

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**  
**Escola de Engenharia**  
**Departamento de Engenharia de Materiais e Construção**

Ítalo Gustavo Martins Ribeiro Dutra

**PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM RESERVATÓRIOS  
ENTERRADOS PARA DETENÇÃO DE CHEIAS EM SISTEMAS DE  
MACRODRENAGEM: AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO  
RESERVATÓRIO VILARINHO 2 EM BELO HORIZONTE**

Belo Horizonte  
2023

Ítalo Gustavo Martins Ribeiro Dutra

**PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM RESERVATÓRIOS  
ENTERRADOS PARA DETENÇÃO DE CHEIAS EM SISTEMAS DE  
MACRODRENAGEM: AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO  
RESERVATÓRIO VILARINHO 2 EM BELO HORIZONTE**

**Versão Final**

Monografia de especialização apresentada à Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Especialista em Gestão e Tecnologia na Construção Civil.

Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães

Belo Horizonte  
2023

D978p

Dutra, Ítalo Gustavo Martins Ribeiro.

Proteção de estruturas de concreto armado em reservatórios enterrados para detenção de cheias em sistemas de macrodrenagem [recurso eletrônico] : avaliação de tecnologias aplicáveis ao reservatório Vilarinho 2 em Belo Horizonte / Ítalo Gustavo Martins Ribeiro Dutra. - 2023.

1 recurso online (35 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Aldo Giuntini de Magalhães.

Monografia apresentada ao Curso de Especialização em Construção Civil da Escola de Engenharia UFMG.

Anexos: f. 30-35.

Bibliografia: f. 28-29.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Construção civil. 2. Concreto armado. 3. Drenagem. 4. Centros Urbanos. 5. Reservatórios. 6. Impermeabilização. I. Magalhães, Aldo Giuntini de. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU:  
691



## ATA DE DEFESA DE MONOGRAFIA

ALUNO: ÍTALO GUSTAVO MARTINS RIBEIRO DUTRA

MATRÍCULA: 2020685170

### RESULTADO

Aos 27 dias do mês de junho de 2023 realizou-se a defesa da MONOGRAFIA de autoria do aluno acima mencionado sob o título:

"PROTEÇÃO DE ESTRUTURAS DE CONCRETO ARMADO EM RESERVATÓRIOS ENTERRADOS PARA DETENÇÃO DE CHEIAS EM SISTEMAS DE MACRODRENAGEM: AVALIAÇÃO DE TECNOLOGIAS APLICÁVEIS AO RESERVATÓRIO VILARINHO 2 EM BELO HORIZONTE"

Após análise, concluiu-se pela alternativa assinalada abaixo:

APROVADO

APROVADO COM CORREÇÕES

REPROVADO

NOTA: 83

CONCEITO: B

### BANCA EXAMINADORA:

Nome

Assinatura

Prof. Dr. Aldo Giuntini de Magalhães

Nome

Assinatura

Prof. Dr. Danielle Meireles de Oliveira

O candidato faz jus ao grau de "ESPECIALISTA EM CONSTRUÇÃO CIVIL: "GESTÃO E TECNOLOGIA NA CONSTRUÇÃO CIVIL"

Belo Horizonte, 27 de junho de 2023

Coordenador do Curso

Prof. Antonio Neves  
de Carvalho Júnior

Coordenador do Curso

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, a todos que direta ou indiretamente fizeram parte de mais essa conquista, o meu muito obrigado.

Agradeço à Arcelor Mittal, patrocinadora do curso, por apoiar e incentivar o desenvolvimento intelectual de engenheiros que trabalham para a sociedade.

Agradeço à SUDECAP pela parceria e pelo apoio na qualificação de seu corpo técnico.

Ao meu professor orientador Aldo Giuntini de Magalhães, por ter sido inspiração nas excelentes aulas sobre sistemas construtivos e pelo apoio na elaboração deste trabalho.

"O sucesso nasce do querer, da determinação e persistência em se chegar a um objetivo. Mesmo não atingindo o alvo, quem busca e vence obstáculos, no mínimo fará coisas admiráveis." (José de Alencar)

## RESUMO

*Com as novas soluções de engenharia para tratar a drenagem nos grandes centros urbanos, faz-se necessária a preocupação com o desempenho e a durabilidade dessas estruturas. Ao mesmo passo, o mercado vem se atualizando quanto à oferta e disponibilidade de materiais e tecnologias para tal. Nesse contexto, um benefício de grande utilidade é a redução da permeabilidade do concreto. Assim, este trabalho tem como objetivo avaliar estudos existentes que se propuseram a apresentar resultados de experimentos com a utilização de microsíllica ou impermeabilizantes por cristalização incorporados ao concreto e como tratamento superficial que tenham viabilidade para aplicação na estrutura do reservatório subterrâneo de detenção de cheias Vilarinho 2. Os resultados obtidos nos estudos avaliados, em sua maioria, apontam para a redução da permeabilidade do concreto quanto ao uso de impermeabilizantes por cristalização, entretanto, alguns autores não confirmam esta afirmação. A microsíllica em comparação aos aditivos impermeabilizantes por cristalização indicam resultados superiores quanto à redução na permeabilidade, além de apresentarem também melhorias na resistência à compressão. Esta resistência à compressão para o caso de experimentos com uso de impermeabilizantes por cristalização apresentou sensível redução com o aumento do teor de material incorporado. Outro ponto que foi bastante citado pelos autores é com relação ao fator água/cimento adotado no traço do concreto, uma relação menor ou igual a 0,45 poderia até mesmo apresentar redução na permeabilidade mais eficiente que os aditivos impermeabilizantes por cristalização. Por fim verificou-se uma discrepância nos resultados obtidos, o que sugere a continuidade dos estudos, inclusive com a inclusão de novas referências que permitam uma maior riqueza de dados para um tratamento estatístico que aponte os resultados mais frequentes e que podem ser considerados na conclusão do tema.*

**Palavras-chave:** Impermeabilização; Permeabilidade do concreto; Aditivo cristalizante; Microsíllica.

## ABSTRACT

*With the new engineering solutions of drainage in large urban centers, it is necessary to be concerned with the performance and durability of these structures. At the same time, the market has been updating in terms of supply and availability of materials and technologies for this purpose. In this context, a very useful benefit is the reduction of concrete permeability. Thus, this work aims to evaluate existing studies that proposed to present results of experiments with the use of microsilica or waterproofing agents by crystallization incorporated into concrete and as a surface treatment that are feasible for application in the structure of the underground reservoir for flood detention Vilarinho 2. The results obtained in the evaluated studies, for the most part, point to the reduction of the permeability of the concrete regarding the use of waterproofing agents by crystallization, however, some authors do not confirm this statement. Microsilica compared to waterproofing additives by crystallization indicate superior results regarding the reduction in permeability, in addition to also showing improvements in compressive strength. This compressive strength for the case of experiments using waterproofing agents by crystallization showed a significant reduction with the increase in the amount of incorporated material. Another point that was often cited by the authors is in relation to the water/cement factor adopted in the concrete mix, a ratio less than or equal to 0.45 could even present a more efficient reduction in permeability than waterproofing additives by crystallization. Finally, there was a discrepancy in the results obtained, which suggests the continuity of the studies, including the inclusion of new references that allow a greater wealth of data for a statistical treatment that points out the most frequent results and that can be considered in the conclusion. of the theme*

**Keywords:** Waterproofing; Concrete permeability; Crystalline admixture; Microsilica.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Planta do Reservatório Vilarinho 2 .....	21
Figura 2 – Seção do Reservatório Vilarinho 2 .....	22

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental (CAA) .....	17
Quadro 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto .....	17
Quadro 3 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos .....	17
Quadro 4 – Resultados vantajosos para o uso dos impermeabilizantes por cristalização.....	23
Quadro 5 – Resultados negativos ou fora do esperado para o uso dos impermeabilizantes .....	24
Quadro 6 – Resultados quanto a resistência à compressão quando do uso dos impermeabilizantes .....	24
Quadro 7 – Resultados quanto a resistência à compressão quando do uso dos impermeabilizantes .....	24
Quadro 8 – Resultados quanto à variação na relação a/c.....	25
Quadro 9 – Matriz comparativa entre os diferentes materiais utilizados na impermeabilização do concreto .....	31

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>10</b>
<b>2. OBJETIVOS .....</b>	<b>12</b>
2.1 Objetivo Geral .....	12
2.2 Objetivos Específicos .....	12
<b>3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA .....</b>	<b>13</b>
<b>4. METODOLOGIA E RESULTADOS .....</b>	<b>20</b>
4.1 Metodologia.....	20
4.2. Obtenção de dados .....	23
4.3. Resultados obtidos e análise dos dados .....	23
<b>5. CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>26</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>28</b>
<b>ANEXO A .....</b>	<b>30</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Cada vez mais a engenharia se desenvolve e propõe soluções de drenagem por meio de estruturas que muitas vezes extrapolam o convencional para se adequar às realidades dos centros urbanos, ao passo que o mercado também vem se atualizando quanto à oferta e disponibilidade de recursos para melhorias no desempenho e durabilidade dessas estruturas.

Este trabalho foi desenvolvido de forma a avaliar tecnologias de proteção e aumento na durabilidade de estruturas de concreto armado, tendo como objetivo identificar a mais vantajosa para aplicação em reservatórios de detenção de cheias enterrados, especificamente o Reservatório Vilarinho 2, a ser implantado no município de Belo Horizonte.

Em geral, estruturas de concreto armado destinadas à reservação em eventos chuvosos estão sujeitas a agentes agressivos presentes nas águas provenientes de escoamentos, podendo conter lançamentos irregulares de esgoto residencial e industrial, bem como o carreamento de resíduos lançados indevidamente nas áreas de fundo de vale. Sabe-se que é possível proteger estas estruturas para aumento da vida útil e reduzir a frequência de manutenções corretivas. Ocorre que para isto deve-se buscar soluções adequadas, mas também que sejam viáveis economicamente.

A água está presente na maioria dos casos de deterioração do concreto. Impedir a entrada de fluídos no concreto é essencial para garantir a durabilidade do mesmo. É possível reduzir a porosidade diminuindo a relação água/cimento do traço, utilizando pozolanas ou produtos impermeabilizantes na mistura, ou aplicados na superfície do concreto.

Esses produtos impermeabilizantes como aditivos no concreto se constituem uma opção para melhoria na durabilidade de concretos, reduzindo significativamente a permeabilidade do mesmo, entretanto, além de ser necessário avaliar sua eficiência, aplicabilidade e vida útil, requerem que sejam adicionados em todo o volume de concreto e, portanto, grande volume de material, podendo ser oneroso ao empreendimento.

Por outro lado, os produtos impermeabilizantes que podem ser aplicados sobre a superfície destas estruturas, por meio de pintura, podem conferir proteção, entretanto, é necessário avaliar sua eficiência, aplicabilidade e vida útil. É necessário

avaliar como esses materiais se comportam quando sujeitos também à presença de resíduos e à ação dos efluentes.

Desta forma, resta como objetivo do presente trabalho a avaliação das propriedades dos materiais e/ou tecnologias disponíveis no mercado, sejam eles por meio de pintura ou aditivos, para revelar dentre os aplicáveis, aquele que melhor se adequa à estrutura do Reservatório Vilarinho 2.

Para isso, foi necessária a avaliação dos projetos das estruturas que compõem o reservatório a ser protegido de forma a elencar as propriedades que se busca e estabelecer os critérios que deverão ser atendidos pelos materiais e/ou tecnologias. Foi necessária também pesquisa dos materiais e tecnologias disponíveis no mercado, junto a busca bibliográfica específica, para viabilização de um comparativo e indicação do material e/ou tecnologia com maior viabilidade de aplicação à estrutura em estudo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo Geral**

Avaliar as propriedades dos materiais e/ou tecnologias disponíveis no mercado e revelar dentre os aplicáveis, aquele que melhor se adequa a estruturas enterradas destinadas ao armazenamento temporário ou condução de águas provenientes da rede de drenagem urbana, tal como é o caso do Reservatório Vilarinho 2

### **2.2. Objetivos específicos**

- Avaliar as estruturas que se deseja proteger e as propriedades que se deseja conferir à mesma;
- Estabelecer critérios que deverão ser atendidos pelos materiais e/ou tecnologias;
- Conhecer os materiais e tecnologias disponíveis no mercado e traçar um comparativo tendo como base a estrutura que será aplicada;
- Indicar o material e/ou tecnologia com maior viabilidade de aplicação à estrutura em estudo.

### 3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Primeiramente é necessário entender que estruturas tais como reservatórios de retenção de cheias enterrados apresentam características muito semelhantes quanto à execução e exposição a agentes agressivos de estruturas hidráulicas convencionais, tais como galerias, bueiros e outras. Em geral são projetadas e executadas em concreto armado atendendo às prescrições normativas e às boas práticas da engenharia no sentido de buscar além de capacidade estrutural, uma maior durabilidade frente aos agentes agressivos ambientais.

Para Neville (2016), a permeabilidade, ou seja, a facilidade com a qual os fluidos, sejam líquidos ou gases, podem penetrar e se movimentar no interior da estrutura por determinada pressão determinam a durabilidade do concreto.

Quanto aos processos de deterioração do concreto, Aguiar e Batista (2009) apontam que ocorrem por causas físicas e/ou químicas, sendo os processos físicos classificados em desgastes superficiais (abrasão e cavitação) e fissurações. Os processos químicos ocorrem como reação de sais presentes na água com o concreto hidratado. Sobre isso, ainda é importante destacar que é comum que os processos erosivos se somem na ação sobre a estrutura. Ainda, há os processos biogênicos, que francamente são verificados de forma significativa nas estruturas expostas a esgotos.

Aguiar (2012) quando analisa as galerias pluviais urbanas, aponta que o nível do desgaste nas faces internas das estruturas, particularmente o piso e base das paredes, depende da qualidade do material empregado na construção e do tempo de exposição.

É importante notar que a durabilidade do concreto tem relação direta com a minimização dos efeitos tanto dos processos físicos como dos processos químicos.

Sobre as ações deletérias ao concreto Guignone *et al.* (2015, p.1) cita que:

Dentre os principais mecanismos de deterioração das estruturas de concreto os íons cloreto respondem por uma parcela significativa da perda de desempenho dessas estruturas. Isso se deve, em parte, à possibilidade de transporte desses íons para o interior da estrutura, atingindo a armadura, causando corrosão. Na tentativa de minimizar a entrada desses agentes agressivos ao concreto, uma medida preventiva que pode ser aplicada é a inserção de aditivos impermeabilizantes na massa de concreto, que tem o

intuito de diminuir a quantidade de poros no concreto e, conseqüentemente, minimizar a entrada dos íons cloreto.

Cappellesso *et al.* (2016, p.2145) desenvolveu um estudo experimental apresentando um comparativo bem semelhante ao que se pretende no presente estudo onde resumidamente expôs que:

O intuito desta pesquisa é estudar a influência do uso de produto impermeabilizante por cristalização, tanto como tratamento superficial quanto como adição, na absorção de água em concretos. O desempenho destes será comparado com concretos com e sem adição de sílica ativa. Os ensaios desenvolvidos para avaliar o desempenho deste material foram: absorção total - NBR 9778 (ABNT, 2009), penetração de água sob pressão (30kPa), e complementarmente aos ensaios de permeabilidade foi realizado o ensaio de resistência à compressão – NBR 5739 (ABNT, 2007). Os resultados mostram que a adição de sílica ativa é mais eficiente que o impermeabilizante por cristalização estudado, pois contribuiu com a resistência à compressão e reduziu a absorção e a penetração de água.

Segundo Pazderka e Hájková (2016) em sua avaliação experimental de concretos adicionados com os produtos impermeabilizantes por cristalização mais utilizados atualmente, Xypex e Penetron, foi possível observar que o ganho com o uso do produto é bastante significativo com 12 dias de aplicação do concreto, concluindo que sua eficiência já é garantida aos 28 dias, tempo padrão para endurecimento do concreto.

Sobre os aditivos impermeabilizantes por cristalização Pazderka e Hájková (2016) citam que o efeito de impermeabilização no concreto é alcançado após processo químico de diversos componentes quando combinados à matriz do concreto na presença de umidade, sem a qual os componentes permanecem inativos. Araújo e Ribas (2022) chegam a descrevê-los como uma alternativa para prevenção e tratamento de fissuras.

Quanto à ação desses aditivos, Polesello e Maus (2020) esclarecem que após adicionados no concreto, reagem com a água formando cristais dentro dos poros, que impedem a penetração da água sem que a passagem de vapor seja bloqueada, com isso, não ocorre a formação de vapor dentro do concreto. Nesse sentido, Nasim *et al.* (2020) frisam que a autocura de fissuras no concreto por meio da cristalização é uma

forma para melhorar a durabilidade do concreto bastante significativa, uma vez que com a recuperação das fissuras, experimentalmente se identificou melhorias significativas da ordem de 36,6% na resistência à compressão nas amostras tratadas com aditivos em relação às amostras controle, após um período de recuperação de 42 dias, contados a partir da aplicação de fissuras nas amostras, ocorrida 3 dias após a moldagem das mesmas.

Dentro da matriz do concreto, os componentes do aditivo reagem quando em contato com a água e com o hidróxido de cálcio  $\text{Ca(OH)}_2$  (produto do processo de hidratação do cimento) gerando cristais não solúveis na estrutura capilar, que na prática atuam no sentido de minimizar a penetração de água e outros líquidos.

Oliveira (2018) analisou o desempenho dos sistemas de impermeabilização por cristalização do concreto frente a penetração de íons cloreto, observando o aumento da resistência a esta penetração e a redução da absorção de água por capilaridade, entretanto, as melhorias mais significativas se deram pela redução da relação a/c, estabelecidas em função das classes de agressividade ambiental adotadas, II e III, padronizadas pela norma técnica NBR 6118 (ABNT, 2014).

Reddy e Reddy (2020) avaliaram as alterações na durabilidade do concreto quando adicionados de aditivos líquido ou em pó, variando também sua dosagem, em comparação com amostra controle. Todas as amostras foram submetidas a imersão em solução com cloreto de sódio (5%) por 90 dias, após a cura, para proceder-se com os ensaios de compressão, onde foram verificadas evidências de que a perda de resistência ocorre em todas as amostras, porém com valores discretamente mais elevados na amostra em que não houve adição de impermeabilizante.

Guignone *et al.* (2015) avaliou a influência do uso de aditivos impermeabilizantes por cristalização do concreto e distintas relações água/cimento frente ao avanço de íons cloreto nas estruturas de concreto, os resultados mostraram que o uso do aditivo impermeabilizante por cristalização resultou em valores inferiores de penetração de cloretos, configurando-se maior resistência a ação desses agentes agressivos.

A carbonatação e mecanismos de corrosão induzida por cloreto em estruturas de concreto armado foram avaliadas por Neverkovic e Korjakins (2014), frente à utilização dos três seguintes aditivos: Xypex C-1000, Penetron e Elkem Microsílica (sílica ativa). Quanto à carbonatação, para o corpo de prova com Penetron verificou-

se uma menor profundidade de alcance do processo, entretanto, o Elkem Microsílica apresentou maior proteção contra os ataques por cloreto, extremamente danosos às armaduras do concreto, sendo mais indicado para uso em ambientes agressivos.

A norma técnica NBR 13956-1 (ABNT, 2012) conceitua a sílica ativa como uma pozolana de alta reatividade, adequada para uso em concretos, onde melhora os aspectos reológicos no estado fresco e, no estado endurecido, trabalha na redução da porosidade e permeabilidade, aumento da resistência a sulfatos e à difusão de íons cloreto, além de atuar dentre outros aspectos, no aumento da resistência à compressão e à flexão.

Polesello e Maus (2020) estudaram o uso de um tipo de aditivo de cristalizante, em três diferentes percentuais de dosagem (0,5%, 0,8% e 1,0% em relação à massa de cimento), na produção de concretos caracterizados por três relações água/cimento, definidas em 0,40, 0,50 e 0,60, submetidos a dois processos de cura, úmida e submersa. Os resultados apontaram que a redução do valor da relação água/cimento apresentou melhorias expressivas na permeabilidade do concreto, entretanto, ao contrário do que era esperado, observou-se o aumento da absorção de água por capilaridade com o aumento do teor de aditivo cristalizante.

A norma técnica NBR 12655 (ABNT, 2022), assim como a NBR 6118 (ABNT, 2014), no sentido de estabelecer requisitos relativos à capacidade resistente, ao desempenho em serviço e à durabilidade das estruturas de concreto, recomenda valores máximos para a relação água/cimento de acordo com o enquadramento das estruturas nas classes de agressividade ambiental (CAA), definidas para efeitos de projeto conforme ambiente ao qual estará exposta (ver Quadro 2). O Quadro 1 apresenta os níveis de classe de agressividade ambiental em função do ambiente ao qual a estrutura estará sujeita durante sua vida útil. Ainda, o Quadro 3, também adaptado da NBR 12.655 (ABNT, 2022), apresenta recomendações de valores máximos para a relação água/cimento em função do nível de exposição do concreto a sulfatos ( $SO_4$ ), importante agente agressivo.

Quadro 1 – Classes de agressividade ambiental (CAA)

Classe de agressividade ambiental	Agressividade	Classificação geral do tipo de ambiente para efeito de projeto	Risco de deterioração da estrutura
I	Fraca	Rural	Insignificante
		Submersa	
II	Moderada	Urbana <sup>a, b</sup>	Pequeno
III	Forte	Marinha <sup>a</sup>	Grande
		Industrial <sup>a, b</sup>	
IV	Muito forte	Industrial <sup>a, c</sup>	Elevado
		Respingos de maré	

a Pode-se admitir um microclima com uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) para ambientes internos secos (salas, dormitórios, banheiros, cozinhas e áreas de serviço de apartamentos residenciais e conjuntos comerciais ou ambientes com concreto revestido com argamassa e pintura).

b Pode-se admitir uma classe de agressividade mais branda (um nível acima) em obras em regiões de clima seco, com umidade relativa do ar menor ou igual a 65 %, partes da estrutura protegidas de chuva em ambientes predominantemente secos, ou regiões onde chove raramente.

c Ambientes quimicamente agressivos, tanques industriais, galvanoplastia, branqueamento em indústrias de celulose e papel, armazéns de fertilizantes e indústrias químicas.

Fonte: Adaptado de NBR 12.655 (ABNT, 2022, p.11)

Quadro 2 – Correspondência entre classe de agressividade e qualidade do concreto

Concreto	Tipo	Classe de Agressividade			
		I	II	III	IV
Relação água/cimento em massa	CA	≤ 0,65	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,45
	CP	≤ 0,60	≤ 0,55	≤ 0,50	≤ 0,45
Classe de concreto (ABNT NBR 8953)	CA	≥ C20	≥ C25	≥ C30	≥ C40
	CP	≥ C25	≥ C30	≥ C35	≥ C40
Consumo de cimento Portland por metro cúbico de concreto (kg/m <sup>3</sup> )	CA e CP	≥ 260	≥ 280	≥ 320	≥ 360

CA Componentes e elementos estruturais de concreto armado.  
CP Componentes e elementos estruturais de concreto protendido.

Fonte: Adaptado de NBR 12.655 (ABNT, 2022, p.12)

Quadro 3 – Requisitos para concreto exposto a soluções contendo sulfatos

Condições de exposição em função da agressividade	Sulfato solúvel em água (SO <sub>4</sub> ) presente no solo (% em massa)	Sulfato solúvel (SO <sub>4</sub> ) presente na água (ppm)	Máxima relação água/cimento, em massa, para concreto com agregado normal <sup>a</sup>	Mínimo fck (com agregado normal ou leve) (Mpa)
Fraca	0,00 a 0,10	< 150	Conforme Quadro 1	Conforme Quadro 1
Moderada <sup>b</sup>	0,10 a 0,20	150 a 1 500	0,5	35
Severa <sup>c</sup>	Acima de 0,20	> 1 500	0,45	40

a Baixa relação água/cimento ou elevada resistência podem ser necessárias para a obtenção de baixa permeabilidade do concreto ou proteção contra a corrosão da armadura ou proteção a processos de congelamento e degelo.

b A água do mar é considerada para efeito do ataque de sulfatos como condição de agressividade moderada, embora o seu conteúdo de SO<sub>4</sub> seja acima de 1500 ppm, devido ao fato de que a etringita é solubilizada na presença de cloretos.

c Para condições severas de agressividade, devem ser obrigatoriamente usados cimentos resistentes a sulfatos.

Fonte: Adaptado de NBR 12.655 (ABNT, 2022, p.12)

Em seus estudos, Takagi *et. al.* (2014) avaliaram amostras de concreto, com e sem a adição do aditivo impermeabilizante por cristalização Xypex Admix C-500, ensaiadas utilizando três tipos de cimentos comerciais brasileiros: CPIII 40RS, CPII E40 e CPV ARI Plus, com teores distintos de escória de alto forno nas faixas de 55%, 34% e 0%, respectivamente. Nesta avaliação, os corpos de prova foram preparados atendendo a um mesmo fator *a/c* de 0,5. Aos 28 dias foram carregados na prensa com 90% da carga de ruptura de compressão, de modo a se induzir a formação de microfissuras. As amostras fissuradas aos 28 dias foram mergulhadas em água com cal para ativar o mecanismo de cicatrização até os 56 dias. Observou-se que nas amostras contendo aditivo impermeabilizante, à medida que o teor da escória aumenta, ocorre um aumento significativo nas propriedades de recuperação mecânica e de redução da permeabilidade.

Nataadmadja e Runtuwene (2018) também trabalharam com estudos experimentais onde avaliaram o desempenho do aditivo impermeabilizante Xypex C-1000 em diferentes dosagens para formação do traço do concreto das amostras. De acordo com seu estudo os resultados indicaram que houve uma redução significativa na resistência à compressão, do sétimo para o vigésimo oitavo dia. Ao mesmo tempo, houve também uma redução na permeabilidade das amostras, notoriamente verificado aos 7 dias de idade.

A permeabilidade e a resistência à compressão foram avaliadas por Gojević *et. al.* (2021), por meio da avaliação de corpos de prova referência e com aditivo cristalizante, sendo que para ambos se trabalhou com relação água/cimento de 0,45 e 0,55. Os resultados mostram que a adição do cristalizante não afeta significativamente a resistência à compressão do concreto, mas de fato reduz a profundidade de penetração da água no concreto, sendo a redução mais efetiva para traços com menor relação *a/c*. Foi constatado também que a adição do cristalizante melhora a cicatrização das fissuras no concreto, entretanto, sua eficiência depende da largura inicial da fissura.

Figmig (2020) avaliou a ação de aditivos cristalizantes em concretos com alto valor da relação água/cimento, por meio de amostras com *a/c* com valores de 0,835, 0,740 e 0,655 submetidas aos testes de penetração de água sob pressão, de resistência à compressão e de absorção de água, todos após 28 dias de cura. Os resultados dos testes, bem como a avaliação visual e microscópica, demonstraram

que os aditivos cristalizantes não foram suficientes para melhorar os resultados das amostras em relação às de referência, uma vez que os concretos que já possuíam baixa relação a/c e ainda receberam adição de material impermeabilizante na forma líquida, o que interferiu ainda mais na relação. O autor chama atenção para a importância de se produzir concretos de qualidade com taxas de relação a/c compatíveis com o uso e ambiente da estrutura, uma vez que materiais para melhoria na permeabilidade apresentam alto custo.

Martin (2012) chama atenção para o fato de que as propriedades de durabilidade do concreto serem afetadas também pela técnica de cura implementada no concreto. Complementa ainda que, conforme observado, os aditivos por cristalização requerem água para hidratação e apresentam melhores resultados quando submetidos a cura úmida.

É notável que muitos autores incluem na abordagem da durabilidade do concreto a importância de se observar a relação água/cimento e também influência do uso de impermeabilizantes por cristalização na resistência do concreto após a cura. Estes tópicos passam a ser levados em consideração também no desenvolvimento do trabalho.

## 4. METODOLOGIA E RESULTADOS

### 4.1. Metodologia

Os procedimentos metodológicos utilizados para esta pesquisa se basearam em uma revisão bibliográfica com fins de subsidiar dados para uma sugestão embasada de uma solução para um estudo de caso. Os dados qualitativos e até mesmo quantitativos foram compilados em uma matriz comparativa de forma a permitir a avaliação entre as soluções propostas para melhoria da durabilidade do concreto, especificado para o tipo de estrutura do reservatório subterrâneo de detenção de cheias Vilarinho 2.

As características da estrutura, foram obtidas por meio da análise dos projetos básicos já elaborados, os quais previam a execução de paredes diafragmas armadas com 1,00 metro de espessura em todo o bordo do reservatório, formando três septos circulares, conectados entre si, com 40,00 metros de diâmetro interno cada, como apresentado na Figura 1, estendendo-se por 34,00 metros de profundidade. O concreto de constituição das paredes foi especificado em conformidade com as recomendações da norma técnica NBR 6118 (ABNT, 2014), tal como apresentado abaixo:

- Classe de agressividade ambiental CAA III
- Resistência do concreto aos 28 dias  $f_{ck} \geq 40\text{MPa}$
- Relação água cimento  $\leq 0,55$
- Consumo mínimo de cimento em  $400\text{kg/m}^3$
- Abatimento do tronco de cone (*slump*) limitado a  $240 \pm 20\text{mm}$
- Cobrimento mínimo da armadura da parede diafragma = 5,0 cm (atendendo ao mínimo de 4,0cm para estruturas em contato com o solo).

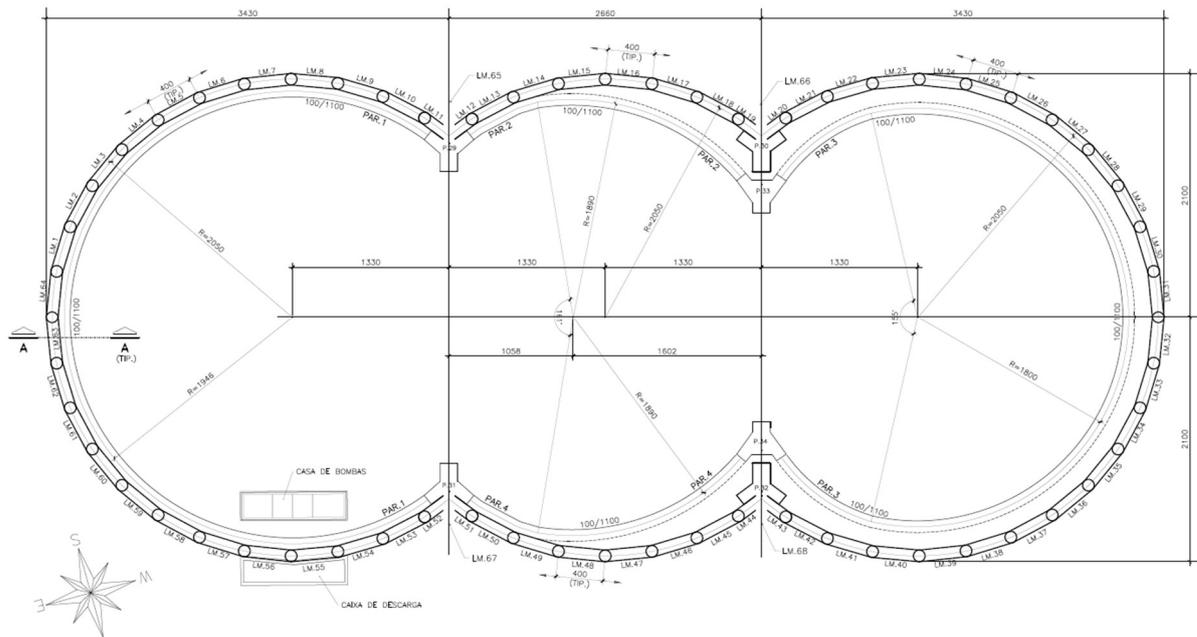


Figura 1 – Planta do reservatório Vilarinho 2. (Fonte: Apêndice IX do Edital de Licitação SMOBI N° 039/2020).

Conforme mostrado na Figura 2, lateralmente essas estruturas estão expostas na face externa com o solo e na face interna com os efluentes provenientes do escoamento superficial gerados pelas chuvas, que será detido temporariamente no interior do reservatório. O solo que envolve a estrutura é composto essencialmente por argila arenosa e silte arenoso, além de traços de argila orgânica próximo ao topo das paredes.

Quanto aos efluentes provenientes do escoamento superficial, sabe-se que essencialmente se constitui de água das chuvas, entretanto, podendo carrear em baixa concentração frente ao restante, efluentes sanitários e industriais lançados irregularmente nos cursos d'água.

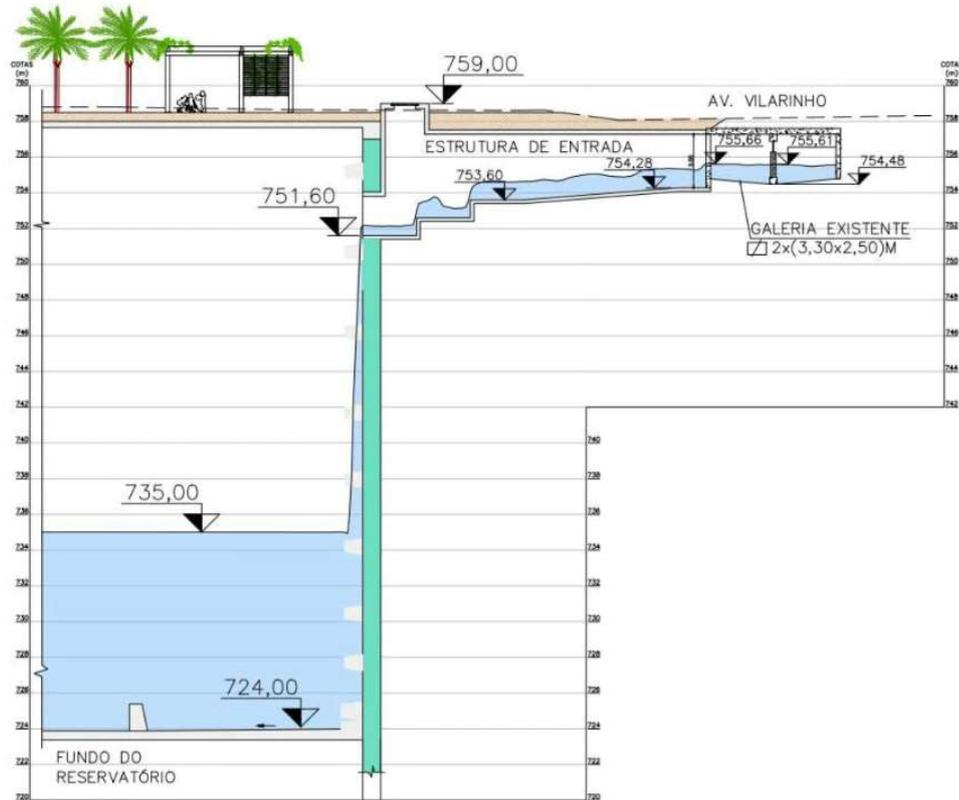


Figura 2 – Seção do reservatório Vilarinho 2. (Fonte: Apêndice IX do Edital de Licitação SMOBI Nº 039/2020).

Para proteger estruturas de concreto como esta, os materiais e/ou metodologias citados na bibliografia consultada com potencial para prover melhorias na permeabilidade e durabilidade os listados a seguir:

- aditivos impermeabilizantes por cristalização (Xypex e Penetron)
- impermeabilizante por cristalização como tratamento superficial
- adição de microsílca (sílica ativa)
- redução da relação água/cimento conforme limites recomendados pela norma técnica NBR 12655 (ABNT, 2022), sendo que alguns autores tratam destes produtos sem mencionar o fabricante.

Com essas informações, elaborou-se uma tabela para apresentar resumidamente os resultados obtidos nos estudos avaliados e possibilitar a comparação das características, vantagens e desvantagens observados no uso dos materiais considerados.

## 4.2. Obtenção de dados

A Apresentação dos dados obtidos gerou o Quadro 9, Anexo 1, onde foram indicados os resultados mais relevantes obtidos em cada um dos estudos avaliados, as colunas listam as informações referentes aos materiais e/ou metodologias de impermeabilização e melhoria na durabilidade do concreto.

## 4.3. Resultados obtidos e análise dos dados

Como tratamento dos dados levantados no Quadro 9, a seguir são apresentados os Quadros 4 a 8 como forma de estabelecer um comparativo entre as vantagens e desvantagens dos materiais e/ou metodologias de impermeabilização obtidos nas doze referências bibliográficas que subsidiaram esta etapa do estudo.

Assim, no que diz respeito às avaliações de permeabilidade do concreto, dentre as referências avaliadas, 7 (sete) apontaram resultados positivos quanto ao uso dos impermeabilizantes por cristalização. O Quadro 4 apresenta os tópicos nos quais se verificou vantagens no uso desses materiais.

Quadro 4 – Resultados vantajosos para o uso dos impermeabilizantes por cristalização

Referência	Resultados
Pazderka e Hájková (2016)	O efeito da impermeabilização já se mostrou eficaz a partir do 12º dia de idade do concreto.
Nasim et. al. (2020)	Microscopia confirmou certo nível de autocicatrização e a recuperação da resistência à compressão para os corpos de prova adicionados com impermeabilizante que foi de 93,98%, confirmando melhora na sua integridade.
Reddy e Reddy (2020)	A adição de impermeabilizante na dosagem de 2%, tipo líquido e tipo pó, conferiram maior durabilidade do que a amostra referência.
Guignone et al. (2015)	A redução na carga de água passante reduziu com o avanço da idade do concreto, de 28 para 91 dias, sendo os aumentos mais expressivos em concretos com alta relação a/c.
Neverkovic e Korjakins (2014)	Profundidades de alcance da carbonatação inferiores à amostra referencial e valores quanto à penetração rápida de íons cloreto em corpos de prova não carbonatados abaixo da amostra referência.
Takagi et. al. (2014)	A medida que o teor da escória de alto forno aumenta, houve um aumento significativo nas propriedades de recuperação mecânica e de redução da permeabilidade.
Gojević et. al. (2021)	Os resultados mostram que a adição do cristalizante reduz a profundidade de penetração da água no concreto.

Ainda quanto à permeabilidade, dentre as referências avaliadas, 5 (cinco) apontaram resultados negativos ou fora do esperado, indicando a necessidade de mais estudos, conforme mostrado no Quadro 5.

Quadro 5 – Resultados negativos ou fora do esperado para o uso dos impermeabilizantes

Referência	Resultados
Cappelleso et al. (2016)	Índice de absorção de água, superior às amostras referência quando usado como aditivo, mas eficiente quando utilizado como tratamento superficial, seguido de lixamento da superfície.
Polesello e Maus (2020)	O uso do aditivo cristalizante resultou em aumento da absorção de água por capilaridade no concreto quando comparado com o concreto referência. Quanto maior o teor de aditivo, maior foi a absorção, o que não era esperado.
Nataadmadja e Runtuwene (2018)	Salvo alguns desvios, a permeabilidade se mostrou menor com o aumento da dosagem e com o avanço da idade do concreto para o uso do Xypex C-1000.
Figmig (2020)	Os resultados dos testes, bem como a avaliação visual e microscópica, demonstraram que os aditivos cristalizantes não foram suficientes para melhorar os resultados das amostras com alta relação a/c em relação às de referência.

Quanto à influência do impermeabilizante por cristalização na resistência à compressão, 8 (oito) referências avaliaram como benéfica no sentido de recuperação parcial desta propriedade após a fissuração, quando comparada à amostra referência, ou mesmo, que seu uso não afeta a resistência negativamente, conforme apresentado no Quadro 6.

Quadro 6 – Resultados quanto a resistência à compressão quando do uso dos impermeabilizantes

Referência	Resultados
Cappelleso et al. (2016)	Verificou melhorias na resistência à compressão.
Pazderka e Hájková (2016)	Impermeabilizante não afeta significativamente a resistência à compressão.
Nasim et. al. (2020)	Verificou melhorias na resistência à compressão.
Oliveira (2018)	Impermeabilizante não afeta significativamente a resistência à compressão.
Reddy e Reddy (2020)	Verificou melhorias na resistência à compressão.
Takagi et. al. (2014)	Verificou melhorias na resistência à compressão.
Gojević et. al. (2021)	Impermeabilizante não afeta significativamente a resistência à compressão.
Nataadmadja e Runtuwene (2018)	Verificou melhorias na resistência à compressão.

Dentre as referências analisadas, as 3 (três) listadas no Quadro 7 avaliaram a penetração de íons cloreto no concreto, sendo unânime quanto aos resultados positivos do uso do impermeabilizante por cristalização, entretanto, Oliveira (2018) ressaltou que a melhoria foi mais significativa quando aliada à redução da relação a/c.

Quadro 7 – Resultados quanto a resistência à compressão quando do uso dos impermeabilizantes

Referência	Resultados
Oliveira (2018)	Aumento da resistência a esta penetração e a redução da absorção de água por capilaridade, entretanto, as melhorias mais significativas se deram pela redução da relação a/c.
Reddy e Reddy (2020)	Perda de resistência com valores discretamente mais elevados na amostra em que não houve adição de impermeabilizante.
Guignone et al. (2015)	Uso do aditivo impermeabilizante por cristalização resultou em valores inferiores de penetração de cloretos

Por outro lado, as 5 (cinco) referências avaliadas, listadas no Quadro 8, investigaram a influência de alterações na relação a/c para melhorias na permeabilidade e durabilidade do concreto. Esta análise independe do uso de impermeabilizantes por cristalização e foi unânime entre as referências o apontamento das melhorias significativas observadas.

Quadro 8 – Resultados quanto à variação na relação a/c

Referência	Resultados
Polesello e Maus (2020)	A resistência à compressão, tanto para o concreto referência como para o concreto com a adição do cristalizante, apresentou resultados mais expressivos para menores relações a/c.
Oliveira (2018)	Na resistência à penetração de água e à absorção de água por capilaridade, os resultados indicam que os efeitos produzidos pela redução da relação a/c foram muito maiores do que os resultantes do uso dos aditivos redutores de permeabilidade utilizados neste estudo.
Guignone et al. (2015)	Foram registrados valores superiores de correntes passantes em concretos com maiores relações água/cimento.
Gojević et. al. (2021)	O uso do aditivo impermeabilizante reduz a profundidade de penetração da água no concreto, sendo a redução mais efetiva para traços com menor relação a/c.
Figmig (2020)	Relação a/c abaixo dos valores recomendados pelas normas técnicas NBR 6118/2014 e 13956-1/2012 não obtiveram resultados satisfatório nem mesmo com o uso de impermeabilizante por cristalização.

## 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos nos estudos avaliados, em sua maioria, apontam para a redução da permeabilidade do concreto quanto ao uso de impermeabilizantes por cristalização, entretanto, alguns autores não confirmam esta avaliação e sugerem que sejam feitos novos estudos acerca.

O uso de impermeabilizante por cristalização como tratamento superficial foi pouco citado nos estudos avaliados, o qual indica a necessidade de mais uma etapa de execução, o lixamento da superfície após aplicação para ainda não se chegar a resultados tão performático quanto seu uso como aditivo. Assim, entende-se esta forma de aplicação seja mais fortemente estudado posteriormente.

A microsilica (sílica ativa) foi incluída dentre os produtos avaliados neste estudo, uma vez que os estudos que a avaliam em comparação aos aditivos impermeabilizantes por cristalização indicam resultados superiores quanto às melhorias na permeabilidade do concreto e resistência à penetração de íons cloreto. Por ser objeto de análise em apenas 2 (duas) das referências avaliadas, este produto não foi considerado nos comparativos do item 4.3, estando apenas descrito no Quadro 9 (Anexo 1).

No que diz respeito a resistência à compressão, é importante notar que alguns autores alertam para o fato de que esta resistência pode ser comprometida a partir de determinado teor de aditivo por cristalização na constituição do concreto.

Outro ponto que foi bastante citado pelos autores está associado à relação água/cimento adotada no traço do concreto, chegando à menção de que uma relação menor ou igual a 0,45 poderia até mesmo apresentar redução na permeabilidade mais eficiente que os aditivos impermeabilizantes por cristalização, com a vantagem de que se trata de um material que disponível em obra e que possivelmente terá um valor de mercado mais adequado que os aditivos propostos. Corrobora em vantagens quanto à redução da relação água/cimento o fato da norma técnica NBR 12655 (ABNT, 2022) já apresentar valores máximos recomendados para esta taxa em função do nível de agressão do ambiente (além dos aspectos já previstos na NBR 6118 (ABNT, 2014) e também em função do agentes ao qual a estrutura poderá estar exposta durante a sua vida útil.

Por fim, diante do exposto, é visível que alguns autores ainda apresentam valores divergentes ao esperado quanto aos resultados obtidos em seus estudos experimentais, contudo se acredita que ainda há muito o que se avaliar para estes materiais pela academia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, José Eduardo de. **Estudos das características técnicas e operacionais das galerias de águas pluviais como subsídios para gestão patrimonial e estabelecimento de diretrizes para projetos de sistemas de drenagem urbana.** 279f. Tese (Doutorado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

AGUIAR, José Eduardo de; BAPTISTA, Márcio Benedito. Estudo das patologias de concreto das galerias de águas pluviais de Belo Horizonte. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos (SBRH)**, Campo Grande, nov.2009.

ARAÚJO, Frank Albert Soares; RIBAS, Luciane Farias. Avaliação de propriedades físicas e mecânicas em concretos produzidos com materiais da cidade de Manaus com o uso de redutores de permeabilidade por cristalização. **Congresso Técnico Científico da Engenharia e da Agronomia (CONTECC)**, out. 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118**: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento. Rio de Janeiro, 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12655**: Concreto de cimento Portland - Preparo, controle, recebimento e aceitação - Procedimento. Rio de Janeiro, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13956-1**: Sílica ativa para uso com cimento portland em concreto, argamassa e pasta - Parte 1: Requisitos. Rio de Janeiro, 2012.

CAPPELLESSO, Vanessa Giaretton; PETRY, Natália dos Santos; MOLIN, Denise Carpena Coitinho Dal; MASUERO, Angela Borges. Uso de impermeabilizante por cristalização para o aumento da durabilidade do concreto. **Congresso Brasileiro de Patologia das Construções (CBPAT)**, Belém, abr.2016.

FIGMIG, R. Efficiency of the crystallizing waterproofing admixture in lower-quality concrete. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, Tatra (Eslováquia), out.2020.

GOJEVIĆ, Anita; DUCMAN, Vilma; GRUBEŠA, Ivanka Netinger; Ana BARIČEVIĆ; PEČUR, Ivana Banjad. The Effect of CrystallineWaterproofing Admixtures on the Self-Healing and Permeability of Concrete. **Materials**, Basileia (Suíça), abr.2021.

GUIGNONE, Guilherme Cunha et al. Avaliação da penetração acelerada de cloretos em concretos com aditivo impermeabilizante por cristalização e diferentes relações água/cimento. **Congresso Latino-Americano de Patologia da Construção (CONPAT)**, Lisboa, set.2015.

MARTIN, Michael. **The Influence of Curing Techniques and Chemical Admixtures on the Properties of Concrete**. 168f. Dissertação (Master of Science in Civil Engineering) - University of Cape Town, Cidade do Cabo (África do Sul), 2012.

NASIM, Mohd; DEWANGAN, Umesh Kumar; DEO, Shirish Vinayak. Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete. **Materials Today: Proceedings**, Raipur (Índia), v. 32, n. 4, p. 844-849, 2020.

NATAADMADJA, Adelia Dwidarma; RUNTUWENE, Joshua Adam Picasso. Analysis of concrete permeability with additional waterproofing admixture. **International Conference on Eco Engineering Development (ICEED)**, Alam Sutera/Tangerang, set.2018.

NEVERKOVICA, Darja; KORJAKINS, Aleksandrs. Influence of Additives on Reinforced Concrete Durability. **Construction Science**, Riga (Letônia), v. 16, p. 21-26, 2014.

OLIVEIRA, Carla Dabian de. **Estudo da penetração de cloretos em compósitos cimentícios produzidos com aditivos redutores de permeabilidade por cristalização capilar**. 110f. Dissertação (Mestrado em Construção Civil) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018.

PAZDERKA, Jiří; HÁJKOVÁ, Eva. Crystalline admixtures and their effect on selected properties of concrete. **Acta Polytechnica**, Praga (República Tcheca), v. 56, n. 4, p. 306–311, ago.2016.

POLESELLO, Eduardo; MAUS, Marcelo. A influência do aditivo cristalizante nas propriedades do concreto endurecido. **Revista Tecnologias e Tendências**, Novo Hamburgo (Brasil), a. 11, n. 1, p. 14-36, jan.2020.

REDDY, Kamasani Chandrasekhar; REDDY, Y. Likesh. Experimental study on the durability of concrete by addition of waterproofing admixtures. **Mukt Shabd Journal**, Puttur (Índia), v. IX, n. VI, p. 7785-7795, jun.2020. (ISSN NO : 2347-3150)

TAKAGI, Emilio Minoru; LIMA, Maryangela Geimba Lima; HELENE, Paulo. Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. **Revista Concreto**, São Paulo (Brasil), a. XLI, n. 73, p. 75-79, jan-mar.2014.

## **ANEXO A**

### **Quadro 9**

**Matriz comparativa entre os diferentes materiais utilizados na impermeabilização do concreto**

Quadro 9 – Matriz comparativa entre os diferentes materiais utilizados na impermeabilização do concreto.

AUTORES	MATERIAIS / APLICAÇÃO			
	Impermeabilizante por cristalização incorporado no concreto fresco	Impermeabilizante por cristalização utilizado como tratamento superficial	Sílica ativa ou Microsílica	Relação água/cimento
<p><b>Cappelleso et al. (2016)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova moldados com concreto referência e também com concreto tratado, considerando: impermeabilizante por cristalização em adição, como tratamento superficial e sílica ativa em adição. Foram realizados ensaios de penetração de água sob pressão (30kPa), e complementarmente aos ensaios de permeabilidade foi realizado o ensaio de resistência à compressão.</p>	<p>Apresentou o maior índice de absorção de água, superior às amostras referência, aquelas sem qualquer tratamento.</p> <p>Quando o impermeabilizante é utilizado como adição ao concreto este aumentou a resistência à compressão em 16%, em relação ao verificado nas amostras de referência.</p>	<p>Apresentou índice absorção de água inferior às amostras referência, desde que além da pintura tenha recebido lixamento da superfície para permitir a permeabilidade do vapor de água.</p> <p>Resistência à compressão sofre pequeno aumento em relação às amostras de referência, entretanto, este aumento é considerado insignificante.</p>	<p>Verificou-se que o uso de sílica ativa como adição foi a melhor solução frente ao aumento da durabilidade do concreto, por apresentar o menor índice de absorção de água.</p> <p>A adição de sílica ativa se mostrou a mais eficiente, apresentando um acréscimo de 28% à resistência à compressão quando comparado às amostras de referência.</p>	-
<p><b>Pazderka e Hájková (2016)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova confeccionados com concreto adicionado com os impermeabilizantes por adição Xypex e Penetron, comparados com amostra referência. Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de penetração de água sob pressão, permeabilidade ao vapor de água e resistência à compressão.</p>	<p>Sobre os resultados, foi observado que a o efeito da impermeabilização já se mostra eficaz a partir do 12º dia de idade do concreto, momento em que a penetração da água se estabiliza a aproximadamente 15mm.</p> <p>Foi observado também a redução na permeância ao vapor d'água em 16% com o uso de Xypex e 20% com o uso de Penetron.</p> <p>Por fim, quanto à resistência à compressão, os resultados mostraram que para o concreto com adição de impermeabilizante a uma taxa de 2%, os valores obtidos foram quase coincidentes com as amostras referência quando analisado aos 28 dias.</p>	-	-	-

AUTORES	MATERIAIS / APLICAÇÃO			
	Impermeabilizante por cristalização incorporado no concreto fresco	Impermeabilizante por cristalização utilizado como tratamento superficial	Silica ativa ou Microsilica	Relação água/cimento
<p><b>Polesello e Maus (2020)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova moldados com concreto referência e também com concreto tratado com um tipo de cristalizante, em três diferentes percentuais de dosagem (0,5%, 0,8% e 1,0% em relação à massa de cimento) e variando as relações água/cimento (a/c), definidas em 0,40, 0,50 e 0,60. Foram submetidos a dois processos de cura, úmida e submersa, e posteriormente a ensaios de resistência à compressão e da permeabilidade determinada por meio da absorção por capilaridade.</p>	<p>O uso do aditivo cristalizante resultou em aumento da absorção de água por capilaridade no concreto quando comparado com o concreto referência. Quanto maior o teor de aditivo, maior foi a absorção, o que não era esperado.</p> <p>O processo de cura submersa mostrou-se mais eficiente quando comparado à cura úmida para os resultados de resistência à compressão, tanto para o concreto referência como para o concreto com a adição do cristalizante.</p>	-	-	<p>O processo de cura submersa mostrou-se mais eficiente quando comparado à cura úmida para os resultados de resistência à compressão, tanto para o concreto referência como para o concreto com a adição do cristalizante, apresentando diferenças mais expressivas para menores relações a/c.</p>
<p><b>Nasim et. al. (2020)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova considerando 4 situações, concreto referência, concreto com adição de 0,1% de fibra PVA (em volume), concreto com substituição parcial do cimento por cinza volante e concreto com adição de 2% de impermeabilizante por cristalização (em massa). Os corpos de prova foram fissurados 3 dias após a moldagem e, após a cura de 42 dias, submetidos à ensaios de compressão e análise microscópica da recuperação das fissuras.</p>	<p>Apresentou melhor desempenho, em análise microscópica observou-se produtos de hidratação mais densos e compactos, devido à produção de <math>\text{CaCO}_3</math>. A presença de cálcio carbonato confirma a reação química responsável pela autocura da fissura, o que promove redução na permeabilidade, e justifica a recuperação da resistência à compressão para os corpos de prova adicionados com impermeabilizante que foi de 93,98%, maior porcentagem em relação às demais situações.</p>	-	-	-

AUTORES	MATERIAIS / APLICAÇÃO			
	Impermeabilizante por cristalização incorporado no concreto fresco	Impermeabilizante por cristalização utilizado como tratamento superficial	Silica ativa ou Microsilica	Relação água/cimento
<p><b>Oliveira (2018)</b></p> <p>Avaliou experimentalmente corpos de prova de concreto considerando duas classes de agressividade ambiental II e III da NBR 6118 (ABNT, 2014) e com relação a/c de 0,60 e 0,55, respectivamente, e cimento Portland de alta resistência inicial (CP V). Os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de penetração de água, absorção de água por capilaridade, penetração de íons cloreto, resistência à compressão axial e resistência à tração por compressão diametral.</p>	<p>Na resistência à compressão axial o uso dos aditivos redutores de permeabilidade promoveu uma melhoria nas resistências dos concretos apenas nas primeiras idades (3 e 7 dias) não trazendo ganhos na idade de 28 dias.</p> <p>Nenhum efeito foi observado na resistência à tração por compressão diametral em decorrência do uso dos aditivos.</p>	-	-	<p>Na resistência à penetração de água, os resultados indicam que os efeitos produzidos pela redução da relação água/cimento (a/c) de 0,60, utilizada nos traços da classe II, para 0,55, utilizada na classe III, foram muito maiores do que os resultantes do uso dos aditivos redutores de permeabilidade utilizados neste estudo.</p> <p>Quanto a absorção de água por capilaridade foram reduções 5% a 6% de redução nos valores médios de absorção para a classe II, supostamente devido a sua maior relação a/c e, com isso, com uma maior estrutura de vazios. Já para os traços da classe III, os aditivos, aparentemente, não foram úteis, uma vez que os melhores resultados foram encontrados no traço de referência.</p>
<p><b>Reddy e Reddy (2020)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova de concreto adicionados de aditivos líquido e em pó, variando também sua dosagem (1, 2 e 3%), em comparação com amostra controle. Todas as amostras foram submetidas a imersão em solução com cloreto de sódio (5%) por 90 dias, após a cura, para proceder-se com os ensaios de compressão.</p>	<p>Concluiu que a adição de impermeabilizante na dosagem de 2%, tipo líquido e tipo pó, conferem maior durabilidade do que a amostra referência, uma vez que a perda na resistência à compressão dos corpos de prova com impermeabilizante do tipo líquido e tipo de pó é de 11% e 10%, respectivamente, menor do que amostra referência.</p>	-	-	-

AUTORES	MATERIAIS / APLICAÇÃO			
	Impermeabilizante por cristalização incorporado no concreto fresco	Impermeabilizante por cristalização utilizado como tratamento superficial	Sílica ativa ou Microsílica	Relação água/cimento
<p><b>Guignone et al. (2015)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova moldados com concretos confeccionados com cimento Portland com escória de alto forno, considerando três relações água/cimento (0,45; 0,55; 0,65), sem e com aditivo impermeabilizante, curados em câmara úmida e ensaiados nas idades de 28 e 91 dias quanto à penetração acelerada de íons cloreto (ASTM C1202/12) e por aspersão de nitrato de prata (adequação à NT Build 492).</p>	<p>Nas amostras de menor relação a/c, 0,45, houve redução da carga passante de 15% tanto em 28 dias quanto e em 91 dias. Enquanto que em relações maiores 0,55 e 0,65 os percentuais de 13% e 12%, respectivamente, praticamente dobraram para 29% e 30%. Observou-se assim um efeito prolongado do aditivo impermeabilizante em amostras com maiores porosidades, possibilitando o aditivo agir com a umidade e com os vazios do concreto por maiores idades.</p>	-	-	Foram registrados valores superiores de correntes passantes em concretos com maiores relações água/cimento.
<p><b>Neverkovic e Korjakins (2014)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova moldados com concreto referência e contendo os seguintes aditivos: Xypex C-1000, Penetron e Elkem Microsílica (sílica ativa). Os corpos de prova foram submetidos a ensaios de para avaliação da carbonatação e penetração acelerada de íons cloreto.</p>	<p>Quanto à carbonatação, os aditivos Penetron e Xypex apresentaram profundidades de alcance da carbonatação inferiores à amostra referência, contrariamente à microsílica Elkem.</p> <p>Embora não tenham apresentado os melhores resultados, Xypex e Penetron apresentaram valores abaixo da amostra referência quanto à penetração rápida de íons cloreto em corpos de prova não carbonatados.</p> <p>Para os corpos de prova carbonatados, apresentaram aumento na penetração de íon cloreto em 12% para Penetron e 16% para Xypex, em relação às amostras descritas anteriormente.</p>	-	<p>Quanto à carbonatação, os resultados apresentados pela microsílica Elkem foram mais desfavoráveis que a amostra referência.</p> <p>Quanto à penetração rápida de íons cloreto os melhores resultados para as amostras não carbonatadas foram apresentados pela microsílica Elkem.</p> <p>Para os corpos de prova carbonatados o resultado mais desfavorável foi obtido pela microsílica Elkem, com aumento da carbonatação em 26% em relação às amostras descritas anteriormente.</p>	-

AUTORES	MATERIAIS / APLICAÇÃO			
	Impermeabilizante por cristalização incorporado no concreto fresco	Impermeabilizante por cristalização utilizado como tratamento superficial	Silica ativa ou Microsilica	Relação água/cimento
<p><b>Takagi et. al. (2014)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova de concreto, com e sem a adição do aditivo impermeabilizante por cristalização Xypex Admix C-500, confeccionados com três tipos diferente de cimentos comerciais brasileiros: CPIII 40RS, CPII E40 e CPV ARI Plus, com teores distintos de escória de alto forno nas faixas de 55%, 34% e 0%, respectivamente. Nesta avaliação, os corpos de prova foram preparados atendendo a um mesmo fator a/c de 0,5. Aos 28 dias foram carregados na prensa com 90% da carga de ruptura de compressão, de modo a se induzir a formação de microfissuras. As amostras fissuradas aos 28 dias foram mergulhadas em água com cal para ativar o mecanismo de cicatrização até os 56 dias.</p>	<p>Observou-se que medida que o teor da escória de alto forno aumenta, houve um aumento significativo nas propriedades de recuperação mecânica e de redução da permeabilidade. Nisso, observou-se que o aditivo influencia na melhora dos valores de resistência à compressão dos corpos de prova fissurados e cicatrizados em 5,9% no CPIII, 5,8% no CPII e 3,7% no CPV. No teste rápido de penetração de íons cloreto os valores foram reduzidos em 7,2% no CPIII, em 3,6% no CPII e em 7,8% no CPV. Estes valores mostram que o efeito de aut cicatrização depende do tipo de materiais de cimento utilizado, o teor de escória e de aditivo.</p>	-	-	-
<p><b>Gojević et. al. (2021)</b></p> <p>Avaliaram experimentalmente corpos de prova referência e com aditivo cristalizante, sendo que para ambos se trabalhou com relação água/cimento de 0,45 e 0,55.</p>	<p>Os resultados mostram que a adição do cristalizante não afeta significativamente a resistência à compressão do concreto, mas de fato reduz a profundidade de penetração da água no concreto, sendo a redução mais efetiva para traços com menor relação a/c. Foi constatado também que a adição do cristalizante melhora a cicatrização das fissuras no concreto, entretanto, sua eficiência da depende da largura inicial da fissura.</p>	-	-	O uso do aditivo impermeabilizante reduz a profundidade de penetração da água no concreto, sendo a redução mais efetiva para traços com menor relação a/c.