



A: XXXIX-0000

AVALIAÇÃO DE DESEMPENHO MECÂNICO DE CONCRETOS COM INCORPORAÇÃO DE ADITIVOS CRISTALIZANTES E SUBMETIDOS A DANOS NAS PRIMEIRAS IDADES

EVALUATION OF THE MECHANICAL PERFORMANCE OF CONCRETES WITH INCORPORATION OF CRYSTALLIZING ADMIXTURES AND SUBJECTED TO DAMAGE AT EARLY AGES

R. F. Tambara (1) (A); S. D. Venquiaruto (2)

(1) Eng. Civil, Mestrando em Engenharia, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil.

(2) Dra. Eng. Civil, Profa. Adjunta, Universidade Federal do Pampa, Alegrete, Brasil.

Endereço para correspondência: rafaeltambara@gmail.com; (A) Apresentador

Área temática: Materiais

Resumo

A pesquisa avaliou as propriedades mecânicas de concretos estruturais produzidos com cimento Portland CPV ARI-RS frente ao fenômeno da autocicatrização. Foram produzidos três traços, dois com aditivos cristalizantes (teores de 0,8% e 2,0% do peso de cimento) e um de referência, sem aditivo. Após a produção, parte dos concretos foi submetido a cargas de compressão nas primeiras idades (3 e 14 dias) para indução de microfissuras. O restante das amostras permaneceu intacta, para servirem como referência. O carregamento adotado foi de 75% do f_{cj} médio, determinado a partir do valor médio de ruptura à compressão axial de três corpos de prova. Após o carregamento, os corpos de prova retornaram para a cura submersa até os 28 dias, visando promover condições adequadas para a ocorrência da autocicatrização. Nesta idade, a propriedade de resistência à compressão axial foi determinada. Os resultados mostraram que os aditivos cristalizantes aumentaram a resistência mecânica dos concretos, indicando uma recuperação parcial das microfissuras pela ação dos cristalizantes. A análise ANOVA dos dados mostrou que a idade do carregamento não foi significativa para a propriedade avaliada e houve diferença significativa entre os concretos estudados. Porém, entre os com aditivos cristalizantes, a variação não foi significativa.

Palavras-chave: Autocicatrização, aditivo cristalizante, concreto, fissuras.

Abstract

In this research, the mechanical properties was monitored by self-healing in concrete composed of CP-V ARI-RS. Three mix proportions were produced, two with crystallizing additives (contents of 0.8% and 2.0% of the cement weight) and one of reference, without additives. After concrete production, part was subjected to compressive loads at the first ages (3 and 14 days) to induce microcracks. The rest of the samples remained intact, as reference. The loading adopted was 75% of the average f_{cj} , determined from the average value of rupture at axial compression of three specimens. After, the specimens returned to the submerged cure up to 28 days, aiming to promote adequate conditions for the occurrence of self-healing. At this age, the axial compressive strength was determined. The results showed that the crystallizing additives increased the mechanical strength of the concretes, indicating a partial recovery of microcracks due to the action of the crystallized. The ANOVA analysis of the data showed that the age of loading was not significant the evaluated property and there was a significant difference between the studied concretes. However, among the with crystallizing additives, the variation was not significant.

Keywords: Self-healing, crystallizing additive, concrete, cracks.



1. INTRODUÇÃO

Atualmente existem diversos materiais e tecnologias que podem contribuir para o fechamento de fissuras. Contudo, o próprio concreto apresenta características que podem contribuir para o selamento das fissuras. Este fenômeno é conhecido como autocicatrização (*Self-healing*). Esses materiais possuem capacidade interna autógena para reparar danos, no qual a fissura é preenchida e/ou selada sem auxílio de nenhuma ação externa, apenas com componentes intrínsecos do concreto (Petry, 2021).

A autocicatrização é um fenômeno de auto recuperação que acontece em concretos microfissurados. Segundo o comitê Rilen 221-SCH (2013), esse processo envolve o fechamento de microfissuras de um material que tenha sido danificado por algum processo anteriormente, sem necessariamente apresentar uma melhoria na performance desse material. Por definição, a autocicatrização é a habilidade dos materiais de repararem fissuras de forma autônoma, ou seja, sem intervenções externas (Ghosh, 2009, apud Bianchin, 2018).

Essa capacidade de auto reparo pode ser estimulada com a utilização de aditivos cristalizantes, no qual são inseridos na matriz cimentícia ainda no estado fresco, ao entrarem em contato com a água, reagem e formam cristais por toda matriz cimentícia, bloqueando os poros. A medida que surgem fissuras na estrutura com o passar do tempo, esses aditivos cristalizantes continuam reagindo e ativados com a presença de água (Ziegler, 2020).

Os aditivos cristalizantes podem ser utilizados nas estruturas de concreto de duas formas, como um impermeabilizante (aplicado em forma de pintura em estruturas acabadas), ou incorporados na mistura durante a produção do concreto, formando uma barreira de cristais insolúveis impedindo a entrada de água e agentes agressivos na estrutura. Segundo Ferrara *et. al.* (2014) apud Bianchin (2018), esses aditivos também possuem a capacidade de promover reações de hidratação posteriores, toda vez que o cristalizante entrar em contato novamente com a água ou estiver submetido a um aumento significativo da umidade. Implicando na potencialização do fenômeno de autocicatrização, visto que sempre que houver fissuras devido a entrada de água, haverá reações secundárias de hidratação.

1.1 Justificativa

Na indústria da Construção Civil, as empresas durante os processos de concretagens, em geral, procuram controlar alguns fatores (consistência, tempo de transporte, lançamento, adensamento, cura, entre outros) para minimizar ou limitar a quantidade de fissuras nas estruturas de concreto. No entanto, existe muita dificuldade em se conseguir controlar todas as variáveis influentes na microfissuração dos concretos, pois surge a necessidade da obtenção de um conhecimento mais detalhado por meio de ensaios de todos processos envolvidos. (Cappelless, 2018).

No Brasil, a tecnologia dos concretos autocicatrizantes só passou a ser desenvolvida em 2011, pelo laboratório de pesquisa do Departamento de Materiais do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA), e tem sido aplicado em projetos específicos, onde se busca maior durabilidade das obras (Takagi, 2013).

A importância do tema impulsionou o desenvolvimento de trabalhos científicos relacionados ao estudo da autocicatrização em algumas universidades brasileiras. No Rio Grande do Sul, a Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) possui em seu acervo vários trabalhos de pós-graduação abordando este tema. Além da UFRGS, a Universidade Federal do Vale dos Sinos (UNISINOS) também possui trabalhos nessa temática, como o trabalho defendido



por Pacheco (2020), abordando a “Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto.

A aplicabilidade de concretos com capacidade autoregenerativa se tornam relevantes, não somente pela questão da minimização de custo com reparos, mas também por permitir que a estrutura apresente um melhor desempenho e uma maior vida útil em estruturas contendo esses materiais, em comparação com estruturas de concreto tradicional (Ziegler, 2020). Em função do exposto, a relevância dessa pesquisa é justificada.

1.2 Objetivos

Avaliar a contribuição de aditivos cristalizantes no processo de auto cicatrização autônoma de concretos estruturais submetidos a um processo de microfissuração nas primeiras idades em comparação a concretos estruturais não fissurados.

2. METODOLOGIA

A metodologia aplicada para o desenvolvimento da pesquisa está descrita nos itens 2.1 a 2.3.

2.1. Etapa 1 – Caracterização dos Materiais e Produção dos Concretos

A caracterização dos materiais foi executada de acordo com as recomendações normativas vigentes e atenderam as exigências técnicas.

Para a produção dos concretos estruturais foi dosado um traço unitário em massa 1:4,5 (cimento; agregados) com cimento Portland CP V ARI - RS e teor de argamassa de 48%. A relação água/cimento (a/c) foi fixada em 0,42. Para a padronização da consistência (8 ± 2 cm) dos concretos foi utilizado um aditivo superplastificante em um teor de 0,005%. O consumo de cimento do traço foi de 417 kg/m^3 .

Foram desenvolvidos três traços com os mesmos procedimentos e equipamentos: T1 – Traço de referência (sem aditivo cristalizante); T2 – Traço com aditivo cristalizante X e T3 – Traço com aditivo cristalizante Y).

A produção dos concretos foi feita com a utilização de uma betoneira de eixo inclinado no Laboratório de Materiais do curso de Engenharia Civil da UNIPAMPA. Para os traços T2 e T3 o aditivo cristalizante em pó foi adicionado durante a mistura dos materiais na betoneira, sendo utilizado a dosagem recomendada pelos respectivos fabricantes.

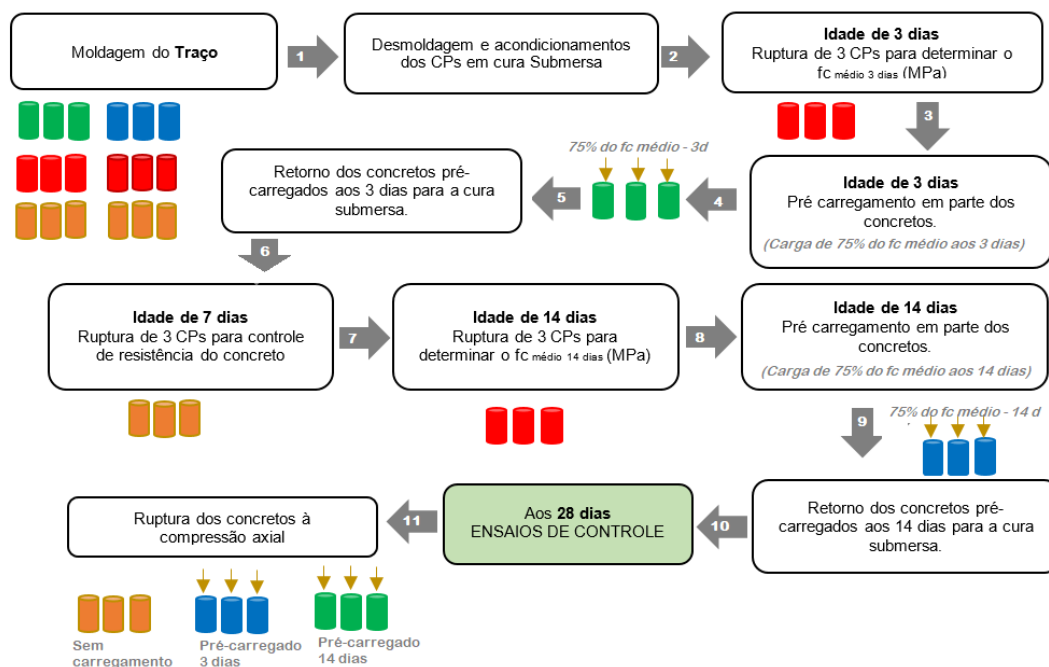
2.2. Etapa 2 – Pré-carregamento dos concretos

O pré-carregamento dos concretos em diferentes idades permitirá observar o comportamento dos concretos com e sem aditivo cristalizante no processo de autocura. O processo de fissuração dos concretos ocorreu na mesma prensa utilizada para os ensaios de compressão axial e com a mesma velocidade de aplicação, conforme as especificações normativas.

A Figura 1 apresenta um fluxograma do programa experimental para um traço, no qual está detalhado as etapas de pré-carregamento dos concretos, cura e ensaios de controle.



Figura 1: Fluxograma do processo de pré-carregamento dos concretos, cura e ensaios de controle.



Fonte: Elaboração própria.

Foram moldados dezoito corpos de prova (CPs) por traço (Figura 1). Após a desmoldagem, os Cps tiveram suas bases retificadas em serra circular, foram identificados e acondicionados em cura submersa. Na idade de três dias, seis corpos de prova foram retirados da cura. Destes, três amostras foram rompidas até o limite para a determinação da resistência à compressão média aos três dias ($f_{cm_{3\text{dias}}}$). Sobre esse valor médio ($f_{cm_{3\text{dias}}}$) foi calculado o valor do percentual de carregamento ($75\% * f_{cm_{3\text{dias}}}$), o qual foi aplicado em três corpos-de-prova (Figura 1). A escolha do percentual de carregamento se justifica por este percentual de carregamento ($75\% * f_{cm_{x\text{dias}}}$) promover um dano interno importante (microfissuras) na matriz, sem levar a amostra a ruptura total. A indução de microfissuras no concreto permitirá a avaliação da ação dos aditivos cristalizantes, a partir da recuperação e/ou manutenção da propriedade avaliada (resistência à compressão axial). Após essa etapa, os corpos de prova foram reidentificados e acondicionados novamente em cura submersa. Na idade de sete dias, três amostras foram retiradas da cura submersa e rompidas até o limite (Figura 1). Esses dados serviram para o controle de resistência dos concretos. Na idade de controle de 14 dias, outros três corpos de prova passaram por um processo de fissuração, semelhante ao procedimento de carregamento aplicado nos concretos aos três dias (Figura 1). Após este processo, os corpos de prova foram reidentificados e na sequência foram acondicionados em cura submersa até a idade dos ensaios de controle (28 dias). Na idade de 28 dias, todos os corpos de prova foram retirados da cura e tiveram as suas propriedades mecânicas determinadas, conforme mostrado na Figura 1.

2.3. Etapa 3 – Ensaios de Controle

A resistência mecânica dos concretos foi avaliada de acordo com o estabelecido pela ABNT NBR 5739 (2018). Para os concretos de referência (sem carregamento) foram realizados



ensaios em diferentes idades: três (3), sete (7), quatorze (14) e vinte e oito dias (28) para melhor avaliação do desenvolvimento desta propriedade. Os resultados de resistência à compressão axial obtidos aos três (3) e quatorze dias (14), também serviram para o cálculo do percentual de carregamento aplicado nos concretos microfissurados nestas idades. A avaliação da propriedade mecânica dos concretos submetidos aos carregamentos foi realizada aos 28 dias.

3. ANÁLISE DE RESULTADOS

Os resultados dos ensaios de resistência à compressão axial dos concretos aos 28 dias são apresentados nas Tabelas 1, 2 e 3. Nessas tabelas também são informados os desvios padrão e os coeficientes de variação entre as amostras.

Tabela 1 - Resistência à compressão axial aos 28 dias sem pré-carregamento

<i>Traço</i>	<i>Resistência Média (MP_a)</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Varição T1-T_{Ref} (%)</i>
T1- T _{Ref}	39,69	3,48	12,15	-
T2- T _{CAx}	43,61	3,08	9,51	+ 9,87
T3 - T _{CAy}	45,52	3,06	9,42	+ 14,69

DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação

Fonte: Elaboração Própria

A Tabela 1 mostra que, aos 28 dias, os traços com aditivos cristalizantes X e Y sem pré-carregamento promoveram um crescimento médio de resistência mecânica em relação ao concreto de referência (sem aditivo) de 9,87% e 14,69%, respectivamente.

Tabela 2 - Resistência à compressão axial aos 28 dias com pré-carregamento aos 3 dias

<i>Traço</i>	<i>Resistência Média (MP_a)</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Varição T1-T_{Ref} (%)</i>
T1- T _{Ref}	40,21	3,25	10,60	-
T2- T _{CAx}	46,56	0,43	0,20	+15,79
T3 - T _{CAy}	47,68	3,00	8,99	+ 18,58

DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação

Fonte: Elaboração Própria

Os traços com aditivos cristalizantes X e Y e microfissurados na idade de 3 dias (Tabela 2) apresentaram um crescimento médio de resistência mecânica em relação ao concreto de referência (sem aditivo) de 15,79% e 18,58%, respectivamente. Em comparação com dados dos concretos não microfissurados (Tabela 1), esses concretos mostraram um desenvolvimento de resistência mecânica mais efetivo.

Tabela 3 - Resistência à compressão axial aos 28 dias com pré-carregamento aos 14 dias

<i>Traço</i>	<i>Resistência Média (MP_a)</i>	<i>DP</i>	<i>CV (%)</i>	<i>Varição T1-T_{Ref} (%)</i>
T1- T _{Ref}	43,77	2,41	5,02	-
T2- T _{CAx}	49,00	2,28	0,08	+ 11,95
T3 - T _{CAy}	45,49	0,29	5,20	+ 3,93

DP: Desvio Padrão; CV: Coeficiente de Variação

Fonte: Elaboração Própria



Os resultados apresentados na Tabela 3 mostram que os traços com aditivos cristalizantes X e Y (pré-carregados aos 14 dias) promoveram um crescimento médio de resistência mecânica em relação ao concreto de referência (sem aditivo) de 11,95% e 3,93%, respectivamente.

Para a análise da significância das variáveis controláveis do experimento (*Idade de carregamento e Uso de aditivo cristalizante*), foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA) através da utilização do software Excel (Tabela 4).

Tabela 4 – Análise da variância (ANOVA)

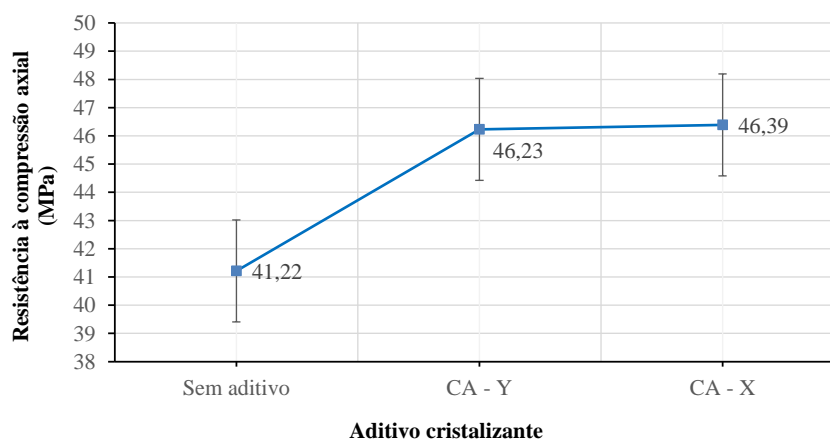
<i>Efeitos</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>Teste – F</i>	<i>p</i>	<i>SIG</i>
Intercessão	53738,54	1	53738,54	7857,70	0,00000	-
Idade do Carregamento	45,21	2	22,60	3,305	0,05558	Não
Aditivo	155,83	2	77,92	11,393	0,00040	Sim
Erro	150,46	22	6,84	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo; SIG: Significância

Fonte: Elaboração Própria

O valor $p < 0,05$ em uma análise ANOVA mostra que a relação entre as variáveis é estatisticamente significativa a um nível de confiança de 95%. Nota-se que entre as variáveis independentes estudadas, somente a variável “Aditivo” (Tabela 4) foi significativa. Ou seja, o uso de aditivo nos concretos interferiu matematicamente na resistência à compressão axial dos concretos estudados, melhorando sua propriedade. Esse comportamento pode ser melhor observado na Figura 2, cujo gráfico foi gerado a partir da análise ANOVA.

Figura 2 – Efeito isolado da resistência à compressão axial dos concretos em função dos aditivos utilizados



Fonte: Elaboração Própria

A Figura 2 mostra um crescimento significativo da resistência dos concretos com a incorporação dos aditivos cristalizantes. O acréscimo de resistência mecânica dos concretos CA-Y e CA-X pode estar relacionado a ação química dos aditivos cristalizantes no fechamento de microfissuras, poros e vazios.

A análise dos dados entre os traços com aditivos cristalizantes (Figura 2), mostra que matematicamente parece não haver diferença entre os resultados. Em função do exposto, foi



realizada uma nova Análise de Variância (ANOVA), através do software Excel, considerando somente os dados de resistência à compressão axial dos traços com aditivos cristalizantes para a idade de 28 dias. Os resultados dessa ANOVA são apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Análise da variância (ANOVA) entre os aditivos cristalizantes aos 28 dias

<i>Efeitos</i>	<i>SQ</i>	<i>GL</i>	<i>MQ</i>	<i>Teste – F</i>	<i>p</i>	<i>Sig</i>
Intercessão	38604,94	1	38604,94	6513,21	0,00000	-
Idade de Carregamento	27,43591	2	13,71795	2,3144	0,13539	Não
Tipo de Aditivo	0,112022	1	0,112022	0,0188	0,89261	Não
Erro	82,98044	14	5,927174	-	-	-

SQ: Soma quadrática; GL: graus de liberdade; MQ: média quadrática; Teste F: valor calculado de F; p: nível de significância; Se $p < 5\%$ = efeito significativo; SIG: Significância

Fonte: Elaboração Própria

Os resultados da ANOVA (Tabela 5) mostrou que entre os concretos com aditivos cristalizantes não há diferença significativa de resistência à compressão axial na idade de 28 dias. Assim como a variável “idade de carregamento”, que também não se mostrou significativa nessa análise.

4. CONCLUSÃO

O pré-carregamento aplicado nas primeiras idades não refletiu negativamente nas propriedades mecânicas dos concretos investigados. Parte dos danos induzidos aos concretos nas primeiras idades podem ter sido minimizados pelo retorno dos concretos ao processo de cura, e pela hidratação remanescente de grãos de cimento anidro. Paralelo a isso, a continuidade da cura promoveu o fornecimento de água para a ação química dos aditivos cristalizantes no fechamento das microfissuras. Os resultados de resistência à compressão axial aos 28 dias mostraram que os concretos com a incorporação de aditivos cristalizantes (submetidos ao pré-carregamento ou não) apresentaram um ganho de resistência mecânica importante, quando comparados aos concretos sem aditivo (concretos de referência). O bom desempenho dos concretos sugerem um indicativo de recuperação parcial dos danos gerados nas primeiras idades pela ação dos aditivos cristalizantes, sugerindo que os dois produtos atuaram de forma positiva na minimização dos danos causados aos concretos nas primeiras idades. Conclui-se que os aditivos utilizados nesta pesquisa são produtos promissores quando se deseja a recuperação mecânica de concretos microfissurados. No entanto, os resultados e conclusões apresentados se limitam aos materiais e métodos utilizados neste estudo, quaisquer alterações nesses processos podem ocasionar variações nos resultados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Dra. Simone Dornelles Venquiaruto, pelo apoio na realização deste projeto, e por ser uma excelente profissional, sempre dedicada e responsável.

Agradeço aos meus familiares e amigos por sempre me apoiarem nessa jornada, sempre me desejando o melhor.

Agradeço a Universidade Federal do Pampa, que foi fundamental para que eu pudesse me tornar o profissional que sou hoje.



REFERÊNCIAS

BERNARDINO DA SILVA, L. M. (2016) **Influência do carregamento precoce na retração por secagem do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, Porto Alegre.

BIANCHIN, F. H. (2018) **Avaliação da autocicatrização em concretos produzidos com aditivo cristalizante e fissurados nas primeiras idades**. Orientadora: Angela Borges Masuero Denise Carpena Coitinho Dal Molin. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharel em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Curso de Engenharia Civil, Porto Alegre.

CAPPELLESSO, V. G. (2018) **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com diferentes cimentos**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Porto Alegre.

PACHECO, F. (2020) **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade do Vale dos Sinos (UNISINOS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil, São Leopoldo.

PETRY, N. dos S. (2021) **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - Construção e Infraestrutura, Porto Alegre.

TAKAGI, E. M. (2013) **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de altoforno ativados por catalisador cristalino**. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Infraestrutura Aeroportuária) – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Pró-Reitoria de Pós-Graduação e Pesquisa do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

TAMBARA, R. F. (2022) **Autocicatrização de materiais cimentícios com aditivos cristalizantes**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Civil) - Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), Campus Alegrete, Alegrete.

VENQUIARUTO, S. D. (2017) **Influência da microfissuração causada nas primeiras idades na durabilidade de concretos ao longo do tempo (self-healing)**. Tese (Doutorado em Engenharia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil (PPGEC), Porto Alegre.

ZIEGLER, F. (2020) **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Porto Alegre.