo de autocicatrização dos aditivos cristalizantes só é ativado quando a matriz porosa do concreto encontra-se em contato com a umidade. Caso não suceda esta interação, os componentes cristalinos permanecem “dormentes”, ou seja, inativos, sendo reativados quando o contato intercorre novamente [50].

O sistema de impermeabilização por cristalização é atóxico, pois não gera produtos poluentes que possam resultar na contaminação do solo e a água, além de proporcionar com que toda estrutura cristalina produzida seja capaz de suportar pressões hidrostáticas tanto positivas como negativas de até 0,7 MPa [7].

Apesar da formação cristalina impedir a penetração de água no concreto, não contribui de forma efetiva na redução da passagem de vapor d'água, consentindo assim, que o concreto “respire”. Essa circunstância impede o desenvolvimento de pressões internas na estrutura, melhorando sua durabilidade [49].

Essa espécie de aditivo é recomendada para locais de difícil acesso para manutenção e que apresentam umidade excessiva constante como: reservatórios, fundações, estruturas

enterradas, lugares que dificultam o processo de manutenções futuras caso decorra necessidade de execução [51].

Portanto, pode-se concluir que o aditivo cristalizante é um material que vale a pena investir, pois proporciona estanqueidade ao concreto, permitindo a obtenção de estruturas mais duráveis, visto que o principal fator associado à degradação das estruturas é em razão da facilidade com os fluídos percolam no interior do concreto.

1.6 Referências Bibliográficas

- [1] V. C. M. Souza, T. Ripper, “Patologia, recuperação e reforço de estruturas de concreto”, In: Pini, 1 ed, São Paulo (1998).
- [2] P. K. Mehta, P. J. M. Monteiro, “Concreto.: microestrutura, propriedade e material”, In: IBRACON, 2 ed., São Paulo (2008).
- [3] A. M. Neville, “Propriedades do concreto”, In: Bookman, 5 ed., Porto Alegre (2016).
- [4] M. M. Moreira, “Efeito do aditivo redutor de permeabilidade em concretos com diferentes tipos de cimento Portland – Contribuição aos processos de autocicatrização”, Diss. Mestrado, Univ. Brasília, Brasília (2016).
- [5] V. G. Cappellesso, N. S. Petry, D. C. C. Molin, A. B. Masuero, Journ. of Build. Path. and Rehab., 24, **244** (2016) 47.
- [6] P. Azarsa, R. Gupta, A. Biparva, “Crystalline Waterproofing Admixtures Effects on Self-healing and Permeability of Concrete”, In: 1st Internat. Conf. New Horiz. Green Civil Eng., Canadá (2018).
- [7] E. M. Takagi, W. J. Almeida, F. S. Oliveira, In: Congresso Brasileiro do Concreto, Ibracon, **46** (2007).
- [8] E. M. Takagi, “Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de altoforno ativados por catalisador cristalino”, Diss. Mestrado, Instit. Tecn. de Aeron., São José dos Campos (2013) 130.
- [9] M. H. F. Medeiros, J. J. Andrade, P. Helene, Conc.: Ciênc. e Tecn. **16** (2011) 773.
- [10] Ass. Bras. Normas Técn. NBR 6118, “Projeto de estruturas de concreto — Procedimento”. Rio de Janeiro (2014).

- [11] N. M. N. Sato, “Análise da porosidade e de propriedades de transporte de massa em concretos”, In: Epusc/PCC, São Paulo (1998).
- [12] O. Cascudo, H. Carasek, Rev. Ibracon de Estr. Mat., **7**, **4** (2011) 849.
- [13] F. R. Costa, Rev. Cient. Sem. Aca. Fortaleza, **000139** (2018).
- [14] M. Ismail, “Etude des transferts et de leurs interactions avec la cicatrisation dans les fissures pour Prolonger la duree de servisse dès Infrastructures (ponts, centrales nucleaires)”, Institut. Nact. Scienc. Appliq. (2006) 234.
- [15] J. W. Raisdorfer, “Influência da adição ou substituição de adições minerais ao cimento Portland: efeitos na carbonatação, absorção capilar e resistividade de concretos”, Diss. Pós-Grad., Univers. Fed. Paraná, Curitiba (2015).
- [16] M. F. Salomão, “Estudo da umidade ascendente em painéis de alvenaria de blocos cerâmicos”, Diss. Mestr., Univers. Fed. Uberlândia, Uberlândia, **092** (2012).
- [17] P. R. L. Helene, “Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado”, Tese Dout., Univers. São Paulo, São Paulo (1993).
- [18] L. Basheer, J. Kropp, D. J. Cleland, Constr. and Build. Mater., **15** (2001), 93.
- [19] L. C. P. Silva Filho, “Durabilidade do concreto à ação de sulfatos: análise do efeito de permeação de água e da adição de microssílica”, Diss. Mestrado, Univers. Fed. Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.
- [20] B Meng, Mat. and Struc., **27** (1994) 125.
- [21] H. Loosveldt, Z. Lafhaj, F. Skoczylas, Cem. and Conc. Resear., **32** (2002) 1357.
- [22] A. C. Filho, T. G. Carmona, “Fissuração nas estruturas de concreto”, Bol. Téc. ALCONPAT Inter., México (2013).
- [23] D. J. E. Cunha, “Análise de fissuração em vigas de concreto armado”, Cen. Univers. Lut. de Palma, Tocantins (2011).
- [24] F. H. Bianchin, “Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades”, Univ. Fed. do Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2019).
- [25] K. E. Philipose, J. J. Beaudoin, R. F. Feldman, “Degradation of normal Portland and slag cement concrete under load due to reinforcement corrosion”, In: 4th CANMET Intern. Conf., Stanbul (1992).

- [25] N. M. T. Braga, “Patologias nas construções: trincas e fissuras em edifícios”, Univers. Fed. Minas Gerais, Belo Horizonte (2010).
- [26] E. F. Magalhães, “Fissuras em alvenarias: Configurações típicas e levantamento de incidências no estado do Rio Grande do Sul”, Diss. Mestrado, Univers. Fed. Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2004).
- [27] E. A. Milagres, “Retração e secagem do concreto: estudo da retração do concreto e o aparecimento de patologias”, Const., Univers. Fed. Minas Gerais, Belo Horizonte (2019).
- [28] D. S. Trindade, “Patologia em estrutura de concreto armado”, Univers. Fed. Santa Maria, Rio Grande do Sul, 2015.
- [29] T. Lança, “Trincas nas edificações: Uma revisão prática baseada no processo causa x efeito”, Univers. Fed. Minas Gerais, Belo Horizonte (2014).
- [30] E. Thomaz, Rev. e Ampl., 2 (2007).
- [31] F. A. S. ARAUJO, “Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização”, Diss. Mestrado, Univers. Fed. Amazonas (2020).
- [32] L. M. S. Bernardino da Silva, “Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto”, Tese Dr., Univers. Fed. Rio Grande do Sul, Porto Alegre (2016).
- [33] I. C. A. Esteves, “Efeito da autocicatrização autógena na durabilidade de concretos convencionais fissurados”, Diss. Mestrado, Univers. Fed. Paraná, Curitiba (2019).
- [34] N. Muhammad, A. Keyvanfar, M. Majid, A. J. Mirza, Constr. and Build. Mat., **101** (2015) 80.
- [35] M. De Rooij, K. Van Tittelboom, N. De Belie, E. Schlangen, Spring. Science & Business Media, **11** (2013).
- [36] Igarashi; Kunieda; Nishiwak, “Commit. Rep.: JCI-TC075B – Techn. Commit. Autog. Heal. in Cement. Mater.”, Japan Conc. Inst. (2009).
- [37] N. De Belie, E. Gruyaert, A. All-Tabaa, P. Antonaci, C. Baera, D. Bajare, A. Darqueni, R. Davieis, L. Ferrara, T. Jefferson, C. Litina, B. Miljevic, A. Otlewska, J. Ranogajec, M. Roig-Flores, K. Paine, P. Lukowski, P. Serna, J. Tulliani, S. Vucetic, J. Wang, H. M. Jonkers, Adv. Mat. Interfaces, **5**, 17 (2018) 1.

- [38] A. S. Oliveira, “Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias”, Tese Dr., Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.
- [39] K. Sisomphon, O. Copuroglu, E. A. B. Koenders, *Cem. Conc. Comp.*, **34** (2012) 566.
- [40] C. F. Hollman, “Avaliação da influência de aditivos cristalizantes na resistência à penetração de íons cloreto em concretos fissurados”. Diss. Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.
- [41] E. M. Takagi, *Rev. Ibracon de Estr. Mat.*, **94** (2019).
- [42] K. V. Tittelboom, N. Belie, *Materials*, **6** (2013) 2182.
- [43] T. N. Heide, E. Schlangen, K. Van Breugel, In: *Proceedings Knud Højgaard conference on Advanced Cement-Based Materials*, Technical University of Denmark. 2005.
- [44] C. Edvardsen, *Materials Journal* **96**, 4 (1999) 448.
- [45] A. R. Suleiman, M. L. Nehd. *Cement and Concrete Research*, **111** (2018).
- [46] E. Schlangen, H. Jonkers, S. Qian, A. Garcia, *Proceedings of FraMCoS*, **7** (2010).
- [47] B. Pereira, R. Nascimento, “Os efeitos de diferentes aditivos cristalizantes nas propriedades do concreto no estado fresco e endurecido”, *Facul. de Tecn. e Ciências Sociais Aplic.* (2018).
- [48] C. S. Sombrio, “Efeitos do aditivo cristalizante na rede capilar de concretos usinados”. Universidade federal de Santa Catarina (2019).
- [49] P. C. Bilesky, C. N. Ourives, C. M. Yokoyama, *Rev. Conc. & Const.*, **55** (2009).
- [50] J. Pazderka, E. Hajková, *Journal of Advanced Eng.*, **56**, 4 (2016).
- [51] ACI 212.3R-10. “American Concrete Institute - Report on Chemical Admixtures”, Farmington Hills, American Concrete Institute, **15** (2010).
- [52] R. B. Ferreira, “Influência das adições minerais nas características do concreto de cobrimento e seu efeito na corrosão de Armaduras Induzidas por Cloretos”. Diss. Mestrado, Univ. Fed. de Goiás, Goiânia (2003).
- [53] M. Roig-flores, S. Moscato, P. Serna, L. Ferrara, *Constr. and Build. Mat.*, **86** (2015) 1.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL

Compreender o desempenho físico e mecânico de concretos produzidos com aditivo cristalizante no estado fresco e endurecido.

2.2 ESPECÍFICO

- Analisar a influência da utilização do aditivo cristalizante na propriedade física do concreto;
- Avaliar o comportamento mecânico de concretos com adição de aditivo cristalizante;
- Comparar a influência de diferentes concentrações do aditivo cristalizante no desempenho do concreto;

3 CAPÍTULO I

(Normas de acordo com a revista Cerâmica)

AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE CONCRETOS COM ADITIVO CRISTALIZANTE *(Evaluation of concretes produced with crystallizing additives)*

RESUMO

O processo de degradação das estruturas de concreto vem se tornando cada vez mais precoce e frequente. Esse fato está associado à penetração de substâncias agressivas para o interior das estruturas. Nesse contexto, o aditivo cristalizante atualmente vem sendo empregado na redução da porosidade das estruturas, visto que, esse aditivo desenvolve compostos cristalinos insolúveis no interior dos poros e fissuras do concreto. O objetivo deste trabalho é compreender o desempenho físico e mecânico de concretos produzidos com aditivo cristalizante no estado fresco e endurecido. Para tanto, foi realizado ensaios de compressão, tração, capilaridade, porosidade e índice de vazios. Os resultados desses ensaios apontaram vantagens na utilização do aditivo cristalizante para a obtenção de um concreto mais durável, dado que houve diminuição de 70,75% na absorção de água, 17% dos índices de vazios, além de proporcionar aumento de 40,83% na resistência mecânica.

Palavras-chaves: permeabilidade, durabilidade, poros, fissuras.

ABSTRACT

The process of degradation of concrete structures is becoming increasingly precocious and frequent. This fact is associated with the penetration of aggressive substances into the structures. In this context, the crystallizing additive is currently being used to reduce the porosity of structures, since this additive develops insoluble crystalline compounds inside the pores and cracks of concrete. The objective of this work is to understand the physical and mechanical performance of concretes produced with crystallizing additive in the fresh and hardened state. For this purpose, compression, traction, capillary, porosity and void ratio tests were carried out. The results of these tests showed advantages in the use of the crystallizing additive to obtain a more durable concrete, given that there was a decrease of 70.75% in water absorption, 17% of void rates, in addition to providing an increase of 40.83% in mechanical strength.

Keywords: permeability, durability, pores, cracks.

INTRODUÇÃO

Desde a década de 70 vêm sendo constatado um significativo aumento na degradação precoce das estruturas de concreto. Esse fato proporcionou o desenvolvimento de diversos estudos relacionados à durabilidade dessas estruturas, visando a redução de custos com manutenção e reparos [1].

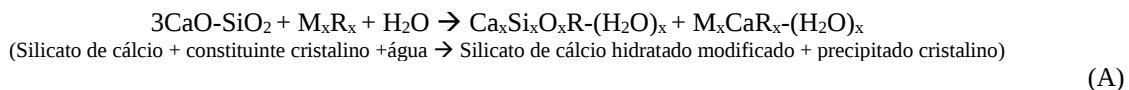
A deterioração das estruturas de concreto está principalmente associada a conectividade dos poros existentes em sua microestrutura, uma vez que estes permitem a penetração e percolação de íons agressivos no interior do concreto, acarretando como consequência a degradação das estruturas [2, 3].

A cada ano, novos conhecimentos relacionados ao aumento da durabilidade de estruturas de concreto vêm surgindo, devido aos intensos estudos sobre os mecanismos de transporte de fluidos agressivos. Essas pesquisas demonstram os enormes benefícios acarretados com o aumento da vida útil das estruturas, dentre eles a maior preservação dos recursos naturais, economia de custos e diminuição dos impactos ambientais [4].

A impermeabilização é uma das formas encontradas para proteção e prolongamento da vida útil das estruturas de concreto. A impermeabilização proporciona estanqueidade às partes de uma construção, ou seja, impede a penetração e movimentação de fluidos na estrutura [5]. Vários estudos foram desenvolvidos a fim de elaborar aditivos impermeabilizantes que proporcionassem maior estanqueidade e consequentemente melhor durabilidade às construções, combatendo assim, a degradação e surgimento de manifestações patológicas [6].

O aditivo cristalizante vem sendo amplamente utilizados na impermeabilização de estruturas [7]; fato justificado pela sua atuação decorre nos interstícios do concreto, mais precisamente na microestrutura do material, promovendo a formação de estruturas cristalinas no interior dos poros, bloqueando a passagem de fluidos [8, 9].

O aditivo cristalizante é classificado como um material hidrofílico, ou seja, reage de forma efetiva na presença de água, sendo esse elemento o catalizador principal para ativação das reações de formação dos cristais insolúveis [10]. A Eq. A apresenta a reação de cristalização decorrente no concreto. Observa-se que as misturas cristalinas são compostas por ingredientes ativos que reagem com a água e as partículas de cimento, formando o silicato de cálcio hidratado e precipitações cristalinas, que bloqueiam os poros e capilaridades do concreto [7].



Os cristais insolúveis formados na reação tornam-se parte integrante da pasta de cimento hidratada, resultando em um aumento da resistência à penetração de fluidos e de densidade no concreto, proporcionando melhor desempenho mecânico [7, 11].

De acordo com a literatura disponível, o aditivo cristalizante também é chamado de cicatrizante, devido ao fato de potencializar a comatação de fissuras presente no concreto, com dimensões de até 0,5mm. Apesar do concreto possuir capacidade inerente de cura, denominada cura autógena, essa habilidade é limitada às fissuras de pequenas dimensões, compreendidas entre $200 \pm 300\mu\text{m}$ [11, 12]. Portanto, conforme a dimensão da fissura, o concreto em si não consegue vedá-la completamente, justificando o uso de aditivos que potencializem esse processo.

Diversos estudos vêm sendo desenvolvidos para compreensão do comportamento do aditivo, sendo no entanto, necessário avaliá-lo mais profundamente, constatando a relevância de sua aplicação na busca de estruturas mais impermeáveis. Visto que sua utilização pode contribuir na durabilidade das construções, implicando diretamente na redução do impacto no meio ambiente, questão bastante pautada atualmente.

Neste artigo, tem-se como objetivo avaliar a eficácia do uso do aditivo cristalizante nas propriedades físicas e mecânicas do concreto.

MATERIAIS E MÉTODOS

Materiais

Os materiais empregados na pesquisa foram escolhidos conforme disponibilidade na região de Rio Verde – Goiás. O cimento utilizado foi o CP II - F32, cimento Portland composto com material carbonático, cuja classe de resistência é 32 MPa. A caracterização do material foi realizada a partir da determinação da massa específica conforme ABNT NBR 16605:2017 [13], obtendo-se o valor de $3,03 \text{ g/cm}^3$.

Os agregados aplicados na pesquisa foram caracterizados por meio dos ensaios orientados pelas normas técnicas brasileiras (NBR). O agregado miúdo foi avaliado a partir da massa específica pela ABNT NBR NM 52:2009 [14] e massa unitária pela ABNT NBR NM 45:2006 [15].

Para o agregado graúdo, a caracterização abrangeu a determinação da massa específica pela ABNT NBR NM 45:2006 [15] e massa unitária pela ABNT NBR NM 53:2009 [16]. Os dados de ambos agregados estão apresentados na tabela I, observou-se que esses valores obtidos são semelhantes aos informados na literatura.

Tabela I – Caracterização do agregado graúdo e agregado miúdo
[Table I - Characterization of coarse aggregate and fine aggregate]

Agregado miúdo	Massa específica (g/cm ³) ¹	Massa unitária (g/cm ³) ^{2,3}	Dimensão (mm)
Brita 0	2,75	1,56	4,8 – 9,5
Areia grossa	2,5	1,49	0,6 – 2,0

De acordo com ficha técnica do aditivo cristalizante empregado [17], sua composição consiste de cimento Portland, composto químicos ativos e rastreador químico, sendo melhor detalhado nas tabelas II e III. A composição dos diversos aditivos cristalizantes presentes no mercado brasileiro são divergentes, quando comparados entre si, não sendo possível a obtenção de um padrão de componentes.

Segundo o fabricante do aditivo Penetron Admix, o teor do material empregado ao concreto deve ser de 0,8% em relação a massa do cimento. Mediante esse dado, nesta pesquisa foram aplicadas variações de $\pm 0,1\%$ em torno da porcentagem informada pelo fabricante, a fim de analisar a influência das concentrações do aditivo no concreto em relação a performance de permeabilidade e recuperação de fissuras.

Tabela II – Composição química do aditivo Penetron Admix®
[Table II - Chemical composition of the additive Penetron Admix®]

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 (CaMg(OH)₂O)	58398-71-3	1,5 a 6
Hidróxido de cálcio	1305-62-0	1 a 2

Penetron Admix, 2020

Tabela III - Composição química e física do aditivo Penetron Admix®
[Table III - Chemical and physical composition of the additive Penetron Admix®]

Aspecto (Físico, forma e cor)	Sólido em pó, cinza
Odor e limite de odor	Característico do cimento
Ph	10-13 (10% em solução)
Ponto de fusão	> 1000°C

Penetron Admix, 2020

Determinação do traço

Por meio dos dados obtidos na caracterização dos materiais, foi definida uma dosagem experimental pelo método da Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP). Para essa dosagem racional, foram realizadas avaliações experimentais através dos ensaios de Slump- Test e Compressão de corpos cilíndricos, orientados respectivamente pela ABNT NBR NM 67:1998 [19] e ABNT NBR 5739:2018 [20], para verificar se as proporções apresentadas dos materiais constituiriam um concreto de acordo com as propriedades determinadas [21].

Com o traço definido, realizou-se o incremento do aditivo cristalizante em três concentrações diferentes, conforme a tabela IV. O estudo baseou-se em duas premissas: a primeira na comparação de um concreto convencional de referência (S) com concretos contendo três variações de concentração do aditivo cristalizante, sendo elas 0,7% (C-1); 0,8% (C-2) e 0,9% (C-3); a segunda é a comparação entre as concentrações variadas do aditivo em relação a atuação nas propriedades físicas do concreto.

Tabela IV – Traços unitário dos concretos expresso em kg/kg de cimento
[Table IV - Unit traces of concrete expressed in kg / kg of cement]

Traço	Cimento	Areia	Brita	Água	Aditivo cristalizante
-------	---------	-------	-------	------	-----------------------

S	1	1,54	1,54	0,45	-
C-1	1	1,54	1,54	0,45	0,007
C-2	1	1,54	1,54	0,45	0,008
C-3	1	1,54	1,54	0,45	0,009

Ensaio no estado fresco

Para avaliação da trabalhabilidade do concreto fresco, foi realizado o ensaio de Slump Test orientado pela ABNT NBR 16889:2020 [22], para cada traço executado. Esse ensaio possibilitou analisar a facilidade com que o concreto fresco pode ser manuseado, sem perda considerável da homogeneidade, direcionando assim, sua aplicação em obra [23, 24].

Moldagem e cura dos corpos de prova

Os corpos de prova cilíndricos (cp's) foram moldados em concordância com a ABNT NBR 5738:2015 [25], apresentando as seguintes dimensões: 100 x 200 mm, sendo adensadas em 2 camadas com 12 golpes cada. Para esta pesquisa, foram confeccionados 30 cp's para cada traço, totalizando 120 unidades.

Os corpos de prova elaborados foram acondicionados em seus moldes durante as primeiras 24 horas, sendo armazenados na câmara úmida e protegidos de intempéries para não haver possíveis interferências em sua avaliação. Posteriormente, foi procedido o desmoldo e imersão em água nos tanques de cura.

Aos 7 dias da moldagem, alguns corpos de prova de cada traço foram retirados do processo de cura úmida, sendo submetidos a aplicação de 80% da carga de ruptura, obtida pelo ensaio de compressão de corpos cilíndricos orientado pela ABNT NBR 5739:2018 [20], promovendo assim, a microfissuração do concreto. Esse método foi implantado, visando a obtenção de uma boa avaliação do fenômeno da aut cicatrização. Subsequente ao processo, os corpos de prova retornaram para os tanques de cura onde permaneceram até os 28 dias de idade.

A partir desse procedimento, os concretos foram sub-divididos em grupos para melhor compressão dos dados da pesquisa, como demonstrado na figura 1.

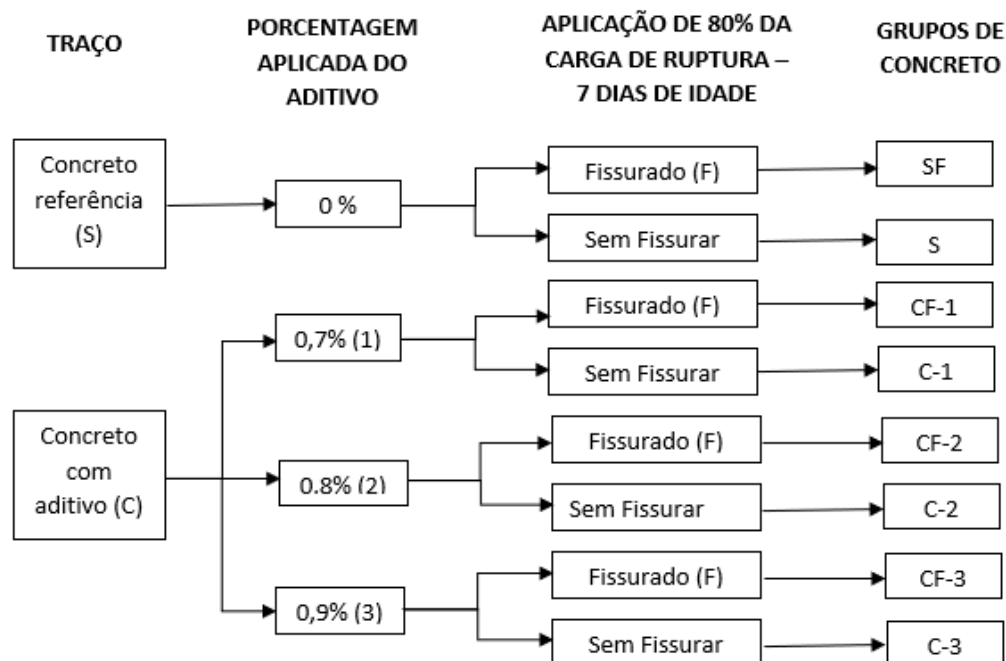


Figura 1 – Programa experimental aplicado
[Figure 1 - Experimental program applied]

Ensaio no estado endurecido

Os corpos de prova ficaram imersos em água por um período de 28 dias, quando iniciou-se os ensaios para avaliação da característica física do concreto no estado endurecido, nas quais abrangeram a resistência à compressão orientado pela ABNT NBR 5739:2018 [20], absorção de água por capilaridade pela ABNT NBR 9779:2012 [26], absorção de água por imersão, índice de vazios pela ABNT NBR 9778:2005 [27] e resistência à tração por compressão diametral pela ABNT NBR 7222:2010 [28].

Na figura 2, encontram-se orientados todos os ensaios e as idades em que foram realizados.

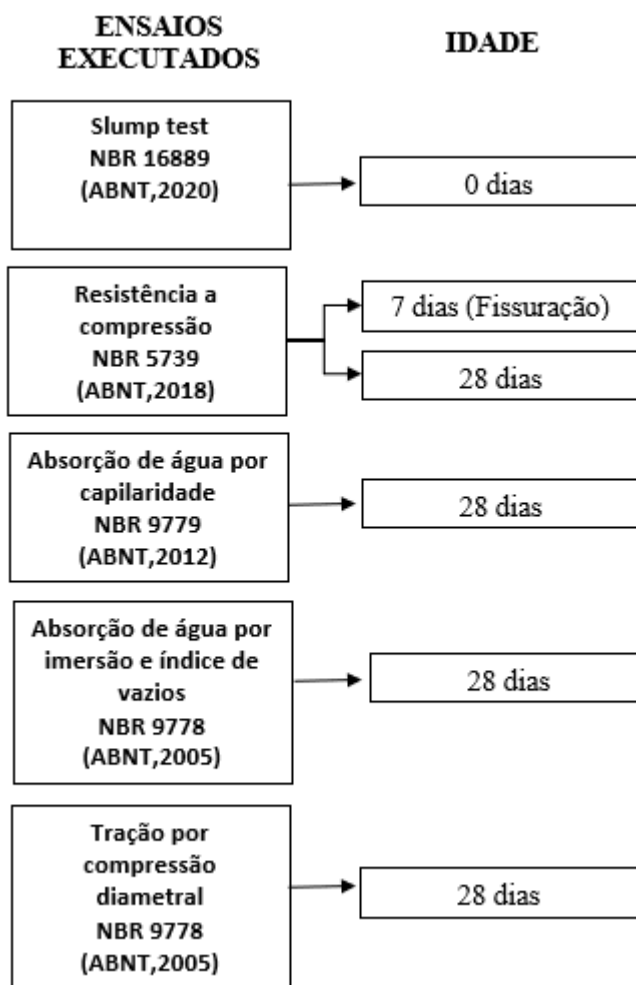


Figura 2 – Ensaio realizados e tempos de cura
[Figure 2 - Tests performed and curing times]

RESULTADOS

Ensaio no estado fresco

A tabela V apresenta os resultados do ensaio de abatimento de tronco de cone dos concretos C-1, C-2 e C-3. Durante a determinação do traço, a faixa estabelecida para o abatimento foi de 120 ± 10 mm. Nota-se que o concreto C-1 e C-2 apresentaram valores fora do intervalo determinado, destacando-se o aumento notável do C-2. Segundo o fabricante, o aditivo não promove mudanças no comportamento do concreto em seu estado fresco, para adições de 0,8%. Perante esse dado, os fatores que influenciaram para esse acontecimento são externos, alheios ao controle, como por exemplo a temperatura do ambiente, teor de ar, umidade, dentre outros.

Tabela V – Resultado do ensaio de consistência pelo abatimento de tronco de cone
[Table V - Result of the consistency test by cutting the cone trunk]

Concreto	Abatimento (mm)
S	120
C-1	140
C-2	170
C-3	120

Ensaio no estado endurecido

Na figura 3 está apresentado os resultados referentes a absorção por capilaridade orientado pela ABNT NBR 9779:2012 [26]. Nota-se que o aditivo obteve desempenho insignificante nos corpos de prova sem fissuração produzidos com 0,8% (C-2) e 0,9% (C-3), enquanto nos confeccionados com 0,7% (C-1) a performance foi satisfatória. A diminuição na absorção de água foi de 67,0%, 5,0% e 4,0% para os corpos de prova C-1, C-2 e C-3, respectivamente. A discrepância na redução da absorção, pode estar associada ao melhor desenvolvimento das estruturas cristalinas no interior dos poros de um concreto em relação ao outro, devido a percolação de água ter alcançado maiores profundidades, permitindo uma ativação eficaz dos cristais insolúveis.

Diversas pesquisas na mesma linha, obtiveram variações em relação a diminuição da absorção capilar. García-Vera, Tenza-Abril, Saval e Lanzón em sua pesquisa constatou que o coeficiente de absorção dos corpos de prova não fissurados com a mistura cristalina foi ligeiramente inferior ao de referência [29]; enquanto Elsalamawy, Mohamed e Abosen obteve-se um índice de diminuição bastante significativo, abrangendo uma faixa de 35-50% de redução na absorção [9].

Para os corpos de prova pré-fissurados confeccionados com aditivo, houve significativa redução na absorção de água por capilaridade. A diminuição da absorção nas amostras CF-1, CF-2 e CF-3 comparadas com a referência, delimitaram-se na faixa de 68,87%, 61,32% e 70,75%, respectivamente. A abertura de microfissuras no concreto está associada a essa significativa redução, pois facilitou a penetração de água nos interstícios do material, possibilitando a hidratação dos compostos cimentícios ainda não hidratados e a ativação dos cristais insolúveis, promovendo o processo de colmatação das fissuras e bloqueio dos poros capilares [30].

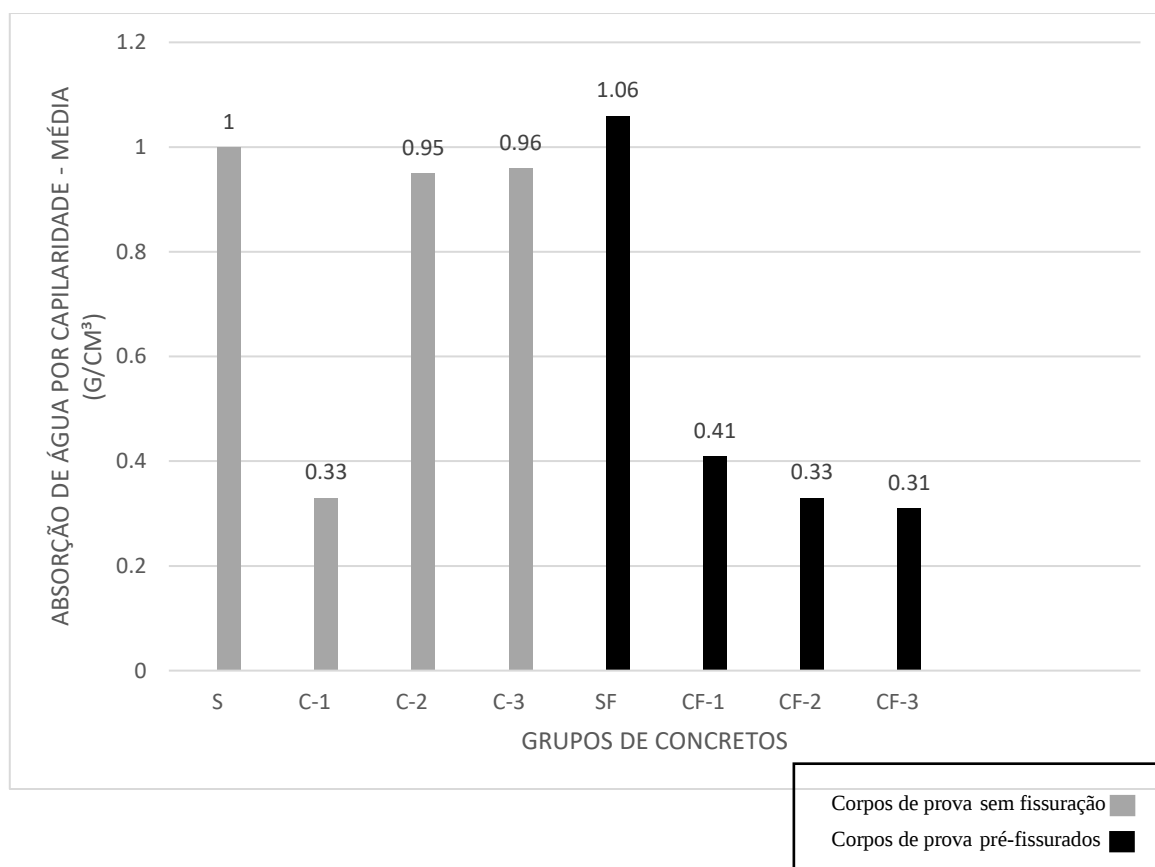


Figura 3 – Resultado do ensaio de absorção por capilaridade com 28 dias
[Figure 3 - Result of the capillary absorption test with 28 days]

Na figura 4 é nítida a diminuição dos índices de vazios nos corpos de prova fissurados e não fissurados, que foram elaborados com aditivo. Dentre os corpos de prova sem fissuração, o melhor desempenho foi relacionado ao concreto

elaborado com 0,9% do aditivo, no qual obteve-se o maior índice de diminuição em relação à referência, sendo de 13,38%. Já para os corpos de prova fissurados, a maior redução do índice de vazios foi de 16,97%, resultado apresentado pelos corpos de prova confeccionados com 0,7% do aditivo.

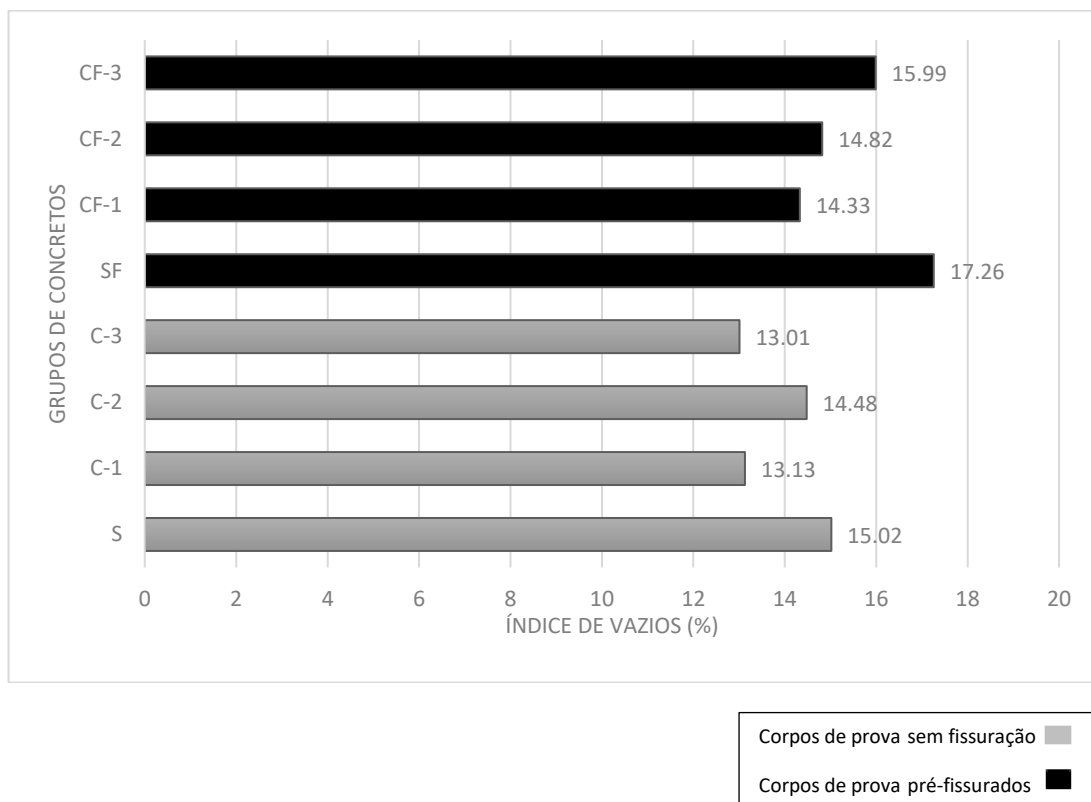


Figura 4 – Índice de vazios dos corpos de prova com 28 dias
[Figure 5 - Index of voids in the specimens at 28 days]

Na figura 5 está representado os valores de absorção por imersão dos corpos de prova. Ao realizar-se um comparativo, nota-se que os corpos de prova com aditivo apresentaram redução na absorção de água quando confrontados com a referência. Para os corpos sem fissuração, a faixa de redução estabeleceu-se de 6-22,5%. Já para os corpos de prova fissurados a faixa ficou acordada de 4–21%.

Esses intervalos não foram tão significativos perante o de outras pesquisas. Al-Rashed e Jabari observaram redução de 60-75% na absorção de água por imersão, segundo estes autores, essa redução se deve aos mecanismos de formação e crescimento de cristais nos poros e fissuras devido a umidade, resultando na diminuição da penetração de água no concreto [31].

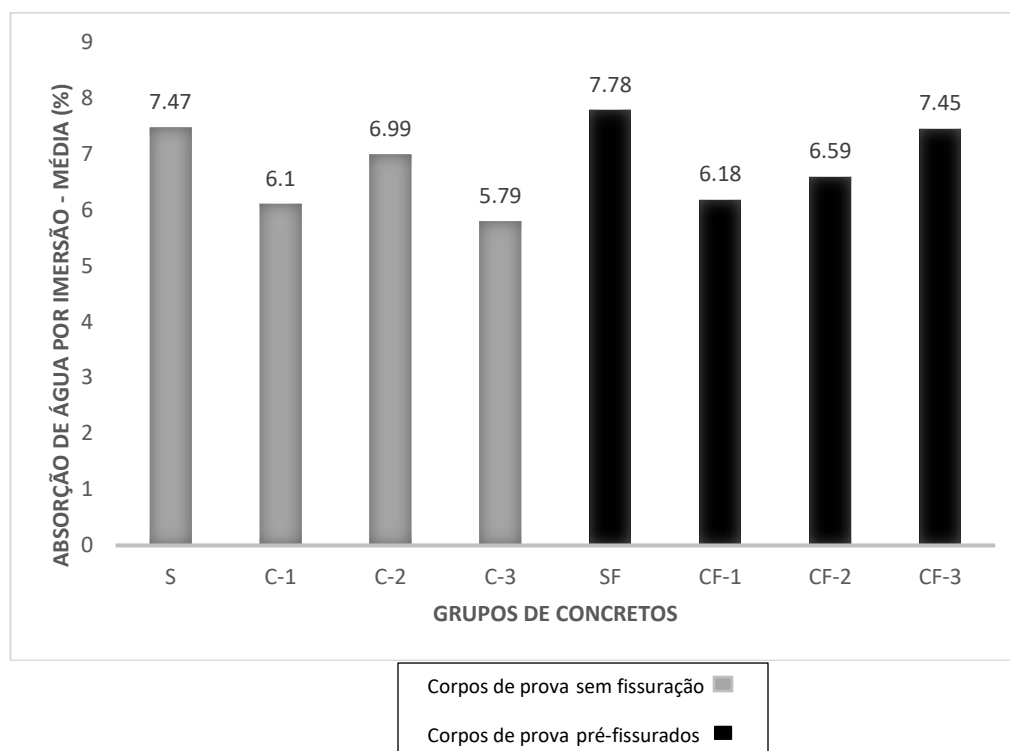


Figura 5 – Resultados do ensaio de absorção por imersão com 28 dias
 [Figure 8 - Results of the 28-day immersion absorption test]

Na tabela VI está apresentado os dados referentes ao ensaio de compressão dos corpos de prova cilíndricos com 28 dias. Observa-se que houve um aumento na resistência dos corpos de prova com a presença do aditivo cristalizante em sua composição, quando comparadas aos que não continham o material. Esse fato também foi observado por Vilela, Filho e Neto; que obtiveram um acréscimo médio de resistência de 21,20% nos corpos de prova com o aditivo cristalizante aos 28 dias de idade [32]. Já para Azarpa, Gupta e Biparva, o índice médio de aumento da resistência à compressão nos concretos produzidos com o aditivo foi de 9,5% [33].

Nesta pesquisa, os corpos de prova sem fissuração, com 0,7%, 0,8% e 0,9% do aditivo, apresentaram um aumento na resistência de 23,06%, 17,99% e 40,83%, respectivamente, quando comparados ao de referência.

O aumento na resistência para os corpos de prova fissurados CF-1, CF-2 e CF-3 foram respectivamente, 19,11%, 16,79% e 22,83%. O aumento da resistência à compressão pode ser associado ao efeito de preenchimento dos poros e fissuras do concreto proporcionado pelo aditivo, como também pela ativação da hidratação do cimento, diminuindo o índice de vazios no material e melhorando como consequência a microestrutura da pasta de cimento [11, 33, 34].

Tabela VI – Compressão axial dos corpos de prova com 28 dias
 [Table VI - Axial compression of specimens at 28 days]

Grupos de concretos	Compressão axial (MPa)	Aumento/ diminuição da resistência em relação S (%)
S	23,29	-
C-1	28,66	+23,06
C-2	27,48	+17,99
C-3	32,80	+40,83
SF	22,34	-
CF-1	26,61	+19,11
CF-2	26,09	+16,79
CF-3	27,44	+22,83

O ensaio de tração por compressão diametral foi realizado em todos os concretos estudados com 28 dias de idade. Na tabela VII está apresentado os resultados do ensaio. Constatou-se, após avaliação das duas tabelas que a incorporação do

aditivo cristalizante pode melhorar efetivamente a resistência à tração do concreto, visto que houve aumento nos corpos de provas com a incorporação do aditivo em sua composição, sendo 0,7% a quantidade que proporcionou maior eficácia neste ensaio.

Escoffres, Desmetre e Charron obtiveram também em suas pesquisas aumento da resistência a tração nos corpos de prova contendo aditivo cristalizante, a justificativa está relacionada a densificação da matriz cimentícia, visto que os cristais insolúveis formados se tornam parte integrante da pasta de cimento [29, 35, 36].

Tabela VII – Tração por compressão diametral dos corpos de prova com 28 dias
[Table VII - Traction by diametrical compression of specimens at 28 days]

Grupos de concretos	Tração por compressão diametral (MPa)	Aumento/ diminuição da resistência em relação S (%)
S	3,03	-
C-1	3,26	+07,59
C-2	3,04	+0,33
C-3	3,10	+02,31
SF	2,68	-
CF-1	3,32	+23,88
CF-2	2,76	+02,99
CF-3	2,89	+7,84

Observa-se que nos ensaios de resistência mecânica, os corpos de prova confeccionados com 0,8% do aditivo, porcentagem correta de acordo com as orientações do fabricante, alcançaram menores resistências em comparação aos demais concretos com outras variações do aditivo, notando-se maior diminuição no ensaio de tração por compressão diametral. Essa redução também foi notada por Al-Kheetan, Rahman e Chamberlain, no qual associaram esta circunstância ao aumento excessivo da trabalhabilidade do traço, resultando numa incorporação superior de ar na pasta de cimento, formando dimensões maiores nos poros do concreto que os demais confeccionados com outras proporções do aditivo, impactando na resistência [37].

Outra justificativa está vinculada ao volume de cristais insolúveis ativados ser inferior ao das outras porcentagens do aditivo, proporcionando menor densificação da matriz cimentícia, a qual está proporcionalmente interligada a resistência do concreto.

Os resultados obtidos nesta pesquisa, reafirmam o que a literatura informa sobre o aditivo cristalizante, que este influencia diretamente na porosidade e permeabilidade do concreto, visto que forma cristais insolúveis no interior dos poros e capilaridades, atuando na redução do transporte de fluidos no interior das estruturas de concreto, combatendo a degradação precoce e aumentando sua vida útil.

CONCLUSÃO

As variações dos teores implementados do aditivo cristalizante demostram resultados satisfatórios no concreto, visto que promoveram melhorias nas características físicas do material. Seu emprego proporcionou aumento da resistência mecânica, dando destaque aos produzidos com 0,9% de concentração do aditivo, proporcionando aumento demasiado de 40,83% da resistência a compressão nos corpos de prova sem fissuração, enquanto na resistência à tração o aumento foi estabelecido na faixa de 20%, atribuindo esta notoriedade aos corpos pré-fissurados produzidos com 0,7% do aditivo. Além de proporcionar diminuição do índice de vazios, absorção de água por imersão e capilaridade, obtendo-se as maiores reduções na faixa de 17%, 23% e 71% respectivamente, assegurando assim a produção de concretos com melhor estanqueidade e, consequentemente, maior durabilidade. As diversas concentrações do aditivo não conservarão uma linha tênue de atuação, seus desempenhos variavam entre os ensaios, impossibilitando a determinação de uma concentração mais aconselhável que otimize as propriedades do material. Contudo, o aditivo cristalizante proporciona ao concreto maior durabilidade, pois diminui a permeabilidade do material, principal fator associado à degradação das estruturas, em razão de facilitar a percolação de fluidos no interior do concreto.

REFERÊNCIAS

- [1] A.R.B. Vasconcelos, J.L. Akasaki, Ambient. Constr. **10** (2010) 77.
- [2] R. Kumar, B. Bhattacharjee, Cement and Concrete Research **33** (2003) 155.
- [3] P.K. Mehta, P.J.M. Monteiro, Concreto: microestrutura, propriedades e materiais, 2ª ed., IBRACON, S. Paulo (2008).

- [4] M.H.F. Medeiros, J.J. Andrade, P. Helene, In: Isaia, Geraldo Cechella, *Concreto: Ciência e Tecnologia*, São Paulo (2011).
- [5] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 9575, “Impermeabilização — Seleção e projeto”, Rio de Janeiro (2003).
- [6] N. Muhammad, A. Keyvanfar, M. Majid, A.J. Mirza, *Constr. Build. Mater.* **101** (2015) 80.
- [7] ACI 212.3R-10. “American Concrete Institute - Report on Chemical Admixtures” (2010).
- [8] L. Ferrara, V. Krelani, C. Maddalena, *Constr. Build. Mater.* **68** (2014) 535.
- [9] M. Elsalamawy, A.R. Mohamed, A.E. Abosen, *Constr. Build. Mater.* **230** (2020).
- [10] K. Sisomphon, O. Copuroglu, E.A.B. Koenders, *Cem. Conc. Comp.* **34** (2012) 566.
- [11] M. Roig-Flores, S. Moscato, P. Serna, L. Ferrara, L. *Constr. Build. Mater.* **86** (2015).
- [12] C.-M. Aldea, W.-J. Song, J.S. Popovics, S.P. Shah, *Jorn. Mater. Civ. Eng.* **12** (2000) 92.
- [13] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 16605, “Cimento Portland e outros materiais em pó — Determinação da massa específica”, Rio de Janeiro (2017).
- [14] Ass. Bras. Normas Técn., NBR NM 52, “Agregado miúdo - Determinação da massa específica e massa específica aparente”, Rio de Janeiro (2009).
- [15] Ass. Bras. Normas Técn., NBR NM 45, “Agregados - Determinação da massa unitária e do volume de vazios”, Rio de Janeiro (2006).
- [16] Ass. Bras. Normas Técn., NBR NM 53, “Agregado graúdo – Determinação de massa específica, massa específica aparente e absorção de água”, Rio de Janeiro (2006).
- [17] Penetron, Ficha técnica, Penetron Admix. Lorena, São Paulo (2018).
- [18] Penetron, FISQ – Ficha de informação de segurança de produtos químicos, Penetron Admix. Lorena, São Paulo (2020).
- [19] Ass. Bras. Normas Técn., NBR NM 67, “Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”, Rio de Janeiro (1998).
- [20] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 5739, “Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro (2018).
- [21] P.P.F. Rodrigues, “Parâmetros de dosagem do concreto”, In: Associação Brasileira de Cimento Portland, 2 ed., São Paulo, Brasil (1995).
- [22] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 16889, “Concreto - Determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone”, Rio de Janeiro (2020).
- [23] ASTM C 125-93, “Standard Terminology Relating to Concrete and Concrete Aggregates”, American Society for Testing Materials, Philadelphia (1993) 59.
- [24] P.R.L. Helene, P. Terzian, *Manual de dosagem e controle do concreto*, São Paulo (1993).
- [25] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 5738, “Concreto — Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova”, Rio de Janeiro (2015).
- [26] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 9779, “Argamassa e concreto endurecidos — Determinação da absorção de água por capilaridade”, Rio de Janeiro (2012).
- [27] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 9778, “Argamassa e concreto endurecidos - Determinação da absorção de água, índice de vazios e massa específica”, Rio de Janeiro (2005).
- [28] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 7222, “Concreto e argamassa — Determinação da resistência à tração por compressão diametral de corpos de prova cilíndricos”, Rio de Janeiro (2010).
- [29] V.E. García-Vera, A.J. Tenza-Abril, J.M. Saval, M. Lanzón, *Materials* **12** (2019) 82.
- [30] G.L. Vieira, D.C.C. Molin, *Ambient. constr.* **11** (2011) 25.
- [31] R. Al-Rashed, M. Jabari, *Case Stud. Constr. Mater.* **13** (2020).
- [32] H. T. P. Vilela, M.G. Teixeira Filho, T.F. Campos Neto, *Revista ALCONPAT* **11** (2021) 1.
- [33] P. Azarpa, R. Gupta, A. Biparva, *Cem. Conc. Comp.* **99** (2019) 17.
- [34] L. Ferrara, V. Krelani, F. Moretti, *Smart Mater. Struc* **25** (2016) 8.
- [35] P. Escoffres; C. Desmetre, J.-P. Charron, *Const. Build. Mater.* **173** (2018) 763.
- [36] T.-L. Weng, A. Cheng, *Monatshefte Für Chemie - Chemical Monthly* **145** (2013) 195.
- [37] M.J. Al-Kheetan, M.M. Rahman, D.A. Chamberlain, *Structural Concrete* (2018).
- [38] B. Park, Y.C. Choi, *Int. J. Concr. Struct. Mater.* **13** (2019) 36.
- [39] Y. Yang, M.D. Lepech, E.-H. Yang, V.C. Li., *Cem. Conc. Resear.* **39** (2005) 382.
- [40] Ass. Bras. Normas Técn., NBR 7211, “Agregados para concreto — Especificações”, Rio de Janeiro (1983).
- [41] M. Sahmaran, S.B. Keskin, G. Ozerkan, I.O. Yaman, *Cem. Conc. Comp.* **30**, 10 (2008) 872.