

**FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO DO SUL
INSTITUTO DE FÍSICA**

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS E
AGENTES CRISTALIZANTES NA OCORRÊNCIA DE
CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM CONCRETOS SOB
CURA SUBMERSA: ESTUDO DE UM ANO.**

ENILDA MARIA DA SILVA GARCIA DE FREITAS

**CAMPO GRANDE
SETEMBRO/2025**



Serviço Público Federal
Ministério da Educação
Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

**AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DE ADIÇÕES MINERAIS E AGENTES
CRISTALIZANTES NA OCORRÊNCIA DE CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS EM
CONCRETOS SOB CURA SUBMERSA: ESTUDO DE UM ANO.**

ENILDA MARIA DA SILVA GARCIA DE FREITAS

Orientador: Prof. Dr. Além-Mar Bernades Gonçalves

Coorientador: Prof. Dr. Sidiclei Formagini

Tese apresentada à Universidade Federal de Mato Grosso do Sul - UFMS - Instituto de Física - INFI, como requisito parcial para obtenção do título de Doutora em Ciência dos Materiais.

Campo Grande – MS
SETEMBRO/2025

INSTITUTO DE FÍSICA- INFI

Cidade Universitária | Unidade 5 |
Fone 67 3345 7485
79070-900 | Campo Grande | MS

Ao meu pai Lazaro (*in memoriam*), pelo carinho e amor infinito,
a minha mãe Maria de Lourdes e minha irmã Ana Paula,
grande incentivadoras e luzes da minha vida.

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida e aos pais maravilhosos que me proporcionou.

A minha gratidão a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para este trabalho.

A minha mãe e irmã pelo apoio e incentivo incondicionais.

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais por todo conhecimento compartilhado.

Ao Israel Vilalba, técnico do Laboratório de Materiais de Construção Civil Prof. Hélio Baís Martins, pelo suporte e auxílio prestado

Aos meus orientadores, Prof. Dr Além-Mar Gonçalves e Prof. Dr Sidiclei Formagini pela oportunidade e apoio durante o desenvolvimento da pesquisa.

Respondeu-lhes Jesus: Tende fé em Deus.

Em verdade vos digo que qualquer que disser a este monte: Ergue-te e lança-te no mar; e não duvidar em seu coração, mas crer que se fará aquilo que diz, assim lhe será feito.

(Marcos 11, 22-23)

INSTITUTO DE FÍSICA- INFI

Cidade Universitária | Unidade 5 |

Fone 67 3345 7485

79070-900 | Campo Grande | MS

RESUMO

Neste trabalho estudou duas classes de concreto: C30 (adição mineral escória de alto-forno) e C50 (adição mineral sílica ativa), cada classe com três subclasses: uma mistura controle, uma com adição cristalizante A e outra com adição cristalizante B. O objetivo foi avaliar o potencial de cicatrização de fissuras com aberturas iniciais (e_0) de até 500 μm , com e sem adições cristalizantes comerciais e identificar os principais produtos formados durante a cicatrização. Para tanto, os materiais e os concretos foram caracterizados, e a cicatrização das fissuras foi avaliada pelo índice de cicatrização (I_C) com testes de percolação de água antes do início do processo e nas idades de 28, 56, 84, 180 e 365 dias. As amostras foram pré-fissuradas, medidas com auxílio de um microscópio óptico digital e mantidas submersas em água para a cicatrização até a data dos ensaios. Adicionalmente, foram realizados testes de penetração de íons cloreto, análises visuais e microestruturais. Os resultados mostraram que a velocidade de cicatrização está diretamente relacionada à e_0 da fissura e ao tempo de cura. A análise das águas de imersão confirmou o carbonato de cálcio como principal mecanismo de fechamento. A composição das misturas influenciou os I_C e a profundidade de penetração de íons cloreto, apresentando comportamentos distintos entre as classes de concreto. As fissuras com $e_0 < 200 \mu\text{m}$ tendem a cicatrizar totalmente em até um ano, enquanto fissuras maiores a obtenção de cicatrização é parcial, com limitação significativa para aquelas acima de 300 μm . As misturas de referência com sílica ativa (C50) apresentaram as maiores médias de I_C , enquanto as com adições cristalizantes tiveram desempenho variável, com resultados da adição cristalizante A ligeiramente superior a B. O teste de penetração de íons cloreto revelou que as adições cristalizantes podem atuar tanto no preenchimento na região interna da matriz quanto na cicatrização das fissuras. As análises microestruturais identificaram fases relacionadas a hidratação contínua, a formação do hidróxido de cálcio, carbonato de cálcio e outros produtos secundários de hidratação, como etringita e aluminosilicatos hidratados, evidenciando que a cicatrização envolve mecanismos físicos e químicos simultâneos. A observação superficial mostrou-se útil, mas limitada, reforçando que a eficácia do processo depende tanto da composição do concreto quanto das condições de fissuração e cura.

Palavras-chave: cicatrização de fissuras; adições minerais; adição cristalizante; índice de permeabilidade de água; cura submersa.

ABSTRACT

In this study, two classes of concrete were examined: C30 (addition of blast furnace slag mineral) and C50 (addition of silica fume mineral), each class with three subclasses: a control mixture, one with crystallizing addition A, and another with crystallizing addition B. The objective was to evaluate the potential for healing cracks with initial openings (e_0) of up to 500 μm , with and without commercial crystallizing additions, and to identify the main products formed during healing. To this end, the materials and concretes were characterized, and crack healing was evaluated by the healing index (HI) with water percolation tests before the start of the process and at 28, 56, 84, 180, and 365 days. The samples were pre-cracked, measured with an optical microscope, and kept submerged in water for healing until the date of testing. Additionally, chloride ion penetration tests, visual and microstructural analyses were performed. The results showed that the speed of healing is directly related to the e_0 of the crack, the curing time, and the availability of carbon dioxide (CO_2). Analysis of the immersion water confirmed calcium carbonate as the main sealing mechanism. The composition of the mixtures influenced the HI and the depth of chloride ion penetration, showing different behaviors among the concrete classes. Cracks with $e_0 < 200 \mu\text{m}$ tend to heal completely within a year, while larger cracks heal only partially, with significant limitations for those above 300 μm . The reference mixtures with silica fume (C50) had the highest average HI values, while those with crystallizing additions had variable performance, with results for crystallizing addition A slightly higher than B. The chloride ion penetration test revealed that crystallizing additions can act both in filling the internal region of the matrix and in healing cracks. Microstructural analyses identified phases related to continuous hydration, the formation of calcium hydroxide, calcium carbonate, and other secondary hydration products, such as ettringite and hydrated aluminosilicates, showing that healing involves simultaneous physical and chemical mechanisms. Surface observation proved useful but limited, reinforcing that the effectiveness of the process depends both on the composition of the concrete and on the cracking and curing conditions.

Keywords: crack healing; mineral additions; crystallizing addition; water permeability index; submerged curing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama dos tipos de retração a partir do estado físico da mistura	32
Figura 2 - Aumento da densidade da matriz cimentícia ocasionada pela hidratação adicional nas regiões adjacentes às fissuras	37
Figura 3 - Diferentes níveis de cicatrização que pode ocorrer no concreto.	37
Figura 4 - Esboço de diferentes possibilidades de geometria interior de fissura ao longo da profundidade.....	45
Figura 5 - Resumo por autores que utilizaram em seus estudos de cicatrização autônoma algum tipo de agente específico na mistura cimentícia	47
Figura 6 - Indução de fissuras em amostra cilíndrica de concreto com fibras metálica por meio do ensaio de compressão diametral	55
Figura 7 - Captura de imagens das fissuras por meio do microscópio óptico digital.....	58
Figura 8 - Aparato para teste de permeabilidade à água de baixa pressão	62
Figura 9 - Aparelho de teste de difusão de cloreto	63
Figura 10 - Ensaio de penetração de cloreto. a) Esboço do plano do corte dos discos fissurados e b) pontos de medição da penetração de cloretos pela matriz e pela fissura nos meios dos discos esquerdo (L) e direito (R)	65
Figura 11 - Fluxograma do programa experimental das etapas de desenvolvimento da pesquisa	68
Figura 12 - Exemplo de fibra de aço com ancoragens nas extremidades.....	70
Figura 13 - Diagrama com os respectivos ensaios para a caracterização dos materiais.....	73
Figura 14 - Diagrama com as nomenclaturas dos concretos estudados	74
Figura 15 - Infográfico da preparação das amostras e dispositivo para os testes de acompanhamento da cicatrização	77
Figura 16 - Processo de fissuração dos discos amostras	78
Figura 17 - Fotos dos discos com as marcações dos pontos das fissuras	78
Figura 18 - Microscópio óptico digital e gabarito padrão	79
Figura 19 - Aparato para os ensaios de permeabilidade de água e penetração de cloretos	80
Figura 20 - Infográfico com o teste de permeabilidade de água	81
Figura 21 - Imagem com a condição do ambiente e da cura	83
Figura 22 - Pontos de medição de penetração de cloretos pela superfície e pela fissura	84

Figura 23 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos: areia fina e areia grossa	88
Figura 24 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos	88
Figura 25 - Distribuição granulométrica do cimento Portland CP II-F 40.....	89
Figura 26 - Difratoograma do cimento CP II-F 40	90
Figura 27 - Difratoograma da sílica-ativa.....	92
Figura 28 - Distribuição granulométrica da escória de alto-forno	93
Figura 29 - Difratoograma da escória de alto-forno	94
Figura 30 - Distribuição granulométrica das misturas cristalinas	95
Figura 31 - Difratoograma da adição cristalizante A	97
Figura 32 - Difratoograma da adição cristalizante B.....	97
Figura 33 - Resultados de análise da água de cada tipo de concreto	99
Figura 34 - Difratoogramas da subclasse do concreto C30-R.....	102
Figura 35 - Difratoogramas da subclasse do concreto C30-A103	
Figura 36 - Difratoogramas da subclasse do concreto C30-B.....	104
Figura 37 - Difratoogramas da subclasse do concreto C50-R.....	105
Figura 38 - Difratoogramas da subclasse do concreto C50-A.....	106
Figura 39 - Difratoogramas da subclasse do concreto C50-B.....	107
Figura 40 - Histograma da distribuição das espessuras e_0 das fissuras estudadas.....	108
Figura 41 - Gráfico de caixa das variações das espessuras das fissuras para a classe C30....	108
Figura 42 - Gráfico de caixa das variações das espessuras das fissuras para a classe C50....	109
Figura 43 - Fluxo de água inicial normalizado, Q_{N0} na idade t_0	110
Figura 44 - Resultados dos I_C por intervalo de e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365} para a subclasse de concreto C30.....	112
Figura 45 - Gráficos com as médias dos I_C por intervalo de e_0 nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da Classe C30	113
Figura 46 - Gráficos com o percentual de amostras das dosagens C30 por intervalos de I_C maior ou igual a 25%, 50%, 75% e 100% e com as e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365}	115
Figura 47 - Gráfico do indicador média dos quadrados da MANOVA por I_C no período de cura de t_0 a t_{365} – C30	117
Figura 48 - Resultados dos I_C por intervalo de e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365} para a subclasse de concreto C50.....	118

Figura 49- Gráficos com as médias dos I_c por intervalo de e_0 nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da Classe C50	119
Figura 50 - Gráficos com o percentual de amostras das dosagens C50 por intervalos de I_c maior ou igual a 25%, 50%, 75% e 100% e com as e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365}	120
Figura 51 - Gráfico do indicador média dos quadrados da MANOVA por I_c no período de cura de t_0 a t_{365} – C50	122
Figura 52 - Teor em massa dos compostos químicos SiO_2 e Al_2O_3 no cimento Portland e nas adições minerais	124
Figura 53 - Penetração de cloretos através da matriz cimentícia para classe de concreto C30	125
Figura 54 - Penetração de cloretos ao longo do comprimento da fissura para classe de concreto C30	126
Figura 55 - Análise integrada das médias dos resultados da e_0 , I_{C365} e das profundidades de penetração de íons cloreto para classe de concreto C30.....	126
Figura 56 - Penetração de cloretos através da matriz cimentícia para classe de concreto C50	127
Figura 57 - Penetração de cloretos ao longo do comprimento da fissura para classe de concreto C50	128
Figura 58 - Análise integrada das médias dos resultados da e_0 , I_{C365} e das profundidades de penetração de íons cloreto para classe de concreto C50.....	129
Figura 59 - Amostras de concreto com penetração de íons cloretos pela brita basáltica	130
Figura 60 - Análise integrada das médias dos resultados da e_0 , I_{C365} , das profundidades de penetração de íons cloreto e das resistências a compressão para as classes de concreto estudadas	131
Figura 61 - MEV das amostras fragmentadas das dosagens C30 e C50, obtidas por elétrons secundários	132
Figura 62 - MEV da amostra de concreto C30-R obtidas por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)	133
Figura 63 - MEV da amostra de concreto C30-A obtidas por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)	134

Figura 64- MEV da amostra de concreto C30-B obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)	135
Figura 65 - MEV da amostra de concreto C50-R obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)	136
Figura 66 - MEV da amostra de concreto C50-A obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)	137
Figura 67- MEV da amostra de concreto C50-B obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)	138
Figura 68 - MEV do produto de cicatrização de fissura da amostra de concreto C30-A obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)....	140
Figura 69 - Mapeamento elementar de cada representação e distribuição espacial dos elementos químicos via EDS do produto de cicatrização do traço C30-A(C).....	141
Figura 70- Mapas individuais de distribuição elementar via EDS da amostra do produto de cicatrização do traço C30-A(C).....	141
Figura 71 - Análise visual superficial de fissura com abertura $e_0 = 497 \mu\text{m}$ do traço C30-B com os I_{c56} (a), I_{c84} (b), I_{c180} (c) e I_{c365} (d).....	143

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Características dos aditivos redutores de água	70
Tabela 2 - Traço dos concretos C30, com escória de alto-forno	75
Tabela 3 - Traços dos concretos C50, com sílica ativa	75
Tabela 4 - Característica dos agregados miúdos - Areias.....	86
Tabela 5 - Características dos agregados graúdos – Brita 4,75/12,5 (Pedrisco)	87
Tabela 6 - Características dos agregados graúdos – Brita 9,5/25	87
Tabela 7 - Caracterização do cimento Portland CP II-F 40.....	89
Tabela 8 - Caracterização química da sílica ativa	91
Tabela 9 - Caracterização química da escória de alto-forno	93
Tabela 10 - Granulometria a laser das misturas cristalinas	95
Tabela 11 - Caracterização química das adições cristalizantes	96
Tabela 12 - Resumo das resistências à compressão axial aos 28 dias de idade	100
Tabela 13 - Resumo da representatividade de cada traço nas faixas em micrômetros.....	109
Tabela 14 - Resumo comparativo com os resultados principais observados nas dosagens C30 por faixa de e_0 , considerando os níveis de $I_C \geq 25\%$, 50% , 75% , 100% no período de cura t_0 a t_{365}	116
Tabela 15- Resumo comparativo com os resultados principais observados nas dosagens C50 por faixa de e_0 , considerando os níveis de $I_C \geq 25\%$, 50% , 75% , 100% no período de cura t_0 a t_{365}	121
Tabela 16 - Resultado percentual, semiquantitativos, obtidos por EDS em fragmentos de concreto da classe C30 e C50 e no produto de cicatrização da fissura (C30-A(C))	142
Tabela 17 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C30-R	171
Tabela 18– Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C30-A	172
Tabela 19- Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C30-B	173
Tabela 20 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C50-R	174

Tabela 21 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C50-A	175
Tabela 22 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C50-B	176
Tabela 23 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C30-R	177
Tabela 24 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C30-A	177
Tabela 25 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C30-B	178
Tabela 26 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C50-R	179
Tabela 27 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C50-A	180
Tabela 28 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C50-B	180
Tabela 29 - MANOVA dos índices de cicatrização nos períodos de cura t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da classe de concreto C30	181
Tabela 30 - MANOVA dos índices de cicatrização nos períodos de cura t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da classe de concreto C50	181
Tabela 31 - MANOVA dos testes de penetração de íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da classe de concreto C30	182
Tabela 32 - MANOVA dos testes de penetração de íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da classe de concreto C30	182

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais compostos do cimento Portland	38
Quadro 2 - Fatores que influenciam o processo de cicatrização autógena	40
Quadro 3 - Resumo de estudos de cicatrização em compósitos cimentícios em apenas uma idade	46
Quadro 4 - Características das diferentes misturas cristalinas, por autores.....	49
Quadro 5 - Composição química de diferentes misturas cristalinas por autores.....	50
Quadro 6 - Imagens MEV das adições cristalizantes A e B ampliadas 500x e 2500x.....	98
Quadro 7 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $200\ \mu\text{m} \leq e_0 < 300\ \mu\text{m}$ para a subclasse C50-A	144
Quadro 8 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $200\ \mu\text{m} \leq e_0 < 300\ \mu\text{m}$ para a subclasse C30-A	145
Quadro 9 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $200\ \mu\text{m} \leq e_0 < 300\ \mu\text{m}$ para a subclasse C50-R.....	146
Quadro 10 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $400\ \mu\text{m} \leq e_0 \leq 500\ \mu\text{m}$ para a subclasse C30-R	147
Quadro 11 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $400\ \mu\text{m} \leq e_0 \leq 500\ \mu\text{m}$ para a subclasse C30-A	148
Quadro 12 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $400\ \mu\text{m} \leq e_0 \leq 500\ \mu\text{m}$ para a subclasse C30-B	149
Quadro 13 - Análise visual superficial da fissura com $e_0 > 300\ \mu\text{m}$ para a subclasse C50-R	150
Quadro 14 - Análise visual superficial da fissura com $e_0 > 300\ \mu\text{m}$ para a subclasse C50-A	151
Quadro 15 - Análise visual superficial da fissura com $e_0 > 300\ \mu\text{m}$ para a subclasse C50-B	152
Quadro 16 - Informações das fichas do ICDD	169
Quadro 17 – Síntese dos resultados de caracterização do concreto e da ocorrência de cicatrização de fissuras	183

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

A	Al_2O_3 /Óxido de alumínio
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a/c	Relação água/cimento
ACI	<i>American Concrete Institute</i>
AF	Areia Fina
AG	Areia Grossa
APHA	American Public Health Association
C	CaO /Óxido de cálcio
Ccl	Concentração de cloreto na profundidade x
C_2S	Silicato dicálcico/Belita
C_3A	Aluminato tricálcico
C_3S	Silicato tricálcico / Alita
C_4AF	Ferroaluminato tetracálcico
C-S-H	Silicato de cálcio hidratado
C-A-S-H	Silicato aluminato de cálcio hidratado
Co	Concentração inicial de cloretos
CP V ARI	Cimento Portland de Alta Resistência Inicial
DRX	Difração de Raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
e_0	Abertura inicial da fissura
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
EITF	Espectroscopia de Infravermelho por Transformada de Fourier
Erf	Função de erro de Gauss
F	Fe_2O_3 /Óxido de ferro
FAENG	Faculdade de Engenharias, Arquitetura e Urbanismo e Geografia
FRX	Fluorescência de Raios X
I_c	Índice de Cicatrização
ICDD	<i>International Centre for Diffraction Data</i>
IMER	Imagens Eletrônicas Retroespalhadas
INFI	Instituto de Física

INSTITUTO DE FÍSICA- INFI

Cidade Universitária | Unidade 5 |

Fone 67 3345 7485

79070-900 | Campo Grande | MS

ITA	Instituto Tecnológico de Aeronáutica
LABMAT	Laboratório de Síntese, Caracterização e Simulação Computacional de Materiais
LAQUA	Laboratório de Qualidade Ambiental
LMCC	Laboratório de Materiais da Construção Civil
MANOVA	Análise Multivariada da Variância
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
MEVA	Microscopia Eletrônica de Varredura Ambiental
MULTILAM	Laboratório Multiusuário de Análises de Materiais
NaCl	Cloreto de sódio
pH	Potencial hidrogeniônico
PSA	Polímeros Superabsorventes
PVC	Policloreto de Vinila
Q _N	Fluxo de água normalizado
RILEM	<i>International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures</i>
S	SiO ₂ /Dióxido de silício
TGA	Análise Térmica Gravimétrica
t ₂₈	Período de 28 dias
t ₅₆	Período de 56 dias
t ₈₄	Período de 84 dias
t ₁₈₀	Período de 180 dias
t ₃₆₅	Período de 365 dias
UFMS	Universidade Federal de Mato Grosso do Sul
USB	Universal Serial Bus
VPU	Velocidade de Pulso Ultrassônico
W _k	Abertura máxima característica de fissura

LISTA DE SÍMBOLOS

%	Porcentagem
θ	Diâmetro
°C	Graus Celsius
μm	Micrômetro
2D	Imagem bidimensional
2θ	Dois teta
3D	Imagem tridimensional
AgNO_3	Nitrato de Prata
CaCO_3	Carbonato de cálcio/Calcita
Ca^{2+}	Íon de cálcio
cm/s	Centímetro por segundo
CO_3^{2-}	Íon de carbonato
Cu	Cobre
D	Coeficiente de difusão de cloreto
Kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
KN	Quilo Newton
ml	Mililitros
MgCO_3	Carbonato de magnésio
MPa	Megapascal
s	Segundos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
1.1 Justificativa.....	27
1.2 Objetivos.....	27
1.2.1 Objetivo geral	27
1.2.2 Objetivos específicos	28
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	28
2.1 Concreto de cimento Portland	28
2.1.1 Hidratação, maturação e cicatrização	30
2.2 Fissuração e durabilidade	30
2.2.1 Causas de ocorrência de fissuração	32
2.3 Fenômeno da cicatrização cimentícia.....	35
2.3.1 Cicatrização por indução autógena.....	36
2.3.2 Cicatrização por indução autônoma.....	46
2.4 A química da água e a cura.....	53
2.5 Ensaio e técnicas de indução e avaliação do índice de cicatrização das fissuras.....	54
2.5.1 Indução de fissuras	54
2.5.2 Avaliação da eficiência na cicatrização de fissuras	56
2.5.3 Avaliação de recuperação de propriedades.....	60
3 PROGRAMA EXPERIMENTAL.....	67
3.1 Materiais e metodologia	68
3.1.1 Materiais	68
3.1.2 Caracterização dos materiais	71
3.1.3 Classe e grupo de concreto produzido	73
3.1.4 Processo e etapas de cicatrização das fissuras	76
3.1.5 Teste de percolação de água pela fissura	79

3.1.6	Teste de penetração de íons cloretos	83
3.1.7	Análise visual.....	85
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	86
4.1	Caracterização dos materiais	86
4.1.1	Ensaio normativo.....	86
4.1.2	Caracterização dos materiais finos	88
4.1.3	Água.....	98
4.2	Caracterização do concreto.....	100
4.2.1	Caracterização mineralógica das classes de concreto.....	101
4.3	Geometria das fissuras.....	107
4.3.1	Espessura Inicial de Fissura.....	107
4.4	Teste de percolação de água sob baixa pressão pelas fissuras	110
4.4.1	Influência do tempo de cura em água para cicatrização das fissuras	111
4.5	Teste de penetração de íons cloretos	124
4.5.1	Classe de concreto C30.....	124
4.5.2	Classe de concreto C50.....	127
4.5.3	Avaliação comparativa dos resultados do teste de penetração de Íons cloreto para as classes de concreto estudadas.....	129
4.6	Análise visual	132
4.6.1	Microscopia eletrônica de varredura	132
4.6.2	Registro de imagem por meio de microscópio óptico digital	142
4.7	Contribuições finais.....	153
5	CONCLUSÃO.....	154
5.1	Limitações do trabalho	156
5.2	Sugestões de trabalhos futuros	156
6	REFERÊNCIAS.....	157

APÊNDICE A — FICHAS DO BANCO DE DADOS <i>INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA</i> (ICDD): NUMERAÇÃO, DENOMINAÇÃO QUÍMICA, FÓRMULA E SÍMBOLO.....	164
APÊNDICE B — RESULTADOS DO TESTE DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PELAS FISSURAS.....	166
APÊNDICE C — RESULTADOS DO TESTE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO.....	172
APÊNDICE D — ANÁLISE MULTIVARIADA DA VARIÂNCIA (MANOVA).....	176
APÊNDICE E — RESUMO DA CARACTERIAÇÃO DO CONCRETO E DA OCORRÊNCIA DE CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS.....	178

1 INTRODUÇÃO

Os compósitos cimentícios compõem um dos grupos mais utilizados na cadeia produtiva da construção civil, pois possuem características como praticidade produtiva, adaptabilidade a várias fôrmas e formatos e o bom desempenho físico-mecânico.

Os materiais cimentícios (pasta, argamassa e concreto) são amplamente estudados para obtenção de produtos com propriedades e características adequadas em seu estado fresco e endurecido (Biernacki et al., 2017). As principais pesquisas buscam desenvolver compósitos cimentícios que permitam a redução de manifestações patológicas, como retração plástica, fissuração, aumento de permeabilidade e porosidade e com isso melhorar a vida útil e o desempenho (Mechtcherine; Secrieru; Schröfl, 2015). Assim, o desenvolvimento de novos aditivos químicos e adições minerais, ajudam na concepção de compósitos cimentícios especiais, que possam contribuir no melhoramento das propriedades físicas, mecânicas e químicas (Li; Kwan, 2015).

A fissuração é uma manifestação patológica que afeta as estruturas de concretos, que pode comprometer a durabilidade, pois uma vez acometida facilita a migração de agentes agressivos para seu interior (Huang et al., 2016). Consequentemente, podem afetar a segurança, a estanqueidade dos elementos e comprometer também a estética da peça e o lugar. Assim, a fissuração está entre as principais causas físicas de maior ocorrência de deterioração nas estruturas de concreto. Segundo Dal Molin (1988), ela pode ocorrer por alguns fatores, como: variação volumétrica devido o gradiente de temperatura e umidade ou a pressão de cristalização de sais nos poros, carregamento estrutural por sobrecarga e impacto ou carregamento cíclico, a variação cíclica por condições severas de temperatura de gelo-degelo ou fogo.

A cura é um processo que facilita a hidratação do cimento, envolvendo o controle da temperatura e da entrada e saída de água no concreto. Seu propósito é manter o concreto saturado, ou tão próximo disso quanto possível, até que os espaços inicialmente preenchidos com água na pasta de cimento sejam completamente ocupados pelos produtos formados pela sua hidratação (Neville, 2016).

Pesquisas foram fomentadas pelo fato de que fissuras surgiam em compósitos cimentícios e com passar do tempo elas desapareciam. Lauer e Slate (1957) em seus relatos observaram que, alguns fatores como a influência do tempo, as condições de cura e as adições de cal e cinza volantes explicavam tal fato e ainda, que o material ligante, formado durante a ação de cicatrização no qual ele chamava de “soldagem” da pasta de cimento e do concreto, era

constituído praticamente por cristais de carbonato de cálcio (CaCO_3) e hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), sem produtos hidratados amorfos e resultando em apenas vestígios ou quase nenhum de carbonato de magnésio, hidróxido de magnésio e somente encontrados carbonatos alcalinos.

No entanto, muito antes das investigações de Lauer e Slate em 1957, a Academia Francesa de Ciências já havia atribuído, em 1836, a transformação do Ca(OH)_2 em CaCO_3 como resultado da exposição ao dióxido de carbono (CO_2) atmosférico (Ferrara; Krelani; Carsana, 2014). Além disso, a autocicatrização do concreto foi observada posteriormente por Abrams (1913, *apud* Ferrara et al., 2014), que a associou à hidraulicidade do cimento.

A principal reação química responsável pela hidraulicidade do cimento é a formação de silicatos de cálcio hidratados (C-S-H, forma abreviada de óxido de cálcio (CaO), dióxido de silício (SiO_2), água (H_2O)), hidróxido de cálcio (CH, forma abreviada de Ca(OH)_2) e sulfoaluminatos de cálcio a partir dos componentes do cimento, como o clínquer. Esses produtos de hidratação preenchem os espaços vazios entre as partículas de cimento, endurecendo a mistura e conferindo-lhe resistência mecânica ao longo do tempo (Mehta; Monteiro, 2014).

Segundo Takagi (2013), a capacidade de cicatrização ou da autocicatrização do concreto se refere à sua habilidade de colmatar parcial ou integralmente suas próprias microfissuras, por meio da interação da água com a matriz cimentícia. Logo, a cicatrização, refere-se à capacidade de um material se recuperar de danos causados por ações físicas, agentes nocivos ou degradantes, resultando na melhoria de seu desempenho, sendo classificado como autógeno e autônomo (RILEM, 2013).

Com o aumento constante das pesquisas relacionadas à ocorrência de cicatrização em compósitos cimentícios, diversas terminologias e classificações surgiram. Com o propósito de estabelecer uma padronização nesse contexto, em 2005, foi fundado o Comitê Técnico para Fenômenos de Autocicatrização em materiais à base de cimento (Comitê Técnico 221 - SHC) na RILEM (União Internacional de Laboratórios e Especialistas em Materiais, Sistemas e Estruturas de Construção). Em 2013, esse comitê publicou o relatório intitulado "Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials", que classifica os efeitos da cicatrização. O termo "self-healing" é usado para compósitos cimentícios com capacidade de se autorreparar após a estrutura sofrer algum dano por mecanismo de deterioração que gere fissuras (Cappelless, 2018).

Segundo Rooij et al. (2013) as matrizes autorregenerativas ditas como “self-healing”, são materiais que possuem a capacidade interna autógena de reparar danos, ou com auxílio ínfimo de estímulo externo desenvolvendo reparação de maneira autônoma, ou seja, o processo pelo qual o material se regenera reparando as fissuras internas por meio intrínseco (autógeno) ou extrínseco (autônomo). E ainda, a cicatrização autógena é o processo no qual as fissuras são fechadas de forma parcial ou total, resultando, implicitamente, na restauração parcial da durabilidade original e das propriedades mecânicas das matrizes cimentícias (De Belie et al., 2018).

Sendo assim, a cicatrização autógena é dada como um processo natural do concreto e ocorre por ser intrínseco aos materiais contidos na matriz cimentícia. Os mecanismos mais importantes envolvidos são a contínua hidratação dos compostos do clínquer ou a carbonatação do hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), possibilitando com que as fissuras cicatrizem ao longo do tempo. Entretanto, a cicatrização autônoma é induzida por meio de reações de um agente específico, como uso de adições minerais que são adicionadas intencionalmente na mistura do concreto para promover a autocicatrização. A cicatrização autógena é limitada a pequenas fissuras, normalmente inferiores a 0,30 mm e sendo eficaz somente em meio a água disponível (Van Tittelboom; De Belie, 2013). No entanto, para os autores Roig-Flores, Formagini e Serna (2021) a cicatrização autógena é eficaz nos casos em que as fissuras apresentam até 0,15 mm.

Diversos fatores influenciam a capacidade de cicatrização autógena, sendo o tamanho da fissura um dos mais importantes. Fissuras com abertura entre 0,20 mm e 0,30 mm apresentam maiores chances de cicatrização parcial devido ao menor volume a ser preenchido (Danish; Mosaberpanah; Usama Salim, 2020).

A hidratação contínua é um processo essencial nos efeitos na cicatrização autógena, entretanto, o processo de carbonatação, tem recebido maior atenção quando comparado a hidratação contínua. Geralmente, a cura continua efetiva ao máximo a hidratação de parte dos grãos de cimento ainda não hidratados, contribuindo mais no processo de cicatrização de matrizes cimentícias (Schlangen; Ter Heide; Breugel, 2006). Somado a isto, à disponibilidade de hidróxido de cálcio e água livre na matriz reagindo com o CO_2 presente no meio, promove a formação de carbonato de cálcio, que preenche espaços vazios e fissuras (Schlangen; Ter Heide; Breugel, 2006).

Desta forma, pesquisas relacionadas ao fenômeno de autocicatrização vem ganhando várias versões relacionadas a estudo de tecnologias que podem ser adicionadas à matriz para

induzir a cicatrização por processo autônomo, como adições cristalizantes, soluções bacterianas, polímeros superabsorventes (PSA) ou agentes adesivos encapsulados.

Entre os agentes químicos inorgânicos utilizados para induzir a cicatrização autônoma estão as adições cristalizantes. Essas são misturas comerciais que, ao reagir com a umidade do concreto fresco e com os produtos de hidratação do cimento, geram cristais insolúveis que promovem o fechamento das fissuras. As adições cristalinas são misturas que possibilitam reduzir a permeabilidade sob pressão hidrostática (ACI 212.3R-10, 2010). A reação química da adição cristalina com o cimento e a água, forma depósito insolúveis em água dentro de fissuras, aumentando a densidade do hidrato de silicato de cálcio e a resistência à penetração de água. São eficazes somente em contato direto com água e para fissuras com espessuras menores que 0,30 mm. Além disso, alguns estudos apontam que seu uso não garante a recuperação das propriedades mecânicas do concreto (Roig-Flores, 2018; Roig-Flores et al., 2016).

Segundo Rooij et al. (2013), o efeito da cicatrização de fissuras, em compósitos cimentícios é influenciada por diversos fatores, como a composição e as características do concreto (tipo de cimento, tipo de adição, o tipo de agregados a relação água/aglomerante), da água, das fissuras (idade de abertura, a espessura, a profundidade, a geometria, o tipo de ramificação da fissura e a presença de aglomerados) e do ambiente de exposição. Por outro lado, na presença de água, a pressão, o gradiente de pressão, a dureza, o pH (potencial hidrogeniônico) e a temperatura também podem desempenhar um papel importante.

Como mencionado, o crescimento exponencial em pesquisa relacionadas a “self-healing” tem merecido destaque; porém, ainda existem algumas lacunas a serem superadas como na metodologia de avaliação dos efeitos através de técnicas de avaliação de permeabilidade, difusão, absorção em condições de fissuração, além da recuperação de propriedades mecânicas (Roig-Flores; Formagini; Serna, 2021). Além, de trabalhos mais interdisciplinares são necessários para o melhoramento na estimativa da taxa da autocicatrização (Nasim; Dewangan; Deo, 2020a). Outra lacuna permissível de pesquisa que correlaciona as interdisciplinares é a análise da microestrutura de materiais cimentícios utilizando outras técnicas como microtomografia, permeabilidade, porosidade, entre outras (Watanuki Filho, 2021).

A cicatrização em materiais cimentícios é um processo que oferece o benefício primário de estender a vida útil das estruturas, prevenindo reparos frequentes e promovendo a redução de custos de manutenção. O processo de cicatrização de fissuras pode ocorrer pela maturação contínua da matriz cimentícia (refinamento de poros) ou após o dano na estrutura. Neste

contexto, a capacidade de cicatrização cimentícia em fissuras atua como uma barreira preventiva, auxiliando na extinção de etapas como a entrada de agentes agressivos e a subsequente deterioração da estrutura (Cappellesso, 2018). Portanto, a avaliação de aditivos que potencializam este fenômeno, como as adições minerais e os agentes cristalizantes, torna-se essencial para o avanço da durabilidade do concreto.

Além dos benefícios de manutenção, a busca por um material mais resistente e durável, que emprega menos matéria-prima de alto consumo energético, é intrinsecamente ligada à sustentabilidade. A incorporação de adições minerais e a otimização da vida útil via autocura fazem com que os compósitos cimentícios se tornem ambientalmente mais aceitáveis. Desta forma, o desempenho aprimorado desses materiais na diminuição da suscetibilidade à fissuração é um aspecto crucial na formulação de estratégias para a concepção de edificações mais eficientes e sustentáveis. Tais alternativas inovadoras na construção civil devem, portanto, atender de forma otimizada aos requisitos mínimos de durabilidade, desempenho térmico e físico-mecânico.

1.1 Justificativa

Embora o potencial da cicatrização em concretos seja reconhecido, a literatura ainda apresenta lacunas quanto à quantificação da eficácia de agentes de cura como adições minerais e cristalizantes em estudos de longa duração (um ano). Adicionalmente, a identificação dos produtos de cicatrização é fundamental para a otimização da dosagem e para o avanço da engenharia desses materiais. A principal relevância desta tese reside em sua abordagem metodológica robusta: a combinação da análise microestrutural com experimentos práticos de percolação de água e penetração de íons cloreto. Além disso, a caracterização da água de imersão, pouco explorada na literatura, oferece *insights* inovadores sobre a precipitação de carbonato de cálcio e íons cálcio, padronizando a avaliação do processo de cura. Portanto, o presente trabalho se justifica pela necessidade de fornecer dados multiescala e de longo prazo que correlacionam a microestrutura à durabilidade, servindo de base essencial para a aplicação prática de concretos mais resilientes e sustentáveis.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

Avaliar comparativamente a contribuição de agentes cristalizantes comerciais para potencializar a cicatrização em fissuras (aberturas iniciais de até 500 µm) em concretos

produzidos com adições minerais e agregados locais, e identificar os principais produtos formados durante o processo.

1.2.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos do trabalho são:

- a) Avaliar o potencial de cicatrização de diferentes adições cristalizantes, em comparação ao potencial de cicatrização do cimento Portland;
- b) Analisar como os diferentes tamanhos de espessura de fissura em compósitos cimentícios são afetadas durante o processo de cicatrização;
- c) Analisar a composição química da água de exposição para determinar os produtos lixiviados do concreto durante a cicatrização;
- d) Caracterizar a morfologia e a composição química da microestrutura dos concretos estudados após 365 dias de cicatrização em água, através das técnicas de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) acoplada à Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS) e Difração de Raios X (DRX)
- e) Caracterizar a morfologia e a composição química dos produtos de cicatrização formados nas fissuras por meio de MEV e EDS;
- f) Avaliar o impacto do tempo de cura de um ano em imersão contínua em água no desempenho de cicatrização através do teste de percolação de água;

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo são apresentados conceitos elencados ao mecanismo e desempenho da cicatrização de fissuras em materiais cimentícios, com foco na durabilidade do concreto, assim como a influência de alguns fatores na cicatrização, ensaios e técnicas para indução de fissuras e avaliação de taxas de cicatrização.

2.1 Concreto de cimento Portland

O concreto de cimento Portland é o material mais utilizado na construção civil, devido as suas várias vantagens, como a facilidade de moldagem em praticamente qualquer dimensão e formato, simplificando assim o seu uso. O baixo custo do concreto favorece na escolha quando comparado aos outros materiais estruturais, além de outras vantagens como a resistência e rigidez, capacidade de resistir a carregamentos cíclicos e facilidade na manutenção (Mehta; Monteiro, 2014; Taylor, 1997).

Nesse contexto o concreto é um material durável composto por agregados, materiais cimentícios e água, que pode ser estudado em diferentes escalas, desde a macroscópica até a nanoscópica. Numa escala macroscópica o concreto vai exibir em duas fases, o agregado e a pasta hidratada. Já em uma escala microscópica é possível identificar a ligação entre eles

(agregados + pasta hidratada), assim como heterogeneidades na pasta hidratada. Entretanto, na escala nanoscópica, é possível identificar a ligação entre os grãos dos próprios produtos hidratados (Paulon; Neto; Kirchheim, 2022).

O estudo do concreto visa aprimorar a compreensão de suas propriedades em diferentes escalas, pois é um compósito combinado por três elementos: pasta endurecida, agregados e zona de transição (interface entre a pasta e os agregados graúdos) (Liao et al., 2004).

A ligação entre a pasta de cimento e os agregados no concreto, envolve tanto um entrelaçamento mecânico dos produtos de hidratação do cimento, quanto reações químicas entre eles e a pasta. A morfologia da ligação fornece evidências desse entrelaçamento mecânico. Portanto, a forma, o tipo, o tamanho e a composição mineralógica dos agregados, juntamente com as propriedades da pasta hidratada, afetam a qualidade da zona de transição, influenciando as propriedades essenciais do concreto, como resistência mecânica, porosidade e durabilidade (Paulon; Neto; Kirchheim, 2022).

A microestrutura do concreto não é somente intrínseca ao material, pois dois constituintes da microestrutura: a pasta de cimento hidratada e a zona de transição na interface estão suscetíveis a modificações com relação ao tempo, umidade e temperatura ambiental (Ramachandran et al., 2002).

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a microfissura na zona de transição pode ocorrer antes mesmo do elemento estrutural ser carregada, devido aos movimentos diferenciais de amplitude térmica e perda de umidade. Além de cargas de impacto de curta duração, retração por secagem e cargas mantidas a altos níveis de tensão promovem o aumento do número e tamanho das microfissuras.

Segundo Helene (1993), o surgimento de microfissuras pode ocorrer na zona de transição, sendo influenciada pelos parâmetros de tamanho do agregado, distribuição granulométrica, consumo de cimento, relação água/cimento (a/c), grau de adensamento do concreto no estado fresco, condições de cura, umidade do ambiente e ainda do histórico térmico da mistura.

De acordo com Mehta e Monteiro (2014), a microfissura na zona de transição pode ocorrer antes mesmo do elemento estrutural ser carregada, devido aos movimentos diferenciais durante o período de esfriamento e a secagem da estrutura. Além de cargas de impacto de curta duração, retração por secagem e cargas mantidas a altos níveis de tensão promovem o aumento do número e tamanho das microfissuras.

2.1.1 Hidratação, maturação e cicatrização

O concreto é um compósito formado por agregados e materiais cimentícios que hidratam e ganham resistência ao longo do tempo. O enrijecimento da matriz cimentícia, ocorre pela reação de hidratação entre os compostos aluminatos e silicatos (presentes no cimento ou nas adições minerais) e a água. Este processo é o principal responsável pelo ganho de resistência ao longo do tempo. Assim, o conceito de grau de hidratação dos grãos dos materiais cimentícios é fundamental para entender o mecanismo de ganho de resistência, pois este processo é responsável por formar o C-S-H, bem como o monosulfoaluminato, que garantem a formação de uma microestrutura rígida, sólida e resistente fornecendo a estabilidade do concreto (Wang et al., 2023). Por outro lado, o ganho de resistência em um concreto atinge seu ápice quando os grãos dos materiais cimentícios se hidratarem por completo.

Quando o cimento e alguns materiais cimentícios reagem quimicamente com a água, produzem uma reação exotérmica liberando calor para o ambiente. Assim, esse comportamento pode ser associado a um índice de maturação do concreto, que pode ser determinado a partir da correlação da evolução de temperatura e do ganho de resistência pela hidratação. Assim, a maturidade do concreto indica o grau de progresso de sua cura, implicando no ganho de resistência e rigidez, em função da hidratação dos materiais cimentícios, contado a partir de sua produção.

O grau de hidratação e de maturação do concreto é associado ao um avanço nas suas propriedades físicas, mecânicas e de durabilidade, pois as variações de volumes estão ligadas à disponibilidade de água para hidratação. Muitas pesquisas tem atribuído o grau de hidratação e de maturação do concreto ao efeito de cicatrização da matriz cimentícia, por processo autônomo ou autógeno, independente da presença de dano nesta matriz. Outros autores, só consideram o efeito de cicatrização quando o concreto sofre um dano (microfissura, fissura), e, este dano, for reparado por algum agente autógeno ou autônomo. Deste modo, entende-se que o efeito de cicatrização em um concreto só ocorre se, seu dano, for sanado por um processo autógeno ou autônomo.

2.2 Fissuração e durabilidade

Segundo Filho; Helene e Boni (2022), a fissura pode ser definida como uma descontinuidade de pequena abertura, que pode surgir na matriz de concreto, a partir das ações de forças, que geram tensões de tração superiores a capacidade resistente do material do elemento estrutural.

O concreto pode apresentar fissuras em diferentes estágios, durante a execução, serviço ou devido a ações acidentais. Condições adversas de exposição, juntamente com uma cura inadequada, podem resultar em fissuras de retração durante a maturação. Pesquisas mostram que essas fissuras são frequentemente relatadas como o principal problema na construção, representando 90% dos casos, sendo que 73% desses problemas são causados pela entrada de água (Gardner et al., 2018).

De acordo com Medeiros et al. (2015), a durabilidade é fundamental nos elementos estruturais de concreto armado (concreto + armadura), buscando a capacidade de resistir às condições para as quais foram projetadas ao longo de sua vida útil. Um concreto é considerado durável quando é capaz de suportar o processo de deterioração ao qual estará exposto, mantendo a resistência necessária e condições de uso ao longo de um período específico ou da vida útil tradicionalmente esperada. No entanto, uma alta resistência mecânica do concreto não garante, por si só, a durabilidade da estrutura (Neville, 2016).

Limites dimensionais e impacto na durabilidade

Não é convencionada uma definição dimensional universal para as microfissuras, porém é sugerido que o limite máximo adotado seja de 0,1 mm, considerada como a menor dimensão que geralmente pode ser localizada a olho nu (Slate; Hover, 1984). Entretanto, fissuras menores que 0,1 mm são mais difíceis de ser detectadas e controladas. Devido a heterogeneidade microestrutural do concreto, as microfissuras são distribuídas de forma aleatória e densa dentro do compósito. Essas microfissuras podem difundir-se, ligar e conectar-se, criando-se uma rede de fissuras, fazendo com que acelere processo de deterioração do concreto a partir do aumento da permeabilidade (Li; Li; Xu, 2019).

Em estruturas de concreto que operam em condições de serviço, as normativas de projeto, como a NBR 6118 (ABNT, 2023) estabelecem limites para a espessura máxima permitida de fissuras superficiais, variando entre 0,1 mm e 0,4 mm, dependendo da classe de agressividade ambiental. A faixa de fissuras permitidas é onde a maioria dos sistemas de autocorreção pode proporcionar uma cicatrização eficiente, resultando no maior impacto potencial (Hu et al., 2018; Roig-Flores et al., 2016; Selvarajoo et al., 2020; Sidiq et al., 2019; Sisomphon; Copuroglu; Koenders, 2012).

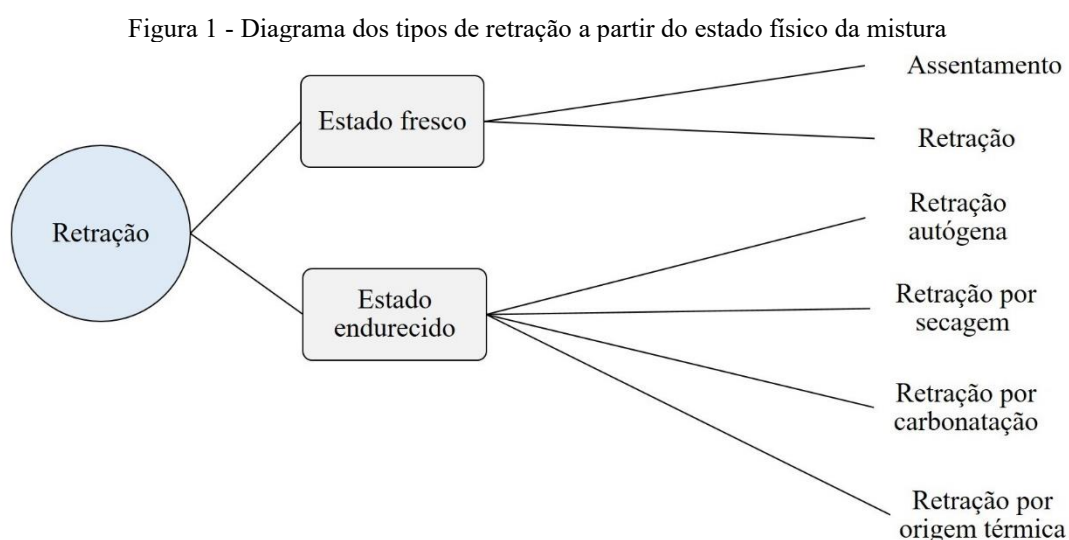
Mecanismos de transporte de agentes agressivos

A Análise de interações entre os mecanismos de transporte e a durabilidade do concreto mostra que a durabilidade das estruturas de concreto está intrinsecamente relacionada à

estrutura dos poros, microfissuras na pasta de cimento e aos mecanismos de ingresso e transporte de agentes agressivos, independentemente de seu estado físico (Hilsdorf; Kropp, 1995). Esses mecanismos de transporte, como permeabilidade, difusão, absorção capilar e migração, podem atuar em conjunto, tornando desafiador o desenvolvimento de modelos precisos para descrever seu comportamento complexo (Da Silva, 2022).

2.2.1 Causas de ocorrência de fissuração

A ocorrência das fissuras pode ser dividida a partir do estado físico da mistura cimentícia, as que se originam no estado fresco e aquelas que surgem no concreto após o endurecimento (Figura 1). Essa distinção, é importante no que diz a respeito o grau de hidratação da matriz ligante e, sua classificação, é útil diante o processo de cicatrização, pois podem apontar indícios no potencial de recuperação das fissuras.



Fonte: Adaptado de Valverdes (2023)

2.2.1.1 Retração no estado fresco

As principais causas da fissuração no concreto fresco podem ser atribuída à retração interna, à retração da superfície causada pela rápida evaporação da água (dessecação superficial), ou pela movimentação das fôrmas (Dal Molin, 1988).

Fissuras por assentamento ou retração ocorrem pela perda de água por evaporação pela superfície exposta do concreto. A intensidade da retração é função da quantidade de água perdida pela superfície exposta do concreto, sendo influenciada pela temperatura, pela umidade relativa do ambiente e pela velocidade do vento (Neville, 2016). Assim, a fissuração por retração no concreto antes do final de pega, pode ocorrer quando a velocidade da evaporação

da água, na superfície exposta do concreto, for maior que a taxa de água interna que migra à superfície por exsudação (Diniz; Fernandes; Kuperman, 2022).

O surgimento de fissuras também pode ocorrer sobre o assentamento uniforme. Os obstáculos como as armaduras ou agregados de maiores dimensões, assim como a própria fôrma pode restringir a homogeneidade deste assentamento, provocando o surgimento de fissuras, denominadas por fissuração por assentamento plástico (Dal Molin, 1988).

2.2.1.2 Retração no estado endurecido

2.2.1.2.1 Fissuras de origem físico-química

As variações volumétricas também são suscetíveis a formação de fissuras, que após a ocorrência da pega da pasta de cimento, acontecem por retração ou expansão. Variações de volume estão associadas a disponibilidade de água para hidratação, pois se existir fornecimento de água suficiente para ter continuidade da hidratação, tem-se a expansão. Por outro lado, fatores como a perda de água, ou quando a movimentação de água cessa, ou a hidratação da pasta é interrompida, podem promover a retração (Neville, 2016).

Concretos produzidos com cimento Portland podem sofrer quatro formas principais de retração:

1. Retração Autógena: Ocorre pela redução do volume do material cimentício durante a hidratação do cimento, devido ao consumo de água interna (Tavares, 2008). Essa variação de volume da pasta ocorre no interior da massa de concreto, sendo a contração restringida pelo esqueleto rígido formado pelas partículas de agregados (Neville, 2016).
2. Retração por Secagem: Consiste na contração irreversível decorrente da perda de água do concreto quando exposto ao ar com umidade inferior. Entre as principais causas de fissuração está a deformação ligada à perda de umidade para o meio ambiente (Equipe de Furnas, 1997).
3. Retração Térmica: Ocorre devido a gradientes de temperatura e umidade (Bianchin, 2018). As fissuras podem ser causadas por diferentes coeficientes de dilatação térmica dos materiais, diferentes condições ambientais, fadiga por ciclos de molhagem e secagem, ou grandes oscilações e choques térmicos. Nas primeiras idades, o gradiente de temperatura gerado pela dissipação do calor das reações de hidratação do cimento é mais relevante do que as condições ambientais (Thomaz, 2020).
4. Retração por Carbonatação: O hidróxido de cálcio resultante do processo de hidratação de cimento Portland, na presença de CO_2 e umidade, pode reagir quimicamente formando carbonato de cálcio e com evaporação da

umidade, ocorre a retração por carbonatação. Sua intensidade é vinculada à proporção de água disponível nos poros (Thomaz, 2020).

2.2.1.2.2 Fissuras de origem mecânica e de restrição

As fissuras de origem mecânica são causadas por tensões ou restrições externas que impedem a movimentação natural do concreto, gerando tensões de tração exercida pelas fôrmas, que podem gerar tensões de tração no concreto.

1. Movimentação e restrição de fôrmas: O surgimento de fissuras pode ser desencadeado pelo movimento e pela restrição exercida pelas fôrmas, gerando tensões de tração no concreto. Isso inclui falhas no sistema de escoramento, falta de travamento das escoras, sobrecarga não prevista ou problemas na confecção dos moldes (Dal Molin, 1988). Essas fissuras podem ser mais severas nas primeiras horas, até que o material entre na fase de endurecimento e comece a ganhar sua própria resistência (Bianchin, 2018).
2. Retração diferencial (restrição interna): O concreto na fase endurecida em condições de exposições atmosféricas normais no que se refere aos efeitos da retração por secagem ou retração térmica, devido a diferença entre os módulos de elasticidade da matriz de concreto e do agregado graúdo, podem surgir deformações diferenciais entre os dois, causando fissuras na zona de transição entre a matriz argamassa e o agregado graúdo (Poletto, 2015).

2.2.1.3 Controle e caracterização de fissuras

A prevenção de fissuras em estruturas de concreto pode ocorrer através de alguns métodos usuais como, maior detalhamento e especificações na fase de planejamento e execução, desenvolvimento de dosagens adequadas às condições climáticas, aos materiais e ao meio o qual a estrutura será exposta ajustados as proporções ideais, dentre outros, têm grande valia para evitar a fissuração. Nesse sentido, a cura adequada do concreto e a manutenção de um ambiente local com alta umidade resultam em vantagens como um aumento maior na resistência do concreto, especialmente nas idades iniciais, um aumento no módulo de elasticidade durante as primeiras idades, e também uma diminuição na retração por secagem e na fluência (Diniz; Fernandes; Kuperman, 2022).

Referente as características geométricas básicas das fissuras são consideradas: a abertura, onde se mede a distância perpendicular entre as bordas da fissura; a extensão; e a profundidade que mede a distância do ponto mais profundo do interior até a superfície (Watanuki Filho, 2021).

Uma vez que ingresso de agentes agressivos em elementos cimentícios é facilitado pela fissuração, é importante o controle de sua espessura.

A NBR 6118 (ABNT, 2023) não estabelece restrição à abertura de fissuras para o concreto simples. Entretanto, para o concreto armado a abertura máxima característica de fissura (W_k) aceitável é menor ou igual a 0,4 mm (para a classe de agressividade mais branda) a 0,2 mm (para a classe IV - ambientes mais severos). Estruturas expostas a condições agressivas são dimensionadas considerando esse controle de fissuras, com o objetivo de assegurar a durabilidade, além de atender aos requisitos mecânicos tradicionais. É justamente na faixa de fissuras permitidas pelas normativas que a maioria dos sistemas de autocorreção pode proporcionar uma cicatrização eficiente, resultando no maior impacto potencial (Roig-Flores; Formagini; Serna, 2021).

2.2.1.4 Benefícios da cicatrização e sustentabilidade

A utilização de um concreto com potencial de cicatrização, poderia proporcionar maior durabilidade dos elementos estruturas, tornando-os mais resilientes em ambientes desafiadores (Roig-Flores; Formagini; Serna, 2021).

O efeito de cicatrização no concreto, promove alguns benefícios, como a redução da taxa de deterioração, extensão da vida útil e redução da frequência de reparo e custo ao longo do ciclo de vida. Esses benefícios podem implicar diretamente no desenvolvimento da sustentabilidade ambiental, pois menos reparos resultam em redução de uso de recursos naturais e também na redução no consumo de energia e emissão de poluentes na produção e transporte de materiais (Li; Herbert, 2012). Segundo Li e Herbert (2012), as preocupações relacionadas a deterioração das estruturas de concreto não se limitam somente ao custo econômico da reparação e reabilitação, mas também aos custos sociais e ambientais.

2.3 Fenômeno da cicatrização cimentícia

O fenômeno de cicatrização pode ser classificado em dois tipos, a autógeno e autônomo (RILEM, 2013). A cicatrização por mecanismos de indução autógena é a capacidade intrínseca da própria matriz cimentícia de gerar subprodutos de hidratação que promovam a auto reparação, seja ela parcial ou total, sem a necessidade de agente externo. A presença de 20% a 30% de partículas de cimento não hidratadas em um concreto, já é suficiente para reagir com a água ou umidade interna, resultando em produtos de hidratação contínua, que ajudam no fechamentos das fissuras (Homma; Mihashi; Nishiwaki, 2009; RILEM, 2013; Van Tittelboom; De Belie, 2013).

Já a cicatrização por mecanismos de indução autônoma ocorre por reações de agentes específicos que são adicionados intencionalmente na matriz cimentícia para esta finalidade. A

cicatrização induzia por agentes autônomos complementa a cicatrização induzida por agentes autógenos. O agente autônomo pode ser adicionado a mistura cimentícia de diferentes formas: diretamente, incorporados em cápsulas ou através de redes vasculares. Assim, diferentes agentes, como: PSA (He et al., 2019; Mignon et al., 2019; Sun et al., 2019), misturas cristalinas (Cuenca; Tejedor; Ferrara, 2018; Ferrara; Krelani; Carsana, 2014; Roig-Flores et al., 2016; Takagi, 2013), silicato de sódio microencapsulado (Al-Tabbaa et al., 2019; Beglarigale et al., 2018; Kanellopoulos et al., 2017), tubos com adesivos químicos (Dry, 2000; Gilabert et al., 2017) e as bactérias (Li; Li; Xu, 2019; Palin; Wiktor; Jonkers, 2016; Pawar; Parekar, 2018; Vijay; Murmu; Deo, 2017), são empregadas com a finalidade de potencializar o efeito de cicatrização em materiais cimentícios.

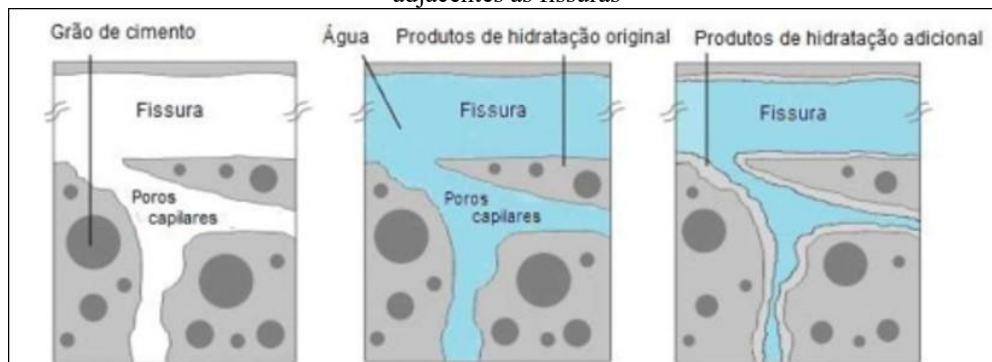
2.3.1 Cicatrização por indução autógena

A cicatrização por indução autógena é um processo natural do concreto e não necessita de agentes adicionais além do cimento Portland e suas adições (materiais carbonáticos, cimentantes ou pozolânicos), para promover a cicatrização da matriz cimentícia. Em suma, as partes fundamentais no processo da cicatrização por indução autógena são a reação de carbonatação formada entre o CO_2 e o Ca(OH)_2 e a hidratação continua dos grãos de cimento parcialmente não hidratados (De Belie et al., 2018; Edvardsen, 1999; Hearn, 1998; Van Tittelboom; De Belie, 2013).

Referente a durabilidade é importante entender que a hidratação adicional existente na matriz de cimento adjacentes às superfícies de fissuras se tornem muito mais densa. Além do que o processo de cicatrização não se limita somente as fissuras, mas se estende a todos os poros que se ramificam a ela, independentemente se há ligação com o meio. Dessa forma, o aumento da densidade da pasta de cimento, em função da maturação, pode ajudar na redução da penetração de agentes agressivos, colaborando no aumento da vida útil dos elementos estruturais (Huang et al., 2016).

A Figura 2 apresenta um esboço do conceito de hidratação adicional de partes do grão de cimento ainda não hidratado (na pasta de cimento adjacentes às superfícies da fissura), promovida pela água adicional vinda da fissura no processo de cicatrização por indução autógena, conforme o ponto de vista Huang et al. (2016).

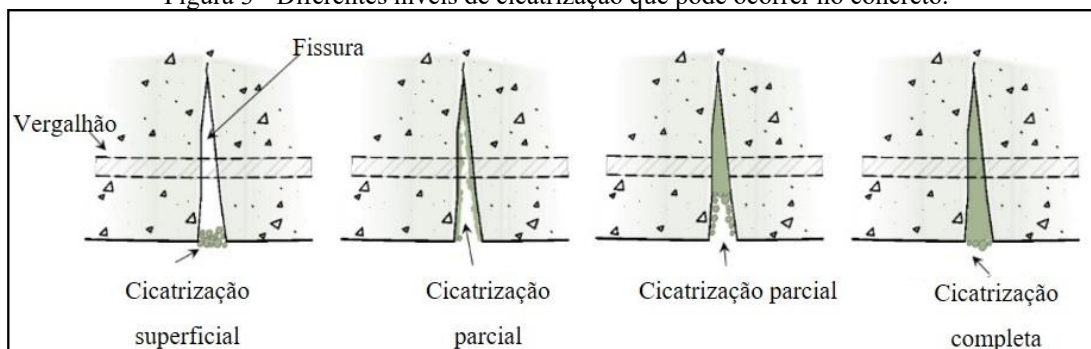
Figura 2 - Aumento da densidade da matriz cimentícia ocasionada pela hidratação adicional nas regiões adjacentes às fissuras



Fonte: Huang et al. (2016)

Segundo os autores Wu, Johannesson e Geiker (2012), os fatores fundamentais no mecanismo da cicatrização em concretos, remetem ao processo de formação de carbonato de cálcio e a hidratação contínua de parte dos grãos ainda não hidratados de cimento Portland. Isto é, a cicatrização de fissuras em concretos nas primeiras idades (até 28 dias) está relacionada à hidratação contínua dos grãos de cimento parcialmente hidratados, enquanto em concretos com idades superiores a 28 dias, ocorre principalmente devido à formação de carbonato de cálcio. Em muitos casos, mais de um desses processos pode ocorrer simultaneamente. E de acordo com Yang et al. (2009) e Roig-Flores, Formagini e Serna (2021), esse efeito de cicatrização pode ser parcial, e em casos menos comuns, pode ocorrer o preenchimento completa da fissura (Figura 3).

Figura 3 - Diferentes níveis de cicatrização que pode ocorrer no concreto.



Fonte: Adaptado de Roig-Flores, Formagini e Serna (2021)

O tipo de cimento Portland desempenha um papel fundamental na cicatrização, influenciando as propriedades de hidratação da matriz cimentícia. Normalmente as matérias primas utilizadas na produção do cimento Portland são ricas em calcário, sílica, alumina e óxido de ferro. A interação desses compostos em fornos rotativos à temperatura de 1450 graus deriva uma série de produtos mais complexos quando se alcançam o equilíbrio e tem-se o clínquer, a base do cimento Portland.

Embora os compostos do clínquer sejam a base do cimento Portland e exerçam grande influência nos processos de hidratação das matrizes cimentícias, sua composição mineralógica pode variar entre diferentes fábricas, devido às particularidades de cada jazida. Esses compostos são comumente representados por notações abreviadas dos óxidos: $\text{CaO} = \text{C}$, $\text{SiO}_2 = \text{S}$, $\text{Al}_2\text{O}_3 = \text{A}$ e $\text{Fe}_2\text{O}_3 = \text{F}$ (Neville, 2016). No Quadro 1 estão listados os principais compostos do cimento Portland, a denominação de cada composto e suas respectivas composição e abreviaturas. Além dos principais compostos apresentados no Quadro 1, existem os compostos secundários, como MgO , TiO_2 , Mn_2O_3 , K_2O e Na_2O , geralmente constituem um pequeno teor da massa do cimento.

Quadro 1 - Principais compostos do cimento Portland

Nome do composto	Composição em óxidos	Abreviatura
Silicato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_3S
Silicato dicálcico	$2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$	C_2S
Aluminato tricálcico	$3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$	C_3A
Ferroaluminato tetracálcico	$4\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$	C_4AF

Fonte: Neville (2016)

O composto formado por elementos como silicatos (C_3S e C_2S) e aluminatos (C_3A e C_4AF) desempenham o papel principal nas reações que promovem o efeito de cicatrização por meio autógeno. Os processos de reações que ocorrem para alcançar tal efeito são os mesmos que ocorrem no processo normal de hidratação do cimento. Isso envolve a formação de C-S-H e CH através da reação do C_3S (alita) e do C_2S (belita) com a água (Ziegler, 2020).

Devido ao maior teor de cálcio, o C_3S tende a reagir mais rapidamente, em comparação ao C_2S , sendo responsável pela resistência do concreto nas primeiras idades. No entanto, o C_2S reage mais lentamente, ficando responsável pela resistência nas idades mais avançadas em concreto (Li et al., 2013). Somente ocorre a hidratação contínua, quando em determinados grãos de cimento Portland, ainda existir parte dos compostos ainda não hidratados. Dessa forma, o grão de cimento parcialmente hidratado encontra-se envolvido por silicato de cálcio hidratado e hidróxido de cálcio, formando-se um encapsulado natural de minerais reativos. O material encapsulado quando é exposto à atmosfera através da fissuração do concreto e na presença de água começa a reidratar, apresentando uma expansão volumétrica que pode ser capaz de preencher as fissuras, aos poucos, permitindo assim, o fechamento parcial ou total (Li et al., 2013).

Assim, o potencial de indução autógena da cicatrização apresenta limitações, além da espessura da fissura ser um fator limitador no processo de fechamento parcial ou total. Alguns

estudos indicam que a dimensão máxima para fechamento completo da fissura por indução autógena varia de 0,06 mm (Wang et al., 2019) a 0,20 mm (Roig-Flores; Serna, 2020; Sangadji, 2017; Vijay; Murmu; Deo, 2017). Em um período de um ano, foi observada cicatrização de até 0,30 mm (Suleiman; Nehdi, 2018). No entanto, em condições de imersão em $\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$ (carbonatação) durante 90 dias, a cicatrização por indução autógena pode reparar fissuras de até 0,45 mm (Yıldırım et al., 2018).

Outro fato que influencia na resposta de cicatrização do compósito cimentício é a exposição a umidade, que segundo Bianchin (2018) tem início com a entrada de água pela fissura. e então, a condição de exposição à umidade tem grande influência no processo por indução autógena. Entretanto, ambientes úmidos, por si só, não são capazes de promover a cicatrização efetiva, sendo necessário o contato direto com a água por um período prolongado de tempo (Roig-Flores; Serna, 2020; Snoeck; De Belie, 2016).

Em resumo, a cicatrização por indução autógena pode ocorrer em qualquer material a base de cimento Portland, independentemente de seu tipo ou composição. No entanto, é necessário atentar-se a algumas condições para ser efetiva, como a espessuras das fissuras e a presença de água (Roig-Flores; Formagini; Serna, 2021). Além da presença de água, outros fatores podem afetar no fenômeno da cicatrização como as proporções dos materiais na mistura (Dhir; Sangha; Munday, 1973), o estado de tensão e a estabilidade ao longo da fissuração (Ngab; Nilson; Slate, 1981), assim como as condições térmicas e higrométricas (Lauer; Slate, 1957; Reinhardt; Jooss, 2003). E ainda, o tipo de cimento, adições minerais em sua composição, idade e a relação a/c.

2.3.1.1 Potencializadores da cicatrização autógena

A potencialidade de cicatrização em materiais cimentícios está relacionada ao tipo e consumo de cimento Portland, idade de surgimento e espessura da fissura, bem como a presença significativa de água. O tipo e o consumo de cimento irão determinar a disponibilidade de Ca(OH)_2 para a formatação do produto de cicatrização, o carbonato de cálcio. A idade de formação da fissura interfere na disponibilidade de grão parcialmente hidratados. O ambiente de exposição irá determinar a presença ou disponibilidade de água, porém não há relatos na literatura referente a quantidade de água mínima necessária para resultar em produtos de cicatrização. Já a espessura das fissuras vai interferir na velocidade do fechamento, onde fissuras com espessuras menores tendem a ter um fechamento mais rápido. Isso ocorre devido quantidade reduzida de produtos de cicatrização para ocorrer a selagem, quando comparados ao fechamento de fissuras mais espessas (Ferrara et al., 2018).

No Quadro 2 tem-se os fatores que influenciam no processo de cicatrização, segundo Rooij, Schlangen e Joseph (2013 *apud* Petry, 2021).

Quadro 2 - Fatores que influenciam o processo de cicatrização autógena

Concreto	Água	Fissura
Composição e teor de cimento	Pressão	Espessura
Composição e teor de adição mineral	Gradiente de pressão	Profundidade
Composição dos agregados	Dureza	Geometria
Idade	pH	Ramificação
Condições de cura	Temperatura	Multifissuração

Fonte: Adaptada Rooij, Schlangen e Joseph (2013 *apud* Petry, 2021).

Composição do cimento Portland

A composição do cimento Portland pode influenciar nas propriedades de cicatrização do concreto. No Brasil são comercializados dez tipos de cimento Portland, com a nomenclatura variando de I ao V, a depender da classe e da quantidade de adições minerais em sua composição. Logo, cada tipo, finura e composição do cimento pode oferecer um potencial diferente no processo de cicatrização do concreto (Bianchin, 2018).

A finura do cimento Portland gerencia sua velocidade de hidratação. De acordo Gomes, Pinto e Pinto (2013), as partículas menores dissolvem-se e hidratam-se mais rapidamente em contato com a água, com maior probabilidade de se hidratarem por completo. Por outro lado, partículas maiores hidratam-se lentamente, pois são envolvidas pelos compostos hidratados e seu núcleo permanece não hidratado e com restrição ao acesso a água. Partículas com tamanho inferior a 50 μm tem maior probabilidade de se hidratarem completamente, enquanto as partículas maiores apresentam maior dificuldade para atingir a hidratação completa (Mehta; Monteiro, 2014). Logo, o processo de hidratação inicia-se na superfície dos grãos de cimento, sendo a área superficial total do cimento que representa o material disponível para hidratação, portanto a velocidade de hidratação vai depender da finura dos grãos de cimento (Neville, 2016). Logo, cimentos mais finos aceleram a resistência do concreto devido à maior superfície específica das partículas, resultando em hidratação mais rápida. A finalização da hidratação de um grão de cimento Portland pode ser provocada por três situações: por não possuir mais nenhuma parte das partículas de cimento na forma anidra; quando a água disponível não consegue atingir os grãos de cimentos não hidratados; ou quando não há mais água disponível para dar continuidade ao processo de hidratação (Pagé; Spiratos, 2000).

A influência da composição do cimento se reflete na velocidade de hidratação e, devido a sua finura e maior quantidade de clínquer, o cimento Portland de Alta Resistência Inicial (CP V ARI) promove hidratação mais rápida nos estágios iniciais, em torno de até 7 dias, enquanto

o cimento Portland com adição mineral (CP-II, CP-III e CP-IV), por exemplo, resultará em reações de hidratação mais lentas, reduzindo-se a desproporção quando comparado com CP V ARI aos 28 dias de idade (Mehta; Monteiro, 2014). Portanto, concretos produzidos com cimento Portland composto com adições minerais, tipos II, III ou IV, podem ou não ter a cicatrização mais efetiva, ao ser comparado aos concretos com CP V ARI. Embora ocorra hidratação contínua das partículas de adição mineral (escória de alto forno, pozolanas ou material carbonático), estas podem ser mais vulneráveis à carbonatação devido à alta permeabilidade ao CO_2 e baixo teor de Ca(OH)_2 produzido. No entanto, o baixo teor de Ca(OH)_2 e a estrutura de poros mais refinada podem aumentar a resistência química desses concretos (De Belie et al., 1996).

Os produtos resultantes da hidratação do cimento Portland como o C-S-H e o Ca(OH)_2 são fundamentais para que o concreto se autocicatrise suas fissuras por indução autógena. Isso pode ocorrer pela formação tardia de C-S-H devido à hidratação de partes dos grãos na forma anidra ou pela hidratação contínua de silicatos (C_3S e C_2S), dependendo da idade e abertura da fissura. Também pode ocorrer pela carbonatação do Ca(OH)_2 , gerado nas reações de hidratação dos silicatos, caso não tenham sido consumidos previamente pelas reações com adições minerais presentes. Isso se aplica a cimentos compostos (Siddique; Khan, 2011) ou pela carbonatação (Rooij; Schlangen; Joseph, 2013; Huang et al., 2016; Sisomphon; Copuroglu; Koenders, 2012; Yang et al., 2009) ocasionada pela lixiviação deste constituinte na área fissurada.

O uso de adições como sílica ativa, cinzas volantes e cinzas de casca de arroz tem sido benéfico na melhoria da resistência do concreto contra a penetração de agentes agressivos (Ayub; Shafiq; Khan, 2013; Gjorv, 1983; Neville, 2016; Siddique; Khan, 2011; Sil; Roy, 2015; Zayed et al., 2016). As pozolanas contribuem no desempenho mecânico de um concreto e reduzem a porosidade da matriz cimentícia, mantendo a mesma relação a/c. Isso justifica sua inclusão nas misturas de concreto e o uso de cimentos compostos com frações de pozolanas para substituir o clínquer (Helene; Andrade, 2010).

Além das adições minerais ativas em cimentos compostos, a norma NBR 16697 (ABNT, 2018) permite cimentos compostos com uma porcentagem em massa de material carbonático entre 11% e 25%. O *filler* tido como material carbonático, tem um efeito puramente físico nas propriedades da matriz de cimento, podendo melhorar a trabalhabilidade, a densidade, a permeabilidade, reduzir a exsudação capilar e minimizar a tendência à fissuração, dependendo da quantidade utilizada (Siddique; Khan, 2011).

Relação água/cimento

A relação água/cimento (a/c) tem um papel importante nas propriedades físico-mecânicas do concreto, como porosidade, resistência, durabilidade e também no comportamento de fissuração ao longo do tempo. Relações a/c elevadas aumentam a probabilidade de lixiviação do Ca(OH)_2 , devido à maior porosidade interna (Neville, 2016). O Ca(OH)_2 é altamente solúvel, com um pH de cerca de 12,6 (Nonat, 2014). No entanto, essa condição pode ser afetada pela lixiviação, dependendo das condições de cura, enfraquecendo a transição entre a pasta e os agregados no concreto. Relações a/c menores aumentam a resistência do concreto, tornando a abertura de fissuras frágil (Mehta; Monteiro, 2014). Entretanto, com menos água, maior a probabilidade de ocorrer hidratação parcial dos grãos de cimento. Isso resulta em concretos com menor porosidade, tornando-os mais suscetíveis ao efeito de cicatrização por meio de produtos de hidratação residual (Na et al., 2012). Esses grãos não hidratados podem ser identificados na microestrutura de pastas de cimento hidratadas em um período posterior, à medida que danos como fissuras se desenvolvem.

Os compósitos cimentícios curados em água possuem uma relação mínima de a/c para que ocorra a hidratação completa dos grãos de cimento, que é de aproximadamente 0,36 (Neville, 2016). Portanto, a cicatrização autógena, que é sustentada pela hidratação da matriz, é influenciada pela quantidade de cimento não hidratado presente, além da presença de materiais complementares capazes de manter essa continuidade.

Cura e das condições do ambiente

A cura do concreto tem objetivo principal em garantir a continuidade das reações de hidratação do cimento (Neville, 2016). A condição de umidade é uma grande influência no processo e na capacidade de cicatrização das fissuras (Huang et al., 2016; Roig-Flores et al., 2015). Referente ao meio de exposição, concretos submetidos a ciclos alternados de cura em condições úmidas e secas, em presença de ar contendo CO_2 , tendem a apresentar melhorias na cicatrização autógena (Sisomphon; Copuroglu; Koenders, 2013).

A cicatrização de fissuras em pastas de cimento Portland, envolve a formação de carbonato de cálcio, resultante da reação entre o hidróxido de cálcio, liberado durante a hidratação dos silicatos, e o dióxido de carbono disponível no meio. Esse processo, conhecido como carbonatação do hidróxido de cálcio, é responsável por cerca de 80% dos produtos gerados (Huang et al., 2016). Isso sugere que, a formação de produtos nas fissuras, não se deve apenas à contínua hidratação dos grãos ainda não hidratados presente na matriz, mas também à

carbonatação do Ca(OH)_2 como resultado da reação. Os processos de cicatrização nos ciclos de molhagem e secagem, com a formação de carbonato de cálcio, é um mecanismo fundamental na contribuição para este processo (Maes; Snoeck; De Belie, 2016).

Cuenca, Tejedor e Ferrara, (2018) examinaram o efeito da cicatrização em concretos com fissuras menores que 250 μm , em três diferentes condições de exposição: imersas em água, ao ar livre e em ciclos úmidos e secos. A pesquisa revelou que apenas as amostras imersas em água ou parcialmente úmidas, com fissuras menores que 300 μm , conseguiram selar completamente. Em contraste, as amostras expostas ao ar livre apresentaram uma capacidade limitada de selar as fissuras. Além disso, os autores observaram a presença de produtos hidratados ao longo das fissuras, como resultantes de reações de hidratação contínua, carbonatação e cristais de etringita.

Roig-Flores et al. (2015) investigaram a cicatrização em concretos produzidos com adições cristalizantes em quatro ambientes diferentes: imerso em água sem renovação, contato com água sob pressão, câmara úmida e exposição ao ar sem influências externas. Os concretos imersos em água tiveram a taxa mais alta de cicatrização (0,90), seguidos pelos que ficaram em contato com a água, na câmara úmida, e o menor índice foi observado no concreto exposto ao ar. A pesquisa mostrou que uma oferta maior de água resultou em uma melhor resposta para a cicatrização das fissuras do concreto.

Cuenca e Serna (2021) pesquisaram sobre o efeito da cicatrização autógena em fissuras de concretos reforçados com fibra, expostos em quatro ambientes: câmara úmida, em temperatura constante (20°C) e umidade relativa de 100%, submerso em água (temperatura de 25°C), imersos em água do mar artificial e cura térmica, onde dois dias imersos em água a 90°C e vinte oito dias em câmara úmida com temperatura de 20°C e 100% de umidade relativa. Os concretos foram avaliados em dois níveis de aberturas de fissuras, microfissuras (< 150 μm) entre 10 μm e 20 μm e as macrofissuras (> 300 μm) de até 400 μm . Os autores concluíram que a temperatura e a imersão contínua em água, bem como a combinação destes fatores, foram cruciais para melhorar a cicatrização. A maior eficácia na cicatrização das fissuras foi observada em ambiente de cura térmica, seguidas pela imersão em água, imersão em água do mar e exposição em câmara úmida.

A exposição a temperatura elevada favoreceu e acelerou a cicatrização das fissuras, pois os gradientes térmicos tem influência nos processos de transporte de água por lixiviação e na velocidade das reações químicas (Reinhardt; Jooss, 2003).

Assim, a cicatrização também pode ocorrer devido à precipitação da carbonatação dentro da fissura. O processo de carbonatação e sua velocidade dependem do nível de saturação do concreto e da pressão parcial de CO_2 , a qual é influenciada pelas condições ambientais, como umidade relativa, tempo e volume de exposição à água na superfície do concreto, além das condições de temperatura (Von Greve-Dierfeld et al., 2020) .

Espessura e geometria da fissura

De acordo com Van Tittelboom e De Belie (2013), existem divergências entre autores, em relação a abertura máxima da fissura que pode ser fechada por processo de cicatrização por indução autógena , envolvendo valores entre 50 μm e 300 μm . Ainda, abertura de fissuras em concreto menos espessas estão mais propensas a serem totalmente seladas do que as fissuras mais espessas.

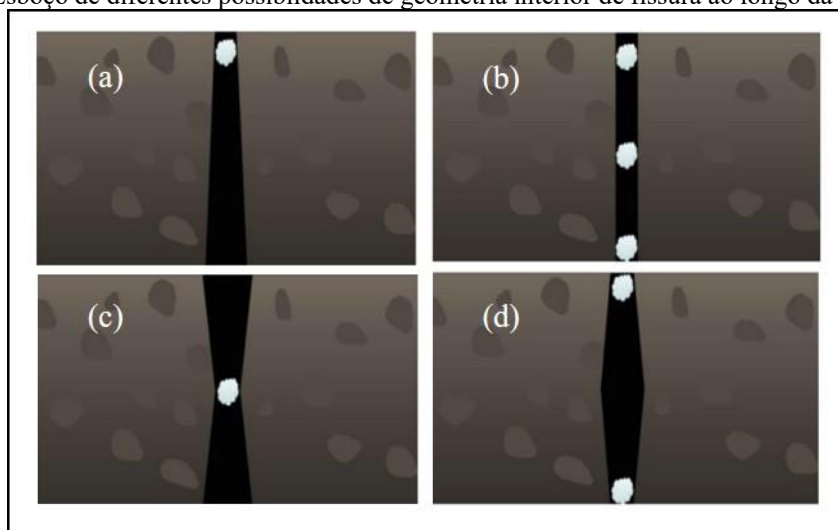
A cicatrização por indução autógena em fissuras (com abertura de 50 μm a 200 μm) de concretos de alta resistência em função da temperatura (20°C a 80°C) foi estudada por Reinhardt e Jooss, (2003). Os autores observaram que, fissuras com espessuras menores, apresentaram cicatrização mais rápida, quando comparadas com espessuras maiores. A porcentagem de fechamento é dependente da espessura inicial da fissura (Maes; Snoeck; De Belie, 2016).

A fissuração causada por tensões de flexão em elementos cimentícios gera variação dimensional na espessura das fissuras ao longo da profundidade, normalmente assumindo a forma de “V”. Na parte inferior da peça as fissuras apresentam larguras maiores, que vão diminuindo gradativamente a medida que a fissura se direciona a extremidade superior da estrutura (Ferrara et al., 2018).

A geometria da fissura, entre a superfície e o interior do concreto, é uma característica que deve ser considerada, pois os produtos de cicatrização podem iniciar mais facilmente em zonas de menor espessura e, conseqüentemente, essa cicatrização pode ocorrer no interior da fissura, mas não necessariamente na superfície. Na Figura 4 tem-se por Roig-Flores et al. (2015) as diferentes possibilidades de geometria interior de fissura ao longo da profundidade: tronco piramidal (Figura 4 (a)), uniforme (Figura 4 (b)), formas convexas (Figura 4 (c)) e côncavas (Figura 4 (d)) e seu pontos mais viáveis para formação de produtos cicatrização.

Dependendo da geometria da fissura e do grau de fechamento parcial, o material de cicatrização será observado apenas nas superfícies das paredes da fissura ou como um pequeno depósito.

Figura 4 - Esboço de diferentes possibilidades de geometria interior de fissura ao longo da profundidade



Fonte: Adaptada de Roig-Flores et al. (2015)

Idade do concreto

Concreto fissurado nas primeiras idades, possui maior quantidade de partículas de cimento Portland parcialmente hidratadas, o que pode contribuir para uma cicatrização mais efetiva das fissuras por processo de hidratação contínua. Com o aumento da idade, o concreto tende a ter maior parte dos grãos de cimento Portland hidratados, restando uma fração menor de grão de cimentos hidratados parcialmente, reduzindo assim, a formação de produtos de cicatrização (Schlangen; Ter heide; Breugel, 2007). Embora, não existam estudos que relacionem o estado de hidratação do cimento Portland com este potencial de cicatrização das fissuras (Qureshi; Kanellopoulos; Al-Tabbaa, 2018).

Para idades mais avançadas, a cicatrização das fissuras é influenciada pela formação do carbonato de cálcio na matriz cimentícia, onde a formação dos cristais são decorrentes da união do íon de cálcio (Ca^{2+}) e do íon de carbonato (CO_3^{2-}) presente na água (Azarsa; Gupta; Biparva, 2019).

Na maior parte dos estudos realizados sobre cicatrização de fissuras em compósitos cimentícios, os autores avaliaram em apenas uma idade de fissuração (Quadro 3). Por sua vez, Cappellessio (2018) observou fissuras realizadas nas idades de três e 28 dias. Ao avaliar a taxa de cicatrização de fissuras por velocidade de propagação de ondas ultrassônicas, observou que as fissuras induzidas aos 3 dias de idade, apresentaram maiores taxas quando comparados as fissuras geradas aos 28 dias. De modo análogo, quando analisado superficialmente a partir da microscopia ótica há uma maior tendência de precipitação dos produtos de hidratação superficial das fissuras realizadas nas primeiras idades, quando comparadas as fissuras induzidas em idades mais tardias (Cappellessio, 2018).

Quadro 3 - Resumo de estudos de cicatrização em compósitos cimentícios em apenas uma idade

Idade de fissuração (dias)	Autores	Material cimentício	Tipo de Fibra	Consumo de cimento (kg/m³)
2	Roig-Flores et al. (2015)	Concreto	Metálica	350,00
2	Roig-Flores; Serna (2020)	Concreto	Metálica	275,00
3	Ziegler (2020)	Concreto	-	503,74
21	Lauch, Desmettre, Charron (2021)	Concreto	Metálica	280,00/400,00/800,00
21	Doostkami et al. (2022a)	Concreto	Metálica	280,00
28	Takagi (2013)	Concreto	Vidro	392,00

Fonte: Autora (2023)

2.3.2 Cicatrização por indução autônoma

A cicatrização por indução autônoma tem a finalidade de complementar a cicatrização por indução autógena. A cicatrização por indução autônoma é promovida pela presença de agentes devidamente projetados para esta finalidade, que são adicionados diretamente na mistura da matriz cimentícia ou introduzidos embutidos em um sistema de encapsulamento, que os abriguem até o momento de sua liberação (Han; Xing, 2017). Sua ativação é realizada pelo contato do agente com a água na fissura, ou até mesmo por outros agentes introduzidos a matriz.

Os principais agentes utilizados com a finalidade de promover a cicatrização por indução autônoma são organizados por liberação controlada de água e os agentes químicos inorgânicos: adições cristalinas e expansivas, adesivos reativos e agentes biológico (Roig-Flores et al., 2021).

As adições cristalizantes, como explanado anteriormente, são produtos comercializados que podem produzir cristais insolúveis. Esses cristais ajudam na cicatrização das fissuras ao reagirem com a umidade do concreto fresco e com os produtos da hidratação do cimento. Por outro lado, as adições à base de sílica são agentes que normalmente promovem a formação de géis de silicato de cálcio hidratado, de forma semelhante às reações pozolânicas. O silicato de sódio é um dos agentes mais comuns utilizados para esse fim. Na maioria dos estudos que empregam o silicato de sódio como agente promotor de cicatrização, ele é encapsulado, o que significa que só reage após a liberação da microcápsula (Roig-Flores et al., 2021).

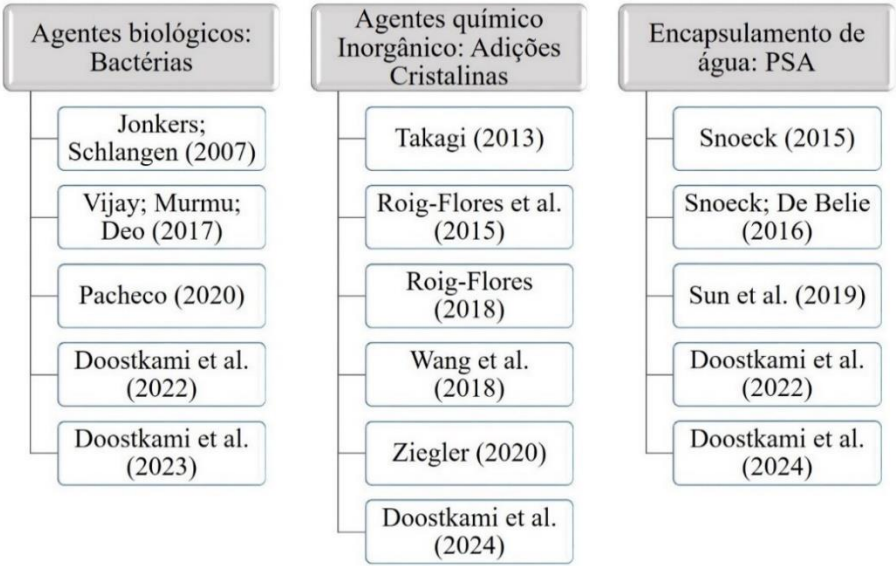
Os adesivos reativos são utilizados normalmente encapsulados e como agente cicatrizante devido à capacidade de unir as superfícies, segundo Roig-Flores et al. (2021) dois tipos têm sido mais utilizados, os adesivos monocomponentes, onde uma parte dos mesmos são ativados por meio de radiação, calor ou umidade, ou seja, a ativação do processo de cicatrização da fissura dependente das condições ambientais para enrijecer, como expostos a luz, alta temperatura ou umidade. Já os multicomponentes necessitam da adição de dois elementos

encapsulados no interior do concreto para ativação de cicatrização como por exemplo para produzir auto aquecimento, a combinação de resinas epóxi combinado com um acelerador para melhorar a reação.

A maioria dos estudos com agentes biológicos como promotor de cicatrização é realizado através da adição de bactérias encapsuladas a mistura do concreto e ocorre pela precipitação do carbonato de cálcio. O processo de cicatrização se inicia quando a fissura rompe a cápsula, possibilitando assim a entrada de água na fissura e em contato com a água os esporos das bactérias são germinados e se alimentam de nutrientes adicionadas a matriz cimentícia como, por exemplo, lactato de cálcio formando a calcita. O calcário insolúvel é responsável por colmatar as fissuras (Santos; Formagini, 2023)

No geral pesquisas vêm sendo realizadas em maior quantidade utilizando os conceitos de cicatrização autônoma como bactérias e produtos, como adições cristalizantes e PSA também são utilizados como tema de pesquisa para melhoramento da autocicatrização em concretos. Na Figura 5 apresenta o resumo de estudos de diversos autores que exploraram a cicatrização autônoma, utilizando algum tipo de agente adicionado a mistura cimentícia para potencializar a cicatrização.

Figura 5 - Resumo por autores que utilizaram em seus estudos de cicatrização autônoma algum tipo de agente específico na mistura cimentícia



Fonte: Autora (2025)

Cicatrização induzida por agentes biológicos

O processo de cicatrização através da adição de bactérias ocorre pela formação de CaCO_3 , utilizando diferentes vias metabólicas, como fotossíntese, redução de sulfato, hidrólise da ureia ou desnitrificação. Para serem integradas com sucesso ao concreto, as bactérias devem possuir características como resistência às tensões mecânicas, resistência a álcalis e tolerância ao oxigênio (Koga; Santos, 2020).

Existem três métodos de aplicação de bactérias, cada um com diferentes níveis de eficiência: aplicação direta com dispersão dos esporos na matriz, imobilização em partículas porosas como agregados porosos, microfibras de celulose ou encapsulamento (Roig-Flores; Formagini; Serna, 2021). A imobilização ou encapsulamento são métodos recomendados para proteger e prolongar a vida das bactérias, pois a capacidade de sobrevivência delas é reduzida para aumentar a hidratação do concreto, devido à diminuição do tamanho dos poros (Jonkers et al., 2010; Vijay; Murmu; Deo, 2017).

Na maioria dos estudos, as bactérias são encapsuladas e dispersas na matriz do concreto. O processo de cicatrização começa quando uma fissura no concreto quebra a cápsula, permitindo a entrada de água. Em contato com a água, os esporos das bactérias germinam e se alimentam dos nutrientes presentes na matriz do cimento, como o lactato de cálcio, formando CaCO_3 . À medida que o oxigênio é consumido na reação, o lactato de cálcio, anteriormente solúvel, se transforma em calcário insolúvel, que sela as fissuras (Santos; Formagini, 2023).

Existem três principais mecanismos relacionados à precipitação do carbonato de cálcio: redução de sulfato, conversão metabólica aeróbica de sais de cálcio e hidrólise enzimática da ureia por bactérias ureolíticas. De acordo com Wang et al. (2012), o mecanismo mais amplamente utilizado é a decomposição da ureia por bactérias ureolíticas, devido à sua facilidade de operação e controle. Em seus estudos, amostras sem bactérias conseguiram selar fissuras de até 0,25 mm, enquanto amostras com cápsulas de bactérias *Bacillus Sphaericus* selaram fissuras de até 1 mm em condições ideais.

Segundo a revisão bibliográfica realizada por Roig-flores, Formagini e Serna (2021), as bactérias têm a capacidade de cicatrizar fissuras no concreto com espessuras de aproximadamente 0,8 mm, demonstrando assim, uma melhoria em relação à capacidade de colmatar pela cicatrização autógena, que é limitada fissuras de no máximo 0,3 mm.

Os esporos bacterianos para concreto estão se tornando disponíveis comercialmente, com algumas pequenas empresas e *start-ups*, oferecendo-os, embora sua disponibilidade comercial a preços competitivos ainda seja limitada (Roig-Flores; Formagini; Serna, 2021).

Apesar dos avanços, a adoção de esporos bacterianos para concreto é limitada pelos altos custos de produção e encapsulamento. O mercado está crescendo e é promissor, mas a disponibilidade comercial a preços competitivos ainda é um desafio.

Cicatrização induzida por adições cristalizantes

As adições cristalizantes foram desenvolvidas com o propósito de reduzir a permeabilidade da matriz cimentícia sob pressão hidrostática. No mercado da construção civil, diversos tipos de adições cristalizantes estão disponíveis, e os fabricantes mantêm em segredo as fórmulas químicas desses produtos. Além disso, o comportamento desses produtos quando incorporados à matriz cimentícia ainda não é totalmente compreendido (Roig-Flores et al., 2016). E ainda, o termo é utilizado como rótulo comercial (adições cristalizantes) e não designa necessariamente a funcionalidade ou a estrutura molecular (De Belie et al., 2018).

Geralmente, as adições cristalizantes apresentam coloração cinza e possuem partículas que tem formas e tamanhos irregulares na faixa de aproximadamente entre 1 µm a 50 µm (Nasim; Dewangan; Deo, 2020a). Sua composição química determinada por Fluorescência de raios X (FRX), pode variar de 34% a 74% de óxido de cálcio. Já a caracterização mineralógica avaliada por meio de difração de raio X, pode apresentar compostos cristalinos, como a alita (C_3S), belita (C_2S) aluminoferrito tetracálcio (C_4AF) e calcita ($CaCO_3$), e ainda, a presença de $Ca(OH)_2$ e quartzo (dióxido de silício). Nos Quadros 4 e 5 apresentam-se o resumo das características e composição química de adições cristalizantes, por autores e levantadas por Nasim; Dewangan; Deo, (2020a).

Quadro 4 - Características das diferentes misturas cristalinas, por autores

Característica	Park et al. (2018)	Kumar et al. (2009)	Ferrara et al. (2016)	Jaroenratanapirorn et al. (2011)
Gravidade específica (g/cm ³)	-	2,8	-	2,90
Finura (cm ² /g)	3020	-	-	5765
Densidade (g/cm ³)	2,59	1,4	-	-
Tamanho da partícula (µm)	-	40-50	1-20	-

Fonte: Adaptada de Nasim, Dewangan e Deo (2020a)

Quadro 5 - Composição química de diferentes misturas cristalinas por autores

Óxidos	Sisomphon et al. (2013)	Park et al. (2018)	Jaroenratanapirom et al. (2011)	García-Vera et al. (2019)
CaO	73,40	53,00	34,58	59,77
SiO ₂	13,72	16,00	16,81	8,10
Al ₂ O ₃	3,66	3,99	1,93	1,98
Fe ₂ O ₃	2,28	4,05	1,98	2,08
Na ₂ O	1,24	2,24	15,22	1,29
K ₂ O	0,40	0,40	0,16	0,44
SO ₃	3,91	3,48	1,16	2,09
MgO	0,70	15,90	1,29	0,82

Fonte: Nasim, Dewangan e Deo (2020a)

Adições cristalizantes normalmente contém em sua mistura cimento, areia e sílica ativa. Alguns elementos do cimento Portland são observados nos cristalizantes, por meio da microanálise de espectroscopia de raios X, por dispersão de energia (EDS), exceto a presença de enxofre (Ferrara; Krelani; Carsana, 2014).

Em particular, as adições cristalizantes têm uma afinidade natural com a água, pois reagem prontamente com ela. A interação química entre adições cristalizantes, cimento e a água resulta na formação de depósitos nas fissuras que são insolúveis em água. Isso leva ao aumento da densidade do silicato de cálcio hidratado e, conseqüentemente, à melhoria da resistência à penetração da água (Nasim; Dewangan; Deo, 2020a).

Devido à diversidade de aglomerantes e produtos químicos ativos presentes nas adições cristalizantes, sua eficácia pode depender de uma variedade de fatores. Essas adições têm a capacidade de interagir com água, hidróxido de cálcio, partículas de cimento não hidratado e íons carbonato. Os agentes cicatrizantes, dessa forma, podem gerar hidrato de silicato de cálcio devido à interação entre o hidróxido de sódio e a sílica presente. Além disso, eles podem atuar como pontos de nucleação, o que resulta em um aumento na precipitação de CaCO₃ devido ao aumento da dissolução dos íons carbonato (Ca²⁺) (Bohus; Drochytka, 2012).

Quando analisado o desempenho com relação a rigidez e resistência, ocorreram com menos frequência, nas amostras avaliadas em concretos com adições cristalizantes (Ferrara; Krelani; Carsana, 2014). Alguns estudos em concretos com adições cristalizantes apontaram que não houve recuperação das propriedades mecânicas (Escoffres; Desmettre; Charron, 2018; Sisomphon; Copuroglu; Koenders, 2013) e, ainda, que os resultados são efetivos para cicatrização, quando as fissuras são mantidas saturadas em água, bem como para fissuras com espessuras menores que 0,30 mm (Roig-Flores et al., 2015, 2016).

Roig-Flores et al. (2015) relataram que os concretos com adições cristalizantes apresentaram comportamento mais estável e confiável, com menor dispersão e tendência mais claras quando comparado as amostras controle (sem adições cristalizantes), com relação a

evolução da permeabilidade a partir da taxa de cicatrização de fissuras em concretos após 42 dias imersos em água. Ainda, as amostras contendo adições cristalizantes obtiveram resultados superiores da taxa de cicatrização de fissuras, com valores em torno de 95% mesmo para as maiores aberturas iniciais, aproximadamente de 0,25 mm, e vários corpos de prova tiveram a cicatrização da fissura por completa.

Nas últimas décadas, os concretos com adições cristalizantes tem sido aplicadas em vários projetos estruturais, como no Brasil: laje subpressão, com cobertura ondulada no Museu da Imagem e do som (Rio de Janeiro), na cobertura no Museu de Artes do Rio (Rio de Janeiro), laje no subsolo do condomínio Adelaide (Bahia) e na reforma do complexo do Estádio Governador Magalhães Pinto (Minas Gerais) (Moreira et al., 2016). Essas após inspeções visuais não apresentaram fissuras no concreto endurecidos, porém não existe nenhum relatório sobre a eficiência da autocicatrização publicada (Roig-. Flores; Formagini; Serna, 2021). Denotando, assim a falta de estudos voltados em peças estruturais *in loco* ou em condições de uso.

As adições cristalizantes são classificadas segundo a NBR 11768-1 (ABNT, 2019) como redutor de permeabilidade capilar, por meio efeito de cristalização, onde os compostos são capazes de bloquear os poros e estáveis para resistir à água sob pressão. Durante a vida útil do concreto, à medida que ocorrem novas fissuras, adições cristalizantes podem se ativar na presença de umidade, promovendo o preenchimento parcial ou total destas novas fissuras (Pacheco et al., 2022).

Takagi (2013) analisou a capacidade de cicatrização de fissuras em concretos com cimentos comercializados no Brasil, contendo adições cristalizantes e diferentes quantidades de escória de alto-forno. A pesquisa revelou que houve ativação das adições cristalizantes no interior do concreto. As fissuras na matriz permitiram a entrada de água, que por sua vez ativaram as adições cristalizantes. Isso expõe as superfícies internas das fissuras a componentes como cimentos não hidratados e escória não ativada. Como resultado, a mistura cristalina eleva a alcalinidade da água dentro das fissuras e poros, promovendo a formação de novos cristais de C-S-H modificado e precipitados hidratados insolúveis nas superfícies internas das fissuras. Segundo o autor, essa reação ocorre e favorece a um maior teor de cicatrização em fissuras com espessura de até 0,40 mm.

O efeito das adições cristalizantes no processo de cicatrização de fissuras em concretos expostos a diferentes condições de ambiente de cura , como imersão em água, contato com água, câmara úmida e ao ar em condições normais de laboratório, foi avaliado por Roig-Flores

et al. (2015). Amostras de concretos pré-fissuradas a idade de 2 dias, com abertura das fissuras de até 0,3 mm submetidas a um período de cicatrização de 42 dias, apresentaram resultados diferentes para cada condição de exposição. As amostras que continham adições cristalizantes tiveram taxa de cicatrização mais estáveis, em comparação com as amostras de referência, sendo que as amostras imersas em água e em contato com água, obtiveram taxas de cicatrização mais altas. Porém, o melhor desempenho de cicatrização com relação ao ambiente de exposição foi a de imersão em água.

Os estudos de Roig-Flores et al. (2015, 2016) demonstraram a influência positiva das adições cristalizantes na cicatrização de fissuras de até 0,40 mm, desde que as amostras sejam mantidas submersas em água. Especificamente, observou-se que a elevação da temperatura de cura para 30 °C resultou em melhor desempenho do que a cura a 15 °C, enquanto a exposição a ciclos de molhagem e secagem levou a um desempenho fraco.

Cura interna

O estudo do encapsulamento de água tem se destacado como uma estratégia para promover a cura autógena do concreto (Roig-Flores; Formagini; Serna, 2021). Esse processo envolve o uso de materiais absorventes, como polímeros superabsorventes (PSAs), fibras vegetais (Singh; Gupta, 2020; Toledo Filho et al., 2005) ou nanoargilas (Qian; Zhou; Schlangen, 2010). Esses materiais possuem a capacidade de absorver grandes quantidades de água e liberá-la de forma controlada, contribuindo tanto para a hidratação da matriz quanto para a cicatrização de fissuras (Roig-Flores et al., 2021).

Os polímeros superabsorventes são hidrogéis capazes de absorver grande quantidade de água em relação a sua massa e tamanho, assim como também perder esta água (Lee; Wong; Buenfeld, 2016). Na cicatrização de fissuras por PSA, esses polímeros expandem em contato com a umidade, preenchendo fissuras. A capacidade de expansão do PSA varia com o tipo, formato das partículas, densidade de grupos aniônicos (afeta absorção rápida), densidade da estrutura reticulada (afeta absorção), tamanho das partículas (maior absorção com diâmetro maior) e temperatura (menor absorção em temperaturas baixas (Manzano et al., 2021).

Lee, Wong e Buenfeld (2016) revelaram que soluções mais iônicas resultam em menor expansão do polímero, tornando ineficaz a aplicação do PSA em ambiente marinho. A principal vantagem do PSA é sua capacidade de acelerar a cicatrização em comparação com a cicatrização por indução autógena. No entanto, desvantagens incluem a formação de vazios, que pode diminuir a resistência à compressão, e a limitação de uso em ambientes marinhos devido à reduzida expansão do polímero.

A fibras naturais no concreto são materiais recicláveis e econômicas em comparação com outras fibras. Singh e Gupta (2020) usaram fibras de celulose como veículo para encapsular água em concretos, aprimorando assim, a eficácia no processo de cicatrização de fissuras.

Singh e Gupta (2020) relataram que a utilização de microfibras de celulose aumentou a taxa de cicatrização em fissuras nas primeiras idades de cura quando comparado ao concreto referência e atingiu os mesmos resultados finais.

2.4 A química da água e a cura

A água desempenha um papel fundamental no sistema cimentício, pois é o meio que possibilita as reações de hidratação necessárias para o enrijecimento da matriz, o ganho de resistência e a estabilidade e também na ativação no processo de cicatrização. Entretanto, a água também é o veículo de entrada para os agentes agressivos, sendo o principal fator que influencia tanto a formação quanto a degradação do concreto. Assim, compreender a interação entre a água e o concreto é essencial para aprimorar sua durabilidade e resistência.

Parâmetros químicos e o meio de cura

A qualidade da água é representada por diversos parâmetros que descrevem suas principais características físicas e químicas. Um dos mais relevantes é o pH, que indica o grau de acidez, neutralidade ou alcalinidade de uma solução com base na concentração de íons hidrogênio (H^+) (Alves, 2023). O pH varia de 0 a 14, sendo que valores abaixo de 7 indicam uma solução ácida, igual a 7 caracterizam uma solução neutra, e acima de 7 classificam a solução como alcalina. Segundo Neville (2016), o cimento se hidrata de forma adequada em um meio altamente alcalino (pH entre 12,6 e 13,5), possibilitando a formação de compostos essenciais para a resistência e estabilidade da matriz cimentícia, como o $Ca(OH)_2$ e os C-S-H.

A alcalinidade total corresponde à soma das diferentes formas de alcalinidade presentes na água, sendo representada pela concentração de hidróxidos, carbonatos e bicarbonatos, expressa em termos de carbonato de cálcio.

A classificação da dureza da água está diretamente relacionada à quantidade de Ca e magnésio (Mg) dissolvidos. Segundo Alves (2023), a água é considerada mole quando apresenta concentrações de $CaCO_3$ inferiores a 50 mg/l e moderadamente dura quando os teores variam entre 50 e 150 mg/L, dura entre teores de 150 a 300 mg/l e muito dura com teores acima de 300 mg/l.

Carbonatação e lixiviação: Processos de degradação e cura

A carbonatação é um processo químico relevante para a durabilidade do concreto, pois pode reduzir o pH da solução dos poros da pasta de cimento endurecida para valores próximos de 9. À medida que o Ca(OH)_2 presente na matriz cimentícia reage com o CO_2 , ele se converte em CaCO_3 , o que leva a uma queda ainda maior do pH, podendo chegar a aproximadamente 8,3 se todo o hidróxido de cálcio for consumido. Essa redução do pH pode comprometer a passivação das armaduras em estruturas de concreto armado, tornando-as mais suscetíveis à corrosão e reduzindo a vida útil da estrutura (Neville, 2016).

A lixiviação do cimento pode elevar o pH da água e aumentar a concentração de CaCO_3 , elevando sua dureza. Esse aumento ocorre devido à reação de CO_2 dissolvido na água com o Ca(OH)_2 presente na matriz cimentícia. Além disso, esse processo pode contribuir para o aumento dos teores de alumínio (Al), cálcio (Ca), sódio (Na), potássio (K) na solução, influenciando a composição química da água e a durabilidade do concreto (Neville, 2016).

2.5 Ensaios e técnicas de indução e avaliação do índice de cicatrização das fissuras

2.5.1 Indução de fissuras

Para avaliar a eficácia do efeito de cicatrização das fissuras, é necessário induzir fissuras controladas em amostras de concreto, com tamanho e espessura compatíveis à escala de seu preenchimento. Isso permite avaliar a velocidade e a taxa da cicatrização ao medir o fechamento e selagem das fissuras, bem como comparar medições de testes adequados a proposta obtidas imediatamente após sua abertura, com aquelas obtidas após um período de cicatrização programada (Ferrara et al., 2018). Para induzir fissuras controladas em amostras cilíndricas por compressão diametral é essencial que o concreto seja reforçado com fibras para proporcionar uma ação eficaz, tanto no controle da largura da fissura durante o processo de pré-fissuração, quanto na manutenção de seu valor fixo posteriormente (Roig-Flores et al., 2015).

De acordo com Roig-Flores et al. (2015), a adição de 40 kg/m^3 de fibras de aço ao concreto, já permite um controle eficiente nas aberturas de fissuras, possibilitando mantê-las inferiores a 0,3 mm. Além disso, essa adição de fibras de aço também contribui para evitar a formação excessiva de ramificações das fissuras em amostras de concreto que foram submetidas a fissuração a qualquer idade.

Vários mecanismos foram utilizados para indução de fissuras em corpos de prova de concreto. Entre elas estão os ensaios de: compressão, tração por compressão diametral, tração

na flexão com 3 pontos ou 4 pontos de carga. Para concreto reforçado com fibras, também é possível utilizar o ensaio de tração direta, entretanto não é comum (Ferrara et al., 2018).

A escolha do mecanismo a ser utilizado para promover a abertura controlada de fissuras está relacionado ao formato da amostra, bem como ao tipo de propriedade a ser avaliada. Por exemplo, uma fissura gerada a partir do ensaio de flexão de três ou quatro pontos, tem forma de V invertido, cuja abertura varia ao longo de sua profundidade, denotando mais larga na face mais tracionada, reduzindo sua largura à medida que a fissura avança em direção a face apostá. A fissura ou as fissuras produzidas por meio de ensaio de flexão, são normalmente aplicadas em amostras como vigas e elementos de placas (Ferrara et al., 2018) e servem para avaliar a possibilidade de recuperação mecânica após a cicatrização.

Roig-Flores e Serna (2020) utilizaram a indução de fissuras, em amostras cilíndricas de concreto com fibras metálicas, por meio do ensaio de compressão diametral. A força aplicada para indução de fissuras com espessuras de 0,1 mm e 0,4 mm foi controlada por meio de uma máquina de ensaio universal. Segundo os autores, o controle das aberturas das fissuras foi possível devido ao uso das fibras de aço na mistura e a utilização do ensaio de compressão diametral, em discos cilíndricos para indução de fissuras, permitiu de maneira muito simples e controlável, a obtenção do valor desejado de abertura das fissuras. Na Figura 6, tem-se a imagem do processo de indução de fissuras por meio de ensaio de compressão diametral (Figura 6 (a)), em amostras cilíndricas de concreto com fibras metálicas. O equipamento possui o mostruário analógico do controle da carga da força aplicada diametralmente no corpo de prova estudado pelos Roig-Flores et al. (2020) (Figura 6 (b)).

Figura 6 - Indução de fissuras em amostra cilíndrica de concreto com fibras metálica por meio do ensaio de compressão diametral



Fonte: Adaptado Roig-Flores et al. (2020)

2.5.2 Avaliação da eficiência na cicatrização de fissuras

O processo de cicatrização em concreto tem sido examinado e interpretado de vários modos, tais como: composição e agentes de cicatrização, avaliação de permeabilidade em amostras íntegras, avaliação do fluxo de água pelas amostras pré-fissuradas, recuperação das propriedades mecânicas (principalmente resistência à compressão e à tração), entre outras. Adicionalmente, muitas iniciativas têm sido empreendidas para quantificar e qualificar a eficiência do processo da cicatrização de fissuras no concreto (Tang; Kardani; Cui, 2015).

Alguns testes para avaliação da eficácia da cicatrização estão elencados e padronizados para o concreto convencional. Segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), com base na avaliação das propriedades do concreto cicatrizado, existem três grupos tidos como técnicas de avaliação que são: visualização e determinação; avaliação da resistência recuperada; e avaliação das propriedades mecânicas recuperadas. Já para Tang, Kardani e Cui (2015) incluem-se técnicas que são classificadas em qualitativas, que possibilitam visualizar a estrutura e composição do concreto cicatrizado, a deposição de cristais, a liberação de agentes de cura encapsulados e o processo de fechamento de fissuras. Além disso, alguns métodos permitem determinar a evolução do processo de cicatrização, a presença de materiais cristalinos, composição química e produtos precipitados.

Embora sejam predominantemente qualitativos, alguns métodos oferecem análises quantitativas. Os principais grupos de métodos utilizados para avaliar a capacidade de cicatrização são: análise de imagem, testes químicos, físicos e mecânicos, cada um focado em procedimentos específicos de avaliação.

2.5.2.1 Visualização superficial do fechamento de fissuras e identificação dos produtos de cicatrização

Os métodos de visualização superficial do fechamento de fissuras e identificação do produto cicatrização tem sido utilizado na avaliação da eficiência da cicatrização em materiais cimentícios. Essa classe de métodos de avaliação engloba técnicas qualitativas para observar a estrutura, a composição após cicatrização, a deposição de cristais, assim como a liberação de agentes cicatrizantes encapsulados para promover o fechamento das fissuras. Podem ser divididos em: microscopia, imagem e espectroscopia. Essa categorização se baseia no procedimento principal utilizado na avaliação. Além disso, existem métodos menos comuns, como a Análise Térmica Gravimétrica (TGA), que podem ser empregados para caracterizar os produtos após a ocorrência da cicatrização (Tang; Kardani; Cui, 2015).

Microscopia

Geralmente, os métodos microscópicos são utilizados para observar a microtextura e a estrutura das amostras antes e depois da cicatrização de materiais cimentícios (Ferrara; Krelani; Carsana, 2014; Van Tittelboom et al., 2016).

Os métodos microscópicos envolvem a obtenção de imagens de alta qualidade do concreto para analisar grandezas como a porosidade e a textura superficial. Essa análise é feita por meio de técnicas de processamento e análise digital de imagens (Moraes, 2021).

Esses métodos podem ser combinados com diversas técnicas de microscopia:

- A Microscopia Óptica.
- A Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), que oferece imagens de alta resolução da superfície. Quando combinada com a Espectroscopia por Dispersão de Energia (EDS), o MEV/EDS permite a determinação da composição química qualitativa e semiquantitativa da amostra.
- A Microscopia Eletrônica de Varredura Ambiental (MEVA), uma variação do MEV que permite a observação de amostras em suas condições ambientais normais, diferentemente do MEV padrão que exige observação em ambiente de vácuo.

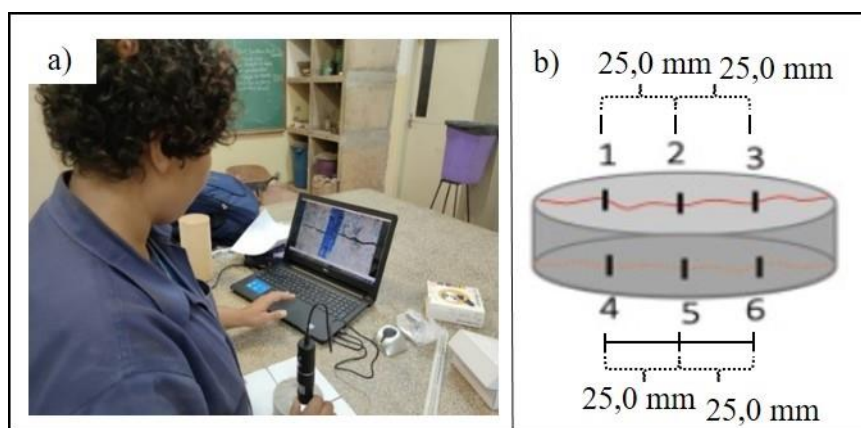
Segundo Van Tittelboom et al. (2016), a microscopia óptica é um instrumento digital usado para observar a superfície da fissura, sendo possível obter: mapas de entorno da superfície da fissura, medidas de espessura da fissura e medir os produtos cristalinos. Já o MEV e MEVA são normalmente utilizados com Imagens Eletrônicas Retroespalhadas (IMER). Assim, as imagens são obtidas pela varredura de uma espécie através de um feixe focalizado de elétrons, para o fornecimento de informações da estrutura cristalográfica e determinar a morfologia da amostra examinada, forma e tamanho dos produtos reidratados (Gollapudi et al., 1995)

No estudo realizado por Wang et al. (2018) foram investigadas as misturas de minerais e carbonato intrínseco ao processo de cicatrização. Para acompanhar a cicatrização, os pesquisadores utilizaram um microscópio óptico digital, obtendo medidas simultâneas das mudanças na espessura e na área das fissuras, ao longo do processo de cicatrização. Utilizaram um software de imagem para calcular a área das fissuras, antes e depois da cicatrização. Os pesquisadores chegaram à conclusão de que, o desvio-padrão das medidas da área das fissuras, foi menor em comparação com as medidas da espessura determinada. Além disso, eles demonstraram que, a metodologia utilizada se mostrou confiável para avaliar a eficiência da cicatrização superficial do concreto, ao empregar a taxa de fechamento da área da fissura. Essa

abordagem proporcionou uma medida objetiva de cicatrização geral, em vez de focar apenas na cicatrização local.

Doostkami et al. (2023), empregaram microscopia óptica com câmera fotográfica para medir fissuras com espessuras entre 50 µm a 450 µm em amostras (Figura 7 (a)). As medidas foram obtidas a partir de fotos, com a ajuda de um medidor de fissuras como referência. A largura das fissuras foi registrada antes e após a cicatrização, em três pontos distintos de cada superfície da amostra, com um intervalo de 25,0 mm entre eles, totalizando seis pontos de medição (três em cada face) (Figura 7 (b)). A média das medidas da largura das seis medições foi considerada como o valor representativo da espessura da fissura de cada amostra de concreto analisada. Os autores utilizaram a taxa de fechamento de fissura como parâmetro para avaliar a eficiência da cicatrização (Equação 1).

Figura 7 - Captura de imagens das fissuras por meio do microscópio óptico digital



Fonte: Adaptada de Doostkami et al. (2023)

$$\text{taxa de fechamento de fissura} = 1 - \frac{\text{largura da fissura após cicatrização}}{\text{largura da fissura antes cicatrização}} \quad (1)$$

Wang et al. (2018) utilizaram da técnica de MEV para observar a morfologia, estrutura e distribuição dos produtos de cristalização em uma distância de até 10 mm a partir da superfície da fissura. Os pesquisadores constataram que, em toda a profundidade da fissura no concreto com carbonato inerente, e não apenas na sua abertura, havia grandes quantidades de cristais de calcita. Essa descoberta sugere que o carbonato presente desempenhou um papel importante no fechamento do interior das fissuras.

Avaliação por técnicas de observação de imagens bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D)

A avaliação por imagem é um método cada vez mais utilizado para examinar materiais cimentícios, em específico a morfologia de fissuras em concreto, antes e após ocorrer a cicatrização, mas também permite a observação dos compostos formados pelo processo de cicatrização (Meraz et al., 2023). Entre os principais métodos estão radiografia e ou tomografia de raios X, que fornece imagens bidimensionais (2D) da estrutura da amostra, onde a fonte de radiação eletromagnética pode ser de raio X ou de nêutrons. Segundo Meraz et al. (2023), a tomografia são as imagens tridimensionais (3D) produzidas a partir do processamento geométrico digital de imagens 2D. A correlação de imagens digitais é um método óptico preciso que detecta alterações em imagens 2D e 3D, que de acordo com Wu, Johannesson e Geiker (2012) permitem investigações detalhadas do desenvolvimento das fissuras e fornece medições de deformações, deslocamentos e fluxo óptico (Malhotra; Carino, 2003 *apud* Meraz et al., 2023, p. 673).

Técnicas espectroscópicas

Entre as principais técnicas de teste espectroscópico são espectroscopia de raios X, espectroscopia de infravermelho, espectroscopia Raman e análise de difração de raios X. A espectroscopia de raios X trata-se com espectro de raio X, enquanto análise de infravermelho explora feixes na região infravermelha do espectro eletromagnético. Tanto a espectroscopia, quanto o infravermelho ajudam na detecção e determinação de produtos precipitados (Tang; Kardani; Cui, 2015).

Em resumo, todas as técnicas espectroscópicas envolvem a interação da radiação eletromagnética com a amostra e o registro do espectro resultante (seja por absorção, reflexão, espalhamento ou difração). Esses espectros fornecem informações cruciais sobre a estrutura molecular ou atômica, cristalinidade, estrutura cristalina, estado de ligação e o conteúdo de diversos componentes cristalinos nos produtos de cicatrização (Tang; Kardani; Cui, 2015).

A análise por Difração de Raios X (DRX) é baseada no efeito de difração dos raios X em amostras policristalinas, permitindo a análise da morfologia cristalina dos componentes presentes. O DRX fornece informações sobre cristalinidade, fase cristalina, estrutura, entre outros aspectos. No entanto, essa técnica geralmente pode determinar a fase com um teor acima de 1% na amostra, sendo incapaz de analisar amostras amorfas (Wang et al., 2019).

Nos estudos realizados por Wang et al. (2018) os autores utilizaram da análise DRX para identificar os produtos resultantes da cicatrização tanto na superfície, quanto no interior da fissura. Os resultados apresentaram que os produtos da cicatrização superficial e no interior da fissura eram principalmente calcita, demonstrando que a carbonatação foi o responsável na promoção da cicatrização no interior das fissuras.

O estudo de Huang, Ye e Damidot (2014) em relação ao efeito da escória de alto-forno na cicatrização de microfissuras de concretos por meio de análise DRX semiquantitativa, indicou formação de produtos cristalinos no interior das fissuras: calcita, etringita, Ca(OH)_2 , monocarboaluminato (ou hidrálcalcita) e hemicarboaluminato, no teor de 19,74%; 9,52%; 6,26%; 5,38% e 2,32%, respectivamente. Denotando que a maior concentração foi da calcita,

A Espectroscopia de Infravermelho por transformada de Fourier (EITF) é usada para obter o espectro infravermelho de absorção ou emissão de uma amostra. Os autores Araújo et al. (2016) e Wang et al. (2018) utilizaram esta técnica para determinação da estrutura molecular ou identificação de espécies químicas. Quando comparado a outros métodos analíticos, a análise EITF é adequada para a exame da fase orgânica. Quando se trata de agentes de cicatrização orgânicos, o EITF, proporciona informações valiosas, sobre as alterações nos diferentes grupos funcionais, presentes nos agentes e produtos de cicatrização (Wang et al., 2019).

2.5.2.1.2 Análise térmica

Já a análise térmica é utilizada segundo Wang et al. (2019), como um método suplementar para identificar os produtos de cicatrização. As técnicas incluem análise TGA e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).

O TGA é um método que mede a relação entre a massa dos produtos de cicatrização e as mudanças de temperatura, sob um programa de controle de temperatura. Essa técnica é utilizada para determinar a estabilidade térmica e composição do material e, na maioria dos casos, o TGA e DSC são usados juntos.

A técnica de TGA foi utilizada por Bundur et al. (2017); Lors et al.(2017), Xu, Wu e Jiang (2014) para identificar o precipitado de coloração branca, em matérias cimentícios, tendo como base de bactérias. Ainda, outros autores usando TGA+DSC, também identificaram os produtos de cicatrização em fissuras de concreto contendo adições minerais.

2.5.3 Avaliação de recuperação de propriedades

Os métodos de ensaios realizados para avaliar o desempenho dos materiais cimentícios, com relação a resistência a recuperação do concreto após a cicatrização, segundo Tang, Kardani

e Cui (2015), são baseados a partir das propriedades de transporte, resistividade e continuidade do concreto depois de cicatrizadas as fissuras.

2.5.3.1 Propriedade de transporte interno

A cicatrização de fissuras visa melhorar a durabilidade do concreto, sendo a água e gases, como gás carbônico e oxigênio os principais fluídos que afetam a durabilidade (Neville, 2016). O fechamento visual das fissuras não garante essa melhoria, por isso a avaliação da cicatrização de fissuras com base nas propriedades de transporte é fundamental. A avaliação da cicatrização por meio da propriedade do transporte, quando comparado com ensaios mecânicos, requer a pré-fissuração como um passo distintivo (Roig-Flores, 2018).

Segundo Neville (2016), em corpos de prova não fissurados, o transporte depende das propriedades da pasta de cimento hidratada. A permeabilidade refere-se ao fluxo através de um meio poroso. No contexto da difusão e sorção no concreto, o objetivo é avaliar a "penetrabilidade" do material, não se restringindo exclusivamente à permeabilidade. A avaliação considera permeabilidade: movimento de fluído sob pressão diferencial, difusão: transporte de íons ou gases sob diferencial de concentração) e sorção (fluxo causado pelo movimento capilar nos poros abertos ao meio ambiente) como mecanismos de transporte importantes, dependendo das condições de umidade do concreto (Neville, 2016).

2.5.3.2 Ensaio de percolação de água

O ensaios de percolação de água tem sido utilizado por (Doostkami et al., 2022a, 2022b, 2023; Li; Li; Xu, 2019; Roig-Flores et al., 2015; Tang; Kardani; Cui, 2015; Vijay; Murmu; Deo, 2017) como ferramenta de observação e avaliação da extensão de fissuras cicatrizada.

A percolação de água, segundo Zimmerman e Bodvarsson (1996), funciona como um indicador da propriedade de transporte da fissura, que pode ser obter a transmissividade da água multiplicando-a pela seção transversal da fissura. Suleiman e Nehdi (2018), observaram em seus estudos, que fissuras com espessuras entre 150 μm a 300 μm podem ser totalmente cicatrizadas por indução autógena, ainda pode observar uma redução de até 71% no coeficiente de permeabilidade (cm/s) de amostras de argamassa fissuradas quando submersas totalmente em água por 60 dias, entretanto apenas 6% de redução na percolação para as amostras fissuras submetidas a variação cíclica de temperatura de -10°C a 40°C e umidade relativa entre 20% a 90%.

A partir do ensaio de percolação de água, é possível estimar a redução do fluxo de água e da taxa de vedação de fissuras, devido à formação gradual e acumulação de produtos de

cicatrização nos vazios das fissuras. Isso cria obstáculos que diminuem a espessura da fissura e aumentam sua tortuosidade no plano, reduzindo assim a transmissividade de água. Além disso, a relação quantitativa entre a geometria da fissura e o desempenho da cicatrização, pode ser estabelecida e analisada com base na taxa de vedação determinada pelo teste de permeabilidade (Hou et al., 2022).

Doostkami et al. (2023) empregaram o ensaio de percolação à água de baixa pressão, em concretos com bactérias, medindo a vazão de água (ml/30 minutos) que passa pela fissura (50 µm a 450 µm) e pela matriz. Utilizaram discos de concreto de 100 mm x 50 mm acoplados em tubos de (Policloreto de Vinila) PVC, preenchidos com água a 200 mm de altura. Mediram a redução da carga de água nos tempos de 0, 1, 5, 10, 15, 20, 25 e 30 minutos antes e após 28 dias de cicatrização. A taxa ou índice de cicatrização em relação à percolação da água foi calculada com base na Equação 2 (Figura 8). As amostras submersas 28 dias em água, mostraram um índice de cicatrização superior, quando comparado as amostras que foram curadas em câmara úmida por 28 dias, ou corpos de prova submetidos a ciclos de 7 dias submersos em água e 21 dias em câmara úmida.

O índice de cicatrização foi determinado pela relação:

$$\text{Índice cicatrização} = 1 - \frac{\text{fluxo em 30 min. após cicatrização}}{\text{fluxo em 30 min. antes da cicatrização}} \quad (2)$$

Figura 8 - Aparato para teste de permeabilidade à água de baixa pressão



Fonte: Adaptada de Doostkami et al. (2023)

Muitos estudos se concentram exclusivamente no fechamento superficial das fissuras, no entanto, informações sobre como as fissuras cicatrizam, incluindo as alterações na permeabilidade à água, oferecem *insights* mais pertinentes para a durabilidade de uma estrutura

(Doostkami et al., 2023). Segundo Ziegler et al. (2020), inferir conclusões precipitadas de cicatrização em fissuras baseadas somente na análise superficial da fissura, com relação na medição de seu fechamento pode ser errônea, pois o comportamento da cicatrização interna pode ser bem diferente da observada da na região externa.

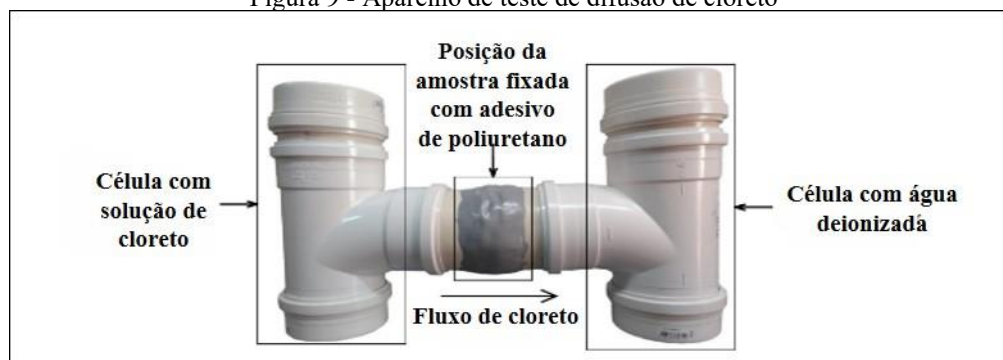
Wang et al. (2018) verificaram a diminuição do fluxo de água para taxa de vedação da fissura na ordem de 81%, com somente 32% da região superficial da fissura preenchida com produtos de cicatrização, ainda que os produtos formados de cicatrização se acumulam nos vazios das fissuras e desempenharam um papel importante na determinação da transmissividade da água.

2.5.3.3 Ensaio de difusão de cloreto

O teste de difusão de cloreto determina o coeficiente efetivo de difusão do cloreto na fissura cicatrizada do concreto, indicando a eficiência da cicatrização. A avaliação dessas propriedades de transporte é fundamental para compreender o desempenho do concreto cicatrizante, pois a difusão de cloreto descreve o processo de movimento gradual e contínuo dos íons de cloreto dentro do concreto ao longo do tempo, enquanto a penetração de cloreto é uma medida específica da profundidade que esses íons alcançam nas superfícies do concreto em um período de teste definido.

Ziegler et al. (2020), por meio da difusão de cloretos e para simular uma situação real expuseram o concreto fissurado contendo mistura cristalina (denominados pelos autores X, Y e Z) em um ambiente contendo cloreto, onde o aparelho utilizado garantiu a concentração de cloretos na solução durante todo o ensaio de difusão de cloretos (Figura 9).

Figura 9 - Aparelho de teste de difusão de cloreto



Fonte: Adaptada Ziegler et al. (2020)

Assim, as amostras foram fixadas entre as células com solução de cloreto e a célula com água deionizada com a finalidade de verificar a passagem de cloretos pelas as amostras de concretos fissuradas ao longo do tempo e a partir das leituras realizadas a cada 7 dias e a cada

28 dias, totalizando 203 dias de coleta para verificação de teor de cloreto. O cálculo do coeficiente de difusão de cloretos e a previsão da vida útil, foi utilizada da equação segunda lei de Fick (Equação 3).

$$\frac{C_{cl}-C_o}{C_s-C_o} = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{2\sqrt{D\cdot t}}\right), \quad (3)$$

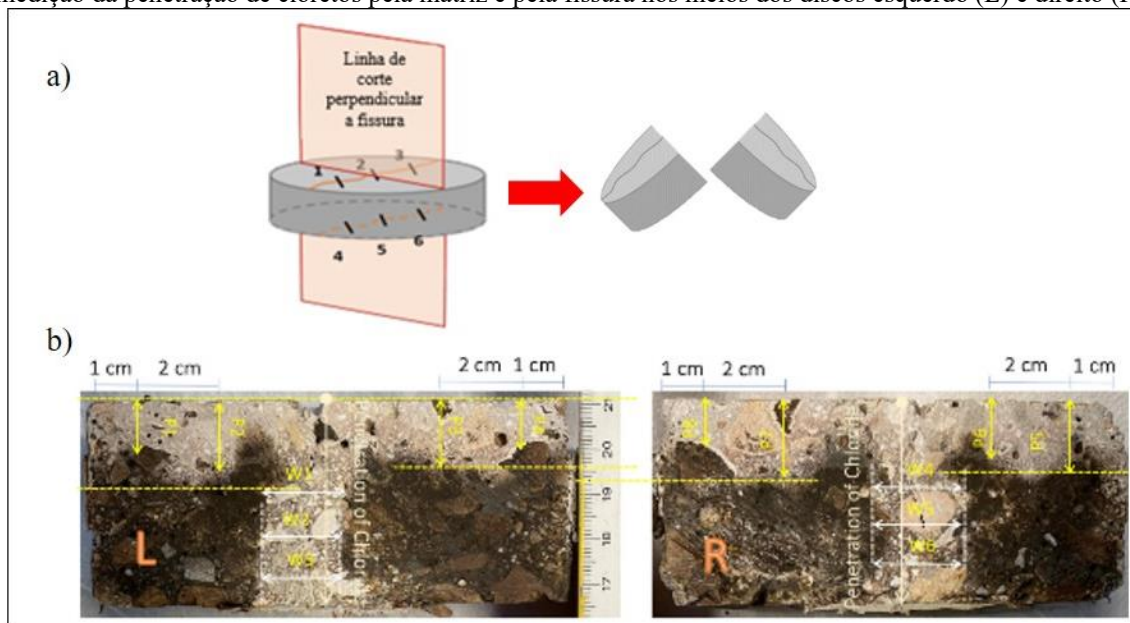
Onde, C_{cl} é a concentração de cloreto na profundidade x e o tempo t (mg/L), C_o é a concentração inicial de cloretos dentro do componente estrutural, C_s é a concentração de cloreto na superfície do componente estrutural de concreto, tomada como constante (mg/L), erf é a função de erro de Gauss, x é a profundidade considerada (cm), D é o coeficiente de difusão de cloreto (cm^2/s) e t é o tempo considerado (s).

De acordo com Ziegler et al. (2020), o teste de difusão de cloreto apresentou-se viável para verificação da eficácia da cicatrização de concretos. Os resultados obtidos pelos autores denotaram que, os concretos com adições cristalinas, retardaram a entrada de cloreto com o passar do tempo e aumentaram a vida útil e, ainda, há diferença no desempenho entre as marcas avaliadas das adições cristalizantes (X, Y e Z), quando verificado a previsão da vida útil e entrada de cloretos para amostras avaliadas e comparação ao concreto de referência (sem adições cristalinas).

Doostkami et al. (2023) realizaram teste de penetração de cloreto em concretos com bactéria para avaliar a cicatrização das fissuras, baseando-se em estudos anteriores (Doostkami et al., 2022a, 2022b). Mediram a penetração de cloreto na fissura e na superfície do concreto usando nitrato de prata como indicador. Esse teste foi conduzido nas mesmas amostras e aparato usados para avaliar a permeabilidade de água sob baixa pressão (Figura 6). Os tubos de PVC foram preenchidos com água contendo 33g de NaCl (cloreto de sódio) por litro e mantidos por 3 dias. Após esse período, as amostras foram retiradas, secas, cortadas a seco e tratadas com uma solução de AgNO_3 (Nitrato de Prata) (0,1 mol/litro) para criar contrastes de cores (Figura 10)

Na Figura 10 observa-se uma parte clara e uma escura. A área escura indica que não houve penetração do cloreto e, na área clara, a solução de cloreto penetrou no concreto, inclusive através da fissura, bem como na região de influência da fissura (pontos W) e também a penetração pela matriz iniciando na superfície em contato com a solução de cloreto (ponto P0). Os resultados mostraram que as bactérias melhoraram a resistência à penetração de cloretos em concreto convencional com fissuras, principalmente na imersão em água.

Figura 10 - Ensaio de penetração de cloreto. a) Esboço do plano do corte dos discos fissurados e b) pontos de medição da penetração de cloretos pela matriz e pela fissura nos meios dos discos esquerdo (L) e direito (R)



Fonte: Adaptada de Doostkami et al. (2022a, 2022b)

2.5.3.4 Resistividade e continuidade

Duas propriedades do concreto que estão associadas à durabilidade da estrutura em concreto armado são a continuidade da matriz e a sua resistência à degradação. Diferentemente das técnicas de avaliação das características de transporte, os testes de resistividade e continuidade, não têm sido amplamente adotados como métodos de avaliação para determinar a eficácia das abordagens da cicatrização de fissuras (Tang; Kardani; Cui, 2015).

O teste de Velocidade de Pulso Ultrassônico (VPU) é uma opção para analisar a cicatrização em matriz cimentícia. O ensaio consiste em transmitir ondas ultrassônicas curtas através dos compósitos cimentícios para detectar defeitos e descontinuidades de tamanho mínimo. A medição do tempo de trânsito da onda é feita utilizando circuitos eletrônicos de temporização, permitindo determinar o valor médio de VPU ao longo da distância percorrida. (Wang et al., 2019).

O processo de desenvolvimento da cicatrização de fissuras pode ser verificado a partir da diferença do tempo de propagação da onda ultrassônica, pois o compósitos cimentícios após a cicatrização das fissuras apresentam uma redução no tempo de transmissão (Ait Ouarabi et al., 2017; Pang et al., 2016). Além disso, é possível calcular as alterações na profundidade da fissura causadas pela cura, utilizando o caminho de transmissão do pulso ultrassônico. Essa análise permite determinar a recuperação das propriedades de resistência e durabilidade do material (Wang et al., 2019).

Tang, Kardani e Cui (2015) apontaram que no uso do teste de velocidade de pulso ultrassônico, demonstrou eficaz para avaliar o desempenho de cicatrização de fissuras, porém as medidas podem sofrer interferências na mudança de temperatura e da água na matriz.

2.5.3.5 Avaliação das propriedades regeneradas

Outra etapa importante para avaliar o desempenho da cicatrização de fissuras no concreto é a verificação da recuperação das propriedades mecânicas após cicatrização. Assim, comparar as propriedades mecânicas recuperadas com as de uma amostra de referência permite avaliar a eficácia do processo de autocicatrização. Os métodos comuns de avaliação incluem testes mecânicos, como ensaio de flexão de 3 e 4 pontos para avaliação da recuperação à tração, teste de resistência à compressão, deformação horizontal e impacto (Tang; Kardani; Cui, 2015).

Na visão de Pacheco (2020), os estudos utilizam ensaios mecânicos para caracterizar os concretos desenvolvidos, mas isso não necessariamente reflete a eficácia do processo de cicatrização de fissuras em concreto.

O ensaio de resistência à compressão é amplamente utilizado em estudos para avaliar a cicatrização do concreto. Diversos fatores, como ciclos de umedecimento e secagem, tipo de cimento, adições minerais, relação água/cimento e uso de agentes cicatrizantes, podem afetar a recuperação mecânica do concreto em relação à resistência à compressão (Ramachandran et al., 2002). De acordo com Santos e Formagini (2023), globalmente, a adição de agentes cicatrizantes não impacta negativamente na resistência à compressão dos concretos estudados, embora haja resultados divergentes, com alguns autores relatando ganho de resistência devido ao efeito de maturação do concreto ao longo do tempo.

É importante observar que, em termos práticos, avaliar a cicatrização de fissuras no concreto por meio de ensaios de resistência à compressão pode não ser significativo, pois as fissuras ocorrem principalmente em concretos sob tração. Esses ensaios são relevantes apenas para determinar se a adição de agentes cicatrizantes, afeta a resistência inicial à compressão do material. As fissuras em concreto sob compressão podem apontar para a iminência de falha (ruptura), o que significa que a estrutura pode não atender mais aos critérios de segurança e estabilidade, deixando pouco tempo para qualquer cicatrização efetiva do concreto ocorrer (Santos; Formagini, 2023).

Embora a restauração da estanqueidade ao ar e à água seja o objetivo principal em um concreto com propriedades cicatrizantes, muitos pesquisadores têm se interessado em recuperar as propriedades mecânicas após a cicatrização de fissuras. No entanto, quando as fissuras são cicatrizadas por indução autógena ou autônoma, as propriedades mecânicas após a cicatrização

das fissuras, tendem a ser geralmente inferiores em comparação com amostras não fissuradas (Van Tittelboom; De Belie, 2013). Isso ocorre, segundo Van Tittelboom e De Belie (2013), porque os materiais que preenchem as fissuras, como produtos de hidratação secundária e cristais de CaCO_3 , embora idênticos aos componentes da matriz cimentícia, têm propriedades mecânicas inferiores. Além disso, o gel de C-S-H formado devido à hidratação contínua parece ter propriedades mecânicas inferiores em relação aos produtos de hidratação primária, e os cristais depositados de CaCO_3 não estabelecem uma ligação adequada com as faces da fissura. Isso sugere que, mesmo com a precipitação de agentes cicatrizantes, as propriedades mecânicas do material original nunca serão completamente recuperadas.

3 PROGRAMA EXPERIMENTAL

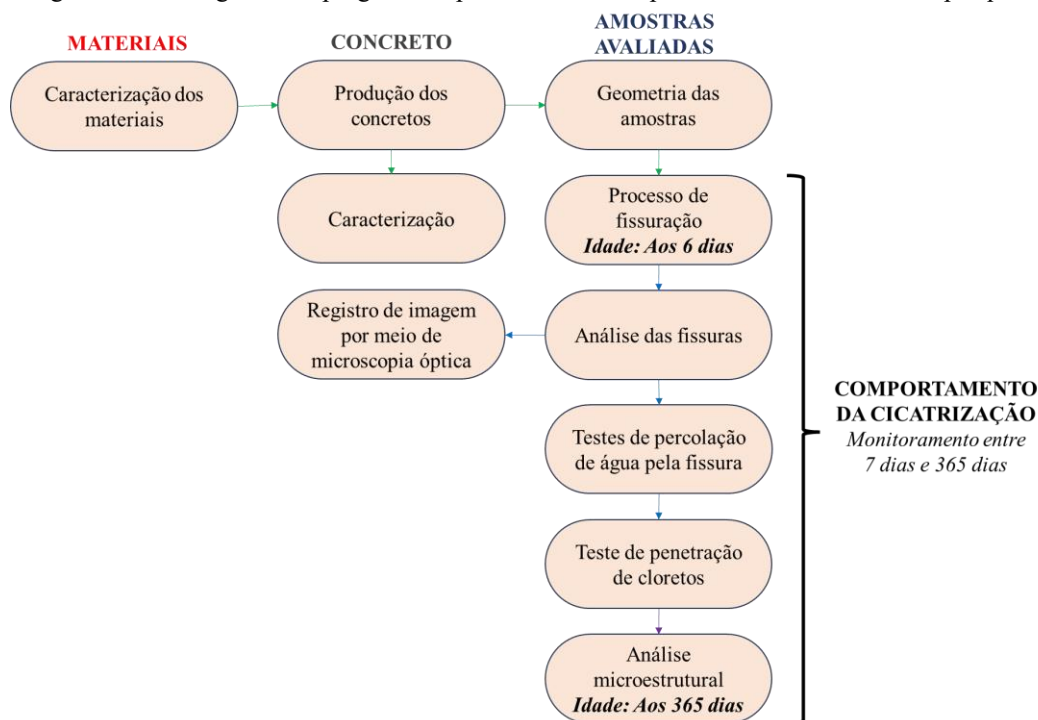
Neste capítulo, descreve-se o programa experimental e as etapas de desenvolvimento da pesquisa, de modo que são expostos os materiais que foram utilizados no concreto, bem como a metodologia para atingir os objetivos propostos.

O concreto é o material mais utilizado e frequentemente exposto a ambientes agressivos com água e umidade, portanto optou-se por avaliar seu potencial de cicatrização em duas classes distintas de resistência e comercializadas na cidade de Campo Grande, MS. Cada uma subdividida em três grupos: uma de referência (sem aditivo cristalizante) e duas com diferentes marcas comerciais de adições cristalizantes. A dosagem e a produção baseou-se na classe de resistência característica aos 28 dias de idade: 30 MPa (C30), com adição mineral de escória de alto-forno, sendo uma mistura de controle C30-R, uma mistura com adição cristalizante comercial denominada por A e por uma mistura com a adição cristalizante comercial denominada por B; e 50 MPa (C50), com adição mineral de sílica ativa e de modo similar, sendo uma mistura de controle C50-R, uma mistura com adição cristalizante comercial A e uma mistura com a adição cristalizante B.

Desta forma, foram elencados os ensaios estabelecidos para a caracterização dos materiais e dos concretos. O comportamento dos concretos cicatrizados, foram acompanhados por meio dos ensaios de percolação de água e de penetração de cloreto, bem como a avaliação e identificação da morfologia dos produtos de cicatrização formados no final do processo. As fissuras no concreto foram induzidas e controladas na idade de 6 dias, a cura foi submersa em água entre as idades de 7 dias e 1 ano, avaliou a eficiência da cicatrização das fissuras em idades programadas por um período máximo de 1 ano, verificou a penetração de cloretos após cicatrização das fissuras limitada a idade máxima de 1 ano de cura do concreto. Logo, o ápice

desse estudo foi verificar o efeito da utilização de marcas comerciais de adições cristalizantes na eficácia da cicatrização de fissuras de concreto confeccionados com os materiais locais, bem como avaliar os produtos de cicatrização formados. Na Figura 11 apresentam-se as etapas de desenvolvimento da pesquisa.

Figura 11 - Fluxograma do programa experimental das etapas de desenvolvimento da pesquisa



Fonte: Autora (2025)

3.1 Materiais e metodologia

Para evitar a repetição e garantir clareza nos procedimentos experimentais, as informações foram organizadas da seguinte forma: a Seção 3.1.1 descreve os materiais utilizados na produção dos concretos e Seção 3.1.2 detalha os ensaios estabelecidos para a caracterização desses materiais.

3.1.1 Materiais

3.1.1.1 Cimento Portland

Utilizou-se o cimento Portland composto com *filler* (CP II-F 40) por ser o cimento mais utilizado em concretos comerciais. Além disso, o CP II-F 40 é um dos cimentos com a maior quantidade de clínquer e gesso em sua composição e a menor quantidade de materiais carbonáticos presentes, os quais poderiam mitigar os efeitos de outras adições minerais e das adições cristalizantes, garantindo, assim, a integridade dos resultados obtidos.

3.1.1.2 Agregados

Como agregado miúdo foram utilizados a areia natural fina e areia natural grossa. A areia fina (AF) é proveniente de cava localizada em Campo Grande, MS, enquanto a areia grossa (AG) é proveniente do Rio Paraná, em Três Lagoas, MS. Como agregado graúdo foram utilizadas rochas britadas de origem basálticas comercializadas como brita 4,75/12,5 (pedrisco) e a brita 9,5/25, proveniente de Campo Grande, MS. Entretanto, as britas 9,5/25 foram oriundas de duas mineradoras distintas, os quais foram denominadas como B1-A e B1-B.

3.1.1.3 Adições minerais cimentantes

São utilizados dois tipos de adições minerais: a escória de alto-forno para o concreto C30, classificada como material cimentante, importante para reduzir o teor de clínquer e gesso na mistura e tornar os concretos mais duráveis em ambientes em contato direto com a água; e a sílica ativa no concreto C50, considerada como material pozzolânico, indispensável para a produção de concretos de maior resistência, bem como diminuir o consumo de cimento para fins de controle do fenômeno de origem térmica do concreto. Ambas as adições, normalmente, são utilizadas na produção de concretos destinados aos ambientes de maior agressividade como tanques de efluentes ou em estruturas em contato direto com solos contaminados.

3.1.1.3.1 Sílica ativa

O intuito de utilização sílica ativa na produção dos concretos estudados foi devido ao uso comum no desenvolvimento de concretos da classe de resistência de 50 MPa nas centrais dosadoras, quando se trata de concretos para peças estruturais de grandes volumes, expostos ao meio agressivos e eminente deterioração, como água. A sílica ativa possui minúsculas partículas, entre 0,03 μm e 0,3 μm , as quais, têm a capacidade de penetrar nos vazios entre as partículas do cimento, aprimorando o seu arranjo. Resultando assim, no aperfeiçoamento na resistência característica do concreto, quando comparado a misturas que não possui a adição mineral. Pelo fato de a sílica ativa conferir a mistura alta coesiva, a exsudação é bastante reduzida, ou até mesmo nula, resultando na diminuição da fissuração por retração plástica devido à secagem bem como a de fenômenos de origem térmica (Neville, 2016).

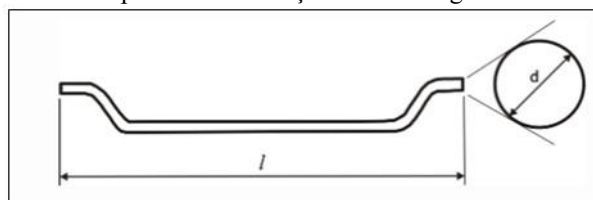
3.1.1.3.2 Escória de alto-forno

A escória de alto-forno é proveniente do Município de Ribas do Rio Pardo, MS e, atualmente, é utilizada pontualmente nas centrais dosadoras na composição de traços de peças estruturais de grandes volumes e exposto a meio agressivo severos.

3.1.1.4 Fibras de Aço

A adição de fibras metálicas em todas as misturas foi necessária para controlar e conservar as dimensões das fissuras, durante as etapas de fissuração e cura das amostras de concreto. As fibras de aço empregas foram do tipo A-I. Conforme a classificação estabelecida pela NBR 15530 (ABNT, 2019), essas fibras de aço são produzidas a partir de arames trefilados a frio, possuindo ancoragem em ambas as extremidades. Além disso, elas apresentam um fator de forma mínimo de 80, calculado como a razão entre o comprimento e o diâmetro equivalente da fibra. Suas dimensões são de 60 mm de comprimento por 0,75 mm de diâmetro. Na Figura 12 tem-se o exemplo ilustrado de fibra com ancoragens nas extremidades.

Figura 12 - Exemplo de fibra de aço com ancoragens nas extremidades



Legenda: l é o comprimento e d é o diâmetro.

Fonte: NBR 15530 (ABNT, 2019)

3.1.1.5 Aditivo químico redutor de água

Foram utilizados dois tipos de aditivos químicos redutores da água, um do tipo SP (RA2), MasterGlenium 301, composto policarboxilatos e o outro do tipo P (RA1), Muraplast FK 490. As características fornecidas pelos os fabricantes estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Características dos aditivos redutores de água

Aditivos	MaterGlenium 301	Muraplast FK 490
Estado	Líquido	Líquido
Cor	Castanho escuro	Marrom
Função	Plastificante/Superplastificante	Plastificante
pH	$9,0 \pm 1$	-
Densidade (g/cm^3)	$1,25 \pm 0,02$	1,09

Fonte: Adaptado dos fabricantes (2025)

3.1.1.6 Adições cristalizantes

As adições cristalizantes, também conhecidas como misturas cristalinas foram utilizadas como agente autônomo para cicatrização de concreto. Para isso, foram utilizadas duas diferentes marcas disponíveis no mercado da construção civil e comercializadas em forma de pó, denominadas nesse trabalho como A e B.

3.1.1.7 Água

Foi utilizado água de poço artesiano nos concretos da classe C50, com sílica ativa, já a água empregada nas produções dos concretos da classe C30, com escória de alto-forno, foi da rede abastecimento local de Campo Grande. No entanto, a água utilizada para cura úmida e imersão das amostras analisadas é de poço artesiano, pertencente a Universidade Federal de Mato Grosso do Sul (UFMS).

3.1.2 Caracterização dos materiais

As caracterizações dos materiais foram divididas em duas etapas. A primeira incluiu os ensaios normativos, realizados conforme referências normativas, aplicáveis a materiais com granulometria superior a 0,075 mm, como os agregados graúdos e miúdos. A segunda etapa envolveu a caracterização dos materiais finos e da água, contemplando ensaios sem normativas específicas, para materiais com granulometria inferior a 0,075 mm, como o cimento CP II-F 40, as adições minerais cimentantes e as adições cristalizantes.

3.1.2.1 Ensaios normativos

As características verificadas para os agregados foram determinação e composição granulométrica de acordo com a NBR 17054 (ABNT, 2022), teor de materiais pulverulentos segundo a NBR 16973 (ABNT, 2021), massa unitária no estado solto segundo a NBR 16972 (ABNT, 2021). A densidade na condição seca para as areias conforme a NBR 16916 (ABNT, 2021) e para as britas de acordo com a NBR 16917 (ABNT, 2021) e para impurezas orgânicas dos agregados miúdos a NBR 17053 (ABNT, 2022). Elenca-se também a determinação da massa específica para o cimento Portland segundo a NBR 16605 (ABNT, 2017).

3.1.2.2 Caracterização dos materiais finos e da água

3.1.2.2.1 Granulometria

A granulometria de materiais finos, com partículas menores que 75 μm , como CP II-F 40, escória e aditivos cristalizantes, foi analisada por difração a laser (Mastersizer 2000, Malvern Instruments), via úmida, em álcool etílico e com aplicação de ultrassom por 60 segundos para dispersão das partículas, exceto para o cimento Portland. As análises foram realizadas no Laboratório de Materiais da Construção Civil (LMCC), da FAENG, da UFMS.

3.1.2.2.2 Caracterização mineralógica

A composição química elementar dos materiais: CP II-F e das adições minerais e cristalizantes foi determinada pelo método de FRX, utilizando o equipamento Espectrômetro de fluorescência de raios X da marca Shimadzu e modelo EDX-720.

As medições do DRX para avaliação qualitativa das fases cristalinas foram feitas em um difratômetro Shimadzu e modelo 6100 equipado com uma fonte de radiação de cobalto (Co) e intensidade Co K α ($\lambda = 0,1790$ nm) e Co K β ($\lambda = 0,1621$ nm), operando no modo Theta-2Theta, com faixa de varredura de 10° a 80°, ao passo de 0,02° e velocidade de varredura de 2°/min. Para ambas as análises, as amostras foram moídas com auxílio do almofariz e pistilo, utilizando apenas partículas menores que 75 μ m.

Os ensaios de FRX e DRX foram feitos no Laboratório de Metalurgia do Instituto Federal de Mato Grosso do Sul (IFMS) de Corumbá.

Para a avaliação qualitativa das fases cristalinas foi utilizado o *software* X'Pert High Score. Os picos dos difratogramas foram analisados por comparação com fichas do banco de dados *International Centre for Diffraction Data* (ICDD). Todas as numerações das fichas, assim como nome químico e a fórmula química da ficha acompanhado de seus respectivos símbolos estão no Quadro 16 do APÊNDICE A.

3.1.2.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

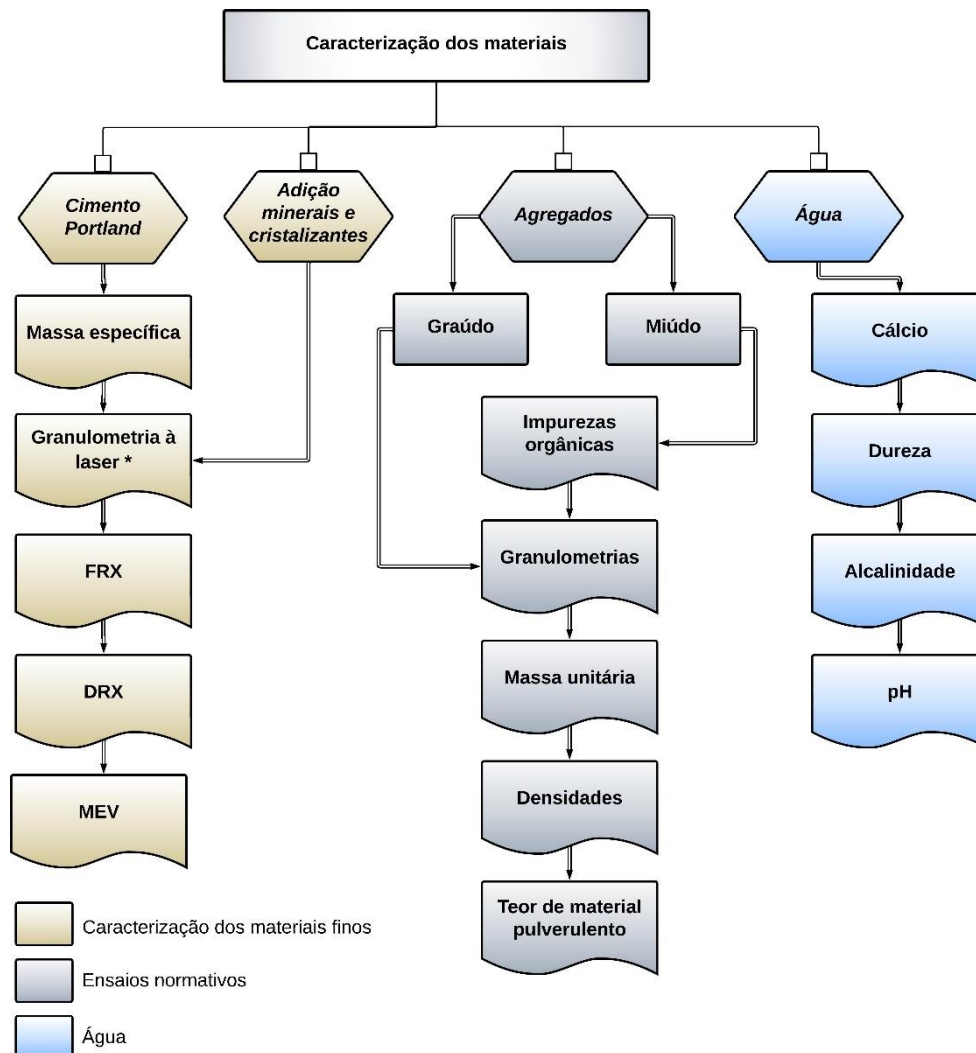
As análises da microscopia foram feitas somente nas adições cristalizantes, via varredura de elétrons pelo MEV da marca JEOL, modelo JSM-6380LV. As amostras foram fixadas em fita de carbono e analisadas com ampliações de 2500x e 10000x, utilizando detecção de elétrons secundários em todas as ampliações. Os ensaios procederam no Laboratório Multiusuário de Análises de Materiais (MULTILAM), do Instituto de Física (INFI), da UFMS

3.1.2.3 Água

A água do poço artesiano da UFMS teve sua análise físico-química: cálcio, dureza, pH, condutividade e alcalinidade a partir do American Public Health Association (APHA, 2017). As análises supracitadas foram realizadas tanto na água coletada da torneira, quanto na água de imersão das amostras de concreto a partir da idade de 12 dias. Estes ensaios foram realizados com intuito de verificar as modificações físico-químicas que cada classe de concreto poderia ocasionar ou influenciar no processo de cicatrização durante o período de cura em imersão. As medidas foram feitas no Laboratório de Qualidade Ambiental (LAQUA), da FAENG, da UFMS.

Com intuito de melhor compreensão na Figura 13 são apresentados os ensaios para caracterização dos materiais.

Figura 13 - Diagrama com os respectivos ensaios para a caracterização dos materiais



*Análise granulométrica realizado somente no CP II F-40, Escória de alto-forno e nas adições cristalizantes.

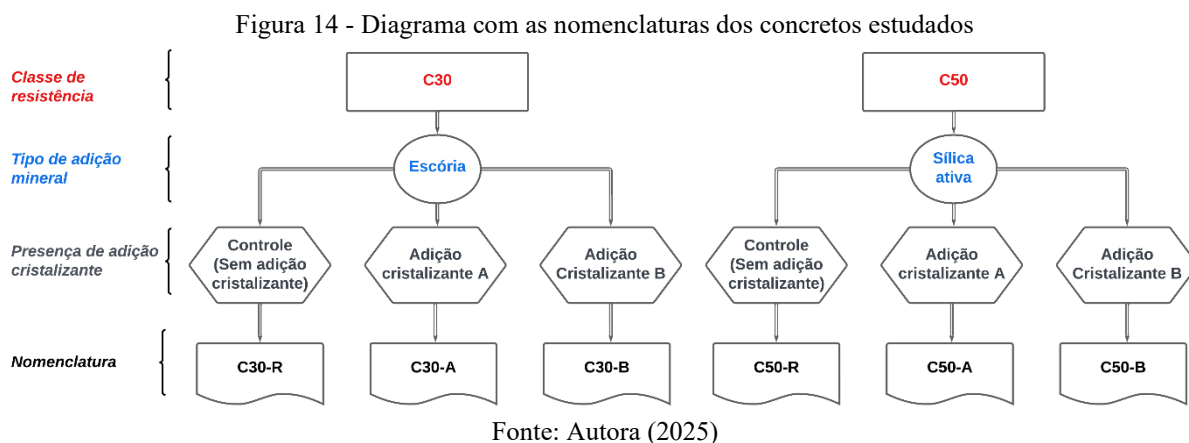
Fonte: Autora (2025)

3.1.3 Classe e grupo de concreto produzido

As classes estudadas foram definidas com base na produção de concretos, considerando seus componentes e elementos estruturais. A classe de agressividade e a qualidade do concreto estão relacionadas à relação água/cimento em massa e à classe do concreto, conforme estabelecido pela NBR 6118 (ABNT, 2023). Desse modo, a classe de agressividade ambiental mínima pretendida foi para ambientes agressivos e industriais (classe de agressividade III – forte) tidos pela normativa como um grande risco de deterioração da estrutura. A correspondência entre a classe de agressividade e qualidade do concreto norteou para dosagens

com relação a/c menores e iguais a 0,55 e resistência característica à compressão aos 28 dias de idade das classes C30 (30 MPa) e C50 (50 MPa).

Foi estudado um total de seis traços de concreto. As nomenclaturas estão relacionadas a classe de resistência (C30 e C50) e a presença ou não da adição cristalizante A ou B (Figura 14).



A produção e moldagens dos corpos de prova dos concretos C30 e C50 foram em lugares distintos. Primeiro, as dosagens e moldagens do concreto C50 foram feitas em uma central dosadora e para avaliar o efeito isolado dos aditivos cristalizantes na cicatrização de matrizes pré-fissuradas, junto a uma adição mineral, utilizou-se a sílica ativa. Depois, o concreto C30 foi produzido em laboratório, analisando o efeito dos aditivos cristalizantes combinados com uma adição cimentante na cicatrização do concreto pré-fissurado com escória de alto-forno.

Os materiais como o cimento CP II-F 40, as adições minerais (sílica ativa e escória de alto-forno), as adições cristalizantes (A e B) e a fibra metálica foram do mesmo lote para a produção dos concretos em ambas as classes. Entretanto, os agregados utilizados na composição do concreto foram de origens diferentes. Na central dosadora (para a classe C50) foi empregada areia natural de rio (AG, de Três Lagoas), Pedrisco e Brita B1-A. Já no laboratório, foi usada areia de cava (AF, de Campo Grande).

Os aditivos redutores de água também foram distintos: para o concreto C50, foi utilizado um aditivo superplastificante tipo SP (RA2), na proporção de 1,1% em relação à massa do cimento, enquanto nas dosagens dos concretos C30, foi aplicado um aditivo plastificante tipo P (RA1) na dosagem de 0,82%.

O traço dos concretos das classes C30 e C50 são apresentadas nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

Tabela 2 - Traço dos concretos C30, com escória de alto-forno

Materiais (kg/m ³)	C30-R	C30-A	C30-B
Cimento Portland (CPII-F 40)	301,00	301,00	301,00
Escória de alto-forno	100,00	100,00	100,00
Mistura cristalina (1%)*	0,00	3,00	3,00
Areia fina	745,00	745,00	745,00
Brita 9,5/25 (B1B)	1146,00	1146,00	1146,00
Aditivo plastificante (0,82%)*	2,47	2,47	2,47
Água	169,4	169,4	169,4
Fibra metálica	34,92	34,92	34,92
a/c	0,56	0,56	0,56
Abatimento (mm)	130,00	125,00	118,00
Resistência característica aos 28 dias (MPa)	36,31	39,10	38,94

*em relação a massa do cimento

Fonte: Autora (2025)

Portanto, os concretos produzidos foram analisados a partir da mesma classe de resistência característica, pois são constituídos com os mesmos materiais e teores, variando somente as marcas comerciais das adições cristalizantes (A e B) que foi utilizado na dosagem de 1% sobre a massa de cimento. Este teor foi adotado com base em diversos estudos sobre concretos cicatrizantes (Bianchin, 2018; Doostkami et al., 2024; Ziegler, 2020; Ziegler et al., 2020). Como grupo de controle, foi utilizado um traço de referência sem as adições cristalizantes.

Tabela 3 - Traços dos concretos C50, com sílica ativa

Materiais (kg/m ³)	C50-R	C50-A	C50-B
Cimento Portland (CPII-F 40)	367,00	367,00	367,00
Sílica ativa	23,00	23,00	23,00
Mistura cristalina (1%)*	0,00	3,67	3,67
Areia Grossa	768,00	768,00	768,00
Brita 4,75/12,5 (pedrisco)	349,00	349,00	349,00
Brita 9,5/25	815,00	815,00	815,00
Aditivo superplastificante (1,1%)*	3,90	3,90	3,90
Água	187,6	186,80	186,00
Fibra metálica	30,00	30,00	30,00
a/c	0,51	0,51	0,51
Abatimento (mm)	160,00	155,00	140,00
Resistência características aos 28 dias (MPa)	55,94	56,90	64,64

*em relação a massa do cimento

Fonte: Autora (2025)

3.1.3.1 Caracterização do concreto

As moldagens foram realizadas conforme NBR 5738 (ABNT, 2016). Em cada traço produzido, foram moldados doze corpos-de-prova cilíndricos de $\phi 100$ mm x 200 mm (diâmetro x altura), sendo utilizados 8 corpos-de-prova para avaliar a cicatrização pelos ensaios de percolação de água e penetração de cloretos. Os corpos-de-prova restantes, foram utilizados

para determinação da resistência à compressão axial. Assim, os concretos em seu estado fresco, foram caracterizados pela determinação da consistência pelo abatimento do tronco de cone conforme a NBR 16889 (ABNT, 2020) e a determinação da resistência característica aos 28 dias de acordo com a NBR 5739 (ABNT, 2018). Após 24 horas do início da mistura, os corpos de prova foram desmoldados e armazenados em câmara úmida a temperatura de 25°C e umidade relativa de 95%, até a idade de corte e pré-fissuração.

3.1.3.1.1 Caracterização mineralógica das classes de concreto

Os fragmentos analisados foram extraídos após os ensaios de permeabilidade de água de duas regiões de cada amostra, uma das paredes internas das fissuras, que foram denominados nas legendas dos gráficos por meio e outra região mais afastada da fissura, que foi chamada de matriz. Esses fragmentos das classes do concreto C30 (C30-R, C30-A e C30-B) e C50 (C50-R, C50-A e C50-B) foram cominuídos com auxílio do almofariz e pistilo, utilizando apenas partículas menores que 75 μm .

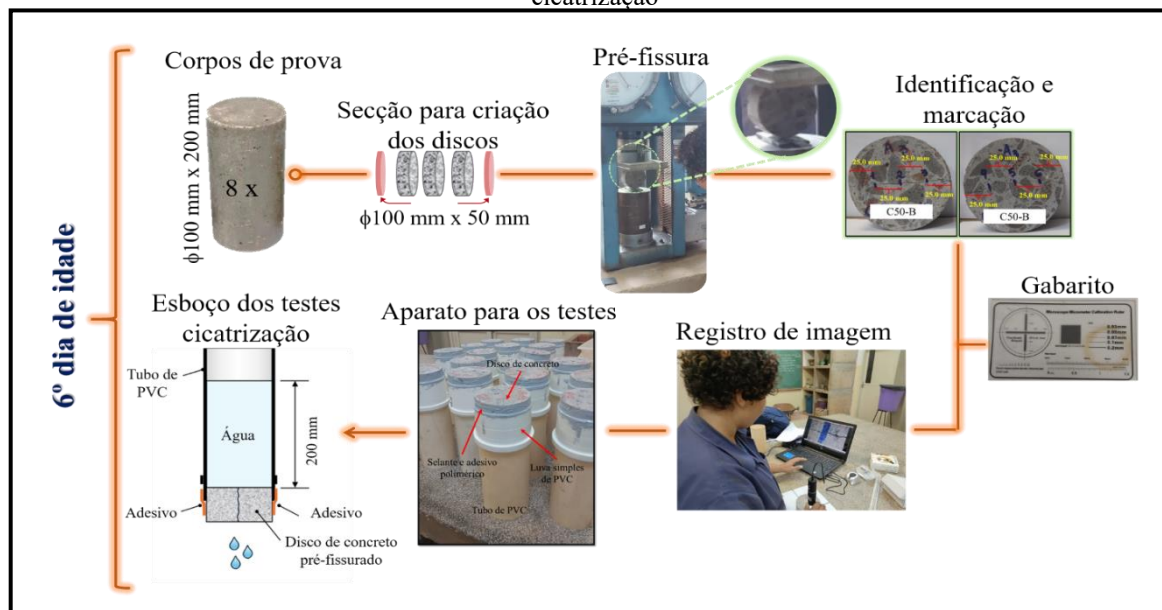
As medições do DRX para avaliação qualitativa das fases cristalinas foram feitas em um difratômetro PANalytical Empyrean equipado com uma fonte de radiação de cobre (Cu) e intensidade $\text{Co K}\alpha$ ($\lambda = 0,1540 \text{ nm}$) operando no modo Theta-2Theta, com faixa de varredura de 10° a 90°, ao passo de 0,013° e o tempo 29s/passos. Os ensaios foram feitos no Laboratório de Síntese, Caracterização e Simulação Computacional de Materiais (LABMAT), do departamento de engenharia das ciências fundamentais, do Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA)

Para a avaliação qualitativa das fases cristalinas foi utilizado o software X'Pert High Score. Os picos dos difratogramas são analisados por comparação com fichas do banco de dados de ICDD. Todas as numerações das fichas, assim como nome químico e a fórmula química da ficha acompanhado de seus respectivos símbolos estão no Quadro 16 do APÊNDICE A.

3.1.4 Processo e etapas de cicatrização das fissuras

A avaliação do potencial de cicatrização das amostras de concreto pré-fissuradas seguiu a metodologia de Doostkami et al. (2022a, 2022b, 2023), abrangendo a preparação das amostras e o aparato dos ensaios. Para melhor compreensão, a Figura 15 apresenta um infográfico com as etapas realizadas no sexto dia, desde a preparação dos corpos de prova cilíndricos em discos até a montagem do dispositivo de monitoramento da cicatrização.

Figura 15 - Infográfico da preparação das amostras e dispositivo para os testes de acompanhamento da cicatrização



Fonte: Autora (2025)

3.1.4.1 Geometria dos corpos-de-prova de testes

Os corpos de prova cilíndricos de dimensão $\phi 100 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ foram seccionados em três partes iguais, formando discos cilíndricos com dimensão de $\phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ para os ensaios de percolação de água e penetração de cloretos. Este processo ocorreu no sexto dia de idade do concreto, para garantir que o concreto tivesse resistência suficiente para ser cortado e pré-fissurado sem causar danos ou fissuras desproporcionais. Ao todo, preparou-se por traço uma amostragem de 20 discos para os ensaios de percolação de água e penetração de cloretos, a fim de se obter uma boa representatividade dos resultados experimentais.

3.1.4.2 Fissuração e análise das fissuras iniciais nos discos

Os discos cilíndricos de $\phi 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ foram pré-fissurados, a partir da adaptação do ensaio de compressão diametral, em uma prensa analógica da marca Forney com capacidade de 1200 kN, onde a força foi controlada manualmente até atingir visualmente a espessura de fissura desejada, dentro de um intervalo pré-estabelecido de 100 μm a 500 μm (Figura 16). Esse processo garantiu a formação de uma fissura principal, contínua ao longo da seção transversal de cada disco.

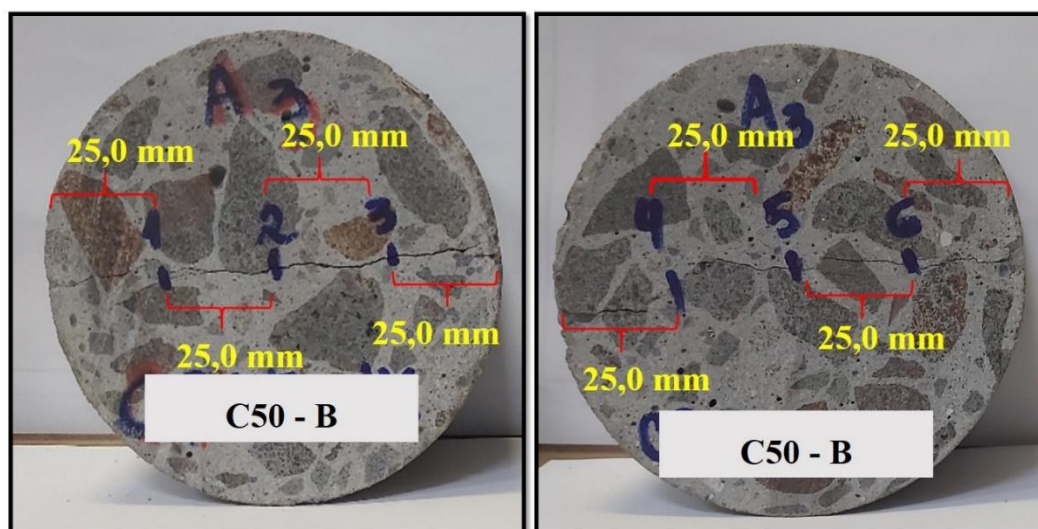
Figura 16 - Processo de fissuração dos discos amostras



Fonte: Autora (2023)

Em seguida, os discos foram identificados e marcados à caneta à prova d'água em três pontos distintos em ambas as faces do corte. As marcações dos pontos iniciaram a 25 mm da borda da superfície lateral, mantendo a mesma distância de 25 mm entre os pontos ao longo da fissura principal (Figura 17).

Figura 17 - Fotos dos discos com as marcações dos pontos das fissuras

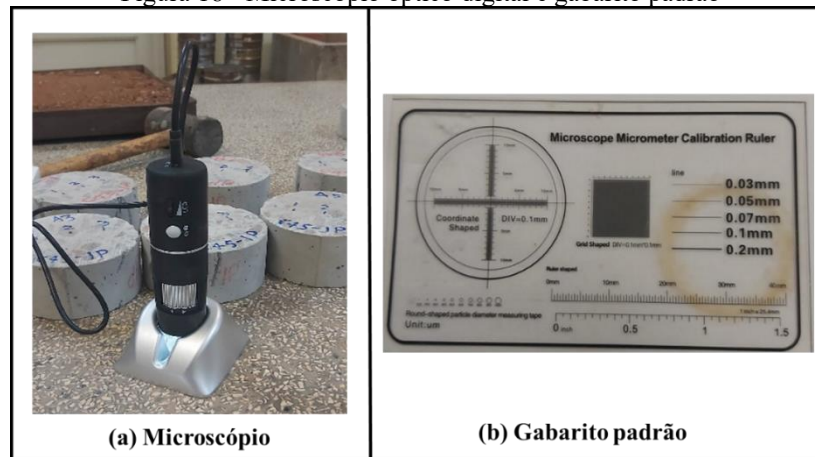


Fonte: Autora (2025)

Para cada disco, a fissura inicial principal foi fotografada por um microscópio óptico digital *Universal Serial Bus* (USB) com faixa de ampliação de até 1000 vezes e resolução de 1920 x 1080 (Figura 18 (a)), utilizando sempre um gabarito como escala padrão (Figura 18 (b)). A espessura da fissura foi determinada nos seis pontos marcados no disco com auxílio do

software ImageJ versão 1.54d, utilizando como referência da medida o gabarito com espessura da linha de 0,2 mm, que serviu para a conversão de escala no ImageJ. Assim, o valor inicial representativo das aberturas, denominado e_0 , foi calculado como as médias das medições das aberturas das fissuras nos seis pontos. As marcações foram utilizadas como referência para monitorar a evolução da cicatrização da fissura em cada disco, por meio de fotografias registradas nas idades pré-definidas dos ensaios de percolação de água.

Figura 18 - Microscópio óptico digital e gabarito padrão



Fonte: Autora (2025)

3.1.5 Teste de percolação de água pela fissura

3.1.5.1 Preparação do aparato dos ensaios

Após a fissuração e a análise das fissuras iniciais, o disco foi posicionado em uma luva simples de PVC (100 mm de diâmetro) com anel de vedação (100 mm de diâmetro) acoplado a um tubo de PVC (100 mm de diâmetro). O tubo tinha o comprimento de 250 mm para poder receber uma coluna de água de 200 mm. A luva de PVC e o anel de vedação foram utilizados para evitar possíveis vazamentos entre os espaços da amostra e o tubo de PVC. Os discos foram selados nas superfícies laterais do conjunto, com um selante e adesivo polimérico para evitar o vazamento de água pela fissura lateral (Figura 19). O disco permaneceu acoplado a este dispositivo durante todo o ensaio de percolação de água e penetração de cloretos.

Figura 19 - Aparato para os ensaios de permeabilidade de água e penetração de cloretos



Fonte: Autora (2025)

O conjunto de disco e dispositivo (luva e tubo PVC) foram deixados por 24 horas em temperatura ambiente do laboratório, para concretizar a secagem do selante.

3.1.5.2 Execução do teste de percolação de água

Para avaliar a redução do fluxo de água e determinar o índice de cicatrização, foram realizados testes de percolação de água através das fissuras em discos de concreto. Esses testes consideraram a influência do processo de cura em água, com o objetivo de promover e analisar o efeito de cicatrização das fissuras no material.

O potencial de cicatrização de cada fissura, por meio do ensaio de percolação de água através da fissura foi calculado a partir do fluxo normalizado de água (Equação 4) e pela taxa de cicatrização (Equação 5), sendo:

$$Q_N = \frac{\text{fluxo de água em 60 min antes da cicatrização}}{\text{Volume inicial de água}} \times 100 \quad (4)$$

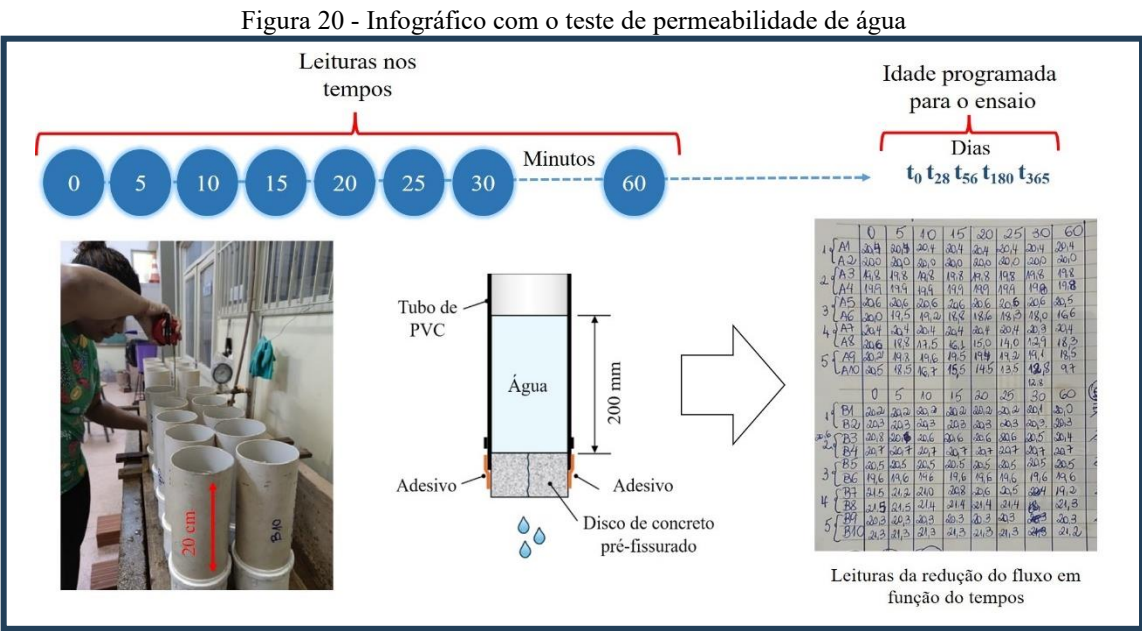
$$I_C = 1 - \frac{\text{fluxo em 60 min. após cicatrização}}{\text{fluxo em 60 min. antes da cicatrização}} \quad (5)$$

Sendo: Q_N o fluxo de água normalizado passante pela fissura durante os 60 minutos de ensaio; e I_C , o índice de cicatrização da fissura, que leva em conta o fluxo de água passante pela

fissura em função das idades de cura do concreto imerso em água com a o fluxo passante antes da cura.

Para a análise da cicatrização das fissuras, foram definidos subgrupos de índices de cicatrização, denominados como: I_{C28} (correspondendo a t_{28}), I_{C56} (correspondendo a t_{56}), I_{C84} (correspondendo a t_{84}), I_{C180} (correspondendo a t_{180}) e I_{C365} . Além disso, foram estabelecidos subgrupos para o fluxo normalizado de água através das fissuras, sendo eles: Q_{N0} (correspondendo ao fluxo inicial t_0), Q_{N28} (correspondendo a t_{28}), Q_{N56} (correspondendo a t_{56}), Q_{N84} (correspondendo a t_{84}), Q_{N180} (correspondendo a t_{180}) e Q_{N365} (correspondendo a t_{365})

Aos 7 dias de idade do concreto (contados a partir da data de produção), foi realizado o primeiro teste de percolação de água através das fissuras nos discos, com o objetivo de obter a leitura inicial do fluxo de água antes do início do processo de cicatrização por imersão. Para a realização do ensaio, o conjunto foi posicionado na vertical, com o disco na parte inferior e o tubo de reservatório de água na parte superior. Em seguida, o tubo foi preenchido com uma coluna de água de aproximadamente 200 mm, medida entre a superfície do disco e o nível superior da água (Figura 20).



Fonte: Autora (2025)

A primeira leitura do nível superior da água foi registrada e utilizada como referência para as medições subsequentes, além de marcar o tempo inicial do ensaio (tempo 0). As leituras da redução do nível de água foram realizadas nos tempos de 5, 10, 15, 20, 25, 30 e 60 minutos, esses intervalos foram selecionados para garantir a representatividade do tempo de fluxo, considerando as diferentes aberturas de fissura e as variações no fluxo de água.

Optou-se por apresentar os resultados do ensaio no tempo de 60 minutos (APÊNDICE B). Este período é o mais longo entre os analisados, o que o torna mais representativo para o cálculo do índice de cicatrização das fissuras.

Após a realização do primeiro teste, os discos permaneceram submersos em água para a cura do concreto, sendo retirados apenas para a execução dos ensaios nas idades programadas: 28 dias (t_{28}), 56 dias (t_{56}), 84 dias (t_{84}), 180 dias (t_{180}) e 365 dias (t_{365}).

3.1.5.2.1 Análise estatística

Os resultados de cada classe de concreto foram submetidos a análise estatística para verificação da variância entre cada fator adotado. Os indicadores para cada fatores correspondentes as e_0 por intervalo em quatro níveis: $100 \mu\text{m} \leq e_0 < 200 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m} \leq e_0 < 300 \mu\text{m}$; $300 \mu\text{m} \leq e_0 < 400 \mu\text{m}$; e $400 \mu\text{m} \leq e_0 < 500 \mu\text{m}$ e para a presença de adição cristalizante com três níveis: sem adição cristalizante, com adição cristalizante A e B em relação ao I_c resultantes nos períodos t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} . Para o tratamento foi utilizado o *software* RStudio (2024), que consiste em um compilador para linguagem de programação R. Desta forma, foi aplicada a análise multivariada da variância (MANOVA), com a finalidade de demonstrar que as variações nos fatores atribuídos nos ensaios têm influência nos resultados do indicador de Índice de cicatrização nos tempos de cura em água. Por conseguinte, foi aplicado o teste de Tukey da diferença totalmente significativa indicada pelo o grau de comparação aos pares de cada fator adotado.

3.1.5.3 Cura e das condições do ambiente

Após a leitura inicial do teste de percolação (t_0 , sem cicatrização, tomado como referência), as amostras permaneceram nos aparatos. Para evitar interferências no processo de cicatrização entre os traços estudados, os dispositivos foram separados por traço e submersos em recipientes com água, cada um contendo apenas um tipo de traço. Os aparatos foram armazenados na posição horizontal para reduzir ou eliminar qualquer influência da pressão ou do fluxo da água de cura.

Os recipientes, contendo o conjunto de discos e os tubos de PVC, foram mantidos em uma câmara controlada a $25^\circ\text{C} \pm 5^\circ\text{C}$ e umidade relativa próxima de 95%, sendo retirados apenas uma hora antes da realização dos ensaios de percolação (Figura 21):

Figura 21 - Imagem com a condição do ambiente e da cura



Fonte: Autora (2025)

3.1.6 Teste de penetração de íons cloretos

O teste de penetração de cloreto de sódio no concreto permite verificar se a cicatrização na fissura foi suficiente e eficaz, para impedir a migração interna da solução em comparação com a migração na superfície do concreto em contato com a solução. Os testes foram realizados nas amostras com as fissuras teoricamente cicatrizadas, tomando como referência a idade de 365 dias das amostras submersas em água. Esse ensaio é realizado de forma similar ao de percolação de água pela fissura, porém com a adição da solução de cloreto de sódio no reservatório de PVC ao invés da água.

Primeiramente, foi feito o selamento da fissura na superfície externa do disco com adesivo polimérico, permitindo assim, que a solução de água e íons cloretos de sódio não vazassem pela fissura. Após a secagem do selante por 24h, os tubos de PVC foram preenchidos com uma coluna de água de 200 mm contendo a solução de 33 g de NaCl por litro de água, e a solução foi mantida dentro dos tubos por 72 horas. Posteriormente, as amostras foram removidas do aparato e cortadas perpendicularmente à direção da fissura. Para evitar qualquer contaminação causada pelo corte, o procedimento de corte foi realizado por processo a seco para que os íons cloretos não fossem levados pela água, caso o corte fosse via úmida. Na sequência, uma solução de nitrato de prata com a concentração de 0,1 mol por litro foi pulverizada em ambas as superfícies dos discos cortados. Então os discos permaneceram por

O contraste no concreto promovido pela aplicação da solução indicadora a base de nitrato de prata é perceptível, em duas áreas distintas, onde a área mais escura denota uma região sem penetração de íons cloretos, já a área mais clara marca a região com penetração de íons cloretos. A partir da diferença de coloração foi possível quantificar, pela medida de quatro pontos ao longo da superfície externa, totalizando 8 pontos e em intervalos de 20 mm, começando com um espaçamento de 10 mm da superfície, evitando assim, a consequência da selagem a esses pontos tomando como S1, S2, S3, S4, S5, S6, S7 e S8. De forma similar, foram medidos três pontos em cada superfície ao longo do caminho da fissura, os quais a distância de 20 mm da superfície para evitar a influência da penetração da fissura, totalizando 6 pontos, denominamos como F1, F2, F3, F4, F5 e F6 (Figura 22).

Dessa forma, foi possível verificar o potencial interno de cicatrização das fissuras e corroborar com os resultados encontrados no índice de cicatrização.

Os resultados de cada classe de concreto (APÊNDICE C) foram submetidos a análise estatística para verificação da variância entre cada fator adotado. Os indicadores para cada fator foram e_0 , subclasse do concreto e os I_C nos períodos t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} em relação a penetração de íons cloreto resultantes. Os resultados foram tratados estatisticamente segundo a metodologia expressa no item 3.1.5.2.1. Desta forma, foi aplicada MANOVA, com a finalidade

de demonstrar que as variações nos fatores atribuídos nos ensaios têm influência nos resultados dos indicadores penetração de íons cloreto pela superfície externa e ao longo do caminho da fissura. Por conseguinte, foi aplicado o teste de Tukey da diferença totalmente significativa indicada pelo o grau de comparação aos pares de cada fator adotado.

3.1.7 Análise visual

A análise visual foi por meio de duas técnicas distintas: registro de imagens ampliadas das fissuras por meio de um microscópio óptico digital para avaliar o avanço no fechamento da fissura com a idade; utilização da microscopia eletrônica de varredura (MEV) para avaliar os compostos cicatrizantes formados durante o processo.

3.1.7.1 Registro de imagem por meio de microscópio óptico digital

Foi utilizado o recurso de registros de imagens, a partir de um microscópio óptico digital, para obtenção da espessura e_0 representativa de cada amostra analisada. O instrumento também foi utilizado para fazer o registro da fissura antes e depois do processo de cicatrização nas idades de referência, 56, 84, 180 e 365 dias, após o início da cura dos discos por imersão em água. Dessa forma foi possível acompanhar o desenvolvimento dos produtos de cicatrização e fechamento superficial de cada fissura.

3.1.7.2 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

O objetivo do MEV foi observar a morfologia superficial, identificando a presença de vazios e possíveis produtos de hidratação que contribuíram para o processo de cicatrização das amostras da classe de concreto C30 e C50 mantidas em água por, no mínimo, 365 dias, de forma comparativa.

O preparo envolveu a extração de fragmentos por traço de concreto após os ensaios de percolação de água. As amostras foram coletadas após secagem em condições ambientais de laboratório, por no mínimo, 24h antes do ensaio, sem qualquer tratamento superficial, como polimento.

Para observar a morfologia e identificar constituição química elementar do produto da cicatrização (esbranquiçado) utilizou da EDS integrada ao MEV. O ensaio foi realizado somente no fragmento do produto de cicatrização da fissura do traço C30-A. A análise foi realizada sob tensão de aceleração de 30 kV.

A análise por microscopia foi feita via varredura de elétrons pelo MEV da marca JEOL, modelo JSM-6380LV, com de energia dispersa de raios-X da marca Oxford. As amostras foram

fixadas em fita de carbono e analisadas com ampliações de 30x, 500x, 2500x e 10000x (exceto a subclasse C50-R, cuja a primeira ampliação foi de 27x), utilizando detecção de elétrons secundários em todas as ampliações. Os ensaios procederam no Laboratório MULTILAM do INFI da UFMS

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados para a caracterização dos materiais e dos concretos. Assim como, a avaliação e desempenho do potencial de cicatrização das fissuras determinadas pelos ensaios: percolação de água pelas fissuras; penetração de cloretos, monitoramento do fechamento superficial das fissuras por meio da análise visual.

4.1 Caracterização dos materiais

4.1.1 Ensaios normativos

4.1.1.1 Agregados

As areias são bem distintas quanto as características físicas, pois a areia natural fina possui diâmetro máximo e módulo de finura inferior quando comparado ao módulo de finura da areia natural grossa, denotando assim um melhoramento no empacotamento no arranjo entre as partículas dos agregados (Tabela 4). Quando verificado os limites elencados substâncias nocivas no agregado miúdo a partir da NBR 7211 (ABNT, 2022) as areias atenderam os requisitos.

Tabela 4 - Característica dos agregados miúdos - Areias

Normativa de ensaio (ABNT)	Agregado	Determinação		Limites (NBR 7211:2022)
		AF	AG	
NBR 17054:2022	Diâmetro máximo (mm)	0,60	2,38	-
NBR 17054:2022	Módulo de finura	1,16	2,53	-
NBR 16916:2021	Densidade na condição seca (g/cm ³)	2,69	2,54	-
NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto kg/m ³)	1490,00	1595,32	-
NBR 16973:2021	Teor de material pulverulento (%)	1,4	0,8	< 5,0 %
NBR 17053:2022	Impurezas orgânicas	Mais clara	Mais clara	Mais clara que a solução

Fonte: Autora (2025)

As Tabelas 5 e 6 apresentam as características dos agregados graúdo e quando verificado os limites normativos ambos os agregados estão de acordo com a NBR 7211 (ABNT, 2022).

Tabela 5 - Características dos agregados graúdos – Brita 4,75/12,5 (Pedrisco)

Normativa de ensaio (ABNT)	Agregado	Determinação	Limites (NBR 7211:2022)
		Pedrisco	
NBR 17054:2022	Diâmetro máximo (mm)	12,7	-
NBR 17054:2022	Módulo de finura	6,02	-
NBR 16916:2021	Densidade na condição seca (g/cm ³)	2,90	-
NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1528,74	-
NBR 16973:2021	Teor de material pulverulento (%)	0,50	< 1,0%

Fonte: Autora (2025)

Tabela 6 - Características dos agregados graúdos – Brita 9,5/25

Normativa de ensaio (ABNT)	Agregado	Determinação		Limites (NBR 7211:2022)
		B1-A	B1-B	
NBR 17054:2022	Diâmetro máximo (mm)	25,0	25,0	-
NBR 17054:2022	Módulo de finura	7,17	7,19	-
NBR 16917:2021	Densidade na condição seca (g/cm ³)	2,87	2,87	-
NBR 16972:2021	Massa unitária no estado solto (kg/m ³)	1,52	1,59	-
NBR 16973:2021	Teor de material pulverulento (%)	0,90	0,30	< 1,0%

Fonte: Autora (2023)

As Figuras 23 e 24 mostram, respectivamente, as distribuições granulométricas dos agregados miúdos e graúdos. Conforme a Figura 23, a areia fina se enquadra fora do limite inferior da zona de distribuição granulométrica das areias, portanto, não se enquadrando dentro dos limites recomendado pela NBR 7211 (ABNT, 2022), entretanto pelos estudos prévios de dosagem essa característica física natural do agregado não limita sua aplicabilidade. Porém, a areia natural grossa se enquadrou na sua maioria da distribuição granulométrica entre os limites das faixas da zona ótima (Figura 23).

Figura 23 - Distribuição granulométrica dos agregados miúdos: areia fina e areia grossa

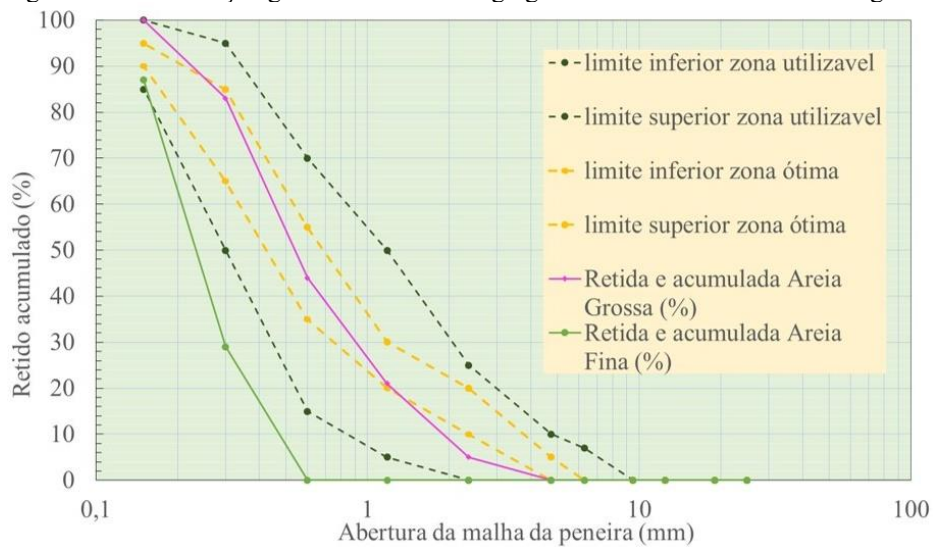
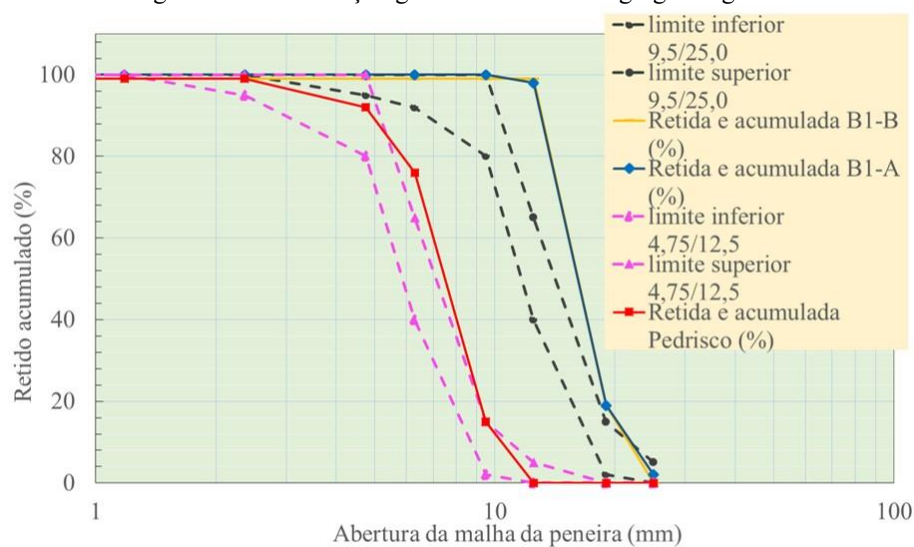


Figura 24 - Distribuição granulométrica dos agregados graúdos



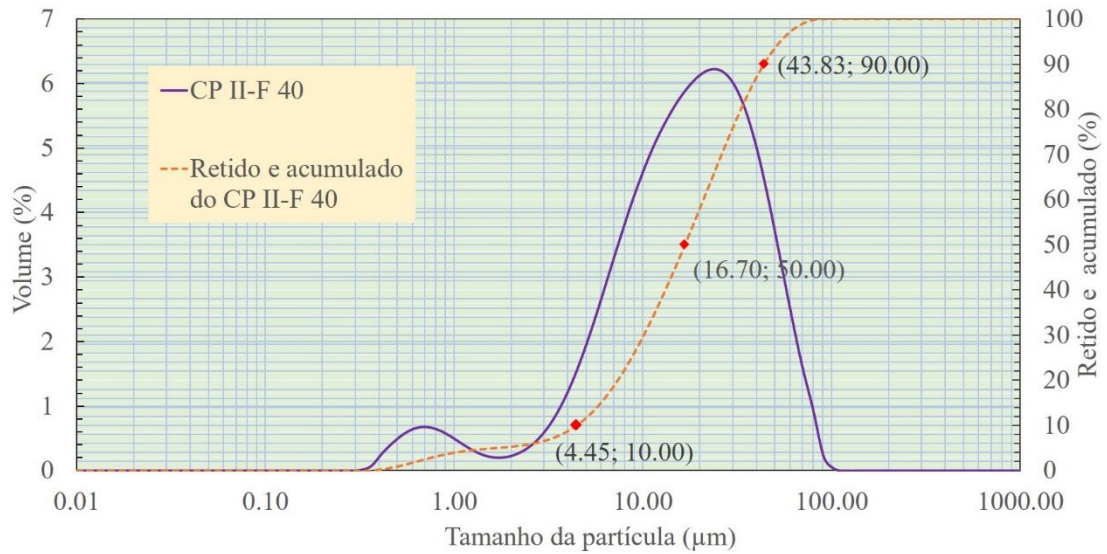
4.1.2 Caracterização dos materiais finos

4.1.2.1 Cimento Portland: CP II-F 40

4.1.2.1.1 Granulometria

A Figura 25 apresenta a curva de distribuição granulométrica das partículas do cimento CP II-F 40, onde percebe-se que 90% das partículas apresentam dimensão inferior a 43,83 μm , e cerca de 50% das partículas apresentam dimensão inferior a 16,70 μm .

Figura 25 - Distribuição granulométrica do cimento Portland CP II-F 40



Fonte: Autora (2025)

4.1.2.1.2 Caracterização mineralógica

A Tabela 7 apresenta um resumo dos resultados da caracterização físico-químico-mecânico, associados aos limites normativos, de acordo com a NBR 16697 (ABNT, 2018). Verificou-se que o teor em massa do trióxido de enxofre da amostra ensaiada apresentou valor superior ao limite normativo.

Tabela 7 - Caracterização do cimento Portland CP II-F 40

Cimento CP II-F 40		Teor (% em massa)	
		Resultados	Limite normativo (NBR 16697:2018)
Perda ao Fogo (PF)*		5,70	≤ 12,5
Dióxido de silício (SiO ₂)		10,80	-
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)		2,91	-
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)		3,70	-
Óxido de cálcio (CaO)		74,21	-
Óxido de magnésio (MgO)		-	-
Trióxido de enxofre (SO ₃)		5,40	≤ 4,5
Óxido de sódio (Na ₂ O)		-	-
Óxido de potássio (K ₂ O)		1,53	-
Anidrido Carbônico (CO ₂)		-	≤ 11,5
Óxido de estrôncio (SrO)		1,04	-
Dióxido de titânio (TiO ₂)		0,30	-
Óxido de manganês (MnO)		0,05	-
Dióxido de zircônio (ZrO ₂)		0,05	-
Óxido de zinco (ZnO)		0,02	-
Granulometria a laser (μm)	Diâmetro médio	20,88 μm	-
	Diâmetro a 10%	4,48 μm	-
	Diâmetro a 50%	16,70 μm	-
	Diâmetro a 90%	43,82 μm	-
Massa específica (g/cm ³)		3,04	-
Área específica (Blaine) (cm ² /g) *		4193,0	-
3 dias		36,1	≤ 15,0

Resistência a	7 dias	40,9	$\leq 25,0$
compressão (MPa)*	28 dias	46,8	$\leq 40,0$

*Resultados obtidos a partir do certificado do Cimento CP II-F 40 da marca Interceмент Brasil

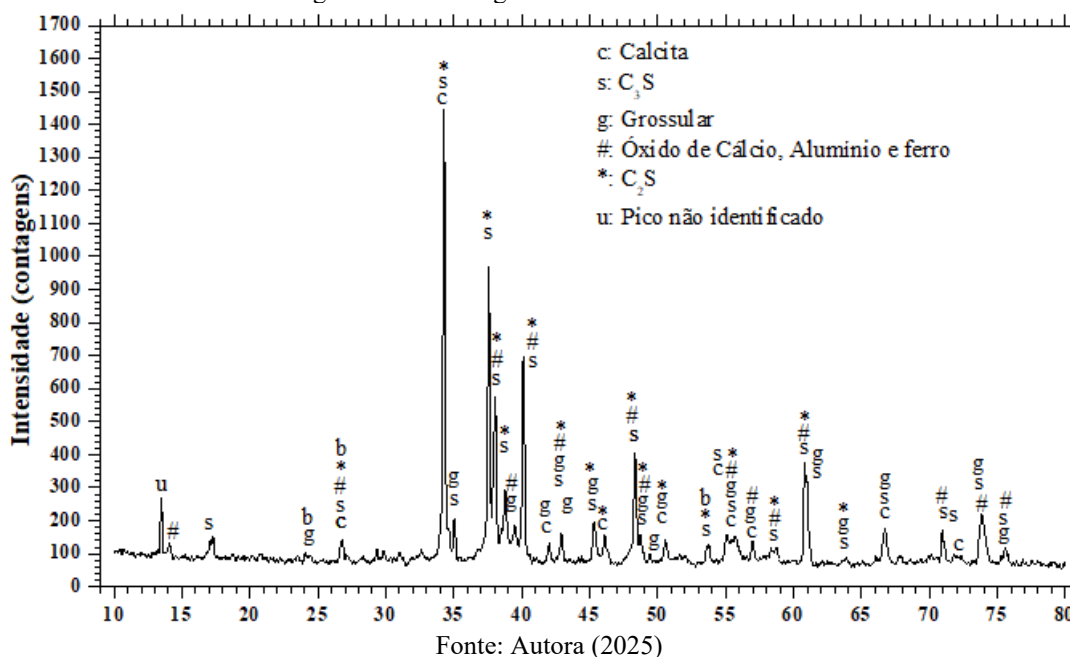
Fonte: Autora (2025)

A Figura 26 apresenta o difratograma do cimento CP II-F 40. Nota-se a presença das fases de constituição do clínquer: C_3S e C_2S e também a calcita, advinda da adição mineral (*filler* calcário) utilizado no cimento CP II-F.

A fase identificada como grossular não é típica da composição do cimento nem formada durante a produção do clínquer. Sua presença pode estar relacionada à utilização de calcário impuro, contendo minerais como silicatos, óxidos e sulfatos, ou originado de rochas metamórficas ou hidrotermais, que, por se formarem sob altas temperaturas e pressões, podem conter grossular (um tipo de granada) e minerais associados incorporados ao calcário durante sua formação ou alteração (Sampaio; Almeida, 2005). Já a fase com os picos de óxido de cálcio, alumínio e ferro corresponde provavelmente a uma forma cristalina da fase C_4AF , uma das principais fases do clínquer, apresentando apenas uma variação estequiométrica em relação à fórmula ideal ($4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$).

O pico localizado em $13,5^\circ 2\theta$ não pôde ser associado a nenhuma das fases cristalinas conhecidas presentes na base de dados consultadas (ICDD). Este pico possivelmente pode estar relacionado a uma fase minoritária, pouco cristalina, ou a um produto residual da produção do cimento não amplamente caracterizado. Desta forma, optou-se por não o atribuir a nenhuma fase específica, mantendo o foco nas fases majoritárias reconhecidas.

Figura 26 - Difratograma do cimento CP II-F 40



4.1.2.2 Adições minerais cimentantes

4.1.2.2.1 Sílica ativa

4.1.2.2.1.1 Caracterização mineralógica

A Tabela 8 contém os resultados do ensaio de FRX. A composição química elementar da sílica ativa, basicamente é constituída por quartzo (dióxido de silício).

Tabela 8 - Caracterização química da sílica ativa

Análise química	Teor em massa (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	86,41
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	1,95
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	2,72
Óxido de cálcio (CaO)	1,67
Óxido de magnésio (MgO)	1,58
Trióxido de enxofre (SO ₃)	1,00
Óxido de potássio (K ₂ O)	2,82
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,01
Óxido de manganês (MnO)	0,75
Óxido de zinco (ZnO)	0,07
Pentóxido de difósforo (P ₂ O ₅)	0,81
Óxido de bário (BaO)	0,17
Óxido de cobre (CuO)	0,03
Óxido de estrôncio (SrO)	0,01
Óxido de rubídio (Rb ₂ O)	0,01
Dióxido zircônio (ZrO ₂)	< 0,01

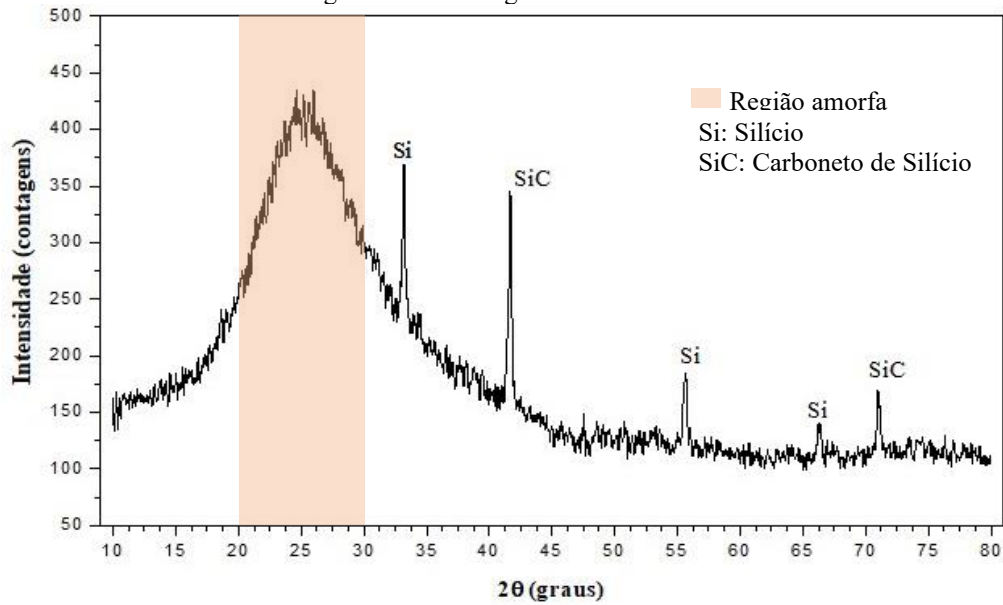
Fonte: Resultados da pesquisa (2025)

A Figura 27 apresenta o difratograma da amostra, no qual foram identificados possíveis picos de Si e SiC, além de uma estrutura amorfa, evidenciada por um halo difuso entre 20° e 30° (2θ), faixa típica de materiais pozolânicos (Amaral; Macioski; Medeiros, 2021).

A presença de silício elementar cristalino e também do carboneto de silício possa ter ocorrido por contaminação metálica ou sílica obtida a partir dos subprodutos industriais de resíduos de silício metálico. Isso ocorre, porque a sílica ativa é um resíduo da produção do silício ou de ligas de ferrosilício, obtidos a partir do quartzo de alto grau de pureza e de carvão em forno elétrico de arco submerso ¹ (Neville, 2016).

¹ É um forno elétrico industrial usado para fundir materiais metálicos ou não metálicos, predominante para a produção de ferroligas (LEE, 2001).

Figura 27 - Difratoograma da sílica-ativa



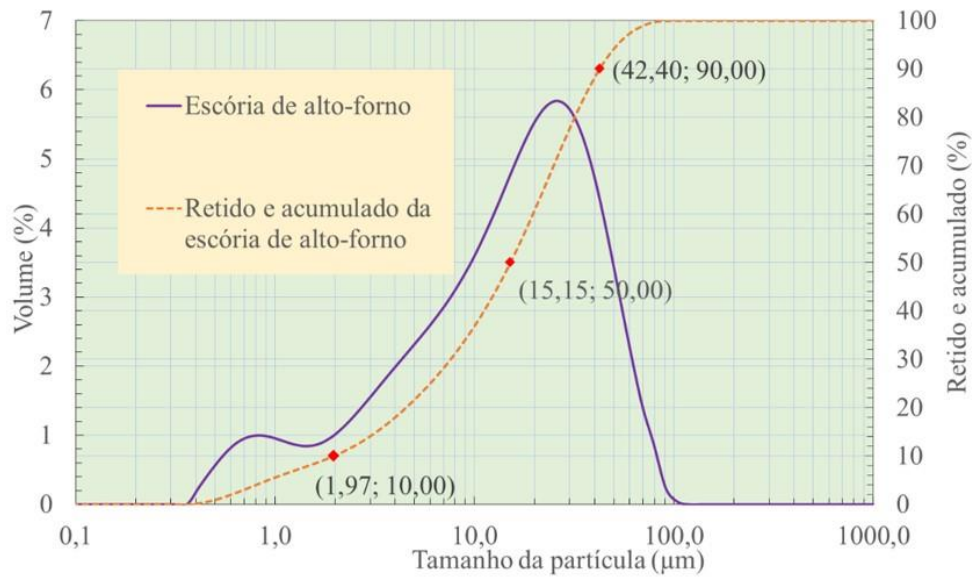
Fonte: Autora (2025)

4.1.2.2.2 Escória de alto-forno

4.1.2.2.2.1 Granulometria

A análise granulométrica a laser da escória de alto-forno apresentou 90% das partículas retidas e acumuladas são menores que 42,40 μm e 50% são inferiores a 15,15 μm . Quando comparado ao cimento CP II-F 40, os teores retidos e acumulados de ambos os materiais apresentam valores similares. No entanto, em 10% das partículas acumuladas, a escória de alto-forno é significativamente mais fina, com diâmetros menores de 1,97 μm , denotando uma fração ultrafina mais expressiva do que no cimento em questão. A média do tamanho das partículas de escória é de 19,31 μm (Figura 28). Esse resultado confirma a natureza fina e pulverulenta do material após a moagem, processo que reduz significativamente seu tamanho, podendo gerar partículas com dimensões inferiores a 45 μm (LEA, 1971). A distribuição fina das partículas contribui para o maior reatividade e potencial pozolânico da escória, devido ao aumento da área superficial específica. (Shi; Qian, 2000).

Figura 28 - Distribuição granulométrica da escória de alto-forno



Fonte: Autora (2025)

4.1.2.2.2 Caracterização mineralógica

A caracterização química elementar via DRX da escória de alto-forno está na Tabela 9. Como pode ser visto, basicamente a escória de alto-forno utilizada na confecção das dosagens C30 é composta pelos óxidos: cálcio, silício e alumínio. Por ser um subproduto não metálico da fabricação do ferro-gusa, sua composição pode ser formada em mais de 95% por silício, cálcio, alumínio, magnésio e oxigênio. Sua composição pode variar de acordo com sua origem, trata-se de um material cimentício. Seus constituintes devem atender a intervalos: CaO (30% a 45%), SiO₂ (30% a 48%), Al₂O₃ (15% a 25%), Fe₂O₃ (0,5% a 2%) e outros óxidos em menores proporções (Shetty; Jain, 2013).

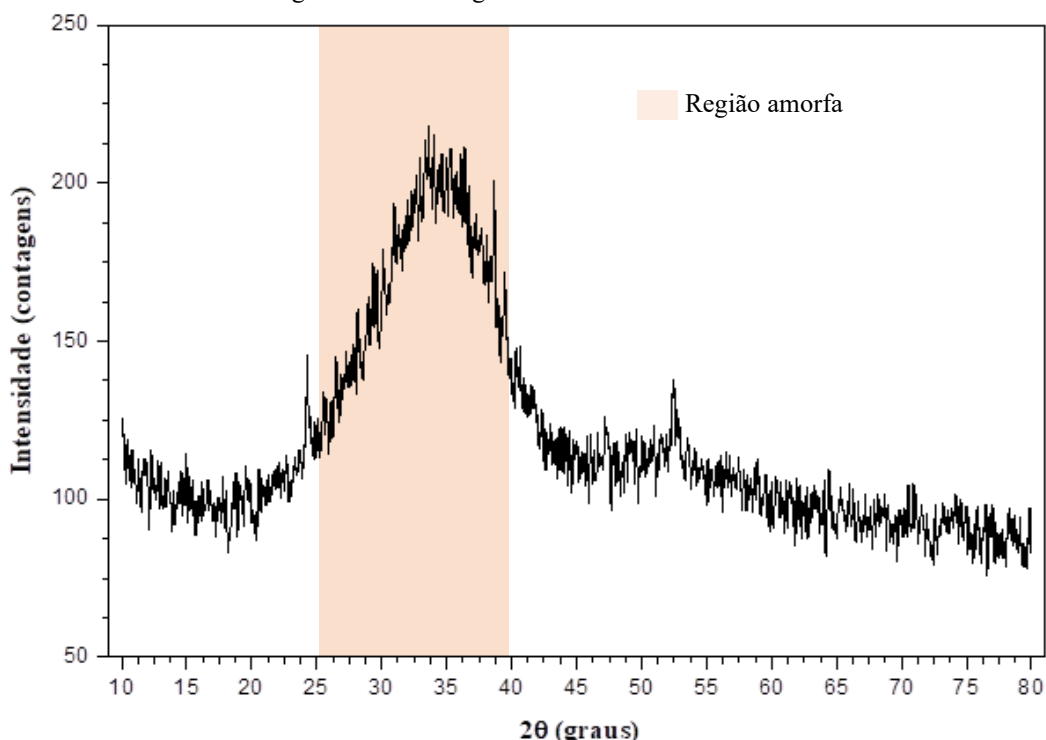
Tabela 9 - Caracterização química da escória de alto-forno

Análise química	Teor em massa (%)
Dióxido de silício (SiO ₂)	33,30
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	10,54
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	3,54
Óxido de cálcio (CaO)	42,75
Óxido de magnésio (MgO)	3,84
Trióxido de enxofre (SO ₃)	1,62
Óxido de potássio (K ₂ O)	1,53
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,49
Óxido de manganês (MnO)	1,20
Óxido de bário (BaO)	0,74
Óxido de estrôncio (SrO)	0,36
Óxido de Ítrio (Y ₂ O ₃)	0,03
Dióxido zircônio (ZrO ₂)	0,07

Fonte: Resultados da pesquisa (2025)

Quando a escória de alto-forno é resfriada rapidamente e de forma brusca com jatos de água, sua solidificação resulta em um material amorfo composto por silicatos de cálcio, magnésio e alumínio, com estrutura predominantemente não cristalina (Shi; Qian, 2000). O difratograma apresentado na Figura 29 confirma essa característica, evidenciando um halo amorfo entre 25° e 40° (2 θ), típico de materiais com atividade pozolânica.

Figura 29 - Difratograma da escória de alto-forno



Fonte: Autora (2025)

4.1.2.3 Adições cristalizantes

4.1.2.3.1 4.1.2.3.1 Granulometria

A Tabela 10 contém um resumo com os resultados dos ensaios da granulometria a laser e, na Figura 30 apresentam-se as distribuições granulométricas de ambas adições cristalizantes.

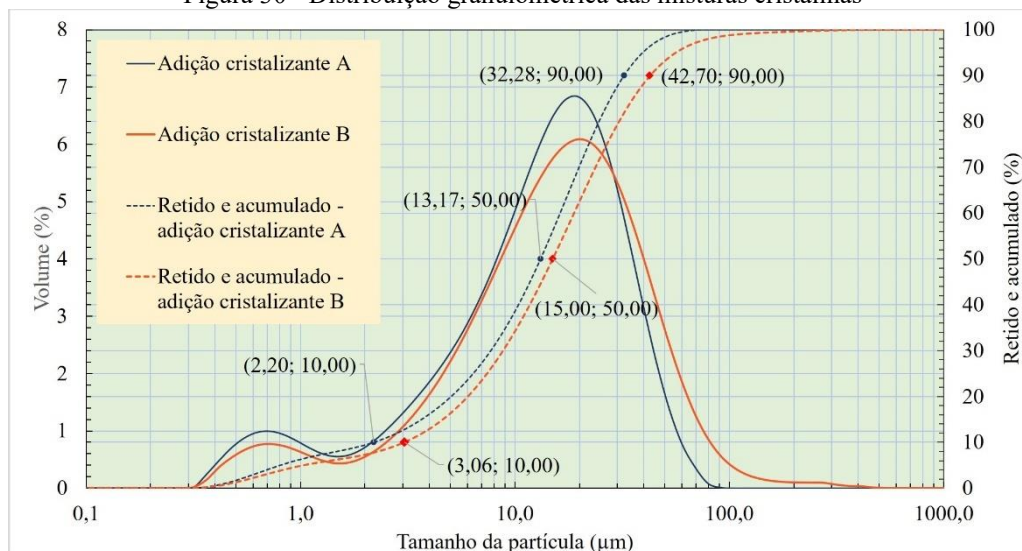
De acordo com os resultados das distribuições granulométricas, a amostra da adição cristalizante B possui frações com maiores dimensões de tamanho de partícula, quando comparada com a amostra ao A, embora a diferença numérica seja pequena.

Tabela 10 - Granulometria a laser das misturas cristalinas

Diâmetros	Adições cristalizantes	
	A	B
Diâmetro a 10% (μm)	2,20	3,06
Diâmetro a 50% (μm)	13,17	15,00
Diâmetro a 90% (μm)	32,28	42,70
Diâmetro médio (μm)	15,70	20,96

Fonte: Autora (2025)

Figura 30 - Distribuição granulométrica das misturas cristalinas



Fonte: Autora (2025)

4.1.2.3.2 Caracterização mineralógica

A caracterização química das adições cristalizantes (Tabela 11) mostram que ambas as marcas comerciais são compostas principalmente por óxido de cálcio e dióxido de silício, com teores moderados de óxido de alumínio, trióxido de enxofre e óxido de ferro, variando entre 2,40% e 4,52%. Como esperado e devido as diferentes formulações das adições cristalizantes comerciais, as proporções e os elementos identificados nos cristalizantes utilizados neste estudo são diferentes relatados por outros pesquisadores. Segundo Nasim; Dewangan; Deo (2020a), a composição química dessas adições pode conter de 34% a 74% de óxido de cálcio. Entretanto, os resultados analisados indicam que os teores de CaO estão acima desse intervalo, e os teores de SiO₂ entre 8% a 16%, abaixo dos valores reportados pelos os autores.

De modo semelhante os autores García-Vera et al., (2018); Jaroenratanapirom; Sahamitmongkol, (2011); Park; Choi, (2018) e Sisomphon; Copuroglu; Koenders (2013) identificaram, por meio de FRX, os mesmo tipos de óxidos com teores superior 1%, embora com variação nas quantidade. Jaroenratanapirom; Sahamitmongkol, (2011) também encontram baixos teores dióxido de titânio, enquanto García-Vera et al. (2018) relataram a presença de óxidos de manganês e estrôncio em quantidades inferiores a 0,2%.

Tabela 11 - Caracterização química das adições cristalizantes

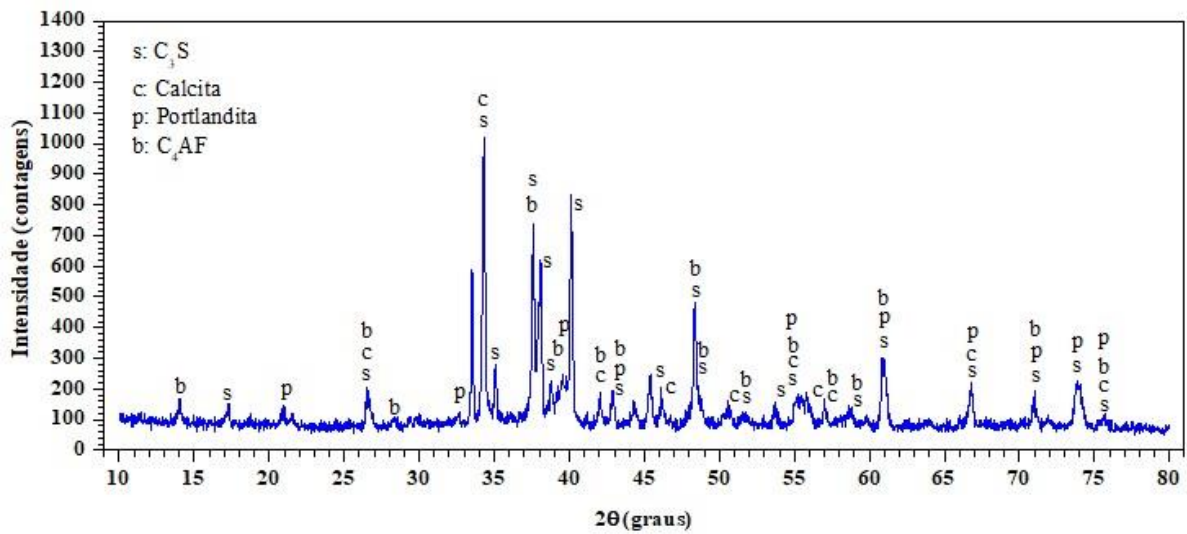
Análise química	Teor em massa (%)	
	A	B
Dióxido de silício (SiO ₂)	9,64	9,64
Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	2,44	2,53
Óxido de ferro (Fe ₂ O ₃)	4,51	3,52
Óxido de cálcio (CaO)	77,01	79,08
Trióxido de enxofre (SO ₃)	3,84	3,19
Óxido de potássio (K ₂ O)	1,36	0,94
Dióxido de titânio (TiO ₂)	0,34	0,25
Óxido de manganês (MnO)	0,19	0,10
Óxido de zinco (ZnO)	0,06	0,05
Óxido de paládio (PdO)	0,04	-
Óxido de prata (Ag ₂ O)	0,04	0,03
Óxido de cobre (CuO)	0,02	0,03
Óxido de estrôncio (SrO)	0,44	0,62
Óxido de rubídio (Rb ₂ O)	0,01	-
Dióxido zircônio (ZrO ₂)	0,03	0,03

Fonte: Autora (202)

As misturas apresentaram uma relação de óxidos CaO/SiO₂ de 7,99 para Adição cristalizante A e 8,18 para adição cristalizante B. A relação cálcio/sílica varia entre os estudos, sem um consenso claro sobre os limites de composição, pois não há definições normativas específicas, como ocorre para os cimentos Portland em relação às adições e ao clínquer com sulfato de cálcio. Segundo Oliveira et al. (2022), há uma ampla diversidade de opções industriais, e variações significativas na composição química e podem ocorrer até mesmo entre produtos do mesmo fabricante. Além disso, as misturas cristalinas, conhecidas globalmente por suas composições distintas, podem apresentar diferentes níveis de eficácia e comportamentos (Roig-Flores, 2018).

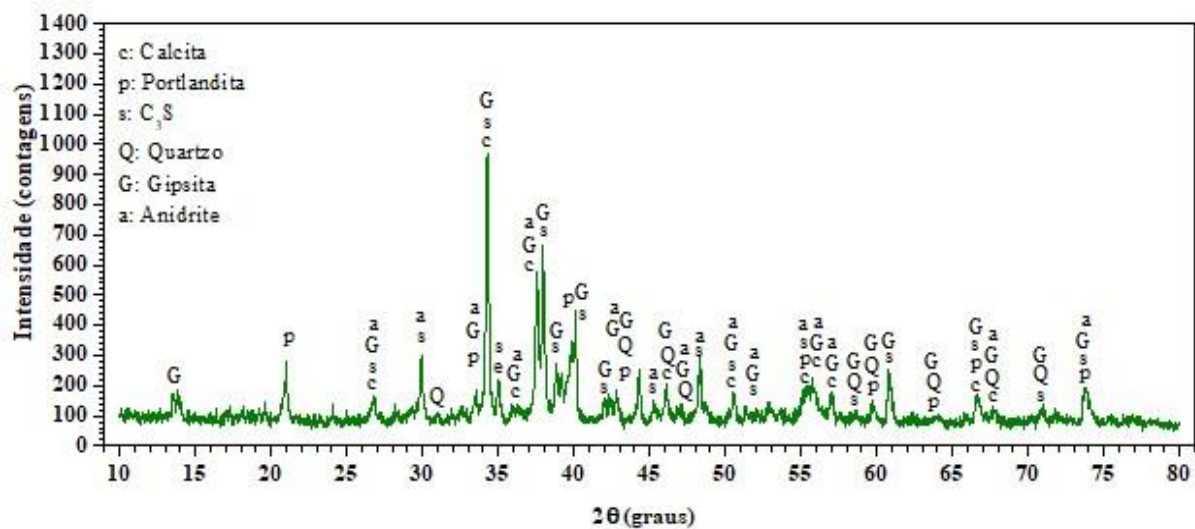
Nas Figuras 31 e 32 apresentam os difratogramas das adições cristalizantes A e B, respectivamente. As adições cristalizantes são compostas basicamente por cimento, areia e sílica (Ferrara; Krelani; Carsana, 2014). De maneira análoga os autores Nasim, Dewangan e Deo (2020a) também observaram as fases cristalinas dos compostos dos cimentos como C₃S e C₄AF, além da calcita, Portlandita e o quartzo. Ainda, foram identificados no difratograma da adição B, os compostos de sulfato de cálcio na versão hidratado (gipsita) e anidra (anidrite).

Figura 31 - Difratoograma da adição cristalizante A



Fonte: Autora (2025)

Figura 32 - Difratoograma da adição cristalizante B

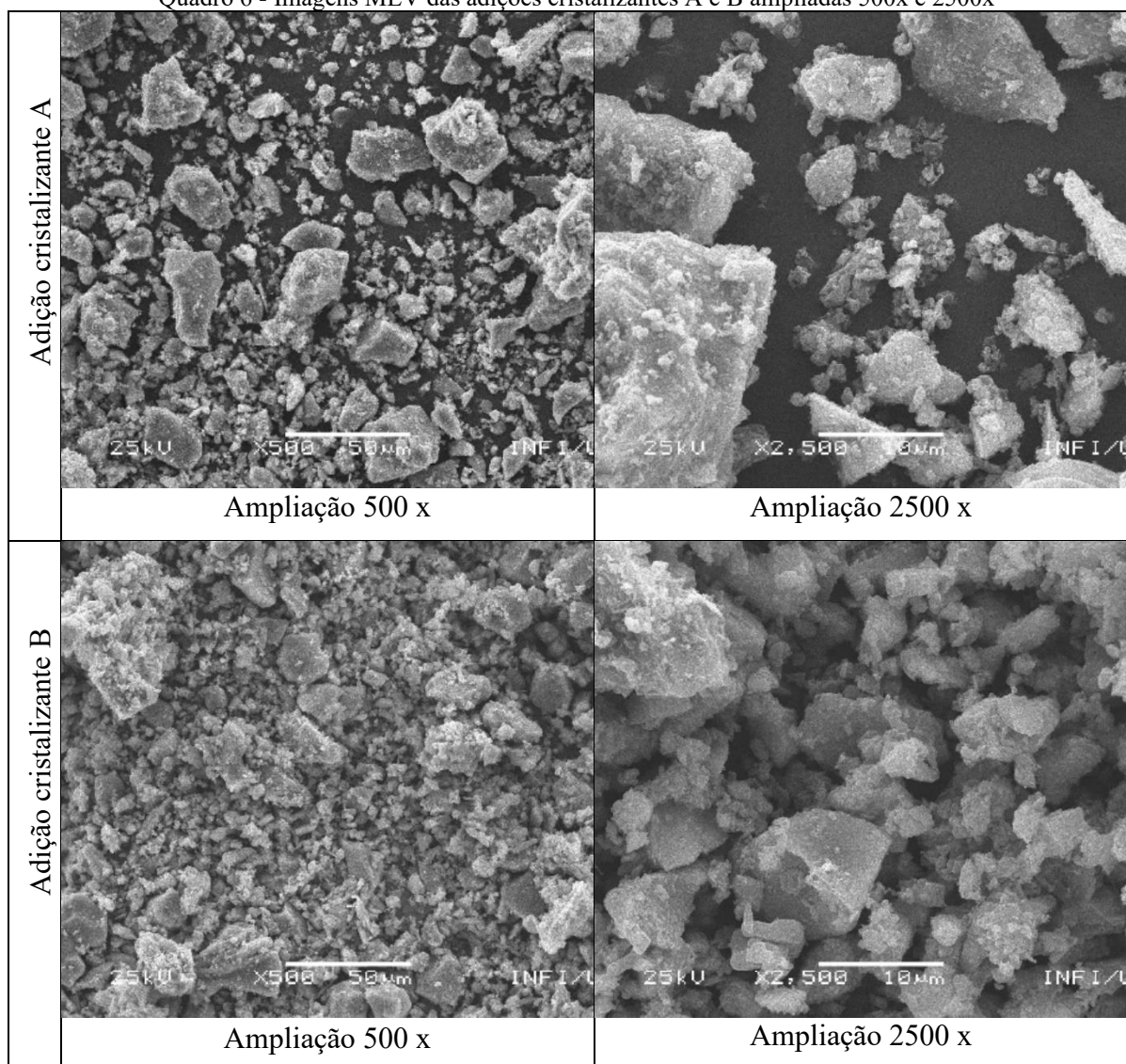


Fonte: Autora (2025)

4.1.2.3.3 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

As partículas das adições cristalizantes apresentam formato e tamanho irregulares como mostram no Quadro 6 e há uma disposição de partículas menores sobrepostas outras maiores. A morfologia e a composição das adições cristalizantes corrobora com a análises das misturas cristalizantes dos estudos de Ferrara; Krelani; Carsana (2014).

Quadro 6 - Imagens MEV das adições cristalizantes A e B ampliadas 500x e 2500x

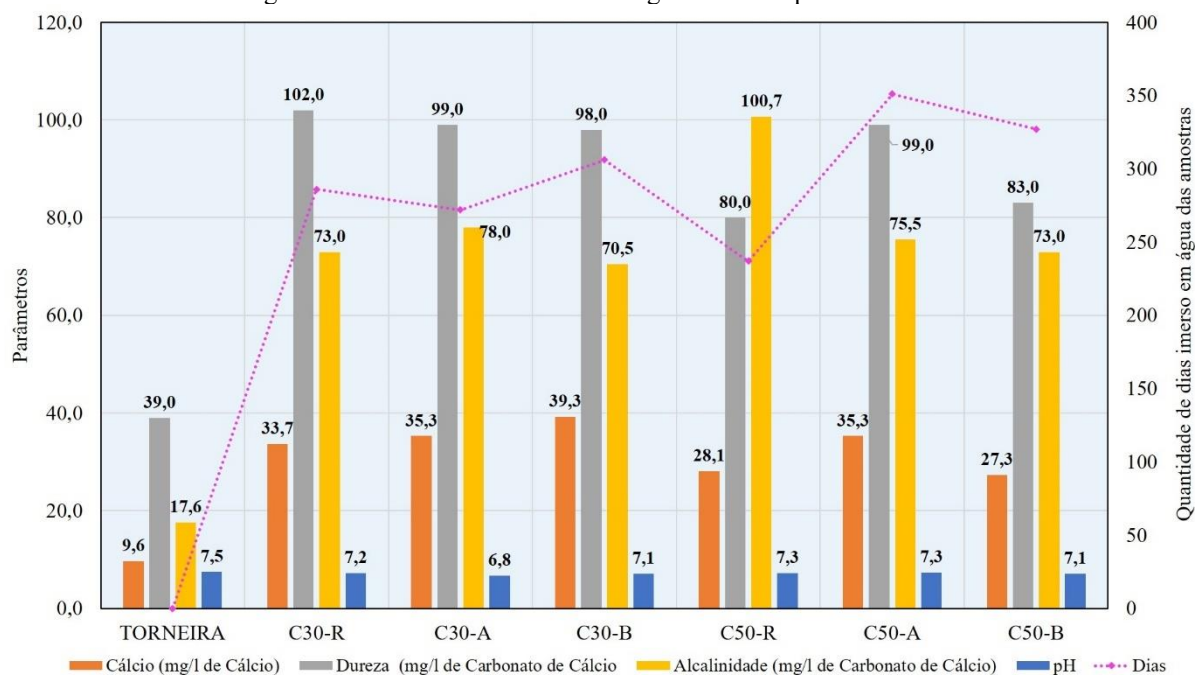


Fonte: Autora (2025)

4.1.3 Água

As análises de água (Figura 33) indicaram que houve variação nos resultados de suas propriedades após contato das amostras de concreto para as medidas do cálcio, dureza e alcalinidade, denotando assim, um aumento nos valores das águas de imersão independentemente da adição cristalina (A e B), das adições minerais (sílica ativa e escória de alto-forno) e em função do período de cicatrização (dias). No entanto, o pH não obteve diferença nos resultados, sugerindo assim que as amostras de concreto não impactaram na água de imersão, com relação ao pH das águas analisadas.

Figura 33 - Resultados de análise da água de cada tipo de concreto



Fonte: Autora (2025)

A concentração de íons cálcio (Ca^{2+}) dissolvidos na água em contato com o concreto ao longo do tempo apresentou variações entre 27,3 e 39,3 mg/L, dependendo da amostra analisada. Destaca-se que a maior concentração de cálcio foi observada no concreto C30 (39,3 mg/L), seguido pelo C50 (35,3 mg/L). Esses valores estão diretamente relacionados ao processo de lixiviação, no qual o hidróxido de cálcio, um dos principais produtos da hidratação do cimento Portland, é dissolvido e transportado para fora da matriz cimentícia.

O aumento da dureza da água de imersão, decorrente da dissolução de compostos do concreto, está diretamente relacionado à composição química dos materiais cimentícios utilizados. Nesse contexto, observa-se que a classe de concreto C30 apresentou valores mais elevados em comparação com a classe C50, o que pode estar associado às diferenças nos teores de óxidos de cálcio (CaO) e magnésio (MgO) das adições cimentantes empregadas. A escória de alto-forno apresenta teores mais elevados de CaO (42,75%) e MgO (3,84%), enquanto a sílica ativa possui concentrações significativamente menores, com CaO (1,67%) e MgO (0,92%). Essa diferença pode influenciar a disponibilidade desses íons na solução e, consequentemente, a dureza da água.

Embora tenha sido constatada a liberação de Ca^{2+} , o sistema manteve o equilíbrio alcalino, provavelmente em razão do tamponamento promovido pelo equilíbrio hidróxido-carbonato. Dessa forma, o pH permaneceu estável, indicando que o meio se manteve tamponado.

4.2 Caracterização do concreto

A resistência média à compressão axial, aos 28 dias, foi obtida pela média do ensaio em 2 corpos de prova cilíndricos $\phi 100$ mm x 200 mm. As resistências são apresentadas na Tabela 12, sendo que os valores experimentais foram superiores os 30 MPa, como estabelecido na NBR 6118 (ABNT, 2023) para classe de agressividade III.

Tabela 12 - Resumo das resistências à compressão axial aos 28 dias de idade

Classe de resistência	Identificação	Consumo de cimento (kg/m ³)	Resistência média (MPa)	Coefficiente de variação (%)
C30	C30-R	301,0	35,3	2,74
	C30-A		38,2	2,38
	C30-B		36,6	2,37
C50	C50-R	367,0	55,2	1,28
	C50-A		56,3	1,07
	C50-B		64,3	0,58

Fonte: Autora (2025)

Ao comparar os resultados entre as classes de concreto, os produzidos com sílica ativa obtiveram maiores resistências à compressão, devido as dosagens possuírem consumo de cimento superior aos traços produzidos com escória de alto-forno. Os resultados, também apontaram um aumento na resistência à compressão nas amostras com adições cristalizantes, com relação as amostras de referência. Não foi observado uma tendência e padrão da marca comercial da adição cristalizante para tal acréscimo de resistência quando verificado na mesma classe.

Entretanto, resultados semelhantes também foram encontrados nos estudo de Roig-Flores et al. (2015), Ziegler (2020) e Azarsa, Gupta e Biparva (2019), quando verificado um aumento na resistência à compressão na incorporação da adição cristalizante a mistura do concreto. Estes autores atribuíram o aumento na resistência à compressão axial, ao preenchimento dos poros e vazios, provocados pelas adições cristalizantes. Segundo Azarsa, Gupta e Biparva (2019) um possível aumento atribuído a resistência à compressão, deve-se, ao fato, da adição cristalizante funcionar como um ativador da hidratação do cimento, melhorando assim a microestrutura da pasta.

4.2.1 Caracterização mineralógica das classes de concreto

4.2.1.1 Classe de concreto C30

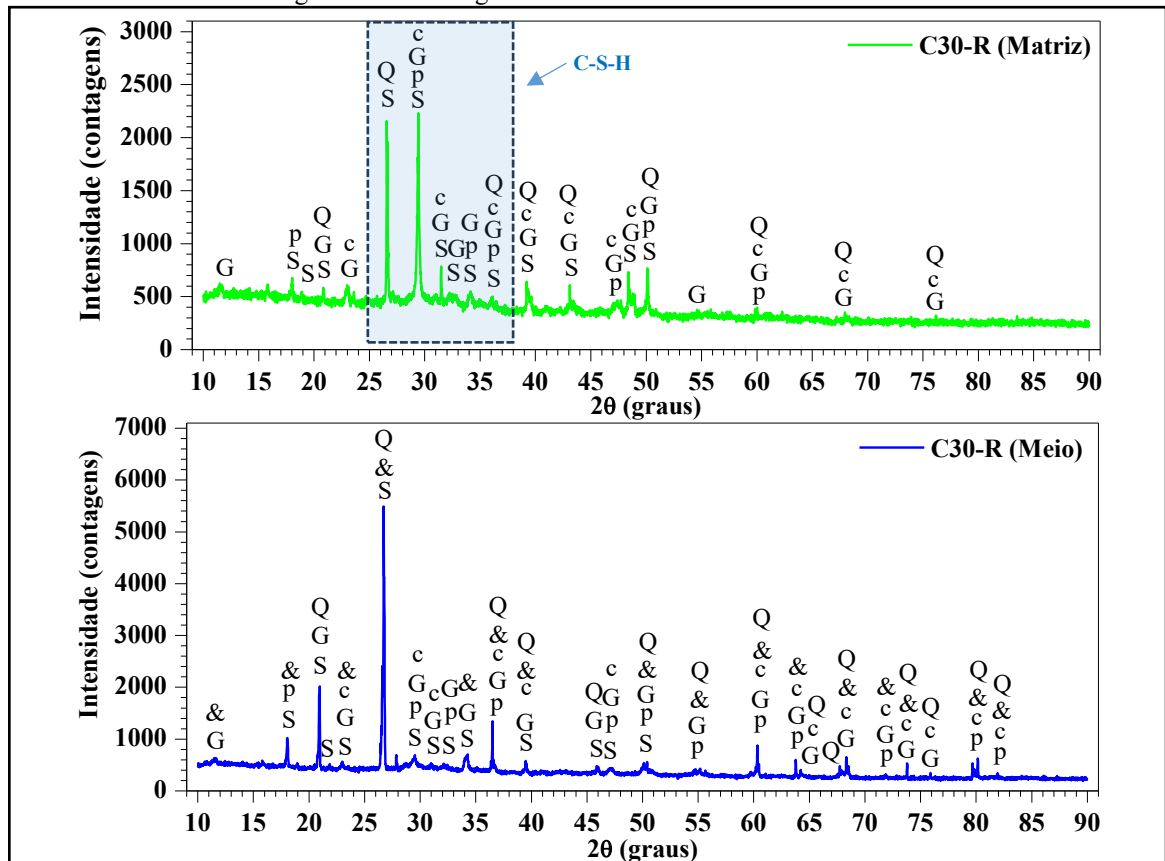
Os difratogramas analisados das subclasses de concreto C30-R, C30-A e C30-B, estão ilustradas, respectivamente nas Figuras 34, 35 e 36. Os principais compostos predominantes nos três traços analisados são quartzo proveniente da areia natural, calcita, associada ao *filler* calcário do cimento CP II-F ou ao processo de carbonatação; e sulfato de magnésio hidratado, possivelmente formado a partir do MgO da escória de alto-forno em contato com ambientes sulfatados, como a água da cura, gipsita e portlandita.

Outros compostos que foram detectados incluem óxido de cálcio e alumínio identificados nos traços C30-R e C30-B, dolomita nos traços C30-A e C30-B e compostos exclusivos no traço C30-A, como hannebachite e cowlesite. No traço C30-B, identificou-se ainda etringita e C_3S .

A intensidade relativamente baixa da portlandita no difratograma do C30-R (meio) confirma o consumo de $Ca(OH)_2$ pela escória, consequentemente na formação de C-S-H secundário. Segundo Rondon (2007), fases provenientes de reações pozolânicas, como C-S-H possui baixa cristalinidade e são difíceis de identificar em difratogramas. A área amorfa entre 25° e 38° (2θ) observada na Figura 34 pode corresponder C-S-H e/ou C-(A)-S-H, cuja estrutura pouco cristalina decorre da incorporação de alumínio e da fase vítrea residual da escória resfriada rapidamente.

No meio da fissura do traço C30-R observou-se aumento de picos relacionados a carbonatos (provavelmente a calcita) e sulfatos (provavelmente gipsita), indicando que a cicatrização ocorreu principalmente por carbonatação, com contribuição secundária de precipitados sulfatados. Esse resultado reforçam a natureza intrínseca da cicatrização no processo de selagem de fissura no traço referência (C30-R).

Figura 34 - Difratogramas da subclasse do concreto C30-R

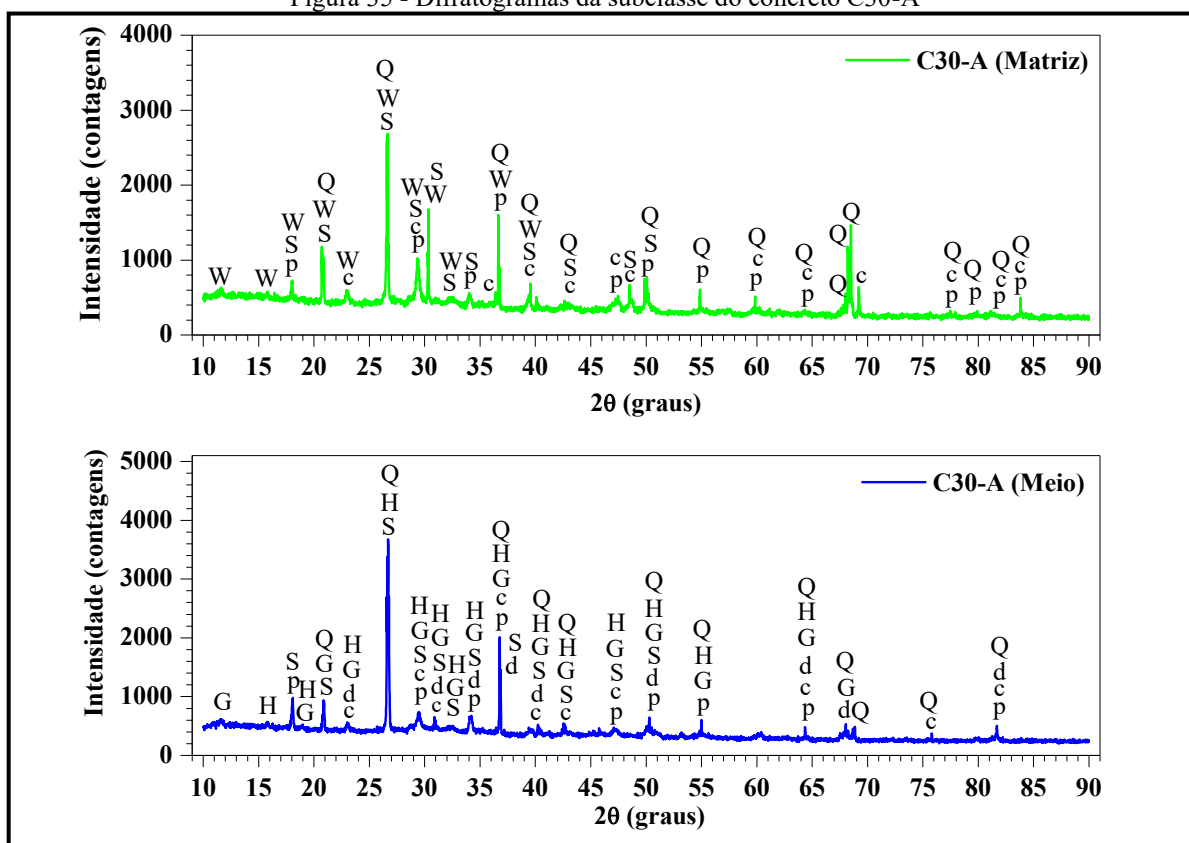


Legenda: S: Sulfito de magnésio hidratado, p: Portlandita, G: Gipsita, c: Calcita, Q: Quartzo, &: Óxido de cálcio e alumínio.

Fonte: Autora (2025)

Além de quartzo e carbonatados, destacam-se exclusivamente os picos de hannebachite e cowlesita no traço C30-A. A presença de hannebachite no meio da fissura e de cowlesita na matriz cimentícia, ambos não detectados nas adições cristalizantes, indicam que essas fases se formaram durante a reação do concreto, induzidas pela adição cristalizante A. Essas formações cálcicas, em especial, cowlesita, à disponibilidade de Ca, Si e Al, o que reforça a hipótese de uma cicatrização induzida por recristalização de aluminossilicatos hidratados. A hannebachite e gipsita complementam o processo, preenchendo vazios na fissura. Dessa forma, a cicatrização da subclasse de concreto C30-A ocorre por mecanismos mais complexo quando comparado ao traço referência (C30-R), com maior formação de fases cristalinas induzidas pela adição cristalizante.

Figura 35 - Difratogramas da subclasse do concreto C30-A

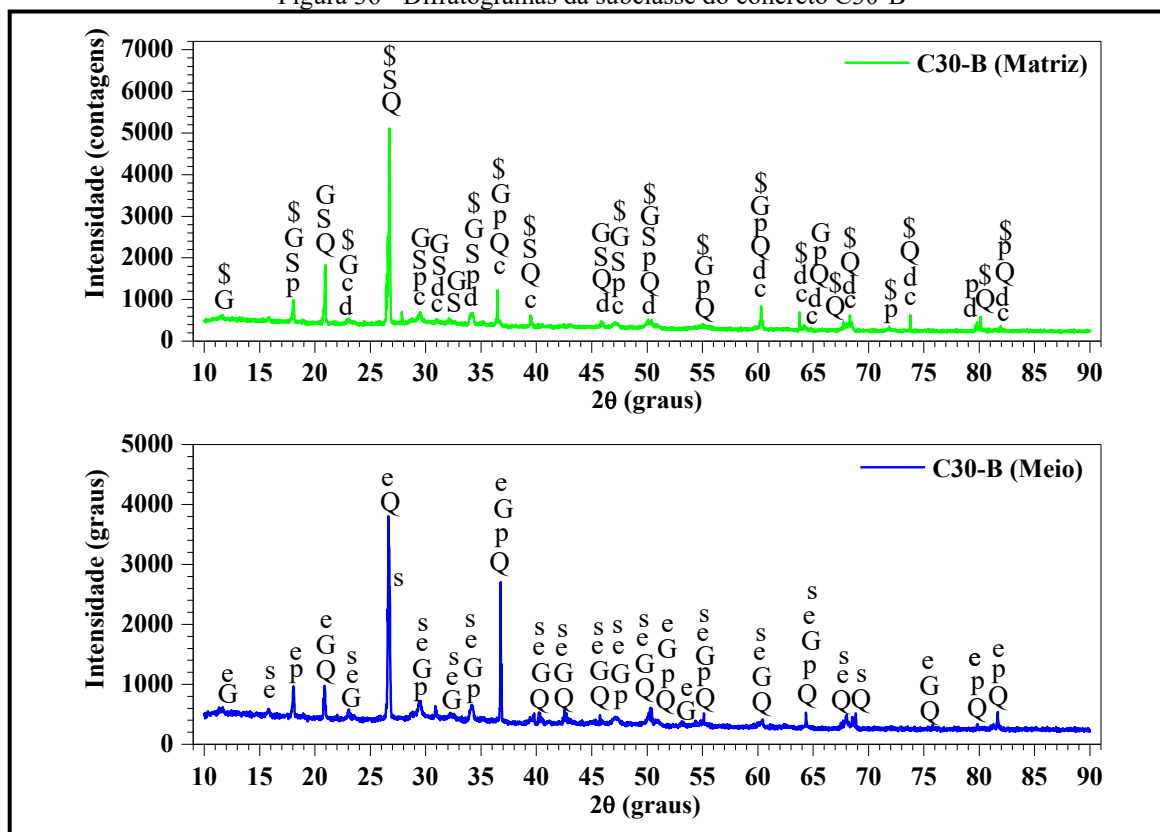


Legenda: S: Sulfito de magnésio hidratado, p: Portlandita, G: Gipsita, c: Calcita, Q: Quartzo, d: Dolomita, H: Hannebachite, W: Cowlesite.

Fonte: Autora (2025)

O traço C30-B além de apresentados os compostos comuns aos demais traços, ele apresentou também etringita. Nesse caso, o difratograma do meio da fissura evidenciou um aumento expressivo das fases sulfatadas, principalmente pelo indicativo de aumento dos picos de gipsita no meio da fissura, quando comparado a amostra da matriz do C30-B e a presença de etringita somente na amostra do meio da fissura, além da persistência do sulfito de magnésio hidratado, responsáveis pelo preenchimento rápido das fissuras.

Figura 36 - Difratogramas da subclasse do concreto C30-B



Legenda: S: Sulfito de magnésio hidratado, p: Portlandita, G: Gipsita, c: Calcita, \$: óxido de cálcio e alumínio, Q: Quartzo, d: Dolomita, e: Etringita, s: C₃S e \$: C₂A

Fonte: Autora (2025)

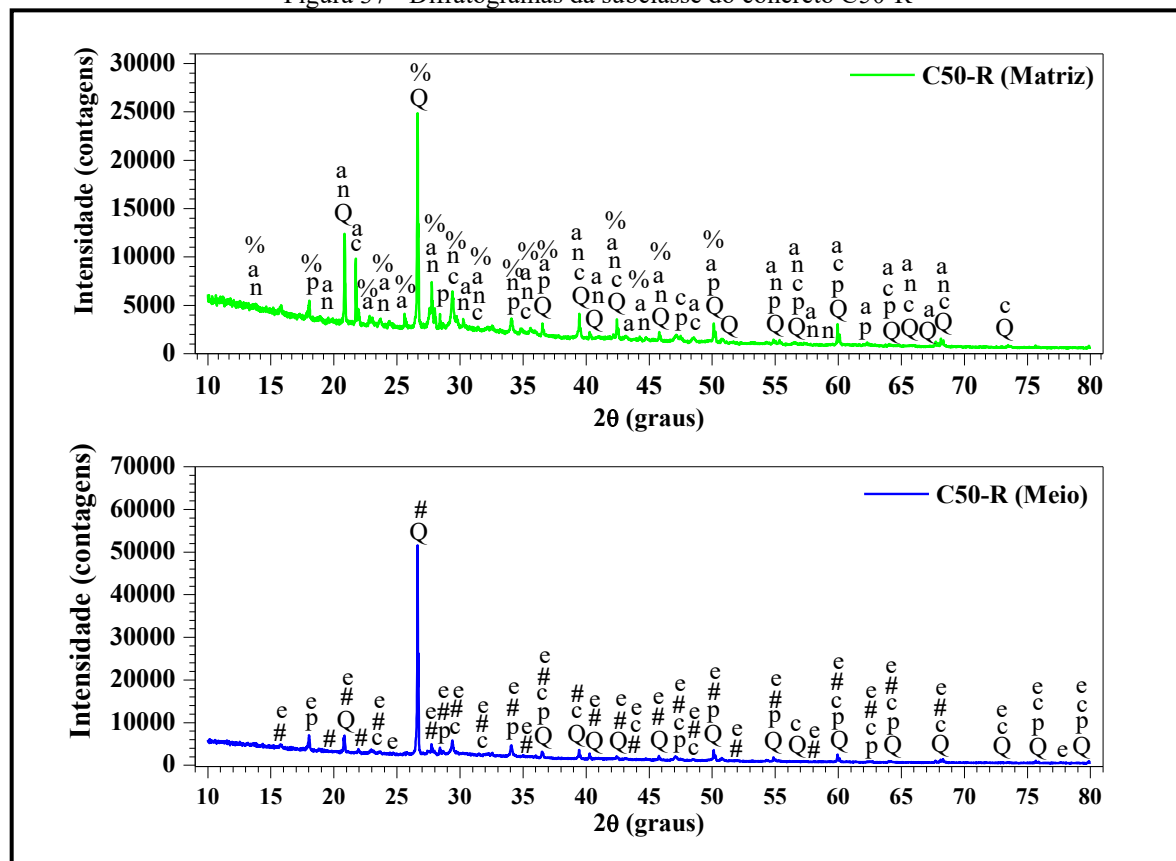
Portanto, a partir dos difratogramas foi possível identificar diferenças relevantes entre a matriz e o interior das fissuras de uma mesma classe de concreto, evidenciando os produtos associados ao processo de cicatrização. Essas variações permitiram distinguir o tipo de mecanismo predominante em cada traço da classe C30: no C30-R, a cicatrização é induzida principalmente pela carbonatação autógena, com formação de calcita e discretos traços de gipsita; no C30-A, o processo é caracterizado pela nucleação de aluminossilicatos hidratados (C-A-S-H), em combinação com hannebachite e gipsita; já no C30-B, a cicatrização está associada à formação de fases sulfatadas, destacando-se gipsita e etringita, complementadas pela presença de sulfito de magnésio hidratado.

4.2.1.2 Classe de concreto C50

Os difratogramas analisados das subclasses de concreto C50-R, C50-A e C50-B, estão dispostos, respectivamente nas Figuras 37, 38 e 39. Os principais compostos identificados, independentemente, da localização nos traços da classe C50 foram quartzo, atribuído aos minerais dos agregados miúdos. Identificou-se, ainda, a portlandita com indicação de consumo parcial de hidróxido de cálcio pela reação pozolânica, representada pela redução nos picos de

portlandita, consequentemente, formação de C-S-H secundário. É possível que o C-S-H esteja parcialmente carbonatado, devido ao processo natural de carbonatação ao longo do tempo e à presença do *filler* calcário previamente identificado entre as fases cristalinas do cimento e das adições cristalizantes (Oliveira, 2019).

Figura 37 - Difratogramas da subclasse do concreto C50-R



Legenda: Q: Quartz, p: Portlandita, c: Calcita, #: Andesina, e: Etringita, n: Esseneite, a: Albite, e %: Silicato de cálcio e alumínio.

Fonte: Autora (2025)

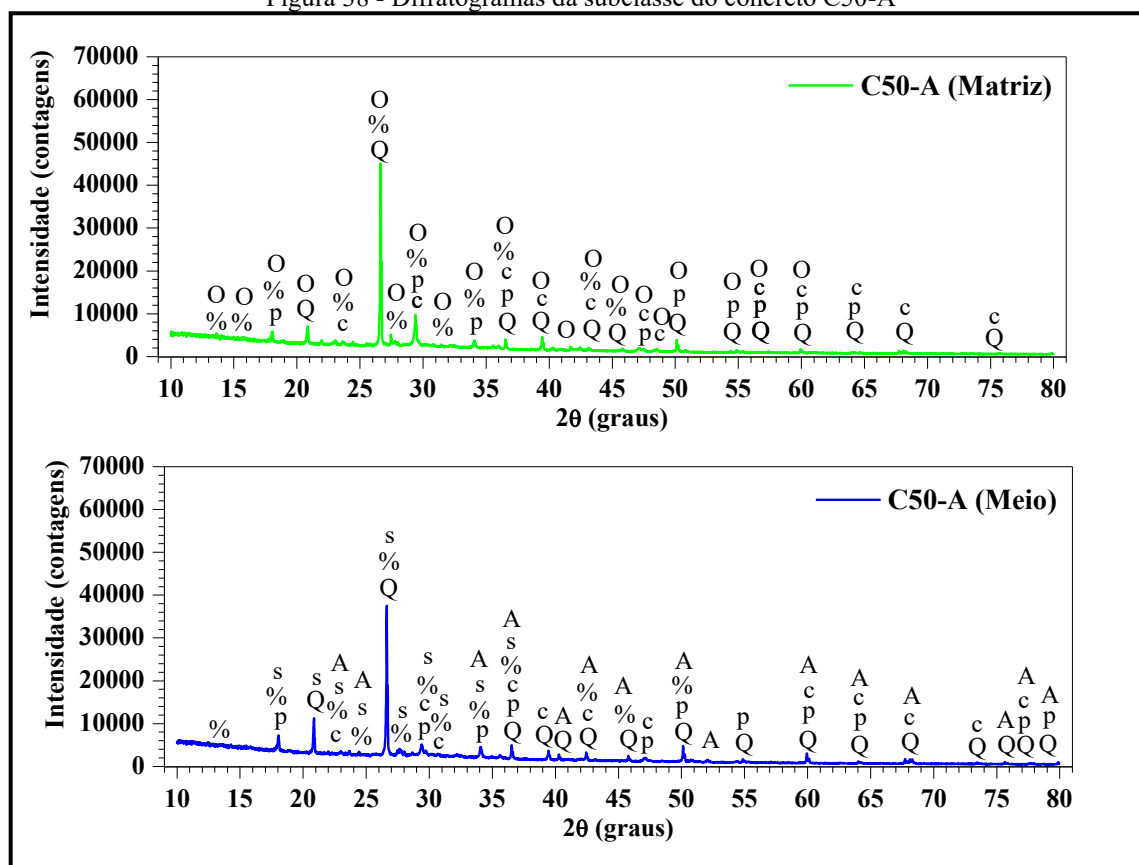
A presença de calcita e de carbonatos mais complexos, como a fase identificada de ankerite no meio da fissura traço C50-A sugere carbonatação parcial ou a presença de *fillers* carbonático. Entretanto, a ocorrência da fase cristalina de scawtita na matriz do traço C50-B pode estar possivelmente relacionada à carga de argilominerais presente no produto cicatrizante, uma vez que não foi constatada essa fase nos demais traços, atuando como fonte suplementar de sílica e alumina. Essa contribuição favorece a formação secundária de C-S-H, reforçando a matriz e auxiliando no processo complementar de cicatrização das fissuras. Segundo Pontes (2011), a scawtita pode ser formada a partir de argila submetidas a altas temperaturas. Em seu estudos sobre atividade pozzolânica em argamassas com o pó de argila

expandidas, foram identificados picos cristalinos típico de scawtita, também relatados por Morande et al. (2024) em pesquisas com solos do interior do Mato Grosso do Sul.

A presença de parte do grão de silicatos de cálcio não hidratados nos traços da classe C50 é atribuída a fases residuais do clínquer presente no cimento, previamente identificadas como C₃S e C₂S no difratograma do CP II-F 40. Além do quartzo, foram identificados picos das fases cristalinas orthoclase, albite, andesina e esseneite, atribuíveis aos minerais dos agregados graúdos de origem basáltica, comumente encontrados na mineralogia dos basaltos no estado de Mato Grosso do Sul (Machado et al., 2009).

Por fim, destaca-se a presença de etringita somente na amostra coletada no meio da fissura do traço referência (C50-R), fase normalmente associada hidratação inicial e/ou recristalização induzida pela presença de umidade e transportes de sulfatos. Essa formação localizada pode ter contribuído para o preenchimento da fissura por um mecanismo de cicatrização autógeno.

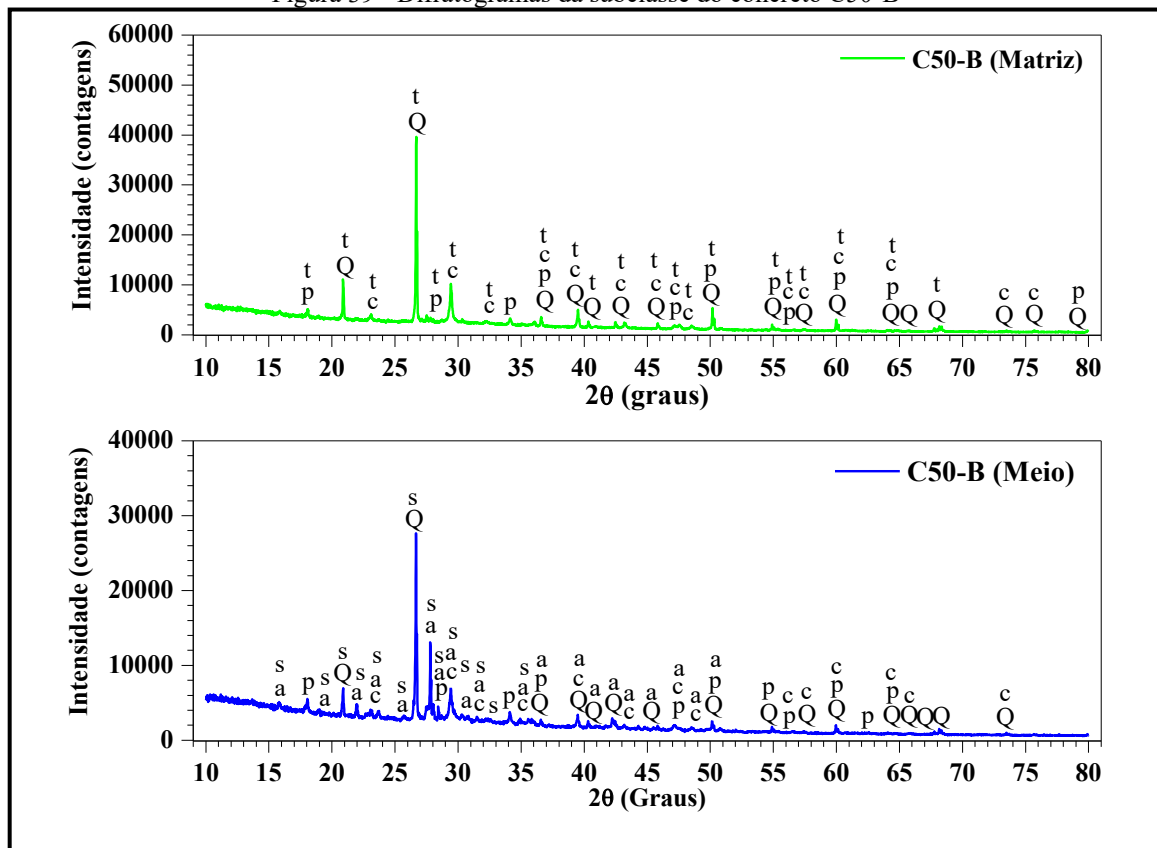
Figura 38 - Difratogramas da subclasse do concreto C50-A



Legenda: Q: Quartzo, p: Portlandita, c: Calcita, %: Silicato de cálcio e alumínio, s: C₃S, A: Ankerite e O: Orthoclase.

Fonte: Autora (2025)

Figura 39 - Difratogramas da subclasse do concreto C50-B



Legenda: Q: Quartzo, p: Portlandita, c: Calcita, a: Albite, s: C₃S e t: Scawtita.

Fonte: Autora (2025)

Os resultados de DRX da classe C50 evidenciam uma matriz complexa, influenciada tanto pela composição dos agregados quanto pela interação entre cimento, adições e produto cicatrizante. Enquanto fases esperadas, como portlandita, C–S–H e carbonatos, confirmam os processos de hidratação e carbonatação, a detecção de scawtita no traço C50-B sugere contribuição específica dos argilominerais presentes no cicatrizante, atuando como fontes adicionais de sílica e alumina. A presença de etringita no traço C50-R indica ainda um possível mecanismo de cicatrização autógena, reforçando que diferentes combinações de materiais e condições locais de hidratação podem gerar respostas distintas no comportamento microestrutural dos concretos da classe C50.

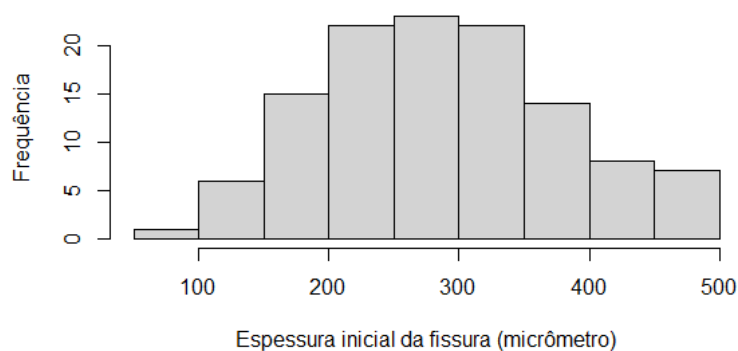
4.3 Geometria das fissuras

4.3.1 Espessura Inicial de Fissura

De maneira geral, o processo de obtenção das aberturas de fissuras resultou em valores de abertura inicial e_0 variando entre 97 μm e 498 μm , com uma espessura média de 290 μm . A normalidade desses dados foi tratada estatisticamente com o auxílio do software RStudio (2024)

e verificada por meio do teste de Shapiro-Wilk, cujos resultados indicaram que a distribuição de e_0 segue um padrão normal ($W = 0,98405$ e $p = 0,177$; sendo $p > 0,05$). Essa tendência pode ser visualizada na Figura 40, que apresenta o histograma de e_0 e reforça a adequação da distribuição normal dos dados.

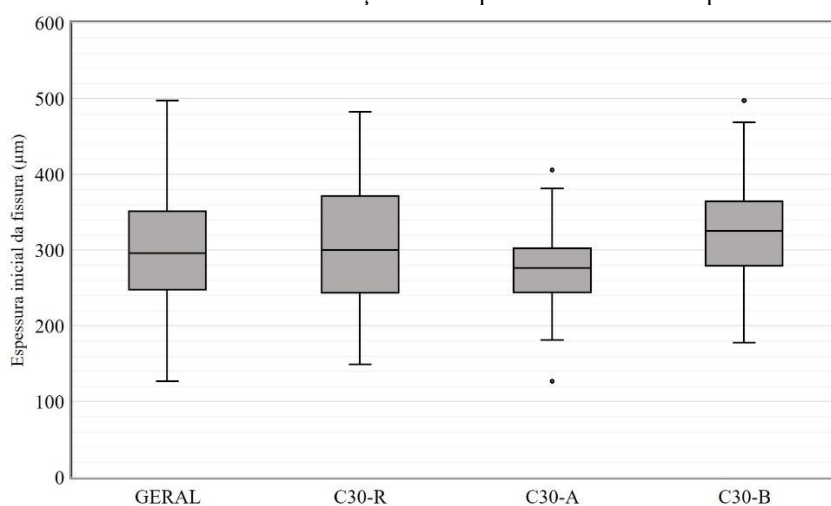
Figura 40 - Histograma da distribuição das espessuras e_0 das fissuras estudadas



Fonte: Autora (2025)

A Figura 41 apresenta o gráfico de caixa com a distribuição de e_0 para a classe de concretos C30. Nota-se que as medianas dos valores de e_0 para as diferentes subclasses de misturas estão acima do valor geral (296 μm), exceto para a dosagem C30-A, que apresentou uma mediana inferior em relação às demais. Desconsiderando os valores discrepantes (outliers), a menor amplitude interquartil foi observada no traço C30-A, seguido por C30-B e C30-R, indicando uma menor variação de e_0 nessa dosagem em comparação às demais.

Figura 41 - Gráfico de caixa das variações das espessuras das fissuras para a classe C30

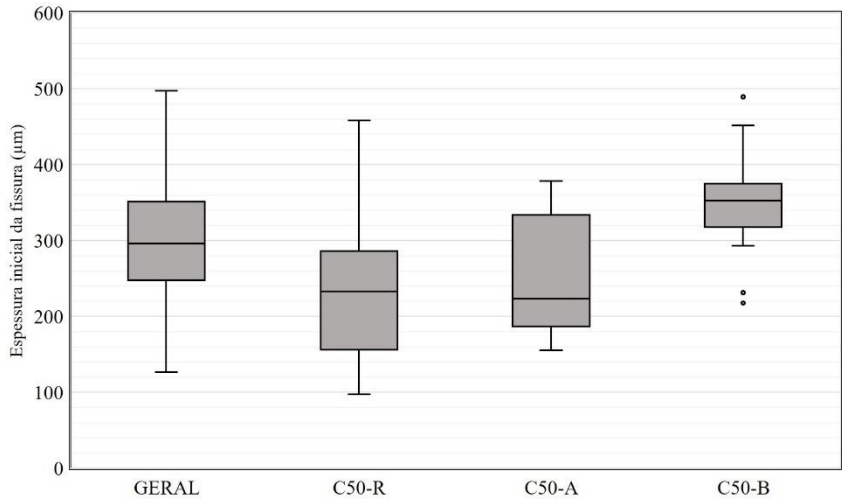


Fonte: Autora (2025)

Ao analisar a classe de concreto C50, observa-se que a subclasse C50-B apresenta valores de e_0 superiores em comparação às subclasses C50-R e C50-A. No entanto, em relação

à amplitude interquartil, a subclasse C50-B exibiu a menor variação para e_0 , com valores situados entre 318 μm e 375 μm , conforme ilustrado na Figura 42.

Figura 42 - Gráfico de caixa das variações das espessuras das fissuras para a classe C50



Fonte: Autora (2025)

Dessa forma, foi possível obter uma variedade de espessura de fissura nos discos entre 90 μm a 500 μm e, conseqüentemente, condição de estudar o desempenho de cicatrização para faixas específicas de abertura de fissuras em uma amostragem total de 118 unidades. Na Tabela 13 apresenta o resumo da representatividade de cada traço nas faixas em micrômetro (μm). Cada faixa foi considerada como correspondendo a 100%, de modo que cada dosagem foi representada pela sua proporção relativa dentro desse total.

Tabela 13 - Resumo da representatividade de cada traço nas faixas em micrômetros

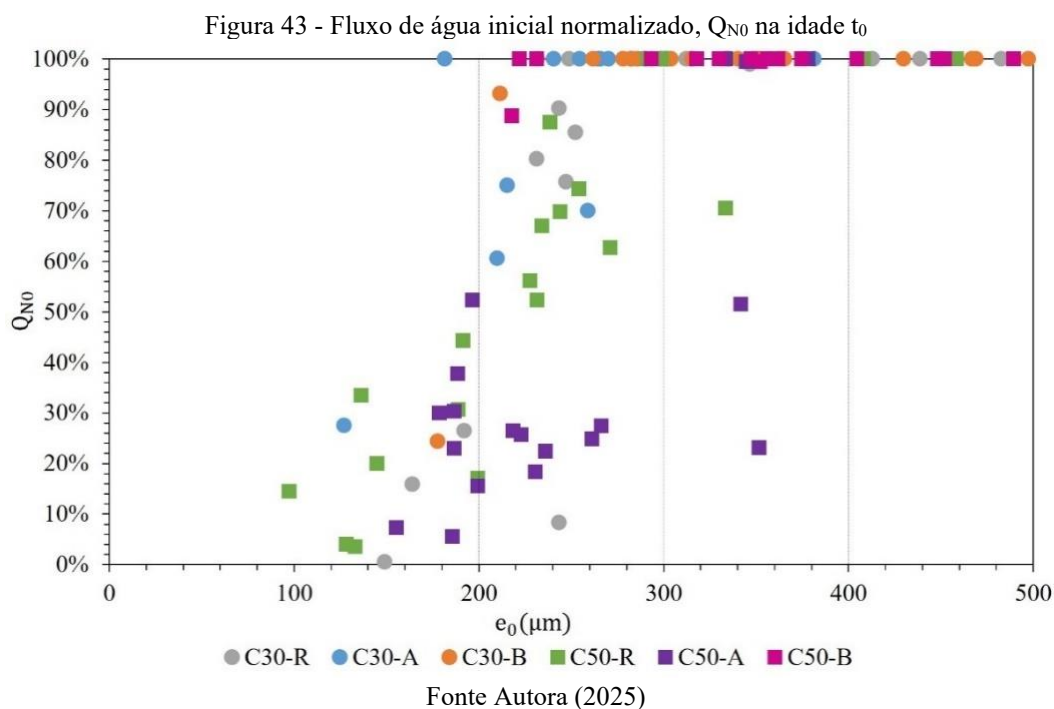
Identificação	Espessuras das fissuras por faixa de abertura (μm)				Total
	e ₀ < 200	200 ≤ e ₀ < 300	300 ≤ e ₀ < 400	400 ≤ e ₀ < 500	
Classe C30					
C30-R	13,6%	15,6%	16,7%	26,7%	72,5%
C30-A	9,1%	26,7%	13,9%	6,7%	56,3%
C30-B	4,5%	15,6%	22,2%	26,7%	69,0%
Total	27,3%	57,8%	52,8%	52,8%	-
Quantidade de mostras	6	26	19	9	60
Média (μm)	165	260	336	450	-
Classe C50					
C50-R	36,4%	20,0%	2,8%	13,3%	72,5%
C50-A	36,4%	13,3%	13,9%	0,0%	63,6%
C50-B	0,0%	8,9%	30,6%	26,7%	66,1%
Total	72,7%	42,2%	47,2%	40,0%	-
Quantidade de mostras	16	19	17	6	58
Média (μm)	169	247	348	444	-
Total de amostras	22	45	36	15	118
Média (μm)	168	253	342	447	-

Fonte Autora (2025)

4.4 Teste de percolação de água sob baixa pressão pelas fissuras

A Figura 43 apresenta a relação entre o fluxo de água normalizado (Q_{N0}) e a espessura inicial da fissura (e_0). Esse resultado representa o volume total de água que percolou pela fissura na idade t_0 , considerando um tempo máximo de fluxo de 60 minutos, independentemente da presença residual de água no reservatório do tubo de PVC.

Observou-se que discos com maiores valores de e_0 apresentaram Q_{N0} mais elevado em comparação àqueles com menores espessuras iniciais. Além disso, a maior concentração de valores de $Q_{N0} = 100\%$ foi observada para fissuras com e_0 superiores a 200 μm , enquanto para e_0 acima de 360 μm , todas as amostras atingiram $Q_{N0} = 100\%$. Percebe-se também que as fissuras com espessuras menores que 200 μm mostraram uma redução no fluxo de água após 7 dias de cura. Essa diminuição, com o fluxo normalizado inferior a 53%, sugere um processo de cicatrização parcial das fissuras. A formação das bolhas de ar provavelmente por forças capilares e de tensão superficial nos espaços relativamente estreitos, pode ter causada a redução significativa nos estágios iniciais do fluxo de água, o que é frequentemente considerado como cicatrização. Segundo Ikoma et al. (2015) a formação de bolhas de ar na fissura é resultante principalmente pela permeação de água no concreto e do ar dissolvido na água (água da torneira).



Observa-se também que algumas fissuras com e_0 mais elevados ou com valores próximos entre si apresentaram Q_{N0} mais baixos em comparação às fissuras de menor espessura.

Esse comportamento pode ser atribuído à geometria da fissura, uma vez que maior tortuosidade no plano reduz a transmissividade da água, dificultando seu fluxo através da fissura (Doostkami et al., 2023, 2024; Hou et al., 2022; Tasdemir et al., 1996).

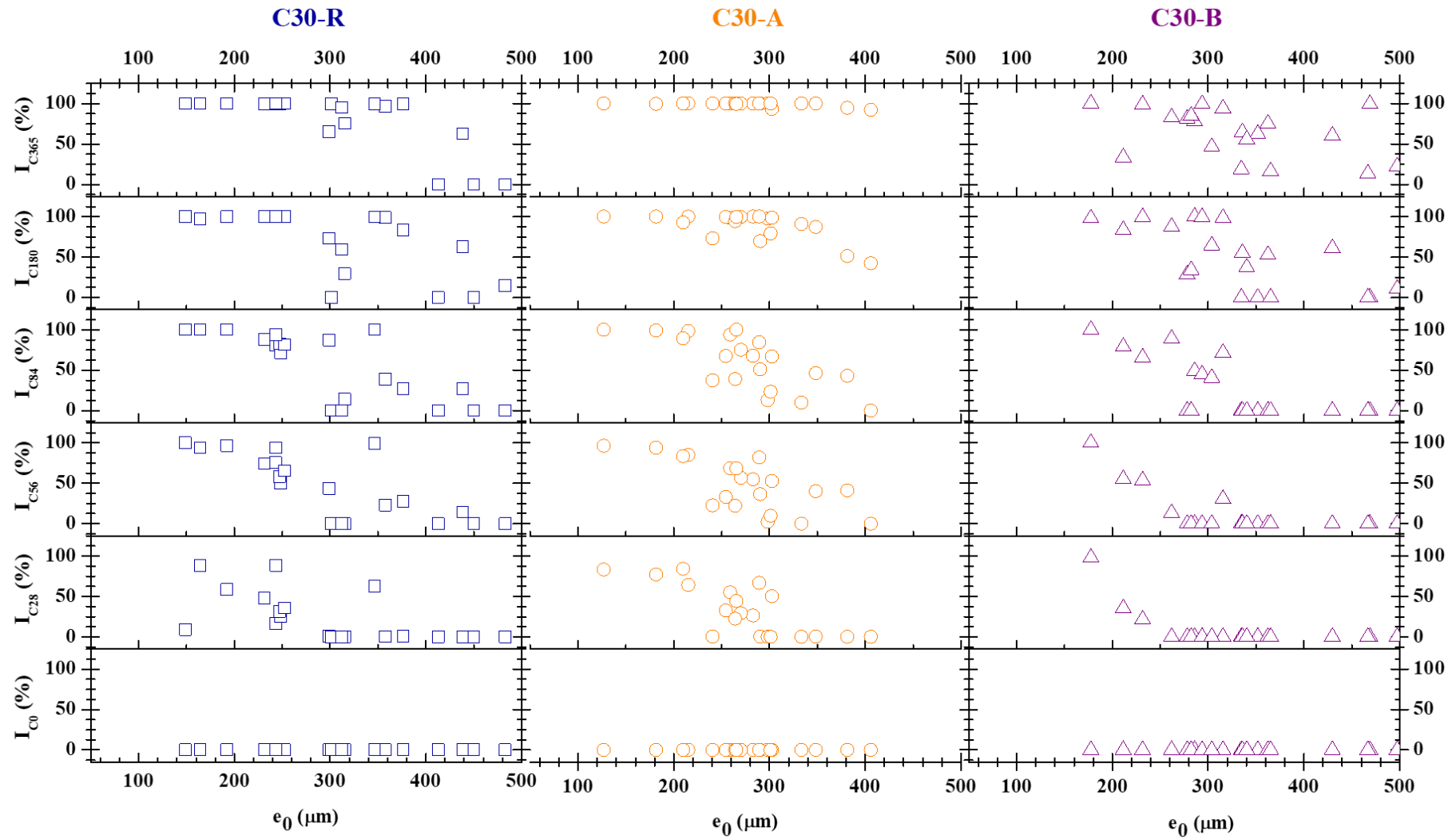
4.4.1 Influência do tempo de cura em água para cicatrização das fissuras

4.4.1.1 Classe de concreto C30

A Figura 44 possui os resultados de I_c (Equação 5) determinados pelo fluxo de água Q_{N0} , para o tempo de imersão em água entre t_0 e t_{365} para a classe de concreto C30. As análises ilustram que as $e_0 < 250 \mu\text{m}$ apresentaram $I_{C28} > 0$ indicando a evidência de formação de produtos cicatrizantes no interior das fissuras no período de cura entre t_0 e t_{28} . Entretanto, 32% das amostras com $e_0 > 300 \mu\text{m}$ apresentou índice de cicatrização não nulo no t_{56} , sugerindo maior tempo necessário para fechamento de fissuras com espessuras maiores. As fissuras para os traços com adição cristalizante com $e_0 > 400 \mu\text{m}$ iniciou a cicatrização a partir de t_{180} .

Esses resultados indicam que a abertura inicial da fissura influencia diretamente no desempenho da cicatrização, corroborando com estudos prévios (Maes; Snoeck; De Belie, 2016; Roig-Flores, 2018; Van Tittelboom; De Belie, 2013) que relatam menor eficiência na cicatrização em fissuras com maiores espessuras, ou seja, o teor de fechamento é dependente da espessura inicial da fissura.

Figura 44 - Resultados dos I_C por intervalo de e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365} para a subclasse de concreto C30

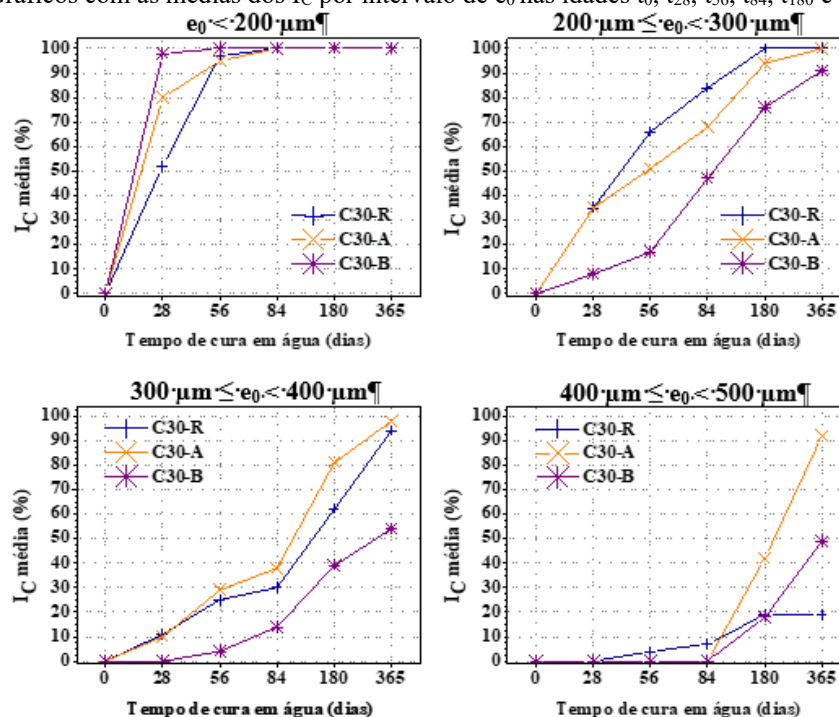


Fonte Autora (2025)

Analisando as dosagens a partir dos resultados das médias I_C por intervalos de e_0 , apresentados na Figura 45, os resultados para I_{C28} foram superiores a 50% para $e_0 < 200 \mu\text{m}$. Neste mesmo intervalo, os traços com as adições cristalizantes apresentaram resultados superiores quando comparado a dosagem referência, embora t_{84} os resultados foram similares atingindo o $I_{C84} = 100\%$. As fissuras com $e_0 \geq 200 \mu\text{m}$ os traços C30-R e C30-A apresentaram desempenho semelhante de t_0 a t_{28} , porém as fissuras com e_0 entre $200 \mu\text{m}$ e $300 \mu\text{m}$ o traço C30-R denotou resultados das médias I_C superiores aos demais traços para idades t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} . Entretanto, no intervalo de fissuras entre $300 \mu\text{m} \leq e_0 < 400 \mu\text{m}$ o melhor desempenho foi para o traço C30-A.

Os traços com as adições cristalizantes para intervalo de fissuras com $e_0 \geq 400 \mu\text{m}$ apresentaram comportamento semelhante com $I_C = 0\%$ para o período de t_0 a t_{84} despontando com resultados superiores no t_{365} quando comparado com o traço sem adição cristalizante (C30-R). No geral, percebe-se que há um retardo na cicatrização independentemente da presença ou não de adição cristalizante no aumento da espessura da fissura inicial. No âmbito dos resultados das médias dos índices de cicatrização no período de t_0 a t_{365} as dosagens com adições cristalizantes apresentaram resultados satisfatório quando comparado ao traço referência para $e_0 > 400 \mu\text{m}$, a adição cristalizante A (C30-A) apresentou melhor desempenho entre os resultados das médias dos I_C para as fissuras superiores a $300 \mu\text{m}$ a partir do t_{365} .

Figura 45 - Gráficos com as médias dos I_C por intervalo de e_0 nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da Classe C30



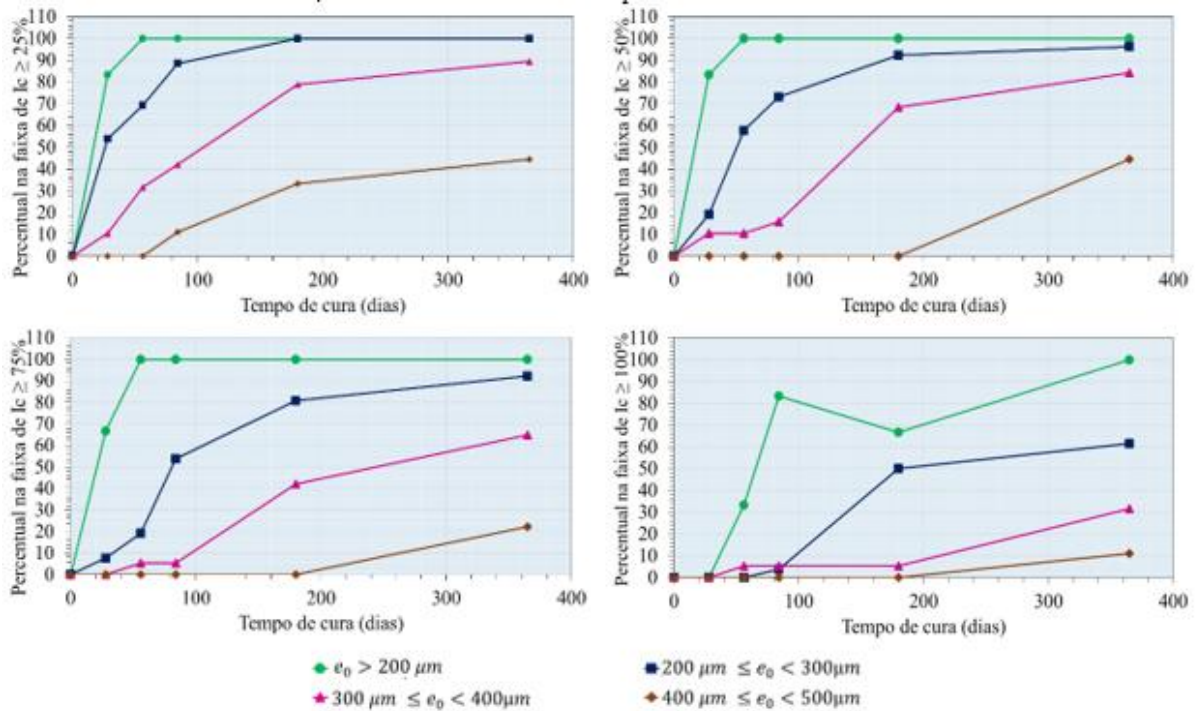
A Figura 46 apresenta a evolução do percentual de amostras das dosagens C30 com I_c maior ou igual a 25%, 50%, 75% e 100% ao longo do período de cura (t_0 a t_{365}), agrupados por faixa de e_0 . Percebe-se, em todos os intervalos de e_0 , um aumento do percentual de amostras com o tempo de cura. Para os níveis de $I_c \geq 25\%$, 50% e 75% o intervalo $e_0 < 200 \mu\text{m}$ atinge rapidamente valores próximo de 100% das amostras, para um período de cura entre t_0 a t_{56} . Porém, para $I_c = 100\%$, é necessário um período de cura mais prolongado – de pelo menos 365 dias em água – para que esse nível de índice de cicatrização seja alcançado.

No período de cura de t_0 a t_{180} , cerca de 80% das amostras com e_0 entre 200 μm e 300 μm atingem $I_c \geq 25\%$, 50% e 75%. Para $I_c \geq 100\%$, aproximadamente 50% das amostras atingem esse nível nesse mesmo intervalo, aumentando para 62% em t_{365} .

As fissuras com e_0 entre 300 μm e 400 μm apresentam desempenho inferior quando comparado as faixas de espessuras de fissuras menores, porém com um crescimento gradual mais lento ao longo do tempo de cura em água, especialmente para o intervalo de e_0 entre 400 μm e 500 μm . As amostras de fissuras entre 300 μm e 400 μm possuem percentuais de 90%, 84%, 65% e 32%, para os níveis de $I_c \geq 25\%$, 50%, 75% e 100%, respectivamente, no período de cura de t_0 a t_{365} . Já para $e_0 \geq 400 \mu\text{m}$, as amostras atingiram teores de 44% para os níveis de I_c maiores ou iguais a 25% e 50%, e 22% e 11% das amostras para $I_c \geq 75\%$ e 100%, respectivamente.

As espessuras iniciais menores que 300 μm , são mais suscetíveis a cicatrização ao longo do tempo, especialmente para níveis I_c mais críticos ($\geq 75\%$ e $\geq 100\%$) e ainda quanto maior a e_0 , menor o percentual de amostras afetadas, mesmo após um período de cura de 365 dias.

Figura 46 - Gráficos com o percentual de amostras das dosagens C30 por intervalos de I_C maior ou igual a 25%, 50%, 75% e 100% e com as e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365}



Fonte Autora (2025)

Na Tabela 14 contém o resumo comparativo com os principais resultados observados por faixa de espessura de fissura (e_0), considerando os níveis de Índice de Cicatrização ($I_C \geq 25\%$, 50%, 75%, 100%) ao longo do período de cura (t_0 a t_{365}).

Portanto, a cura em água favorece o processo de cicatrização, no entanto o tempo de exposição prolongado é necessário principalmente para $I_C = 100\%$. Quanto menor a largura da fissura ($e_0 < 200 \mu m$), maior e mais rápida é o índice de cicatrização. Já as fissuras mais largas necessitam ($e_0 > 300 \mu m$) de períodos de cura mais longos e ainda assim apresentam eficácia reduzida ($e_0 > 400 \mu m$).

Tabela 14 - Resumo comparativo com os resultados principais observados nas dosagens C30 por faixa de e_0 , considerando os níveis de $I_c \geq 25\%$, 50% , 75% , 100% no período de cura t_0 a t_{365}

Faixa de e_0 (μm)	Tendência Geral	$I_c \geq 25\%$	$I_c \geq 50\%$	$I_c \geq 75\%$	$I_c \geq 100\%$
$e_0 < 200$	Cicatrização rápida e alta	100% (t_{56})	100% (t_{56})	100% (t_{56})	100% (t_{365})
$200 \leq e_0 < 300$	Alta cicatrização, porém mais gradual	100% (t_{180})	92% (t_{180})	81% (t_{180})	62% (t_{365})
$300 \leq e_0 < 400$	Desempenho intermediário, progressivo	90% (t_{365})	84% (t_{365})	65% (t_{365})	32% (t_{365})
$400 \leq e_0 < 500$	Baixo desempenho, cicatrização limitada	44% (t_{365})	44% (t_{365})	22% (t_{365})	11% (t_{365})

Fonte Autora (2025)

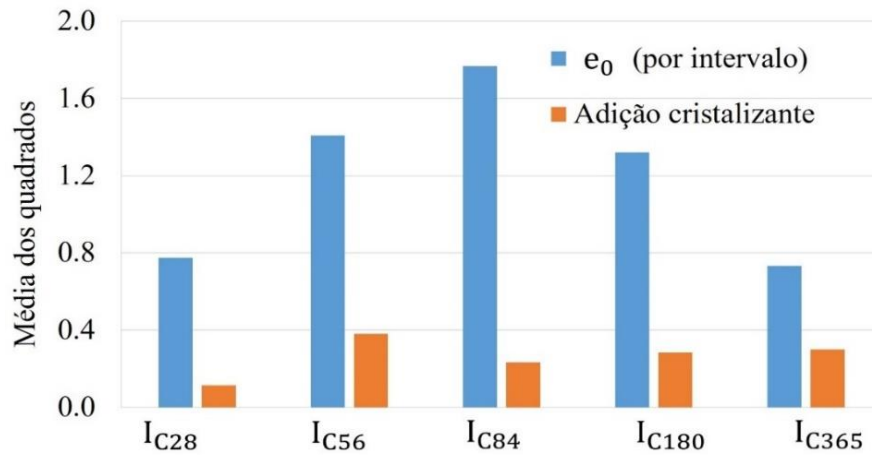
Ao realizar a análise estatísticas para as dosagens com classe de concreto C30 (Tabela 29 do APÊNDICE D) o fator e_0 por intervalo influenciou significativamente os resultados do I_c em todos os períodos t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} . Portanto, estatisticamente, os valores finais do I_c nos períodos t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} sofrem interferência relevantes pelo intervalo de e_0 da fissura. Confirmando, que a eficácia da cicatrização da fissura seja ela parcial ou total está intimamente ligada a espessura da fissura, ou seja, quanto maior a espessura de fissura o potencial e a velocidade da cicatrização são reduzidos (Doostkami et al., 2024; Wang et al., 1997).

Além disso, o fator presença de adição cristalizante nas dosagens influenciou significativamente os resultados do I_c nos períodos t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} , não sendo observado o efeito estatisticamente relevante em t_{28} . Portanto, estatisticamente, os resultados finais do I_c no período de t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} sofrem interferência relevante na presença ou não da adição cristalizante. O efeito não significativo nos resultados do I_{c28} , sugere que nos estágios iniciais (t_0 a t_{28}) o processo predominante de cicatrização é o autógeno ao passo que, com o avanço do tempo de cura (t_{28} a t_{365}), os efeitos promovidos pela adição cristalizante tornam-se mais evidentes.

A espessura inicial da fissura por intervalo é o fator mais relevante em relação ao índice de cicatrização nos 5 períodos de cura em água como pode ser visto na Figura 47 que possui o gráfico com as médias dos quadrados por fator. Desta forma, é o principal fator determinante da cicatrização ao longo do tempo para as dosagens C30. Observa-se também o impacto da e_0 por intervalo no crescimento gradual nos índices de cicatrização no período de cura de t_0 a t_{84} .

No geral o prolongamento da duração da cicatrização através da cura em água no t_{28} para t_{56} melhorou os índices de cicatrização para todos intervalos de e_0 , independentemente da presença ou não da adição cristalizante na mistura.

Figura 47 - Gráfico do indicador média dos quadrados da MANOVA por I_C no período de cura de t_0 a t_{365} – C30



Fonte Autora (2025)

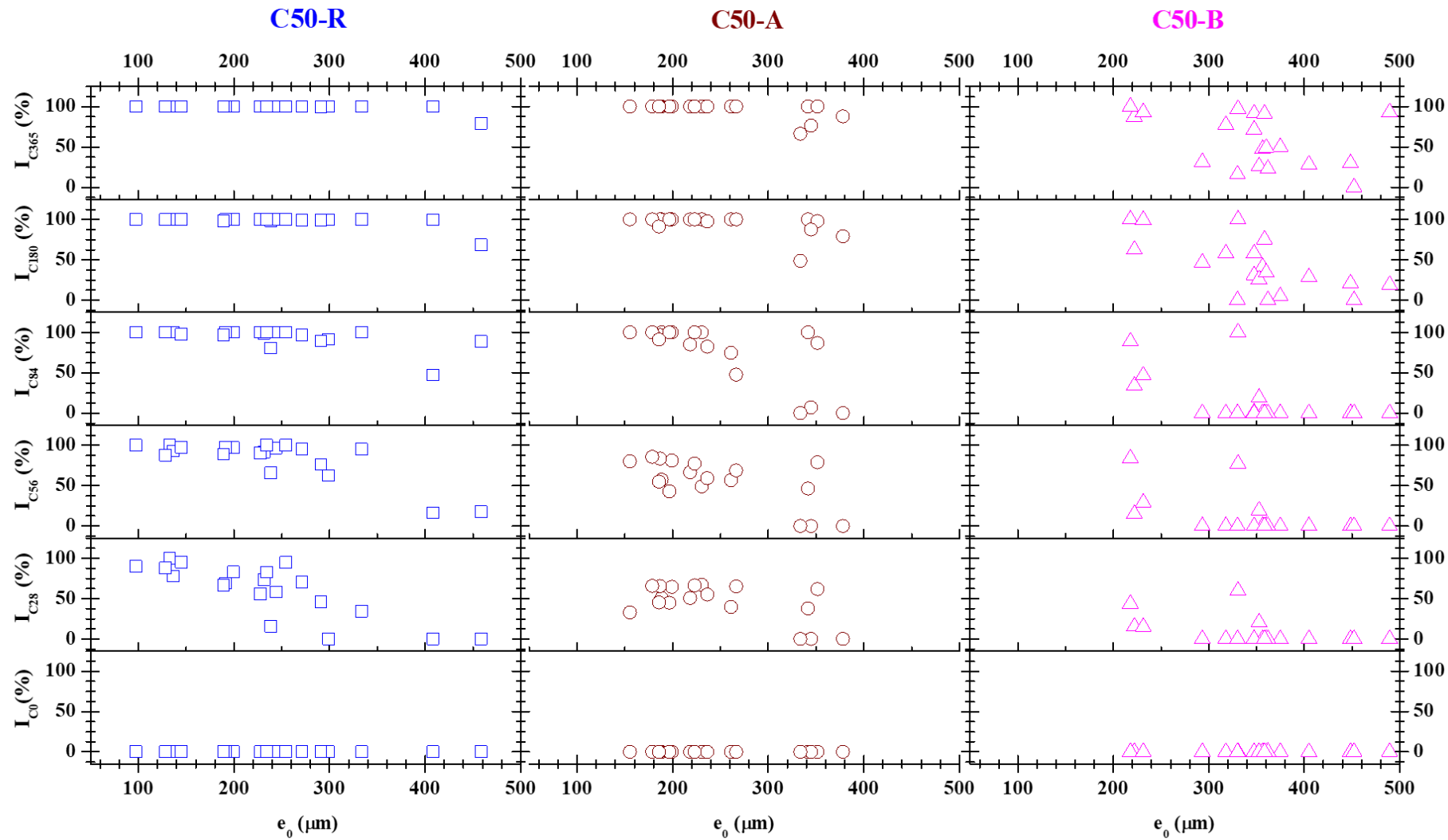
4.4.1.2 Classe de concreto C50

A Figura 48 possui os resultados de I_C (Equação 5) determinados pelo fluxo de água Q_{N0} separados por intervalos de e_0 , para o tempo de imersão em água entre t_0 e t_{365} para a classe de concreto C50. As análises ilustram um comportamento semelhante a classe de concreto C30 com relação ao índice de cicatrização durante o período de cura em água. As fissuras com $e_0 < 250 \mu\text{m}$ apresentaram $I_{C28} > 0$ corroborando com a evidência de formação de produtos cicatrizantes no interior das fissuras no período de cura entre t_0 e t_{28} . Aproximadamente 30% das amostras com $e_0 > 300 \mu\text{m}$ apresentou índice de cicatrização não nulo no t_{56} , sugerindo também maior tempo necessário para fechamento de fissuras com espessuras maiores. As fissuras com $e_0 > 400 \mu\text{m}$ iniciou a cicatrização a partir de t_{56} .

De forma geral, na análise das duas classes de concreto para fissuras com $e_0 > 300 \mu\text{m}$ — cuja média das espessuras iniciais foi de $373 \mu\text{m}$ em ambas — observou-se um desempenho semelhante entre os concretos das classes C30 e C50. No entanto, o concreto da classe C30 exigiu um período de cura mais prolongado para atingir um percentual superior a 85% das amostras com I_C diferente de zero. As dosagens da classe C50 atingiram esse patamar no tempo de cura t_{180} , enquanto as da classe C30 apenas no t_{365} .

Esse comportamento pode estar relacionado ao maior consumo de cimento nas dosagens C50, que utilizaram 67 kg/m^3 a mais em comparação às C30. Essa diferença pode ter influenciado na maior disponibilidade de Ca(OH)_2 , essencial para a formação do produto de cicatrização, o carbonato de cálcio. Em concretos mais envelhecidos, a cicatrização ocorre principalmente pela formação de carbonato de cálcio, enquanto em concretos mais jovens, a recuperação das fissuras se deve, sobretudo, à hidratação contínua do grão do cimento Portland na forma anidra (Wu; Johannesson; Geiker, 2012).

Figura 48 - Resultados dos I_C por intervalo de e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365} para a subclasse de concreto C50

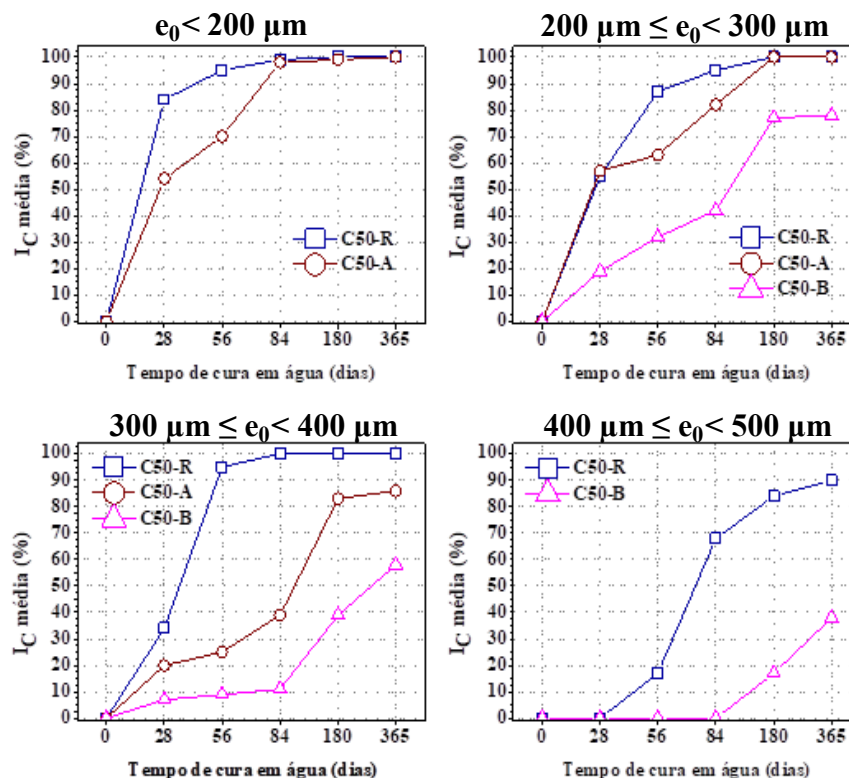


Fonte Autora (2025)

A Figura 49 apresenta os resultados das médias do I_C por intervalos de e_0 . Os valores para $I_{C28} > 50\%$ para fissuras com $e_0 < 300 \mu\text{m}$ nos traços C50-R e C50-A. No entanto, para as fissuras com $e_0 < 200 \mu\text{m}$, a dosagem de referência (C50-R) apresentou os resultados das médias do $I_{C28} = 84\%$, enquanto o traço o com adição cristalizante A (C50-A) atingiu $I_{C28} = 54\%$.

Entre o período t_{84} e t_{365} de cura em água das amostras, os traços C50-R e C50-A, apresentaram resultados semelhantes para fissura com $e_0 < 200 \mu\text{m}$, alcançando $I_C = 100\%$. Para os intervalos de fissuras com $e_0 < 200 \mu\text{m}$ e $200 \mu\text{m} \leq e_0 < 300 \mu\text{m}$, o comportamento foi semelhante entre t_0 e t_{28} . Contudo, a dosagem C50-R obteve médias superiores às das demais dosagens, destacando-se principalmente nas fissuras com $e_0 > 300 \mu\text{m}$, onde o desempenho foi distinto.

Figura 49- Gráficos com as médias dos I_C por intervalo de e_0 nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da Classe C50



Fonte: Autora (2025)

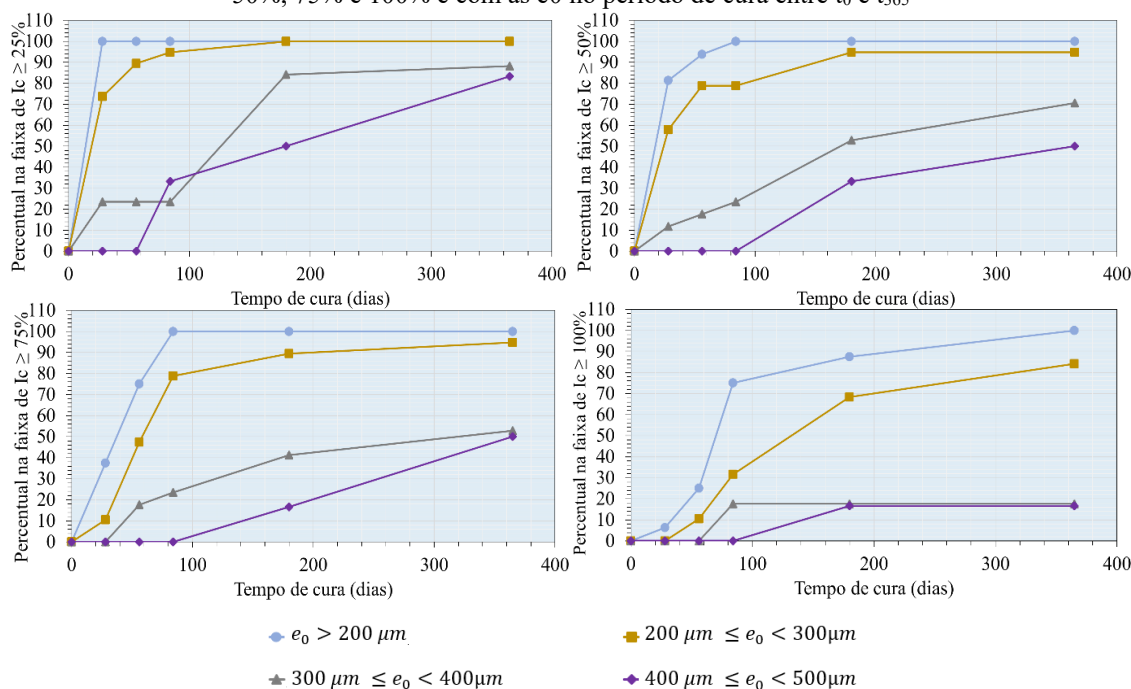
A Figura 50 ilustra a evolução do percentual de amostras das dosagens da classe de concreto C50 com I_C maior ou igual a 25%, 50%, 75% e 100% ao longo do tempo de cura (t_0 a t_{365}), agrupados por faixas de e_0 . Todos os gráficos corroboram o aumento de percentual do índice de cicatrização à medida que o tempo de cura avança, demonstrando e confirmando com a evolução do percentual de amostras dos traços C30 e C50 no processo contínuo e progressivo da cicatrização em contato com água, principalmente para fissuras com $e_0 < 400 \mu\text{m}$.

As fissuras com $e_0 < 200 \mu\text{m}$ obtiveram 100% das amostras para todas as faixas de I_C no período de cura de t_0 a t_{84} . Para os demais intervalos de e_0 , o tempo de cura de t_0 a t_{365} não foi suficiente para atingir 100% das amostras, exceto para e_0 entre $200 \mu\text{m}$ e $300 \mu\text{m}$ que apresentou esse valor somente no nível $I_{C28} \geq 25\%$. Esse comportamento reforça a eficácia do processo de cicatrização em fissuras estreitas em ambiente saturado de água.

As amostras com e_0 entre $200 \mu\text{m}$ e $300 \mu\text{m}$ tiveram resultados expressivos, alcançaram percentuais de 100% e 95% nos $I_{C180} \geq 25\%$ e 50% , respectivamente. Nesse mesmo intervalo de e_0 , a cicatrização apresentou bom desempenho, com crescimento significativo entre t_0 e t_{180} , atingindo cerca de 90% das amostras com $I_C \geq 75\%$ e chegando a 80% para esse mesmo nível no período de cura t_{365} .

Para e_0 entre $300 \mu\text{m}$ e $400 \mu\text{m}$, os ganhos de produtos de cicatrização no interior da fissura foram graduais ao longo do tempo de cura, com avanços nos I_C maiores ou iguais a 25%, 50% e 75%. No entanto, para os percentuais na faixa de $I_C = 100\%$, o crescimento foi modesto, limitado a cerca de 18% das amostras no período entre t_{56} e t_{84} , mantendo esse percentual até 365 dias em água. Por fim, as fissuras com $e_0 \geq 400 \mu\text{m}$ exibiram os menores percentuais de amostras cicatrizadas dentro dos níveis analisados de I_C , com o avanço não nulos a partir do período entre t_{180} e t_{365} em água, reafirmando a limitação da eficiência do processo em fissuras de maiores espessuras.

Figura 50 - Gráficos com o percentual de amostras das dosagens C50 por intervalos de I_C maior ou igual a 25%, 50%, 75% e 100% e com as e_0 no período de cura entre t_0 e t_{365}



Fonte Autora (2025)

A Tabela 15 com o resumo comparativo dos principais resultados observados nas dosagens C50 por faixa de e_0 , considerando os níveis de índice de cicatrização maiores ou iguais a 25%, 50%, 75% e 100% ao longo do período de cura (t_0 a t_{365}), indicou que a tendência geral do desempenho foi semelhante às das dosagens C30 para as fissuras com $e_0 < 300 \mu\text{m}$. Considerando a velocidade e a continuidade no processo de cicatrização, a classe de concreto C30 apresentou percentuais entre 81% e 100%, enquanto as dosagens C50 obtiveram de 90% a 100% das amostras para $e_0 < 300 \mu\text{m}$, nas faixas dos $I_C \geq 25\%$, 50% e 75% no período de cura de t_0 a t_{180} . Nas mesmas faixas de I_C analisadas e $e_0 > 300 \mu\text{m}$, o traço C30 apresentou percentuais entre 22% e 90% das amostras, ao passo que os traços C50 variaram entre 50% e 89%, demonstrando um intervalo menor e com percentuais maiores, ainda que o desempenho de cicatrização tenha sido limitado para $e_0 \geq 400 \mu\text{m}$. Porém, para o desempenho intermediário e progressivo as amostras das dosagens C30 atingiram proporções maiores em todos os níveis de I_C analisadas.

Tabela 15- Resumo comparativo com os resultados principais observados nas dosagens C50 por faixa de e_0 , considerando os níveis de $I_C \geq 25\%$, 50%, 75%, 100% no período de cura t_0 a t_{365}

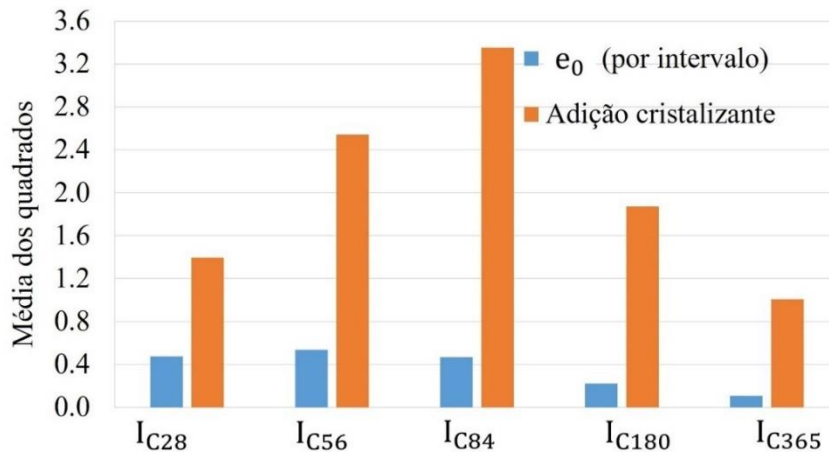
Faixa de e_0 (μm)	Tendência Geral	$I_C \geq 25\%$	$I_C \geq 50\%$	$I_C \geq 75\%$	$I_C \geq 100\%$
$e_0 < 200$	Cicatrização rápida e alta	100% (t_{28})	100% (t_{84})	100% (t_{84})	100% (t_{365})
$200 \leq e_0 < 300$	Alta cicatrização, porém mais gradual	100% (t_{180})	95% (t_{180})	90% (t_{180})	84% (t_{365})
$300 \leq e_0 < 400$	Desempenho intermediário, progressivo	89% (t_{365})	71% (t_{365})	53% (t_{365})	18% (t_{365})
$400 \leq e_0 < 500$	Baixo desempenho, cicatrização limitada	83% (t_{365})	50% (t_{365})	50% (t_{365})	12% (t_{365})

Fonte Autora (2025)

Ao aplicar a análise estatística para as dosagens com classe de concreto C50 (Tabela 30 do APÊNDICE D), os fatores analisados, e_0 por intervalo e presença de adição cristalizante influenciou significativamente os resultados do I_C nos períodos t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} . Estatisticamente, os valores finais do I_C nesses períodos são significativamente afetados pela variação da e_0 da fissura e também pela presença e a marca comercial de cristalizante.

Além disso, o tipo de adição cristalizante é o fator mais relevante em relação ao índice de cicatrização nos 5 períodos de cura em água, como pode ser visto na Figura 51, que possui o gráfico com as médias dos quadrados por fator. Ainda, a cicatrização tardia (t_{180} e t_{365}) reduziu a capacidade de cicatrização iniciada aos 28 dias (Doostkami et al., 2024). O prolongamento da duração da cicatrização de t_{28} a t_{84} melhorou a cicatrização.

Figura 51 - Gráfico do indicador média dos quadrados da MANOVA por I_C no período de cura de t_0 a t_{365} – C50



Fonte Autora (2025)

No contexto geral, para ambas as classes de concreto avaliadas, constatou-se que o aumento da abertura inicial da fissura (e_0) retarda o tempo no processo de cicatrização, independentemente da presença de adições cristalizantes. A velocidade de cicatrização, seja parcial ou total, está diretamente relacionada à largura da fissura e ao tempo de cura em água — quanto maior a abertura inicial, menor tende a ser o índice de cicatrização. Embora a cura em água favoreça a cicatrização, sua eficácia depende tanto da dimensão da fissura quanto da composição das misturas e também no fornecimento de CO_2 no processo de carbonatação.

A velocidade da cicatrização está relacionada ao processo de carbonatação, que depende do nível de saturação do concreto e da pressão parcial de CO_2 , sendo influenciada pelas condições de umidade relativa, tempo e volume de exposição à água na superfície do concreto (Von Greve-Dierfeld et al., 2020). A solubilização do $Ca(OH)_2$ ocorre durante a hidratação do cimento, que acumula no interior da fissura. Este composto ao entrar em contato com CO_2 no ciclo de secagem, lixivia e sofre a carbonatação e tende a formar $CaCO_3$ que contribui no fechamento de fissuras (Jiang; Li; Yuan, 2015).

A padronização dos resultados das águas de imersão revelou um aumento nas concentrações de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) e íons cálcio (Ca^{2+}) após o contato com as amostras de concreto em todos os traços analisados. Essa variação, em comparação com a água da torneira, indica a ocorrência de cicatrização das fissuras por deposição de $CaCO_3$ e a influência de lixiviados do concreto nesse processo. A cicatrização de fissuras é mais eficiente em ambientes com pH elevado e alta concentração de íons cálcio, condições que favorecem a formação de cristais de calcita mais densos e estáveis (Jiang; Li; Yuan, 2015).

A composição das misturas influenciou significativamente no processo de cicatrização das fissuras, especialmente quando consideradas adições minerais cimentantes no desempenho

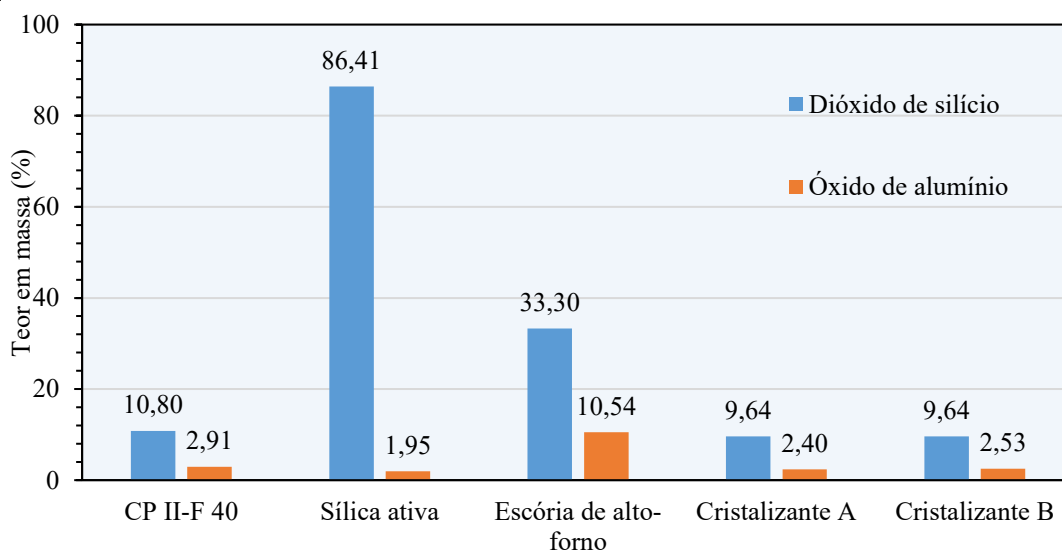
das adições cristalizantes. As misturas de referência com sílica ativa (C50) apresentaram médias de índices de cicatrização superiores ao longo do período de t_0 a t_{365} , em comparação às dosagens com adições cristalizantes. Entre os traços com adições, observou-se um desempenho variável ao longo do mesmo período, sendo que a dosagem com a adição cristalizante A apresentou resultados médios superiores em relação à adição cristalizante B.

No entanto, os traços contendo escória de alto-forno (C30) com adições cristalizantes apresentaram resultados superiores ao traço referência, somente para $e_0 > 400 \mu\text{m}$. Este comportamento foi observado nos estudos realizados por Krelani; Ferrara (2013), constataram que as amostras submersas em águas apresentam maior capacidade de cicatrização em concretos com adição cristalizantes, principalmente em fissuras com maiores espessuras. Já entre as misturas com adição cristalizantes, a mistura A (C30-A) apresentou melhor desempenho entre os resultados das médias dos I_C para as fissuras superiores a $300 \mu\text{m}$ a partir do t_{365} . Esse comportamento está relacionado à redução do potencial de cicatrização autógena (C30-R) ao longo do tempo. Segundo Cuenca; Tejedor; Ferrara (2018), após um ano, a capacidade de cicatrização autógena tende a diminuir devido ao consumo dos compostos reativos presentes no concreto que viabilizam esse processo natural.

O desempenho satisfatório das dosagens com sílica ativa e sem adição cristalizantes (C50-R) pode ser atribuído às proporções dos compostos dióxido de silício (SiO_2) e óxido de alumínio (Al_2O_3) nas adições minerais. Esses compostos reagem com hidróxido de cálcio, na presença de umidade, formando produtos como C-S-H que contribuem para o preenchimento das fissuras (Raghav et al., 2021). A sílica ativa possui maior proporção combinada disponível a mistura de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, seguida pela escória de alto-forno, pelo cimento Portland e, por fim, pelas adições cristalizantes, conforme ilustrado na Figura 52.

Outro ponto a ser considerado, especialmente em traços com adições cimentantes combinadas com os cristalizantes, é que a presença de materiais com comportamento pozolânico, como a sílica ativa, pode consumir o hidróxido de cálcio disponível. Isso reduz a quantidade de Ca(OH)_2 que seria lixiviada para preencher fissuras superficialmente, prejudicando a cicatrização (Cappellessso, 2018).

Figura 52 - Teor em massa dos compostos químicos SiO_2 e Al_2O_3 no cimento Portland e nas adições minerais



Fonte Autora (2025)

De modo geral, as fissuras com e_0 entre 200 μm e 300 μm tendem a atingir um índice de cicatrização de até 75% no período de cura de t_0 a t_{180} , indicando um processo de cicatrização parcial neste intervalo de tempo. No entanto, fissuras com $e_0 < 200 \mu\text{m}$ podem alcançar a cicatrização total ao longo de um ano de cura, enquanto fissuras com e_0 maiores que 300 μm há um melhoramento na redução da espessura da fissura, com cicatrização limitada.

De acordo Cuenca; Tejedor; Ferrara (2018), a vedação completa da fissuras ocorre em amostras expostas permanentemente ou periodicamente à água e com espessuras inferiores a 300 μm . O uso das adições cristalizantes potencializa a cicatrização autógena, especialmente em fissuras com $e_0 < 150 \mu\text{m}$, quando permanentemente imersas em água. Esse efeito das misturas cristalizantes se mantém por até um ano, mesmo após múltiplos ciclos de fissuração e cicatrização.

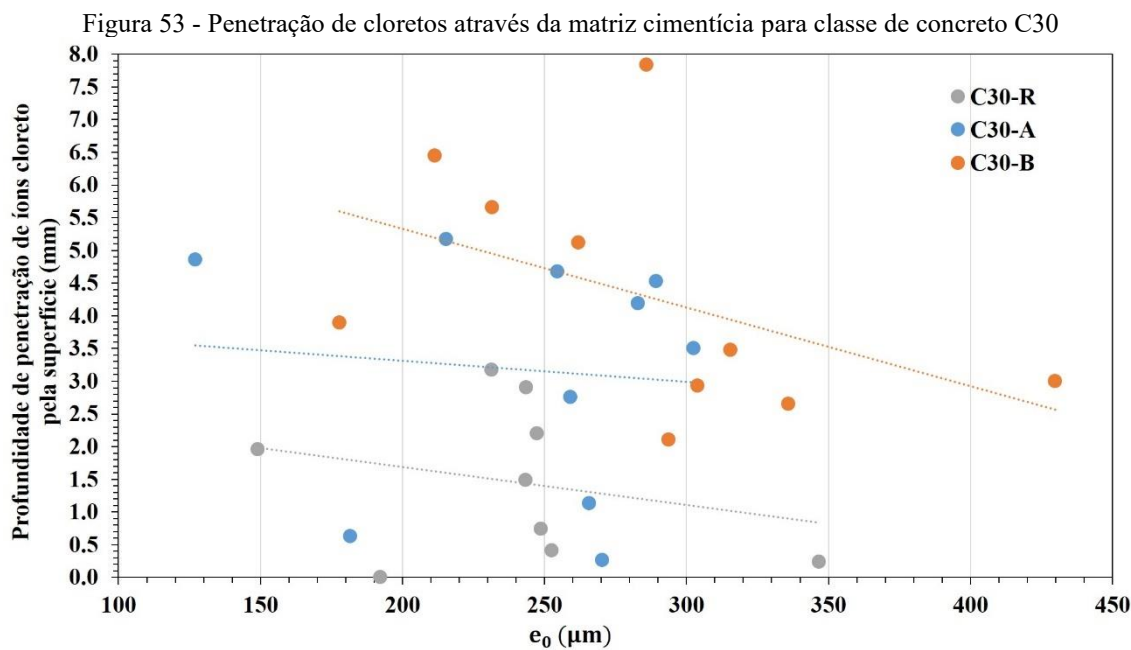
4.5 Teste de penetração de íons cloretos

4.5.1 Classe de concreto C30

A Figura 53 ilustra os valores de penetração de íons cloreto pela matriz cimentícia a partir das superfícies externas dos concretos fissurados e a linha de tendência obtidas. Os resultados demonstram que traço C30-B apresentou a maior profundidade de penetração de íons cloreto, com valores variando entre 2,10 mm e 7,84 mm, indicando um desempenho inferior quando comparado com os traços C30-R (0 mm a 3,17 mm) e C30-A (0,27 mm e 5,170 mm).

Observa-se, a partir das linhas de tendência, que todos os traços apresentaram redução da profundidade de penetração com o aumento da abertura inicial de fissura, sendo essa

tendência mais acentuada para o C30-B. Esses resultados indicam que há diferenças relevantes no comportamento da permeabilidade da matriz cimentícia entre os traços analisados. Essas diferenças estão associadas diretamente à microestrutura da pasta de cimento endurecida, influenciada pela ação das adições empregadas e pela abertura inicial da fissura.

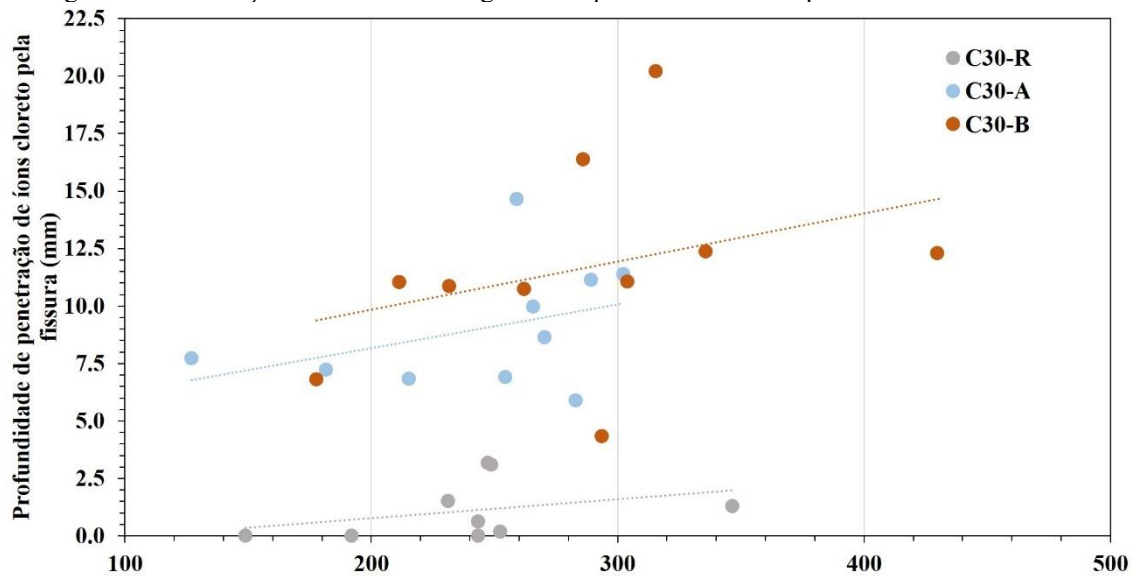


Fonte Autora (2025)

Na Figura 54, o gráfico com os valores de penetração de íons cloreto ao longo do comprimento da fissura e as linhas de tendência obtidas de cada traço analisado. A análise dos dados mostra que a profundidade de penetração de íons cloreto pela fissura tende a aumentar com o incremento da abertura inicial da fissura, como indicado pelas linhas de tendência. O traço C30-R, sem adições cristalizantes, apresentou menor inclinação nessa tendência, configurando maior resistência à penetração de íons cloreto, quando comparado as dosagens com adições cristalizantes.

A análise estatística (Tabela 31 do APÊNDICE D) indicou que o fator subclasse do concreto (C30-R, C30-A e C30-B) influenciou significativamente a penetração tanto pela superfície externa quanto ao longo da fissura. No entanto, os fatores e_0 e I_c , em todos períodos de cura avaliados, não apresentaram um efeito significativo sobre a penetração. Esses resultados reforçam que o tipo de traço é um fator determinante na durabilidade do concreto, sendo mais influente do que a e_0 ou o I_c isoladamente. A resistência ao transporte de íons agressivos está intimamente ligada à microestrutura da matriz cimentícia, especialmente à distribuição e conectividade dos poros (Mehta; Monteiro, 2014).

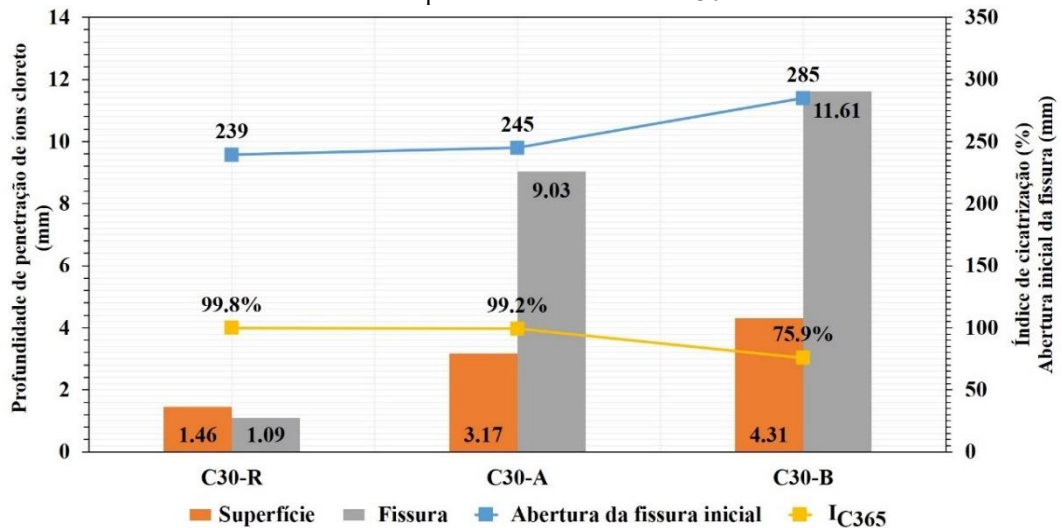
Figura 54 - Penetração de cloretos ao longo do comprimento da fissura para classe de concreto C30



Fonte Autora (2025)

A análise integrada das médias dos resultados da e_0 , do I_{C365} e das profundidades de penetração de cloreto na classe C30, apresentada na Figura 55, sugere algumas tendências. Observa-se uma tendência direta elencada entre o aumento da e_0 e a maior vulnerabilidade do concreto à entrada de agentes agressivo. Inversamente, a resistência a penetração de íons cloreto demonstrou um aumento à medida que o índice de cicatrização no t_{365} se eleva.

Figura 55 - Análise integrada das médias dos resultados da e_0 , I_{C365} e das profundidades de penetração de íons cloreto para classe de concreto C30



Fonte Autora (2025)

Portanto, a partir dos resultados obtidos, a presença da adição cristalizante não promoveu a redução da permeabilidade da matriz fissurada quando comparada ao traço de referência. Embora o traço C30-A ter apresentado desempenho intermediário no teste de penetração de íons cloreto e alto índice de cicatrização no período de cura t_{365} ($I_{C365} = 99,2\%$),

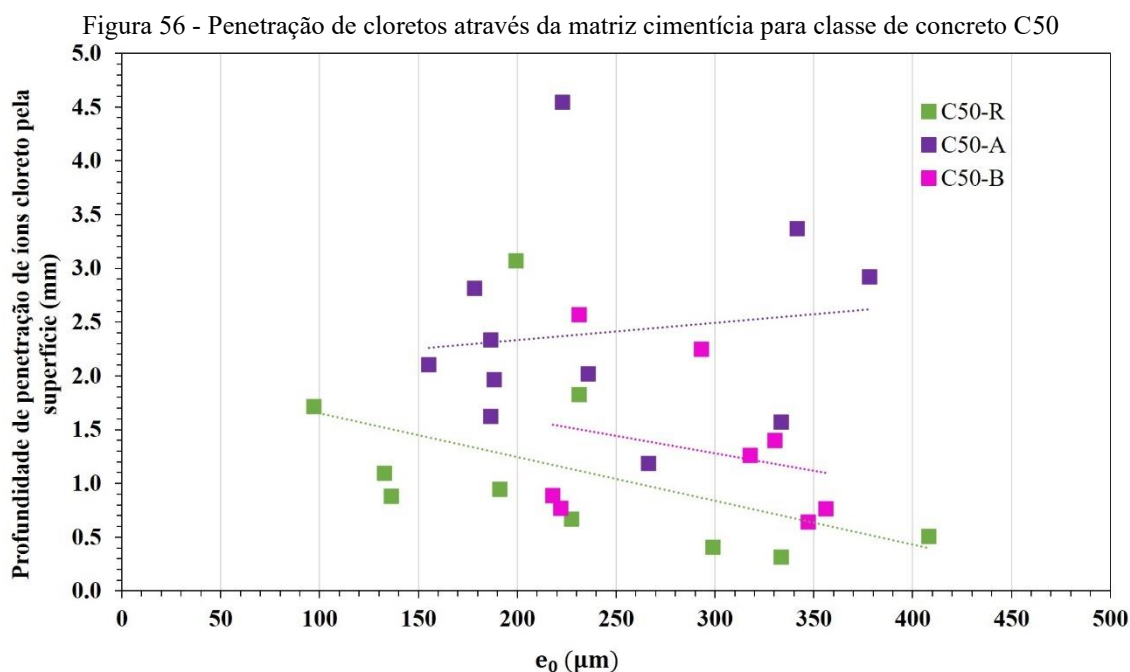
a adição cristalizante não foi eficaz em limitar a entrada de cloretos, especialmente pela via da fissura.

4.5.2 Classe de concreto C50

A Figura 56 ilustra os resultados de penetração de íons cloreto pela matriz cimentícia a partir das superfícies externas dos concretos fissurados. As amostras C50-R e C50-B demonstraram uma tendência de redução da profundidade de penetração com o aumento da e_0 , enquanto o traço C50-A apresentou tendência oposta, com aumento da penetração à medida com incremento do e_0 .

Referente ao desempenho global, o traço de referência (C50-R), sem adição cristalizante, registrou na sua maioria das amostras analisadas, os menores resultados de penetração de íons cloreto, com resultados variando entre 0,31 mm e 3,07 mm, principalmente para $e_0 < 200 \mu\text{m}$.

Contraditório aos resultados da classe de concreto C30, com relação as dosagens com adição cristalizante, o traço C50-A apresentou a maior profundidade de penetração de íons cloreto, variando os resultados entre 1,18 mm e 4,54 mm, indicando o desempenho inferior quando comparado com os traços C50-B (0,64 mm a 2,56 mm).

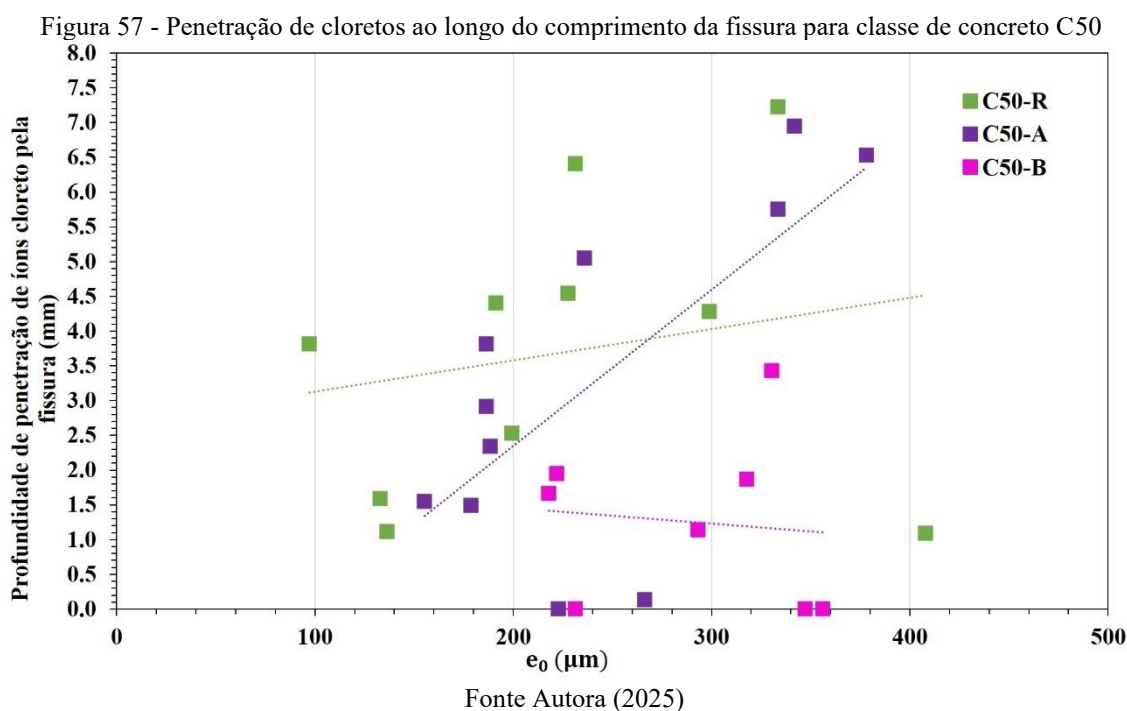


Fonte Autora (2025)

A Figura 57 apresenta a profundidade de penetração de íons cloreto pela fissura da classe C50. As amostras C50-R e C50-A, obtiveram linha de tendência de aumento da penetração com

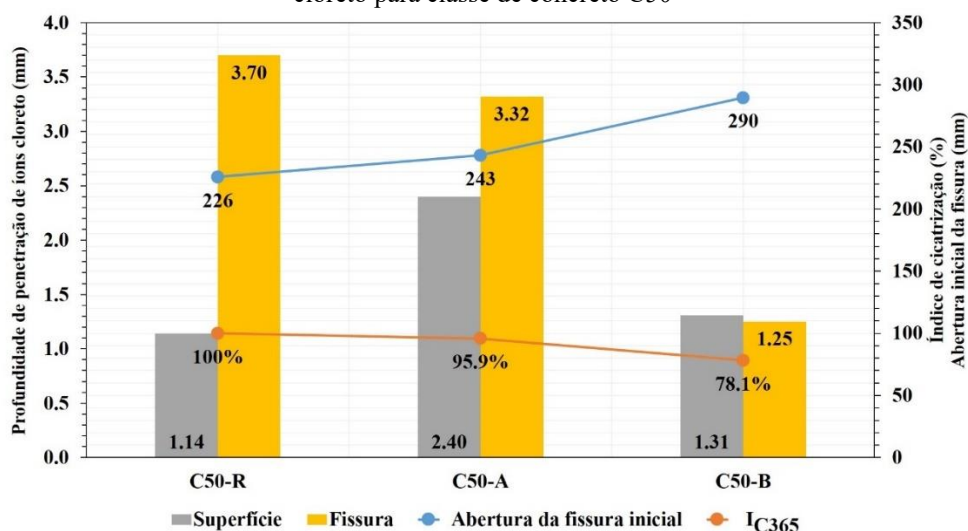
o aumento e_0 , sendo mais evidente no traço C50-A. Em contraste, o traço C50-B demonstrou comportamento inverso, com uma tendência negativa. Este comportamento sugere uma possível ação eficaz do processo de cicatrização ou uma maior resistência da matriz cimentícia à penetração de íons cloretos nas regiões fissuradas.

Referente aos resultados de penetração, o traço C50-B apresentou os menores resultados variando entre 0 μm e 3,43 μm , seguido por C50-A (0 μm e 6,95 μm) e C50-R (1,09 μm e 7,23 μm). Esses dados sugerem para a classe de concreto C50, que o uso de adição cristalizante contribuiu para a redução da penetração de íons cloreto através da fissura. Isso pode ser atribuído a um processo complementar de cicatrização autógena mais eficaz e/ou uma maior capacidade de resistência da matriz cimentícia em regiões fissuradas (Doostkami et al., 2024).



Na Figura 58 apresenta a análise integrada das médias dos resultados da e_0 , do I_{C365} e das profundidades de penetração de íons cloreto. Foram identificadas relações importantes e inesperadas entre as médias. A primeira relação observada é entre as médias dos resultados da e_0 e a penetração de íons cloreto pela superfície externa: à medida que aumenta e_0 , há uma redução na profundidade de penetração através da matriz cimentícia. A segunda relação envolve I_{C365} e a penetração de íons cloreto pela fissura: ao passo que se aumenta o I_{C365} há um incremento na penetração de íons cloreto pela fissura

Figura 58 - Análise integrada das médias dos resultados da e_0 , I_{C365} e das profundidades de penetração de íons cloreto para classe de concreto C50



Fonte Autora (2025)

A análise de variância para os concretos da classe C50 (Tabela 32 do APÊNDICE D) confirmou que o fator subclasse do concreto foi o único com influência significativa nos resultados da profundidade de penetração de íons cloreto, tanto pela superfície externa quanto pela fissura. Os fatores e_0 e o I_C não apresentaram efeito significativo, o que destaca a importância da composição da mistura e reforça o diferente de desempenho entre os traços com adições minerais cimentantes e aqueles que combinam adições cristalizantes com as cimentantes.

4.5.3 Avaliação comparativa dos resultados do teste de penetração de Íons cloreto para as classes de concreto estudadas

Em ambas as classes de concreto estudadas, as misturas que contêm apenas as adições minerais cimentantes (referência) apresentaram melhor desempenho, com menores resultados de penetração de íons cloreto pela superfície externa, o que se alinha com os estudos de Dal Molin (2022) que destaca a capacidade das adições minerais, como a sílica ativa e escória de alto-forno, em refinar a microestrutura e obstruir os poros conectados. A combinação entre aditivo cristalizante e adição cimentante, por outro lado, parece ter comprometido em alguns resultados encontrados, o balanceamento ideal entre retenção de água, hidratação e preenchimento de poros. Segundo Wang; Wang; Meng, (2020) o aumento da área superficial e a redução de água disponível para hidratação pode implicar no aumento da permeabilidade da matriz cimentícia.

Nesse contexto, a resistência à penetração de íons cloreto em concretos a partir da matriz cimentícia é um fator preponderante para a durabilidade de estruturas, especialmente em ambientes agressivos. Os resultados da MANOVA corroboram que a espessura da fissura e o índice de cicatrização tiveram um efeito limitado na durabilidade do concreto endurecido no que tange à penetração de cloretos. Isso reforça a necessidade de priorizar a redução da porosidade capilar, pois é através do mecanismo de absorção que íons agressivos, juntamente com a água, penetram no interior do concreto, desencadeando processos de deterioração (Dal Molin, 2022). Verificou-se também em ambas as classes de concreto que a penetração dos íons cloreto ocorreu através dos agregados graúdos (Figura 59), indicando sua elevada porosidade. Observou-se que os produtos de cicatrização se formaram preferencialmente na matriz cimentícia, sem atuação significativa no interior do agregado e/ou na interface entre agregado e argamassa. Esse comportamento teve interferência relevante nas medidas de profundidade de penetração de íons cloreto. Segundo Paulon; Neto; Kirchheim (2022), o arranjo entre a pasta de cimento hidratada, a zona de transição interfacial e o agregado graúdo é peculiar devido às relações químicas e físicas entre os materiais, e cada partícula de agregado pode conter vários minerais, fissuras e vazios. A presença de agregados graúdos porosos compromete a densidade e a continuidade da matriz, tornando-se um caminho preferencial para a migração de agentes agressivos. Assim, além da composição da pasta e das adições, a qualidade e a absorção dos agregados graúdos influenciaram diretamente a resistência à penetração de cloreto (Mehta; Monteiro, 2014).

Figura 59 - Amostras de concreto com penetração de íons cloretos pela brita basáltica



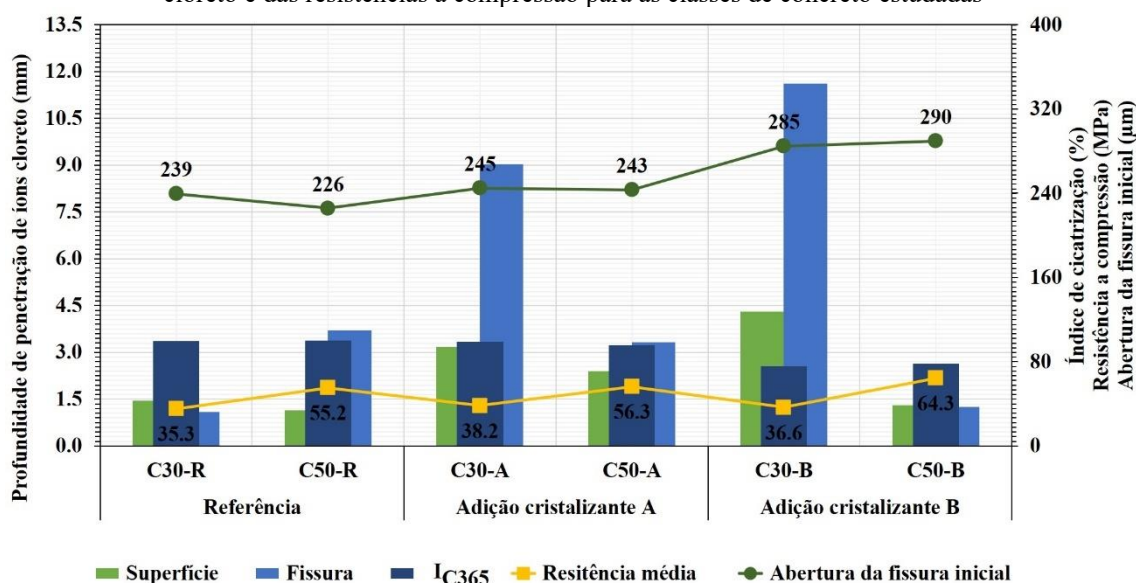
Fonte Autora (2025)

A análise integrada das médias dos resultados de e_0 , do I_{c365} , das profundidades de penetração de íons cloreto e da resistência à compressão (Figura 60) indica que os concretos da classe C50 apresentaram melhor desempenho com relação a penetração de cloreto pela

superfície externa e maior resistência a íons de cloreto pela fissura entre as misturas com adição cristalizante. Esse desempenho pode ser atribuído à presença de sílica ativa nas misturas da classe C50. Por ser um material extremamente fino, a sílica ativa é capaz de preencher os espaços entre as partículas de cimento, promovendo a densificação da matriz cimentícia e melhorando as características de resistência à permeabilidade, especialmente na interface entre a pasta de cimento e o agregado (Neville, 2016).

Além disso, entre as dosagens com adição cimentante e cristalizante, observou-se que os traços com maior resistência média à compressão aos 28 dias também apresentaram maior resistência à penetração de íons cloreto. Essa correlação reforça a influência da microestrutura na durabilidade do concreto e está de acordo com os resultados de Azarsa, Gupta e Biparva (2019), que associam o uso de adições cristalizantes ao refinamento da matriz cimentícia. Segundo os autores, a formação de produtos secundários mais densos tende a aumentar a resistência mecânica e a dificultar a movimentação de agentes agressivos, como os íons cloreto, por meio da rede capilar do concreto.

Figura 60 - Análise integrada das médias dos resultados da e_0 , I_{C365} , das profundidades de penetração de íons cloreto e das resistências a compressão para as classes de concreto estudadas



Fonte Autora (2025)

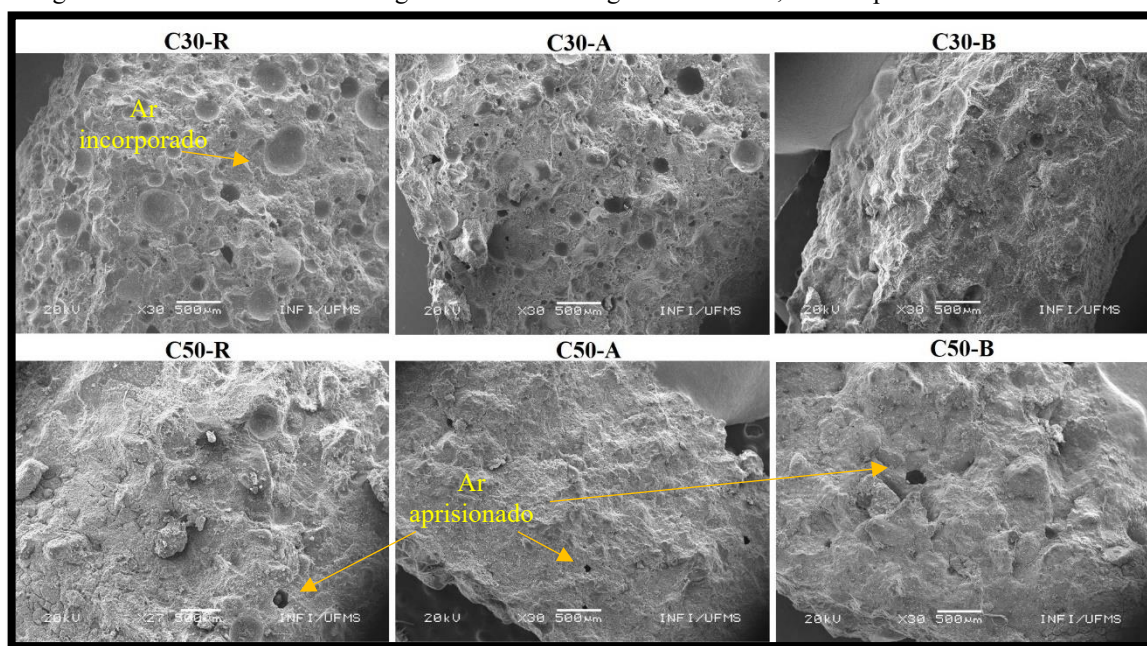
Contudo, o desempenho das adições cristalizantes na penetração de íons cloreto dependeu da classe do concreto, sendo mais impactante através da fissura. Ao comparar as dosagens referência com as que continham adições cimentantes e cristalizantes, apenas a classe de concreto C50 demonstrou melhora na resistência à penetração de íons cloreto com a adição cristalizante. As porcentagens de redução nas profundidades de penetração, em comparação com os traços referência, foram de 10,3% para o traço C50-A e de 66,2% para o C50-B.

4.6 Análise visual

4.6.1 Microscopia eletrônica de varredura

As imagens das amostras da matriz cimentícia fragmentada das dosagens C30 e C50, obtidas por meio de MEV com ampliação de 30x, exceto para o traço C50-R que foi de 27x, estão ilustradas na Figura 61. De acordo com as imagens, observa-se que todas as dosagens possuíam vazios, poros de ar aprisionado e ar incorporado, entretanto, as amostras da classe de concreto C30 apresentaram uma quantidade maior de poros por incorporação de ar, quando comparado as dosagens C50, com destaque para as maiores proporções nos traços C30-R e C30-A. Esse resultado corrobora com o fato dos traços da classe de concreto C50 ter apresentado melhor desempenho frente aos resultados de penetração de íons cloreto pela superfície externa e indica que o refinamento da porosidade e a densificação da matriz cimentícia, proporcionados pelo uso da sílica ativa, atuaram como barreiras efetivas ao transporte iônico.

Figura 61 - MEV das amostras fragmentadas das dosagens C30 e C50, obtidas por elétrons secundários



Fonte Autora (2025)

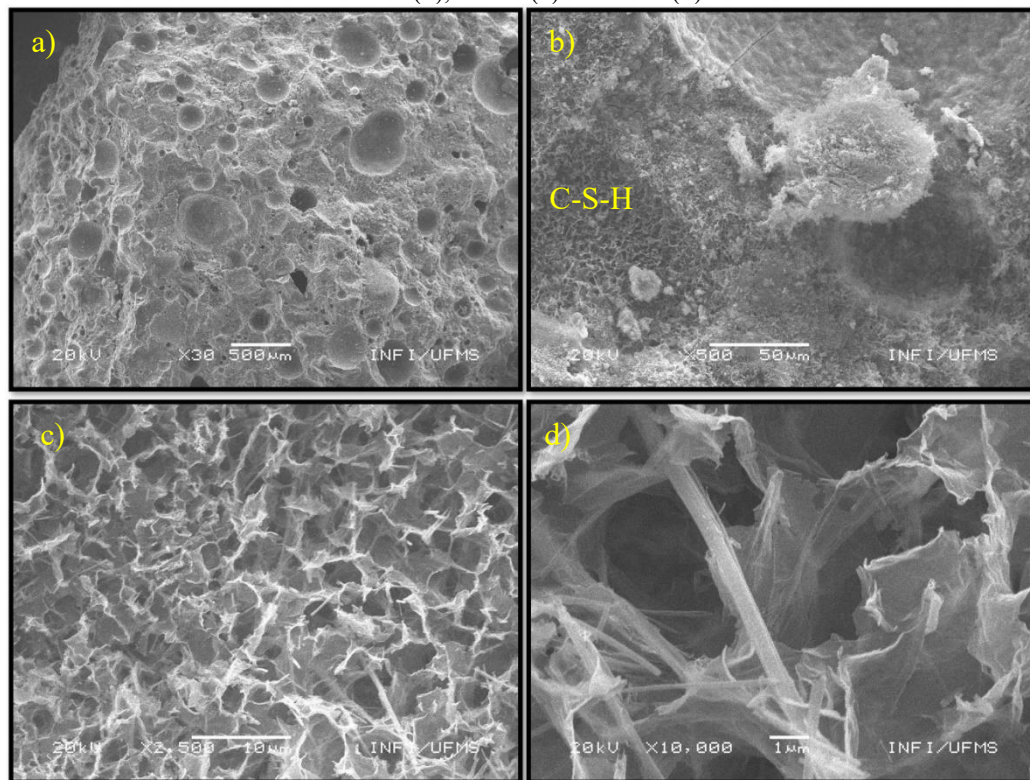
4.6.1.1 Classe de concreto C30

As imagens analisadas das subclasses de concreto C30-R, C30-A e C30-B por meio de MEV com ampliação de 30x, 500x, 2500x e 10000x, estão ilustradas, respectivamente nas Figuras 62, 63 e 64.

Na Figura 62 é possível observar formação fibrilar presente no poro da matriz cimentícia. A morfologia desses produtos é compatível com cristais de C-S-H em crescimento, formados a partir da hidratação das fases C_3S e C_2S do cimento CP II-F 40, ambas identificadas previamente pela análise de DRX. O traço C30-R por ser a referência, não contém a adição cristalizante, a formação de C-S-H nos poros está associada aos processos de cicatrização autógena, favorecidos pela presença contínua de umidade e pela reatividade da escória de alto-forno, que consome hidróxido de cálcio e promove reações pozolânicas tardias. Esse mecanismo resulta na deposição progressiva de gel de C-S-H nos poros e microfissuras, contribuindo para a redução da permeabilidade.

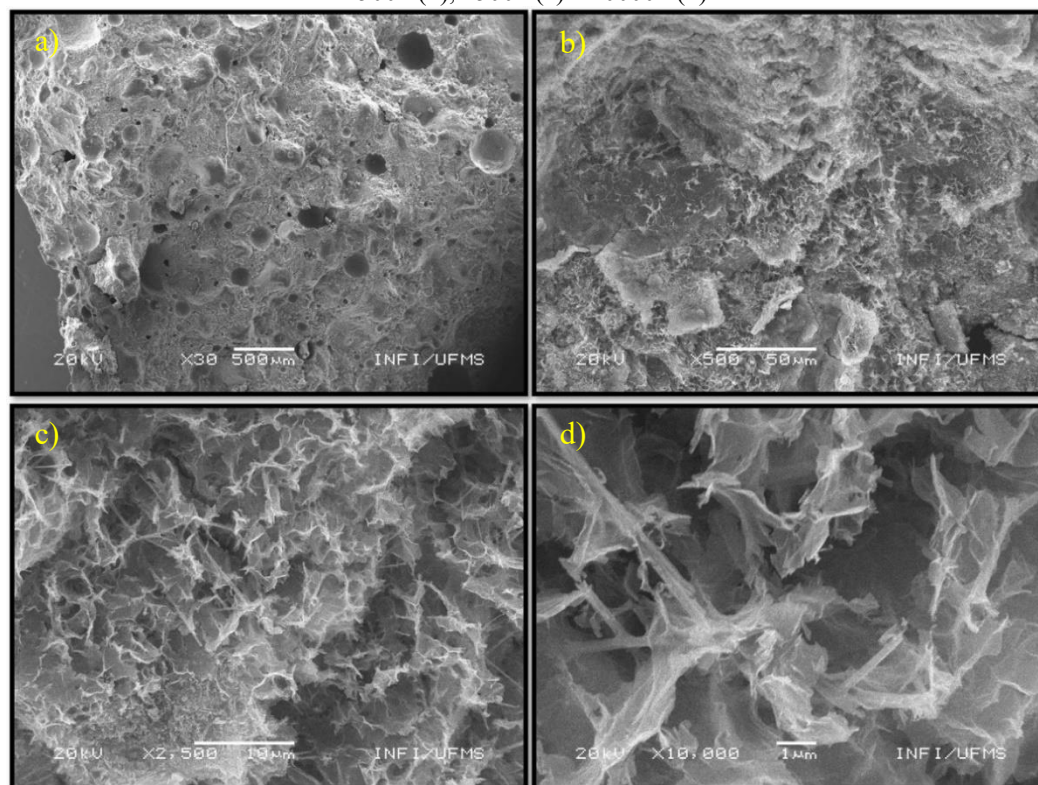
No traço C30-A também foi identificada estrutura fibrilar compatível com cristais de C-S-H em crescimento, sugerindo que a adição cristalizante A não alterou de forma significativa a morfologia dos produtos de preenchimento visíveis por MEV (Figura 63).

Figura 62 - MEV da amostra de concreto C30-R obtidas por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)



Fonte Autora (2025)

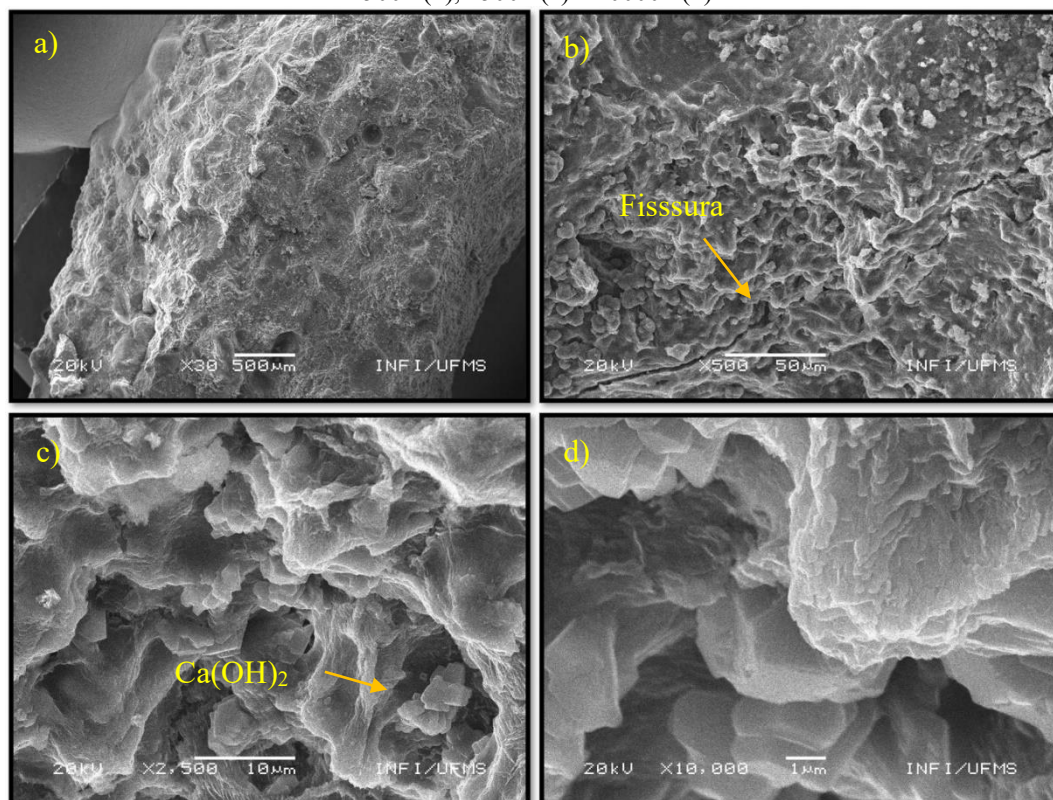
Figura 63 - MEV da amostra de concreto C30-A obtidas por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)



Fonte Autora (2025)

Uma visão geral da superfície do fragmento do concreto C30-B (Figura 64) a textura irregular apresentada é diferente dos demais traços analisados. É possível verificar na Figura 64 (b) uma estrutura mais detalhada, revelando uma matriz com produtos de hidratação interconectadas e de massas mais densas, possivelmente C-S-H secundários e também uma fissura. No entanto, a fissura observada não possui evidências de produtos de cicatrização. Na Figura 64 (c) é possível verificar presença de vazios parcialmente preenchidos com cristais lamelares ou em placas sobrepostas que podem corresponder à Ca(OH)_2 , previamente constatada no DRX dos traços da classe de concreto C30, ou a C-S-H denso. Esses padrões são consistentes com o crescimento tardio de produtos de hidratação, especialmente C-S-H e possivelmente Ca(OH)_2 , preenchendo vazios e microfissuras. A morfologia observada nos traços C30 confirma que, mesmo após longos períodos de cura, para o conjunto de condições testadas (365 dias em água), os concretos continuam apresentando reações de hidratação interna.

Figura 64- MEV da amostra de concreto C30-B obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)



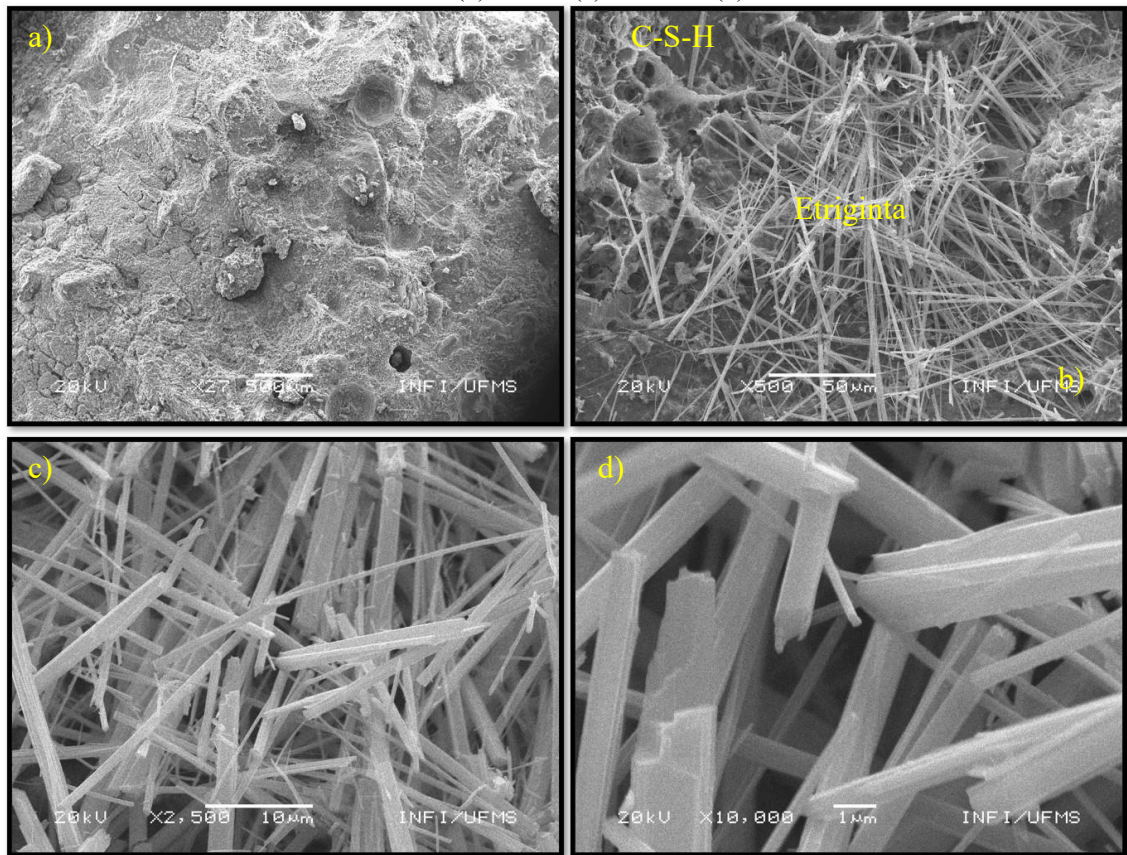
Fonte Autora (2025)

4.6.1.2 Classe de concreto C50

As micrografias das subclasses de concreto C50-R, C50-A e C50-B por meio de MEV com ampliação de 27x, 500x, 2500x e 10000x, estão ilustradas, respectivamente nas Figuras 65, 66 e 67.

Na Figura 65 é possível observar estruturas fibrilares do C-S-H e também cristais aciculares (em forma de agulha), característicos de etringita, dispostos de forma entrelaçada no interior de poros, conforme já constatado no ensaio de DRX. Esse produto de hidratação indica a formação de etringita secundária durante o período de cura prolongada, provavelmente resultou da reação de aluminatos remanescentes com sulfatos disponíveis no sistema, mesmo após as reações pozolânicas desenvolvidas pela sílica ativa. Ainda, na presença de umidade no concreto já endurecido, a etringita recristaliza em cristais maiores dentro dos vazios.

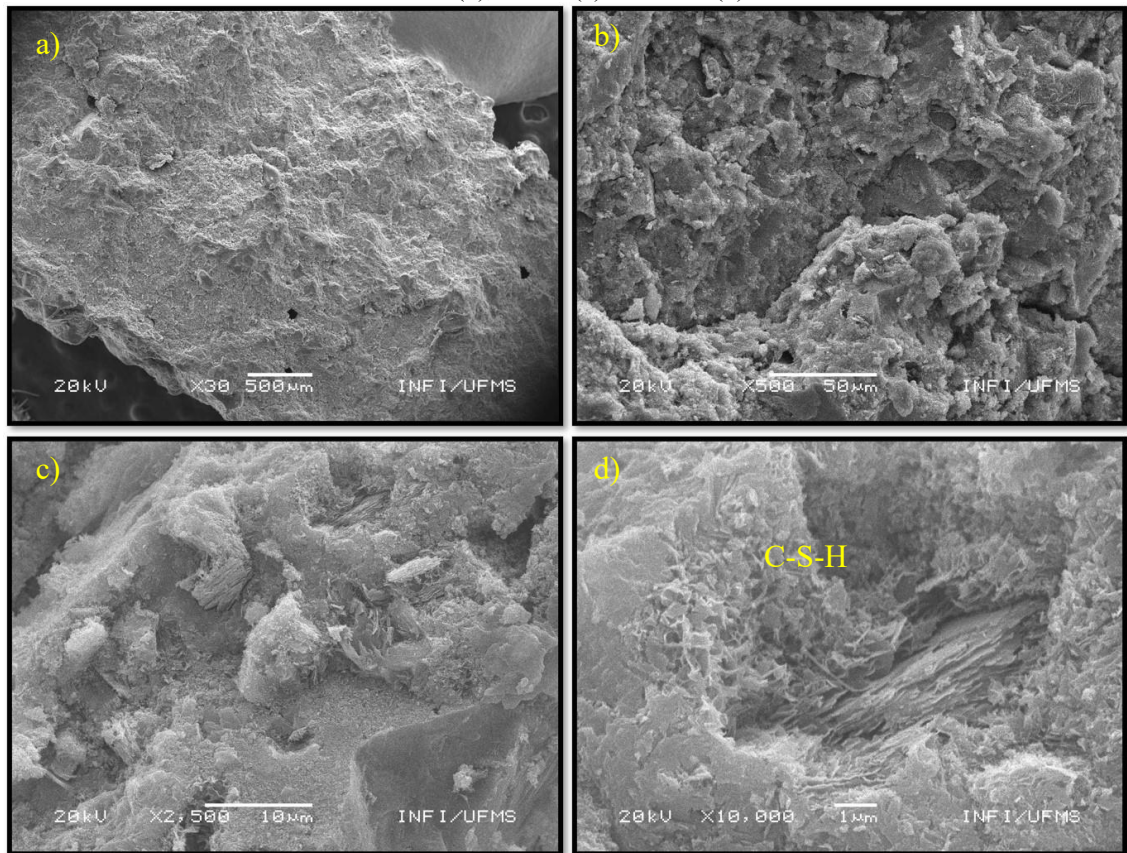
Figura 65 - MEV da amostra de concreto C50-R obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)



Fonte Autora (2025)

No traço C50-A a imagem obtida com ampliação de 500x, observam-se uma morfologia irregular e superfície rugosa. Com o aumento de 10000x foi possível identificar arranjos compactos de lamelares sobrepostas e estruturas fibrilares densas no interior de poros, típicos de C-S-H (Figura 66).

Figura 66 - MEV da amostra de concreto C50-A obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)

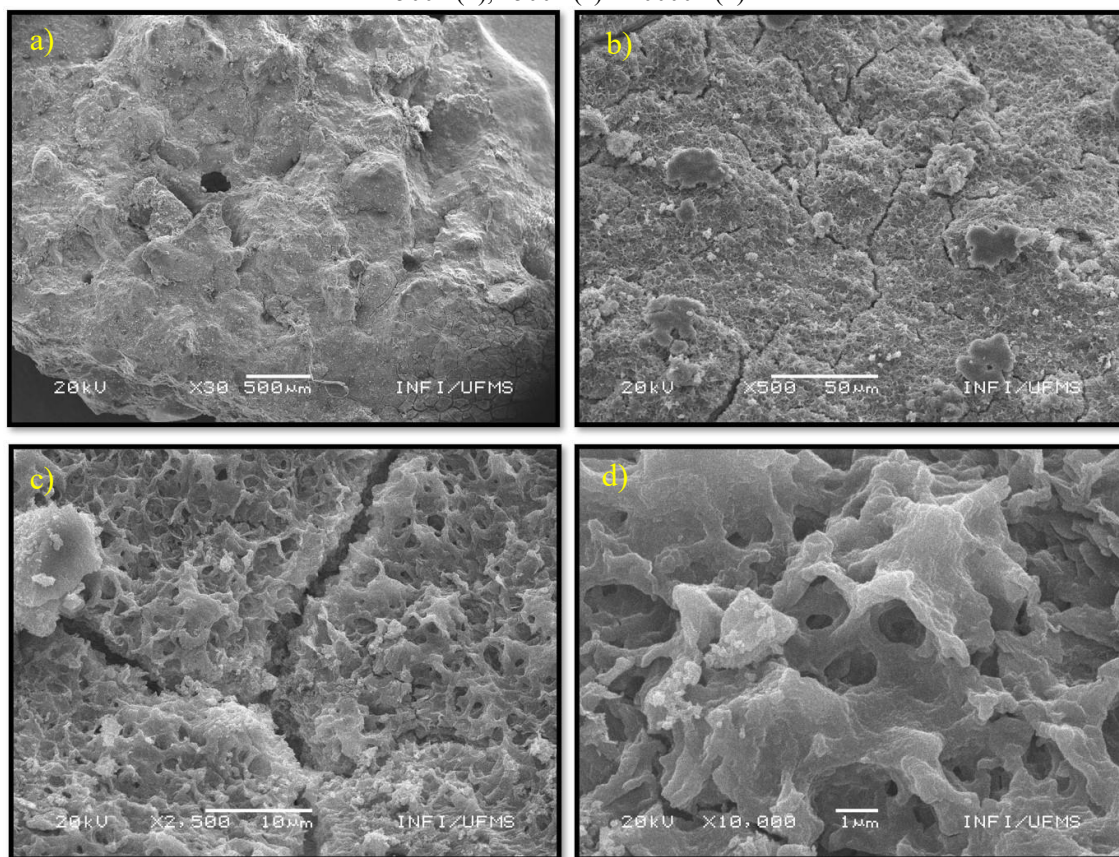


Fonte Autora (2025)

A superfície do fragmento de concreto C50-B (Figura 67) apresentou textura irregular semelhante à observada na amostra do traço C30-B. Foram identificadas fissuras superficiais e uma textura esponjosa e porosa, típica da fase C-S-H ou de produtos secundários de hidratação. As fissuras podem estar relacionadas ao processo de fratura, uma vez que, no ensaio de penetração de íons cloreto, o traço C50-B apresentou a segunda maior resistência à penetração em comparação com os demais traços.

Os padrões de textura irregular observados nas superfícies das amostras com adição cristalizante B indicam que houve alterações no comportamento morfológico entre as diferentes marcas comerciais utilizadas. Essa variação pode estar associada à composição química específica de cada produto, ao tamanho e distribuição das partículas e à reatividade dos componentes ativos, que influenciam a formação e o arranjo das fases hidratadas.

Figura 67- MEV da amostra de concreto C50-B obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)



Fonte Autora (2025)

De modo geral, a análise das micrografias dos fragmentos de concreto permitiu identificar, no interior dos poros, fases de hidratação como C-S-H, etringita secundária e Ca(OH)_2 . A presença de C-S-H nos concretos de referência pode indicar a ocorrência de cicatrização autóloga, uma vez que os processos e reações envolvidos nesse mecanismo são os mesmos do processo normal de hidratação do cimento, envolvendo a formação de C-S-H e Ca(OH)_2 a partir das reações do C_3S e C_2S presentes no cimento CP II-F 40 em contato com a água (Ziegler, 2020).

Por outro lado, a formação de produtos hidratados secundários nos concretos com adição cristalizante pode atuar de forma complementar à cicatrização autóloga. A característica hidrofílica dessas adições favorece a recristalização tanto na porosidade capilar quanto nas fissuras do concreto, ou seja, sempre que houver espaço disponível para precipitação, presença de parte do aglomerante na forma anidra e Ca(OH)_2 , esses produtos tenderão a se formar (Van Tittelboom et al., 2012).

A identificação de C-S-H e etringita na morfologia dos concretos com adição cristalizante corrobora os resultados obtidos por Araújo e Ribas (2022); Nasim; Dewangan; Deo (2020b).

4.6.1.3 Produto de cicatrização da fissura

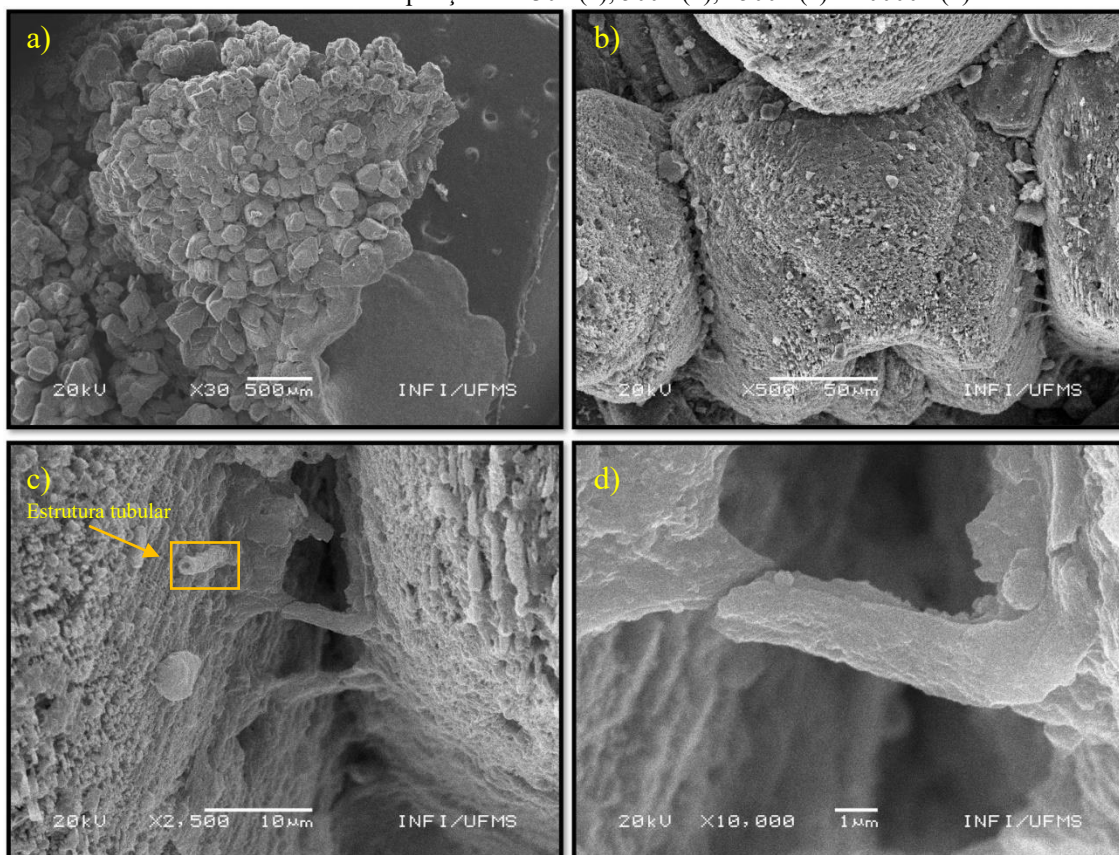
Outra forma de analisar qualitativa e observar a morfologia foi o ensaio de MEV acoplado com EDS nos fragmentos de produto de cicatrização das bordas das fissuras (esbranquiçado) do traço C30-A (C30-A(C)) com ampliação de 30x, 500x, 2500x e 10000x (Figura 68). Na ampliação de 30x (Figura 68 (a)) observam-se aglomerados cristalinos com partículas bem definidas, indicativos de precipitação de produtos secundários no interior da matriz. Nas demais ampliações, nota-se a presença de grãos com superfície rugosa, textura compacta e partículas finas aderidas, sugerindo recobrimento por produtos hidratados, possivelmente C-S-H.

Outro aspecto relevante identificados na Figura 68 (c) e (d) é presença de conexões entre as partículas dos aglomerados a partir de pontes bem definidas e rugosas. A densificação do produto cicatrizante ocorre pela sobreposição das partículas, unidas por essas pontes. Esse arranjo sugere um processo de recristalização induzida pela ação da adição cristalizante, conforme proposto por Van Tittelboom et al. (2012).

Na micrografia apresentada na Figura 68 (d) uma ponte apresenta fratura, indicando possível fragilidade mecânica. Ainda, na Figura 68 (c) é possível verificar a formação de uma estrutura tubular, com um orifício na extremidade, o que sugere que parte dessas pontes pode apresentar fragilidade devido à presença de vazios parciais ou totais em seu interior.

Essas evidências reforçam que o mecanismo de cicatrização no traço C30-A resulta de uma ação combinada: hidratação residual (cicatrização autógena) e recristalização induzida pela adição cristalizante. Esse processo contribuiu para a densificação da matriz cimentícia e, conseqüentemente, para redução da permeabilidade, o que se refletiu no desempenho superior obtido no traço com adição cristalizante A (C30-A) quando comparado com adição cristalizante B (C30-B).

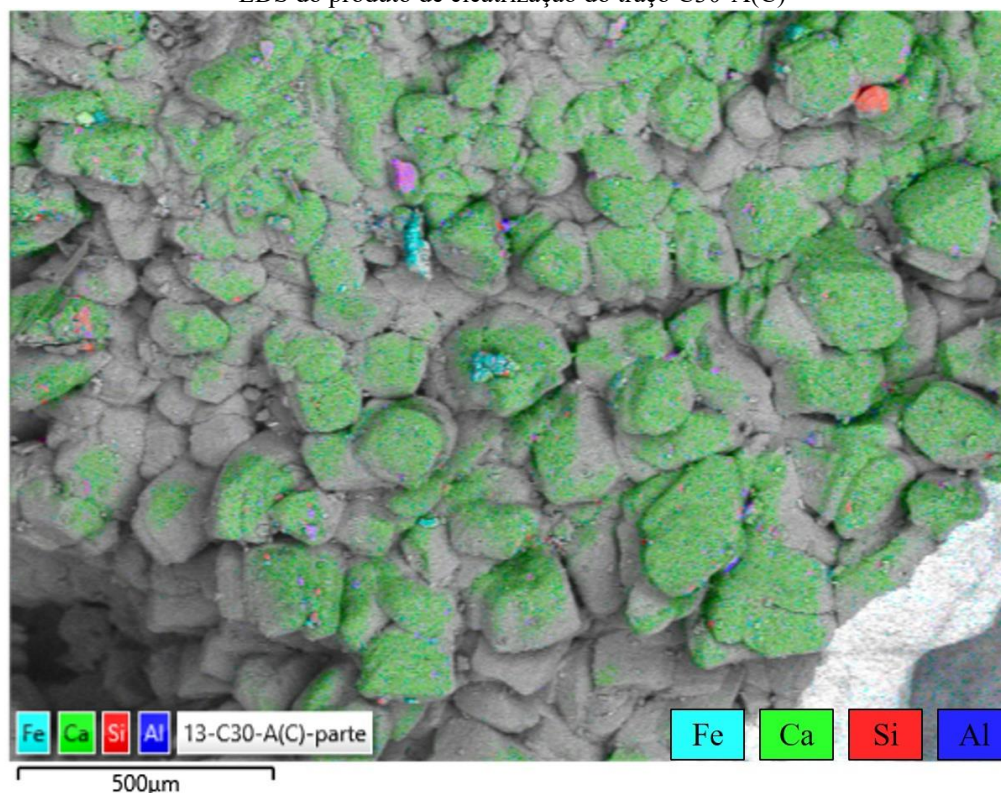
Figura 68 - MEV do produto de cicatrização de fissura da amostra de concreto C30-A obtida por elétrons secundários e com ampliações de 30x (a), 500x (b), 2500x (c) e 10000x (d)



Fonte Autora (2025)

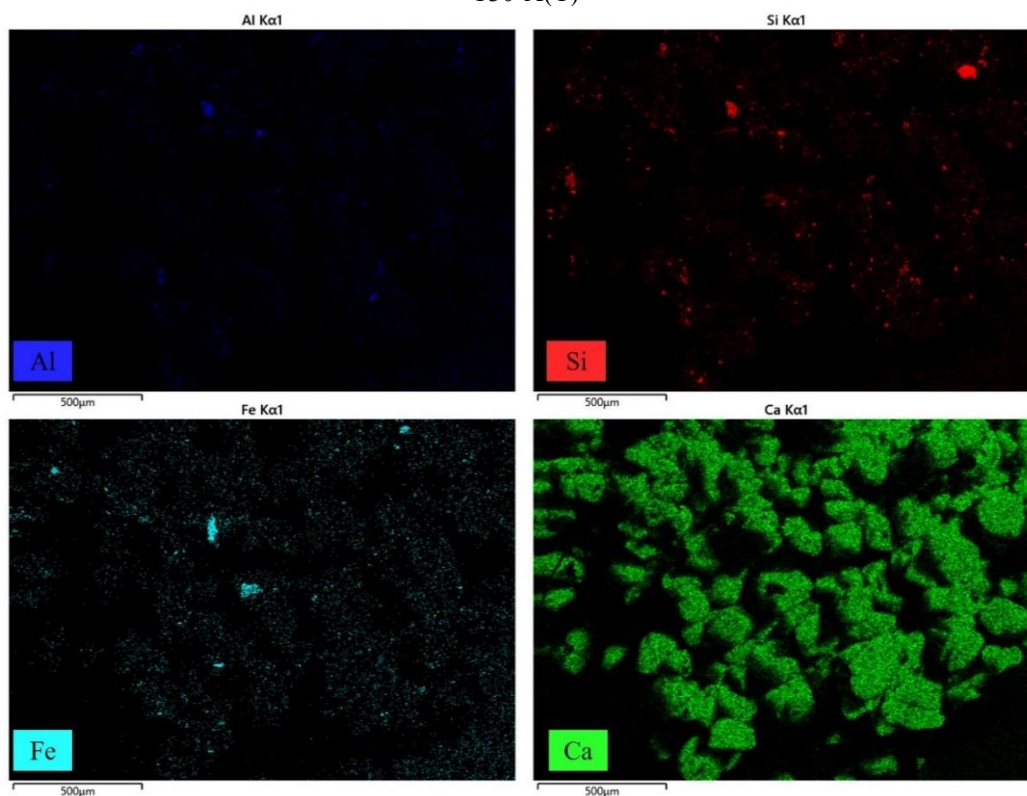
As análises por meio do EDS, para cada uma das ampliações, realizadas concomitantemente ao MEV para as amostras do produto de cicatrização das bordas das fissuras (esbranquiçado) do traço C30-A(C), resultaram no mapeamento elementar de cada representação e distribuição espacial de um elemento químico (Figura 69) e mapas elementares separados (Figura 70). O mapeamento elementar via EDS do fragmento do produto de cicatrização do concreto C30-A (Figura 69) evidencia claramente o predomínio expressivo de cálcio (Figura 70), distribuído de forma homogênea sobre a superfície analisada, o que indica a presença maciça de produtos de hidratação ricos em Ca, como C-S-H e/ou Ca(OH)_2 . O Si e Al apresentaram algumas distribuições pontuais e aglomeradas, possivelmente relacionadas a partículas de quartzo advinda da areia natural e as fases aluminossilicatadas remanescentes da escória de alto-forno não totalmente reagida. O Fe ocorre de forma dispersa e com alguns aglomerados, associado a impurezas minerais ou à composição da escória.

Figura 69 - Mapeamento elemental de cada representação e distribuição espacial dos elementos químicos via EDS do produto de cicatrização do traço C30-A(C)



Fonte Autora (2025)

Figura 70- Mapas individuais de distribuição elemental via EDS da amostra do produto de cicatrização do traço C30-A(C)



Fonte Autora (2025)

4.6.1.4 Avaliação comparativa dos resultados do MEV e do produto de cicatrização de fissura

Os dados apresentados na Tabela 16 indicam que no fragmento C30-A(C), ocorreu um consumo significativo de silicatos (11,42% em C30-A) → 1,68% em C30-A(C)) e aluminatos (1,98% em C30-A → 0,60% em C30-A(C)), possivelmente devido a hidratação contínua e/ou reações secundárias induzidas pelo aditivo cristalizante A. Esse processo promoveu a liberação de íons de cálcio e sua posterior precipitação, explicando tanto a redução acentuada de Si e Al quanto o aumento expressivo de Ca (22,61% → 35,01%) no produto de cicatrização. O aumento de Ca sugere acúmulo de compostos cálcicos no local da fissura, possivelmente como Ca(OH)_2 ou CaCO_3 precipitado, já identificado nos ensaios de DRX, corroborando a hipótese de selamento por recristalização.

Essa interpretação é reforçada pelas análises da água de imersão, que evidenciaram aumento das concentrações de cálcio, dureza e alcalinidade ao longo do período de cicatrização, indicando que a liberação de Ca^{2+} pelas amostras contribuiu diretamente para a formação dos produtos observados no interior das fissuras, enquanto o pH manteve-se estável em virtude do tamponamento hidróxido-carbonato.

Tabela 16 - Resultado percentual, semiquantitativos, obtidos por EDS em fragmentos de concreto da classe C30 e C50 e no produto de cicatrização da fissura (C30-A(C))

Elemento	Teor em massa (%) *						
	C30-R	C30-A	C30-B	C50-R	C50-A	C50-B	C30-A(C)
C	12,69	15,36	15,47	0,29	16,71	14,01	14,64
O	50,22	44,64	41,73	47,66	41,93	44,60	46,63
Mg	0,80	0,81	0,90	-	0,55	0,23	-
Al	2,00	1,98	1,65	1,24	1,74	0,77	0,60
Si	11,07	11,42	8,90	8,48	10,57	5,92	1,68
S	0,85	0,65	-	0,40	0,53	-	-
K	0,14	-	-	-	-	-	-
Ca	21,07	22,61	21,14	27,35	22,05	28,46	35,01
Fe	1,16	1,15	1,22	0,59	1,76	0,77	1,44

*Dados experimentais, análise EDS. Valores semiquantitativos indicam a distribuição relativa dos elementos nas amostras e não correspondem à composição exata em massa (%)

Fonte Autora (2025)

4.6.2 Registro de imagem por meio de microscópio óptico digital

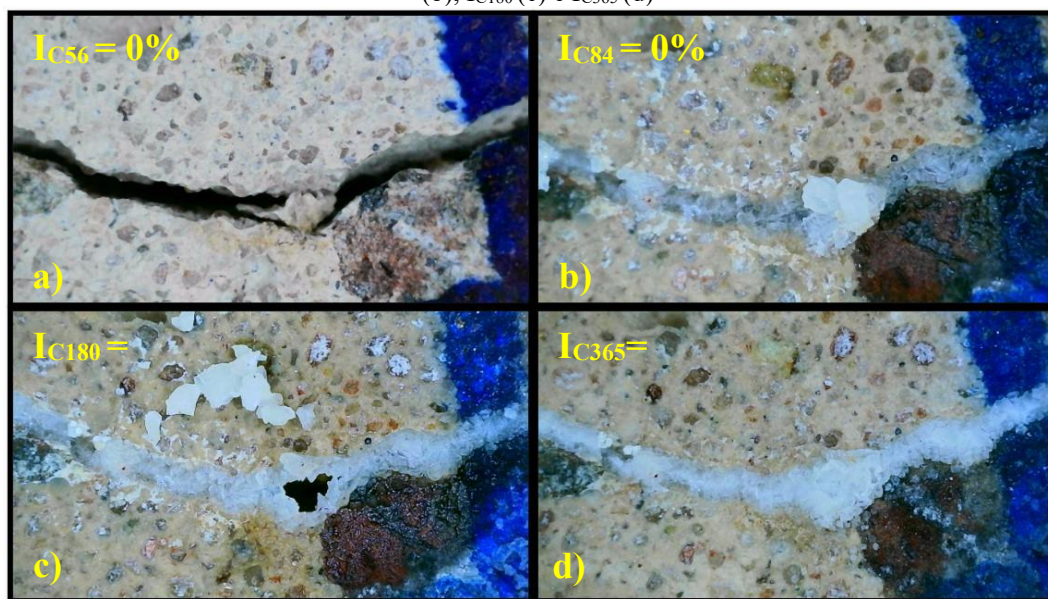
O fechamento superficial das fissuras foi monitorado por meio de registros de imagens da face externa das amostras no aparato obtidas com microscópio óptico nas idades de ensaio t_0 , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} . Observou-se um processo gradual de cicatrização superficial, caracterizado pela deposição de um material de coloração esbranquiçada, predominantemente concentrado ao longo das bordas das fissuras (Figura 71). Essa distribuição corrobora os resultados de

penetração de íons cloreto, indicando que a cicatrização ocorre preferencialmente na matriz cimentícia, sem atuação significativa no interior dos agregados.

Outro aspecto visualizado nas ampliações por MEV foi a morfologia cristalina irregular, com aparência semelhante à de cristais de açúcar. Com o avanço do tempo, essas estruturas se aglomeram e se unem por meio de pontes, formando uma camada superficial. Essa camada inicia-se nas bordas e avança em direção ao interior da fissura. Contudo, as imagens obtidas em ambos os equipamentos evidenciaram que essas pontes podem apresentar fragilidade estrutural quando a densificação e a ancoragem do material não são suficientemente robustas para resistir a tensões mecânicas (Figura 71 (c)). No entanto, é possível constatar na Figura 71 (d) o selamento por recristalização.

A análise química e o mapeamento elementar por EDS confirmaram que a coloração esbranquiçada desses produtos está associada a elevadas concentrações de cálcio (Ca), principal constituinte do Ca(OH)_2 e CaCO_3 , ambos identificados nos ensaios de DRX.

Figura 71 - Análise visual superficial de fissura com abertura $e_0 = 497 \mu\text{m}$ do traço C30-B com os I_{CS6} (a), I_{C84} (b), I_{C180} (c) e I_{C365} (d)

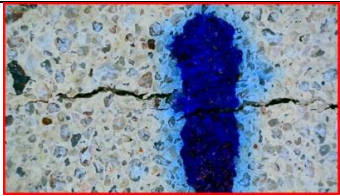
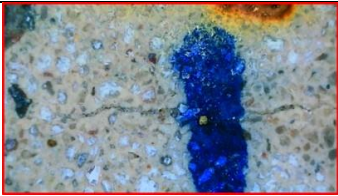
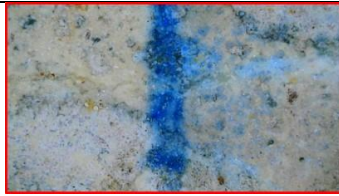
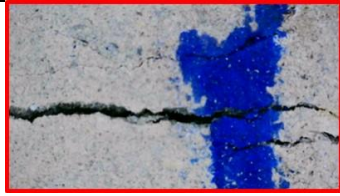
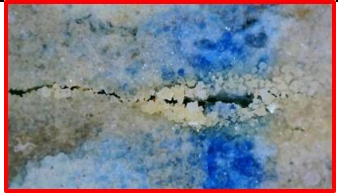
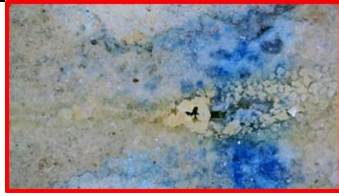
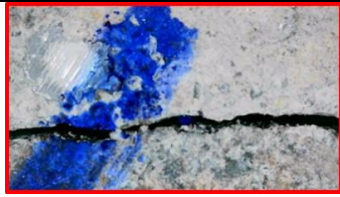
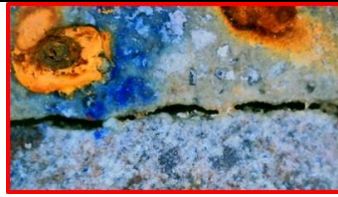


Fonte Autora (2025)

Nos Quadros 7 e 8 estão as imagens das amostras de concreto feitos com adição cristalizante A, representadas, respectivamente, pelos corpos de prova A2 (C50) e B9 (C30). Ambos alcançaram $\text{I}_{\text{C84}} = 100\%$, apresentando e_0 entre $200 \mu\text{m} \leq e_0 < 300 \mu\text{m}$. Observam-se nas fissuras da superfície nos pontos 2 e 3 da amostra A2 que estas não foram totalmente fechadas superficialmente, possivelmente devido à cicatrização interna ou à presença de fragmentos de concreto que impediram a percolação de água na fissura por pelo menos 60

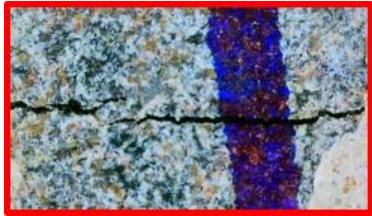
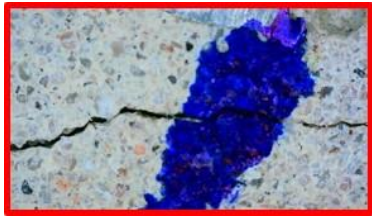
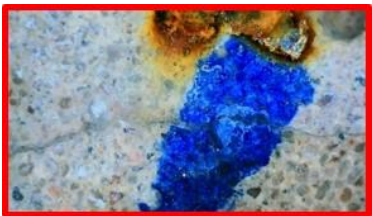
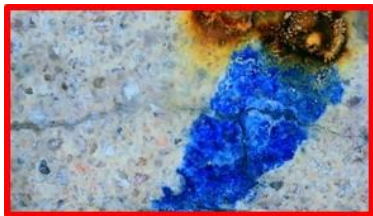
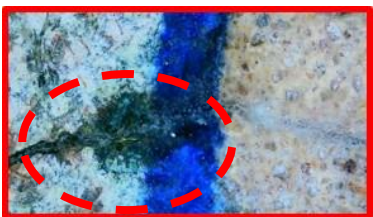
minutos durante o ensaio de permeabilidade de água no t_{84} . No entanto quando verificado as imagens da amostra B9 os pontos 4, 5 e 6 foram aparentemente cicatrizados superficialmente somente no t_{84} dias, apresentando aos t_{56} dias no ponto 6 parte na região em destaque sem a deposição de um material de coloração esbranquiçada já visto no t_{84} .

Um aspecto notável visto no Quadro 7 foi a maneira como a cicatrização ocorreu ao longo da borda da fissura, conforme observado na amostra A2 (C50), ponto 2, antes t_{56} e depois t_{84} . Isso demonstra que a análise visual por meio das imagens capturadas pelo microscópio óptico digital é relevante para acompanhar essa alteração na formação do produto cristalizado.

C50-A		
Abertura inicial da fissura, $e_0 = 199 \mu\text{m}$		
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}
Condição inicial da fissura	$I_{C56} = 81,2\%$	$I_{C84} = 100\%$
Amostra: A2 - ponto 1		
		
Amostra: A2 - ponto 2		
		
Amostra: A2 - ponto 3		
		

Fonte Autora (2025)

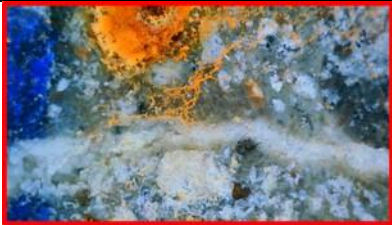
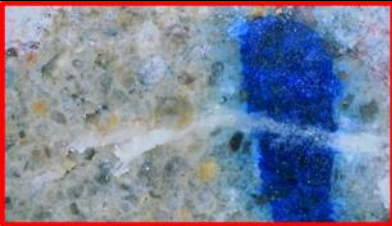
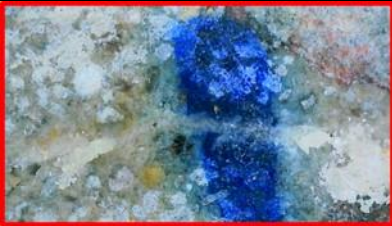
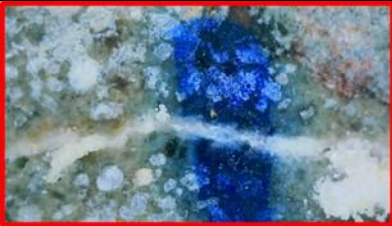
Quadro 8 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $200 \mu\text{m} \leq e_0 < 300 \mu\text{m}$ para a subclasse C30-A

C30-A		
Abertura inicial da fissura, $e_0 = 266 \mu\text{m}$		
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}
Condição inicial da fissura	$I_{C56} = 68,5\%$	$I_{C84} = 100\%$
Amostra: B9 - ponto 4		
		
Amostra: B9 – ponto 5		
		
Amostra B9 – ponto 6		
		

Fonte: Autora (2025)

No Quadro 9 apresenta-se a amostra C50-R, com fissura $200 \mu\text{m} \leq e_0 < 300 \mu\text{m}$ e $I_{C180} = 100\%$. A imagem sugere cicatrização superficial a partir de t_{56} , embora internamente possa não ter ocorrido fechamento completo. O teste de percolação de água, entretanto, confirma a efetividade da vedação aos t_{180} , destacando sua relevância frente às limitações da análise apenas por observação visual.

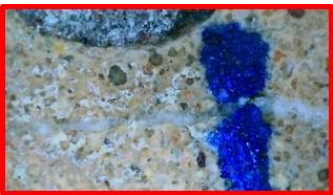
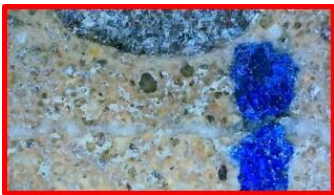
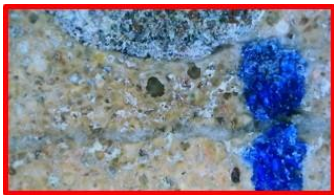
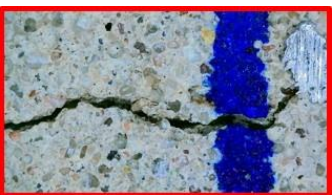
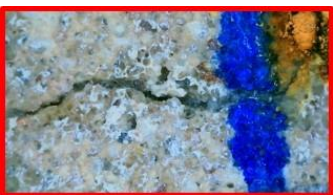
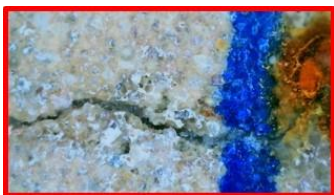
Quadro 9 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $200 \mu\text{m} \leq e_0 < 300 \mu\text{m}$ para a subclasses C50-R

C50-R			
Abertura da Fissura, $e_0 = 299 \mu\text{m}$			
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}	Idade t_{180}
Condição inicial	$I_{C56} = 62,7\%$	$I_{C84} = 91,6\%$	$I_{C180} = 100\%$
Amostra: A9 - ponto 1			
			
Amostra: A9 - ponto 2			
			
Amostra: A9- ponto 3			
			

Fonte: Autora (2025)

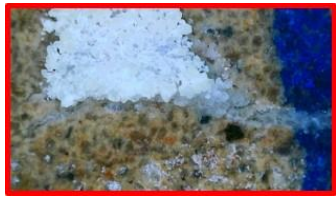
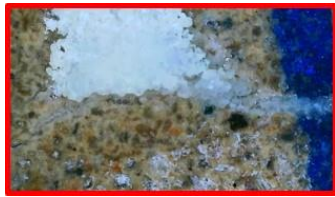
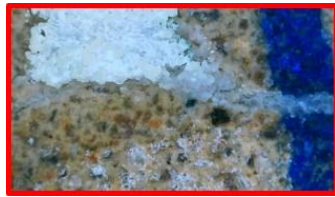
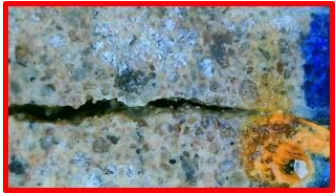
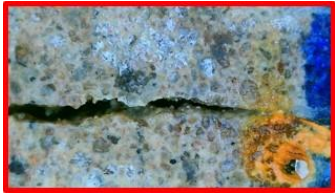
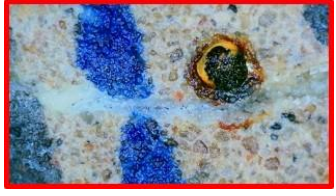
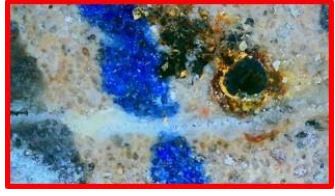
As fissuras observadas nas imagens das subclasses de concreto C30-R, C30-A e C30-B correspondem as amostras com e_0 entre $400 \mu\text{m} \leq e_0 < 500 \mu\text{m}$, que obtiveram cicatrização parcial no período de cura t_{365} , ilustrados, respectivamente, nos Quadros 10, 11 e 12.

Quadro 10 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $400 \mu\text{m} \leq e_0 \leq 500 \mu\text{m}$ para a subclasse C30-R

C30-R				
Abertura da Fissura, $e_0 = 439 \mu\text{m}$				
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}	Idade t_{180}	Idade t_{365}
Condição inicial	$I_{C56} = 14,4\%$	$I_{C84} = 27,1\%$	$I_{C180} = 62,6\%$	$I_{C365} = 62,6\%$
Amostra: B4 - ponto 4				
				
Amostra: B4 - ponto 5				
				
Amostra: B4 - ponto 6				
				

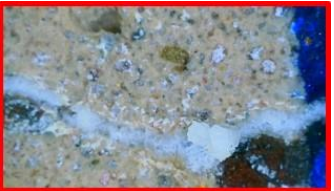
Fonte: Autora (2025)

Quadro 11 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $400 \mu\text{m} \leq e_0 \leq 500 \mu\text{m}$ para a subclasse C30-A

C30-A				
Abertura da Fissura, $e_0 = 406 \mu\text{m}$				
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}	Idade t_{180}	Idade t_{365}
Condição inicial	$I_{C56} = 0\%$	$I_{C84} = 0\%$	$I_{C180} = 42,4\%$	$I_{C365} = 92,1\%$
Amostra: A9 - ponto 4				
				
Amostra: A9 - ponto 5				
				
Amostra: A9 - ponto 6				
				

Fonte: Autora (2025)

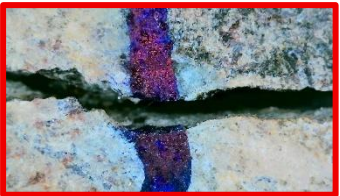
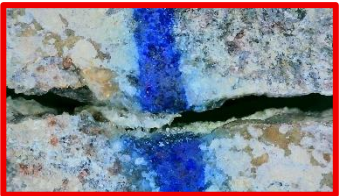
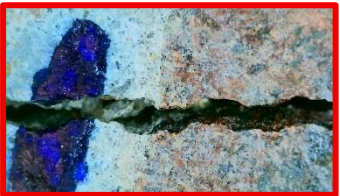
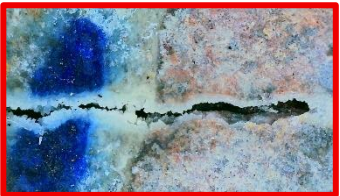
Quadro 12 - Análise visual superficial da fissura com e_0 entre $400 \mu\text{m} \leq e_0 \leq 500 \mu\text{m}$ para a subclasse C30-B

C30-B				
Abertura da Fissura, $e_0 = 497 \mu\text{m}$				
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}	Idade t_{180}	Idade t_{365}
Condição inicial	$I_{C56} = 0\%$	$I_{C84} = 0\%$	$I_{C180} = 10,8\%$	$I_{C365} = 22,2\%$
Amostra: B6 - ponto 1				
				
Amostra: B6 - ponto 2				
				
Amostra: B6 - ponto 3				
				

Fonte: Autora (2025)

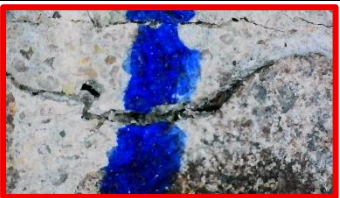
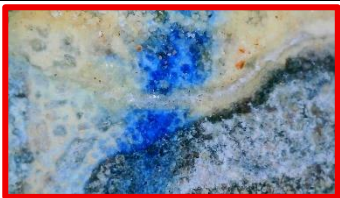
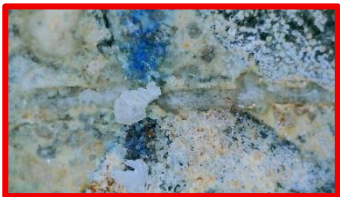
As fissuras dos concretos C50-R, C50-A e C50-B, com $e_0 > 300 \mu\text{m}$, apresentaram cicatrização parcial em t_{365} , como mostrado nos Quadros 13, 14 e 15. Nos traços C50-R e C50-A, apesar das fissuras parecerem seladas superficialmente, o ensaio de permeabilidade apontou fechamento parcial de 79,2% e 87,9%, respectivamente. De forma geral, as análises indicam que fissuras com $e_0 > 300 \mu\text{m}$ representam uma limitação significativa para o fechamento completo, independentemente da classe de concreto avaliada.

Quadro 13 - Análise visual superficial da fissura com $e_0 > 300 \mu\text{m}$ para a subclasse C50-R

C50-R				
Abertura da Fissura, $e_0 = 459 \mu\text{m}$				
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}	Idade t_{180}	Idade t_{365}
Condição inicial	$I_{C56} = 17,5\%$	$I_{C84} = 88,8\%$	$I_{C180} = 68,6\%$	$I_{C365} = 79,2\%$
Amostra: A8 - ponto 1				
				
Amostra: A8 - ponto 2				
				
Amostra: A8 - ponto 3				
				

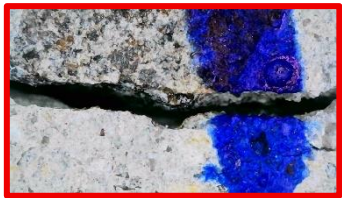
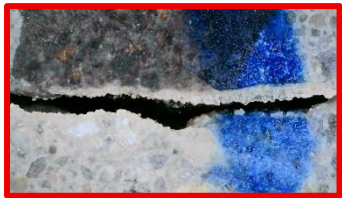
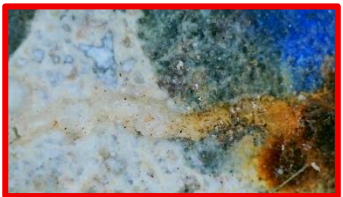
Fonte: Autora (2025)

Quadro 14 - Análise visual superficial da fissura com $e_0 > 300 \mu\text{m}$ para a subclasse C50-A

C50-A				
Abertura da Fissura, $e_0 = 378 \mu\text{m}$				
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}	Idade t_{180}	Idade t_{365}
Condição inicial	$I_{C56} = 0\%$	$I_{C84} = 0\%$	$I_{C180} = 79,3\%$	$I_{C365} = 87,9\%$
Amostra: A9 - ponto 1				
				
Amostra: A9 - ponto 2				
				
Amostra: A9 - ponto 3				
				

Fonte: Autora (2025)

Quadro 15 - Análise visual superficial da fissura com $e_0 > 300 \mu\text{m}$ para a subclasse C50-B

C50-B				
Abertura da Fissura, $e_0 = 490 \mu\text{m}$				
Idade t_0	Idade t_{56}	Idade t_{84}	Idade t_{180}	Idade t_{365}
Condição inicial	$I_{C56} = 0\%$	$I_{C84} = 0\%$	$I_{C180} = 19,1\%$	$I_{C365} = 93,1\%$
Amostra: B4 - ponto 1				
				
Amostra: B4 - ponto 2				
				
Amostra: B4 - ponto 3				
				

Fonte: Autora (2025)

Portanto, a análise visual superficial das fissuras por microscopia óptica via USB é qualitativa e consiste em um método rápido e fácil que pode ajudar na identificação e monitoramento da formação de produtos de cicatrização. No entanto, é necessário complementá-la com outras técnicas de visualização de microestruturas e ensaios específicos, como o ensaio de percolação de água e, além de métodos para ampliar as fissuras até serem perceptíveis a olho nu. A análise visual é um passo inicial na detecção da cicatrização superficial das fissuras, mas não fornece resultados conclusivos sobre a cicatrização do concreto, pois isso envolve outros aspectos além da superfície.

4.7 Contribuições finais

Esta pesquisa buscou avaliar o potencial de cicatrização de fissuras com aberturas menores que 500 μm em concretos típicos da região de Campo Grande, na presença ou não de adição cristalizantes atualmente disponíveis no mercado da construção civil.

Desta forma, foi possível elaborar um Quadro 17 do APÊNDICE E, que sintetiza a caracterização dos concretos estudados a partir de sua concepção de mistura, suas propriedades físico-mecânico e do desempenho da ocorrência de cicatrização de fissuras, considerando a influência do tempo de cura em água.

A metodologia aplicada possibilitou alcançar resultados que confirmam que o processo de cicatrização em concreto é fortemente influenciado pela largura inicial da fissura e pela constituição da mistura, incluindo as adições cimentantes e também a marca comercial do cristalizante. Embora o uso dessas adições cristalizantes possa contribuir para o fechamento das fissuras, fatores como a espessura inicial exercem um papel determinante, estabelecendo limites práticos para a sua aplicação. Além disso, a própria composição da mistura influenciou na ocorrência de cicatrização.

Os ensaios com as águas de imersão, pouco explorados na literatura, mostraram um comportamento padronizado de aumento de carbonato de cálcio e nos íons cálcio após o contato com as amostras de concreto em todos os traços analisados. Esse resultado evidencia que a cicatrização das fissuras decorre por deposição de carbonato de cálcio.

O estudo também avançou o conhecimento sobre o processo de cicatrização ao apresentar evidência do desempenho relativo das classes de concreto estudadas e suas subclasses. A principal contribuição desta tese foi na combinação de análises, ao correlacionar os ensaios microestruturais (DRX e MEV/EDS) com experimentos práticos de percolação de água, caracterização das águas de imersão, penetração de íons cloreto e acompanhamento visual

por microscopia óptica, constituindo uma abordagem robusta para avaliar e acompanhar o processo de cicatrização de fissuras.

Neste contexto as análises integradas destacaram o papel importante na hidratação contínua das adições cristalizantes na utilização como promotor de cicatrização autógena de fissuras. Esse mecanismo de hidratação a longo prazo garante a precipitação e cristalização progressiva de produtos na região da fissura, favorecendo a manutenção do processo em idades mais avançadas.

O ensaio de penetração de íons cloreto, contribui no entendimento da cicatrização das fissuras, porém após o estudo, o ensaio trouxe uma melhor compreensão sobre a durabilidade de concretos estruturais no que tange a constituição da matriz cimentícia e menor significado como ferramenta no estudo de desempenho de cicatrização de fissura, o que evidencia o ensaio de percolação de água mais eficiente para esta finalidade dentro da metodologia aplicada a este trabalho.

5 CONCLUSÃO

O programa experimental buscou avaliar o potencial de cicatrização de fissuras em concretos produzidos com adições minerais e agregados da região de Campo Grande, com e sem adições cristalizantes comerciais, considerando diferentes espessuras iniciais de fissuras e a influência do tempo de cura em água. Dessa forma, foi possível alcançar os objetivos geral e específicos, com base nos resultados obtidos nos ensaios.

As resistências à compressão das misturas com adições cristalizantes foram superiores às de referência; entretanto, não foi identificada uma tendência clara relacionada à marca comercial da adição cristalizante no incremento da resistência dentro de uma mesma classe.

O processo de fissuração realizado por meio do ensaio de compressão diametral foi capaz de produzir diferentes espessuras iniciais, todas menores que 500 μm , seguindo uma distribuição normal.

Quanto à influência do tempo de cura em água na cicatrização das fissuras, constatou-se que o aumento da abertura inicial retarda o processo, independentemente da presença de adições cristalizantes. A velocidade de cicatrização mostrou-se diretamente relacionada à largura da fissura, ao tempo de cura e à disponibilidade de CO_2 . A análise das águas de imersão confirmou o carbonato de cálcio como principal mecanismo de fechamento.

A composição das misturas também influenciou os índices de cicatrização, denotando comportamentos distintos entre as classes de concreto analisadas. Em ambas as classes, a

espessura inicial exerceu influência significativa nos resultados, porém a adição cristalizante na classe C30 não apresentou efeito relevante aos 28 dias, sugerindo, nesse período, a predominância do processo normal de hidratação do cimento.

De modo geral, fissuras menores que 200 μm tendem a alcançar cicatrização total em até um ano de cura em água. Para fissuras maiores, observou-se apenas redução da abertura, com limitação significativa para aquelas acima de 300 μm . As misturas de referência com sílica ativa (C50) apresentaram, ao longo do período de t_0 a t_{365} , índices médios de cicatrização superiores em comparação às misturas com adições. Entre estas, verificou-se desempenho variável e a adição cristalizante A apresentou resultados médios ligeiramente superiores aos da adição cristalizante B.

As misturas de referência também apresentaram melhor desempenho quanto à penetração de íons cloreto pela superfície externa, em razão da capacidade das adições minerais de refinar a microestrutura e reduzir a conectividade dos poros. Já no ensaio de penetração de íons cloreto ao longo da fissura, a adição cristalizante B apresentou resultados melhores em comparação ao traço C50-R. Denotando que a adição cristalizante atuou tanto no preenchimento na região interna da matriz quanto na cicatrização das fissuras.

As análises microestruturais identificaram fases associadas tanto à hidratação contínua quanto à carbonatação, confirmando a ocorrência de reações responsáveis pela cicatrização, como a formação de Ca(OH)_2 , CaCO_3 e produtos secundários de hidratação. Esses resultados reforçam o selamento de fissuras por recristalização e evidenciam que o processo de cicatrização envolve mecanismos físicos e químicos simultâneos, cuja efetividade depende das características da mistura e da abertura inicial da fissura.

Por fim, a análise visual superficial das fissuras por microscopia óptica demonstrou ser um método rápido e prático para detecção da cicatrização superficial das fissuras em monitorar formação de produtos de cicatrização, mas não fornece resultados conclusivos sobre a cicatrização do concreto.

Portanto, a pesquisa evidencia que a eficácia da cicatrização não se limita ao uso de adições cristalizantes, mas também está associada a fatores intrínsecos do material e às condições de fissuração e cura. Assim, o estudo contribui para consolidar o entendimento de que fissuras superiores a 300 μm representam uma limitação significativa para o fechamento completo, independentemente da classe de concreto ou da presença de adições cristalizantes.

5.1 Limitações do trabalho

A ocorrência de cicatrização de fissuras foi avaliada em concreto representativo para uso em elementos estruturais produzidos por centrais dosadoras de Campo Grande, sendo consideradas duas classes: C30, produzida com escória de alto-forno e C50, com sílica ativa. Não foram consideradas dosagens sem adições minerais cimentantes, o que se limitou a análise comparativa quanto o efeito isolado desses materiais. Os resultados mostraram que o desempenho de cicatrização pode variar de acordo com as combinações entre os materiais. As dosagens de referência, em alguns parâmetros, apresentaram resultados superiores às misturas com adições cristalizantes. Dessa forma, embora os resultados indiquem que tanto as adições minerais quanto as cristalizantes influenciam no fenômeno, seus efeitos específicos podem se sobrepor dependendo da composição da mistura.

A pesquisa adotou a cura contínua em água, na qual as amostras permaneceram submersas em recipientes com água e armazenadas em uma sala com umidade relativa de 95% e temperatura em torno de 25 °C por 365 dias, o que pode ter restringido o fornecimento de CO₂ necessário para a formação de carbonato de cálcio, possivelmente influenciando a eficiência do processo de fechamento das fissuras mais lento ou incompleto.

Por fim, as análises microestruturais foram analisadas qualitativamente em todas subclasses de concreto estudadas, a utilização de análises microestruturais quantitativa pode colaborar no levantamento da natureza dos produtos de cicatrização.

5.2 Sugestões de trabalhos futuros

Sugere-se para os trabalhos futuros avaliar a ocorrência de cicatrização de fissuras em concretos sem adições minerais e variar as combinações de materiais, de modo a separar e quantificar os efeitos específicos de cada adição no fechamento das fissuras e na durabilidade do concreto.

Complementando ainda, seria interessante para avaliar o comportamento das adições minerais e cristalizantes com os agregados locais na estimulação da cicatrização autógena, considerando a influência das condições ambientais, como: a cura combinada em ciclos, ora as amostras submersas em água e, ora as amostras expostas ao ar livre.

Por fim, incluir nas análises microestruturais o uso do DRX quantitativo pelo método de Rietveld, pois possibilitaria quantificar as fases minerais, permitindo relacionar a composição do concreto com a eficiência da cicatrização das fissuras.

6 REFERÊNCIAS

- AIT OUARABI, Mohand *et al.* Ultrasonic Monitoring of the Interaction between Cement Matrix and Alkaline Silicate Solution in Self-Healing Systems. **Materials**, v. 10, n. 1, p. 46, jan. 2017.
- AL-TABBAA, Abir *et al.* First UK field application and performance of microcapsule-based self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 208, p. 669–685, maio 2019.
- ALVES, Paula. **Análise físico-química da água de amassamento utilizadas em empresas de pré-moldados da cidade de Campina Grande/PB**. Dissertação—Campina Grande: Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba, 2023.
- AMARAL, Marcella; MACIOSKI, Gustavo; MEDEIROS, Marcelo Henrique Farias De. Atividade pozolânica da sílica ativa: análise em pastas cimentícias com diferentes teores de substituição. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, n. 3, p. e13023, 2021.
- 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 2022**, 77ª Semana oficial da engenharia e da agronomia. v. 77, p. 18, 2022.
- ARAÚJO, Maria *et al.* Cross-linkable polyethers as healing/sealing agents for self-healing of cementitious materials. **Materials & Design**, v. 98, p. 215–222, maio 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NBR 6118: **Projeto de estruturas de concreto**. , 2023.
- AYUB, Tehmina; SHAFIQ, Nasir; KHAN, Sadaqat. Durability of concrete with different mineral admixtures: A comparative review. **World Academy of Science, Engineering and Technology International Journal of Civil Science and Engineering**, v. 7, p. 1161–1172, 1 jan. 2013.
- AZARSA, Pejman; GUPTA, Rishi; BIPARVA, Alireza. Assessment of self-healing and durability parameters of concretes incorporating crystalline admixtures and Portland Limestone Cement. **Cement and Concrete Composites**, v. 99, p. 17–31, maio 2019.
- BEGLARIGALE, Ahsanollah *et al.* Sodium silicate/polyurethane microcapsules used for self-healing in cementitious materials: Monomer optimization, characterization, and fracture behavior. **Construction and Building Materials**, v. 162, p. 57–64, fev. 2018.
- BIANCHIN, Felipe. **Avaliação da autocatrização em concretos produzidos com aditivos cristalizantes e fissurados nas primeiras idades**. Trabalho de conclusão de curso—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2018.
- BIERNACKI, Joseph J. *et al.* Cements in the 21st century: Challenges, perspectives, and opportunities. **Journal of the American Ceramic Society**, v. 100, n. 7, p. 2746–2773, jul. 2017.

BOHUS, Stepan; DROCHYTKA, Rostislav. Cement Based Material with Crystal-Growth Ability under Long Term Aggressive Medium Impact. **Applied Mechanics and Materials**, v. 166–169, p. 1773–1778, 2012.

BUNDUR, Zeynep Başaran *et al.* Impact of air entraining admixtures on biogenic calcium carbonate precipitation and bacterial viability. **Cement and Concrete Research**, v. 98, p. 44–49, 1 ago. 2017.

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

CUENCA, Estefania; SERNA, Pedro. Autogenous Self-Healing Capacity of Early-Age Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete. **Sustainability**, v. 13, n. 6, p. 3061, jan. 2021.

CUENCA, Estefanía; TEJEDOR, Antonio; FERRARA, Liberato. A methodology to assess crack-sealing effectiveness of crystalline admixtures under repeated cracking-healing cycles. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 619–632, ago. 2018.

DAL MOLIN, Denise. **Fissuras em estruturas de concreto armado : análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no Estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988a.

DAL MOLIN, Denise. **Análise das manifestações típicas e levantamento de casos ocorridos no estado do Rio Grande do Sul**. Dissertação—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1988b.

DAL MOLIN, Denise. **Concreto: Ciência e tecnologia**. 3ª ed. [S.l.]: IBRACON, 2022. v. Vol2

DANISH, Aamar; MOSABERPANAHI, Mohammad Ali; USAMA SALIM, Muhammad. Past and present techniques of self-healing in cementitious materials: A critical review on efficiency of implemented treatments. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 9, n. 3, p. 6883–6899, maio 2020.

DE BELIE, Nele *et al.* Influence of the cement type on the resistance of concrete to feed acids. **Cement and Concrete Research**, v. 26, n. 11, p. 1717–1725, 1 nov. 1996.

DE BELIE, Nele *et al.* A Review of Self-Healing Concrete for Damage Management of Structures. **Advanced Materials Interfaces**, v. 5, n. 17, p. 1800074, set. 2018.

DE ROOIJ, M. R.; SCHLANGEN, E.; JOSEPH, C. Introduction. In: ROOIJ, Mario *et al.* (Eds.). **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. RILEM State Art Reports. [S.l.]: Springer, Dordrecht, 2013. v. 11.

DHIR, Ravindra; SANGHA, Chander; MUNDAY, John. Strength and Deformation Properties of Autogenously Healed Mortars. In: 1973. Disponível em: <<http://www.concrete.org/Publications/ACIMaterialsJournal/ACIJJournalSearch.aspx?m=details&ID=11202>>. Acesso em: 5 set. 2023

DINIZ, José; FERNANDES, Juliana; KUPERMAN, Selmo. **Concreto: Ciência e tecnologia**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1

DOOSTKAMI, Hesam *et al.* Self-healing of concrete containing commercial bacteria by means of water and chlorides permeability. **MATEC Web of Conferences**, v. 361, p. 05010, 2022a.

DOOSTKAMI, Hesam *et al.* Self-healing capability of conventional and high-performance concrete containing sap by means of water permeability. *In*: FIB INTERNACIONAL CONGRESS 2022 OSLO. **Anais...** Oslo, Norway: 13 jun. 2022b.

DOOSTKAMI, Hesam *et al.* Self-healing capability of conventional, high-performance, and Ultra High-Performance Concrete with commercial bacteria characterized by means of water and chloride penetration. **Construction and Building Materials**, v. 401, p. 132903, out. 2023.

DOOSTKAMI, Hesam *et al.* Effects of healing start time and duration on conventional and high-performance concretes incorporating SAP, crystalline admixture, and sepiolite: A comparative study. **Case Studies in Construction Materials**, v. 20, p. e02835, 1 jul. 2024.

DRY, C. M. Three designs for the internal release of sealants, adhesives, and waterproofing chemicals into concrete to reduce permeability. **Cement and Concrete Research**, Papers presented at the Symposium on “Transport Properties and Microstructure of Cement-Based Systems”. v. 30, n. 12, p. 1969–1977, 1 dez. 2000.

EDVARDESEN, Carola. Water Permeability and Autogenous Healing of Cracks in Concrete. **Materials Journal**, v. 96, n. 4, p. 448–454, 1 jul. 1999.

EQUIPE DE FURNAS, Laboratório de Concreto. **Concretos: massa , estrutural, projetado e compactado com rolo**. São Paulo: Pini, 1997.

ESCOFFRES, P.; DESMETTRE, C.; CHARRON, J. P. Effect of a crystalline admixture on the self-healing capability of high-performance fiber reinforced concretes in service conditions. **Construction and Building Materials**, v. 173, p. 763–774, 10 jun. 2018.

FERRARA, Liberato *et al.* Experimental characterization of the self-healing capacity of cement based materials and its effects on the material performance: A state of the art report by COST Action SARCOS WG2. **Construction and Building Materials**, v. 167, p. 115–142, 10 abr. 2018.

FERRARA, Liberato; KRELANI, Visar; CARSANA, Maddalena. A “fracture testing” based approach to assess crack healing of concrete with and without crystalline admixtures. **Construction and Building Materials**, v. 68, p. 535–551, out. 2014.

FILHO, Luiz Carlos; HELENE, Paulo; BONI, Ricardo. **Concreto: Ciência e tecnologia**. 3ª ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 2

GARCÍA-VERA, Victoria Eugenia *et al.* Influence of Crystalline Admixtures on the Short-Term Behaviour of Mortars Exposed to Sulphuric Acid. **Materials**, v. 12, n. 1, p. 82, 27 dez. 2018.

GARDNER, Diane *et al.* A survey on problems encountered in current concrete construction and the potential benefits of self-healing cementitious materials. **Case Studies in Construction Materials**, v. 8, p. 238–247, jun. 2018.

GILABERT, F. A. *et al.* Integral procedure to assess crack filling and mechanical contribution of polymer-based healing agent in encapsulation-based self-healing concrete. **Cement and Concrete Composites**, v. 77, p. 68–80, 1 mar. 2017.

GJORV, Odd E. Durability fo Concrete containing condensed silica fume. **Special Publication**, v. 79, p. 695–708, 1 maio 1983.

GOLLAPUDI, U. K. *et al.* A new method for controlling leaching through permeable channels. **Chemosphere**, v. 30, n. 4, p. 695–705, 1 fev. 1995.

GOMES, Augusto; PINTO, Ana Paula Ferreira; PINTO, João Bessa. Cimento Portland e Adições. 2013.

HAN, Ning-Xu; XING, Feng. A Comprehensive Review of the Study and Development of Microcapsule Based Self-Resilience Systems for Concrete Structures at Shenzhen University. **Materials**, v. 10, n. 1, p. 2, jan. 2017.

HE, Ziming *et al.* Cement-based materials modified with superabsorbent polymers: A review. **Construction and Building Materials**, v. 225, p. 569–590, 20 nov. 2019.

HEARN, Nataliya. Self-sealing, autogenous healing and continued hydration: What is the difference? **Materials and Structures**, v. 31, n. 8, p. 563–567, out. 1998.

HELENE, Paulo. **Contribuição ao estudo da corrosão em armaduras de concreto armado**. Tese—São Paulo: Universidade de São Paulo, 1993.

HELENE, Paulo; ANDRADE, Tibério. Concreto de Cimento Portland. *In*: ISAÍIA, Geraldo (Org.). **Materiais de construção civil e princípios de ciência e engenharia dos materiais**. 3^a ed. São Paulo: IBRACON, 2010. v. 1 p. 1760.

HOMMA, Daisuke; MIHASHI, Hirozo; NISHIWAKI, Tomoya. Self-Healing Capability of Fibre Reinforced Cementitious Composites. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 7, n. 2, p. 217–228, 2009.

HOU, Sailong *et al.* Quantitative evaluation on self-healing capacity of cracked concrete by water permeability test – A review. **Cement and Concrete Composites**, v. 127, p. 104404, 1 mar. 2022.

HU, Zun-Xiang *et al.* Performance optimization of one-component polyurethane healing agent for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 179, p. 151–159, 10 ago. 2018.

HUANG, Haoliang *et al.* Self-healing in cementitious materials: Materials, methods and service conditions. **Materials & Design**, v. 92, p. 499–511, fev. 2016.

HUANG, Haoliang; YE, Guang; DAMIDOT, Denis. Effect of blast furnace slag on self-healing of microcracks in cementitious materials. **Cement and Concrete Research**, v. 60, p. 68–82, 1 jun. 2014.

IKOMA, Hayato *et al.* Elucidation of rapid reduction of water flow through concrete crack regarded as self-healing phenomenon. **Journal of Ceramic Processing Research**, v. 16, n. Special 1, p. 7, 2015.

JAROENRATANAPIROM, Dechkhachorn; SAHAMITMONGKOL, Raktipong. Self-crack closing ability of mortar with different additives. **Journal of Metals, Materials and Minerals**, v. 21, n. 1, 30 jun. 2011.

JIANG, Zhengwu; LI, Wenting; YUAN, Zhengcheng. Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials. **Cement and Concrete Composites**, v. 57, p. 116–127, mar. 2015.

JONKERS, Henk M. *et al.* Application of bacteria as self-healing agent for the development of sustainable concrete. **Ecological Engineering**, Special Issue: BioGeoCivil Engineering. v. 36, n. 2, p. 230–235, 1 fev. 2010.

KANELLOPOULOS, A. *et al.* Polymeric microcapsules with switchable mechanical properties for self-healing concrete: synthesis, characterisation and proof of concept. **Smart Materials and Structures**, v. 26, n. 4, p. 045025, mar. 2017.

KOGA, D. S.; SANTOS, L. M. **Bioconcreto - Autocicatrização do concreto pelo processo de biomineralização realizado por bactérias**. Trabalho de conclusão de curso—Goiânia: Pontifica Universidade Católica de Goiás, 2020.

KRELANI, Visar; FERRARA, Liberato. **Self-Healing Capacity of Concrete with Crystalline Additives: Natural vs. Accelerated Exposure Conditions**. [S.l.: S.n.].

LAUER, K. R.; SLATE, F. O. Autogenous healing of cement paste. **Materiales de Construcción**, v. 7, n. 080, p. 51–51, 30 jun. 1957.

LEE, H. X. D.; WONG, H. S.; BUENFELD, N. R. Self-sealing of cracks in concrete using superabsorbent polymers. **Cement and Concrete Research**, v. 79, p. 194–208, 1 jan. 2016.

LEE, Y. E. Ferroalloys: Production and use in Steelmaking. In: BUSCHOW, K. H. Jürgen *et al.* (Eds.). **Encyclopedia of Materials: Science and Technology**. [S.l.]: Elsevier, 2001. p. 3039–3044.

LI, Leo G.; KWAN, Albert K. H. Effects of superplasticizer type on packing density, water film thickness and flowability of cementitious paste. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 113–119, jul. 2015.

LI, Victor C. *et al.* Recovery against Mechanical Actions. In: ROOIJ, Mario *et al.* (Eds.). **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. RILEM State Art Reports. [S.l.]: Springer, Dordrecht, 2013. v. 11.

LI, Victor C.; HERBERT, Emily. Robust Self-Healing Concrete for Sustainable Infrastructure. **Journal of Advanced Concrete Technology**, v. 10, n. 6, p. 207–218, 28 jun. 2012.

LI, Xinxin; LI, Dianqing; XU, Yi. Modeling the effects of microcracks on water permeability of concrete using 3D discrete crack network. **Composite Structures**, v. 210, p. 262–273, 15 fev. 2019.

LIAO, Kuo-Yu *et al.* A study on characteristics of interfacial transition zone in concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 34, n. 6, p. 977–989, jun. 2004.

LORS, C. *et al.* Microbiologically induced calcium carbonate precipitation to repair microcracks remaining after autogenous healing of mortars. **Construction and Building Materials**, v. 141, p. 461–469, 15 jun. 2017.

MACHADO, Fábio Braz *et al.* Geologia e litogeoquímica da formação Serra Geral nos estados de Mato Grosso e Mato Grosso do Sul. **Revista Geociência**, v. 28, n. 4, p. 523–540, 2009.

MAES, Mathias; SNOECK, Didier; DE BELIE, Nele. Chloride penetration in cracked mortar and the influence of autogenous crack healing. **Construction and Building Materials**, v. 115, p. 114–124, jul. 2016.

MALHOTRA, V. M.; CARINO, Nicholas J. Métodos Radioativos/Nucleares. *In: Manual sobre ensaios não destrutivos de concreto*. 2nd. ed. [S.l.]: CRC Press, 2003. p. 22.

MANZANO, Manuel Alejandro Rojas *et al.* Mecanismo de atuação dos Polímeros Superabsorventes como agentes de cura interna para mitigar a retração autógena em Concretos de Alta Resistência (CAR) – Estado da Arte. **Matéria (Rio de Janeiro)**, v. 26, p. e12956, 24 maio 2021.

MECHTCHERINE, Viktor; SECRIERU, Egor; SCHRÖFL, Christof. Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars — Development of yield stress and plastic viscosity over time. **Cement and Concrete Research**, v. 67, p. 52–65, 1 jan. 2015.

MEDEIROS, Ivan Luiz De *et al.* Revisão Sistemática e Bibliometria facilitadas por um Canvas para visualização de informação. **InfoDesign - Revista Brasileira de Design da Informação**, v. 12, n. 1, p. 93–110, 24 ago. 2015.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. **Concreto: microestrutura, propriedades e materiais**. 2^a ed. [S.l.]: IBRACON, 2014.

MERAZ, Md Montaseer *et al.* Self-healing concrete: Fabrication, advancement, and effectiveness for long-term integrity of concrete infrastructures. **Alexandria Engineering Journal**, v. 73, p. 665–694, 15 jul. 2023.

MIGNON, Arn *et al.* Superabsorbent polymers: A review on the characteristics and applications of synthetic, polysaccharide-based, semi-synthetic and ‘smart’ derivatives. **European Polymer Journal**, v. 117, p. 165–178, ago. 2019.

MORAES, Hugo Ricardo. **Microscopia petrográfica: Aplicação da Técnica para investigação da porosidade do concreto**. Trabalho de conclusão de curso—Alagoas: Universidade Federal de Alagoas, 2021.

MORANDE, Andressa de Sá *et al.* Avaliação de uma mistura de solo argiloso e arenoso do interior do mato grosso do sul destinado à fabricação de tijolos solo-cimento. v. 16, 2024.

MOREIRA, M. *et al.* Uso de aditivo redutor de permeabilidade em lajes de subpressão. Caso habitar-DF. *In: Belém: CBPAT*, 2016.

NA, Seung Hyun *et al.* Experimental Investigation on Reaction Rate and Self-healing Ability in Fly Ash Blended Cement Mixtures. v. 10, 2012.

NASIM, Mohd; DEWANGAN, U. K.; DEO, Shirish V. Autonomous healing in concrete by crystalline admixture: A review. **Materials Today: Proceedings**, v. 32, p. 638–644, 2020a.

NASIM, Mohd; DEWANGAN, U. K.; DEO, Shirish V. Effect of crystalline admixture, fly ash, and PVA fiber on self-healing capacity of concrete. **Materials Today: Proceedings**, 3rd International Conference on Innovative Technologies for Clean and Sustainable Development. v. 32, p. 844–849, 1 jan. 2020b.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 5^a ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

NGAB, Ali S.; NILSON, Arthur H.; SLATE, Floyd O. Shrinkage and Creep of High Strength Concrete. **ACI Journal Proceedings**, v. 78, n. 4, 7 jan. 1981.

NONAT, A. A hidratação do cimento. *In*: OLLIVIER, Jean-Pierre; VICHOT, Angélique (Eds.). **Durabilidade do concreto: bases científicas para a formulação de concretos duráveis de acordo com o ambiente**. Tradução: Oswaldo Cascudo; Tradução: Helena Carasek. 1. ed. São Paulo: IBRACON, 2014. v. 1 p. 15.

OLIVEIRA, Aline de Souza. **Estudo do potencial de aditivo cristalizante como estimulador de autocicatrização de fissuras de matrizes cimentícias**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Rio de Janeiro: Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2019.

OLIVEIRA, Aline de Souza *et al.* Microstructural characterization of self-healing products in cementitious systems containing crystalline admixture in the short- and long-term. **Cement and Concrete Composites**, v. 126, p. 104369, 1 fev. 2022.

PACHECO, Fernanda. **Análise da eficácia dos mecanismos de autocicatrização do concreto**. Tese—São Leopoldo: Universidade do Vale dos Rios dos Sinos, 26 ago. 2020.

PACHECO, Fernanda *et al.* Concretos autorregenerantes e autocicatrizantes. *In*: TUTIKIAN, Bernardo *et al.* (Eds.). **Concreto: Ciência e Tecnologia**. 1^a ed. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 2 p. 1134.

PAGÉ, Monique; SPIRATOS, Nelu. The Role of Superplasticizers in The Development of Environmentally-Friendly Concrete. Two-Day CANMET/ACI International Symposium on Concrete Technology for Sustainable Development. p. 15, 2000.

PALIN, D.; WIKTOR, V.; JONKERS, H. M. A bacteria-based bead for possible self-healing marine concrete applications. **Smart Materials and Structures**, v. 25, n. 8, p. 084008, 1 ago. 2016.

PANG, Bo *et al.* Autogenous and engineered healing mechanisms of carbonated steel slag aggregate in concrete. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 191–202, 15 mar. 2016.

PARK, Byoungsun; CHOI, Young Cheol. Self-healing capability of cementitious materials with crystalline admixtures and super absorbent polymers (SAPs). **Construction and Building Materials**, v. 189, p. 1054–1066, nov. 2018.

PAULON, Vladimir; NETO, José; KIRCHHEIM, Ana Paula. Nano estrutura e microestrutura do concreto endurecido. *In: Concreto: Ciência e Tecnologia*. São Paulo: IBRACON, 2022. v. 1.

PAWAR, Suyog S.; PAREKAR, S. R. Bacteria based Self-Healing Concrete: Review. v. 05, n. 03, p. 4, 2018.

PETRY, Natália. **Influência dos ambientes de exposição no fenômeno da autocicatrização de fissuras com idades variadas em concretos de cimento Portland com diferentes resistências**. Tese—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2021.

POLETTTO, Fernanda. **Análise da fluência em vigas de concreto armado simplesmente apoiadas usando método dos elementos finitos**. Dissertação—Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

PONTES, Jorge Miguel Pires do Nascimento. **Reactividade de pozolanas para argamassas e betões**. Dissertação (Mestre em engenharia civil)—Lisboa: Faculdade de Ciências e Tecnologia de Lisboa, 2011.

QIAN, S. Z.; ZHOU, J.; SCHLANGEN, E. Influence of curing condition and precracking time on the self-healing behavior of Engineered Cementitious Composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 32, n. 9, p. 686–693, 1 out. 2010.

QURESHI, Tanvir; KANELLOPOULOS, Antonios; AL-TABBAA, Abir. Autogenous self-healing of cement with expansive minerals-I: Impact in early age crack healing. **Construction and Building Materials**, v. 192, p. 768–784, 20 dez. 2018.

RAGHAV, Muralidharan *et al.* Review of the Effects of Supplementary Cementitious Materials and Chemical Additives on the Physical, Mechanical and Durability Properties of Hydraulic Concrete. **Materials**, v. 14, n. 23, p. 7270, 28 nov. 2021.

RAMACHANDRAN, V. S. *et al.* **Handbook of Thermal Analysis of Construction Materials**. [S.l.]: Noyes Publications, 2002.

REINHARDT, Hans-Wolf; JOOSS, Martin. Permeability and self-healing of cracked concrete as a function of temperature and crack width. **Cement and Concrete Research**, v. 33, n. 7, p. 981–985, 1 jul. 2003.

Report on chemical admixtures for concrete (ACI 212.3R-10). Farmington Hills: [S.n.].

RILEM. **Self-Healing Phenomena in Cement-Based Materials**. [S.l.]: Springer, Dordrecht, 2013. v. 11

ROIG-FLORES, M. *et al.* Self-healing capability of concrete with crystalline admixtures in different environments. **Construction and Building Materials**, v. 86, p. 1–11, 1 jul. 2015.

ROIG-FLORES, M. *et al.* Effect of crystalline admixtures on the self-healing capability of early-age concrete studied by means of permeability and crack closing tests. **Construction and Building Materials**, v. 114, p. 447–457, jul. 2016.

ROIG-FLORES, M. **Self-healing concrete: efficiency evaluation and enhancement with crystalline admixtures**. Valencia (Spain): Universitat Politècnica de València, 22 fev. 2018.

ROIG-FLORES, M.; FORMAGINI, S.; SERNA, P. Self-healing concrete-What Is it Good For? **Materiales de Construcción**, v. 71, n. 341, p. e237, 9 mar. 2021.

ROIG-FLORES, Marta; SERNA, Pedro. Concrete Early-Age Crack Closing by Autogenous Healing. **Sustainability**, v. 12, n. 11, p. 4476, 1 jun. 2020.

RONDON, Odilar da Costa. **Atividade posolânica de blocos cerâmicos produzidos em laboratório**. Tese (Doutorado em Engenharia Civil)—Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 2007.

SAMPAIO, João Alves; ALMEIDA, Salvador Luiz Matos. Calcário e Dolomita. *In*: LUZ, Adão Benvindo; FREITAS, Fernando Antônio (Eds.). **Rochas & Minerais Industriais**. CETEM/2005 ed. Rio de Janeiro: Adão Benvindo da Luz, 2005. p. 727.

SANGADJI, Senot. Can Self-healing Mechanism Helps Concrete Structures Sustainable? **Procedia Engineering**, v. 171, p. 238–249, 2017.

SANTOS, Stephany; FORMAGINI, Sidiclei. Concretos com propriedades cicatrizantes: panorama brasileiro. *In*: : 64°. CONGRESSO BRASILEIRO DO CONCRETO 2023. **64º Congresso Brasileiro do Concreto**. Florianópolis: IBRACON, 2023. Disponível em: <CBC2023-64CBC2023>

SCHLANGEN, E.; TER HEIDE, N.; BREUGEL, K. van. **Measuring, monitoring and modeling concrete properties: an international symposium dedicated to Professor Surendra P. Shah, Northwestern University, U.S.A.** Dordrecht: Springer, 2006.

SCHLANGEN, Erik; TER HEIDE, N.; BREUGEL, Klaas. Crack healing of early age cracks in concrete. *In*: **Proceedings of the First International Conference on Self Healing Materials**. The Netherlands: Springer, Dordrecht, 2007. p. 273–284.

SELVARAJOO, T. *et al.* Mechanical response of a vascular self-healing cementitious material system under varying loading conditions. **Construction and Building Materials**, v. 254, p. 119245, set. 2020.

SHETTY, M. S.; JAIN, A. K. **Concrete Technology (Theory and Practice)**. 8. ed. Indian: S. Chand Publishing, 2013.

SHI, Caijun; QIAN, Jueshi. High performance cementing materials from industrial slags — a review. **Resources, Conservation and Recycling**, v. 29, n. 3, p. 195–207, 1 jun. 2000.

SIDDIQUE, Rafat; KHAN, Mohammad Iqbal. **Supplementary Cementing Materials**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

SIDIQ, Amir *et al.* Microstructural analysis of healing efficiency in highly durable concrete. **Construction and Building Materials**, v. 215, p. 969–983, ago. 2019.

SIL, Amirava; ROY, Dilip. Performance of high volume fly ash concrete using local power plant fly ash. **International Journal of Composite and Constituent Materials**, International Journal of Composite and Constituent Materials. v. 1, p. 7–13, 2015.

SINGH, Harshbab; GUPTA, Rishi. Influence of cellulose fiber addition on self-healing and water permeability of concrete. **Case Studies in Construction Materials**, v. 12, p. e00324, 1 jun. 2020.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Self-healing of surface cracks in mortars with expansive additive and crystalline additive. **Cement and Concrete Composites**, v. 34, n. 4, p. 566–574, abr. 2012.

SISOMPHON, K.; COPUROGLU, O.; KOENDERS, E. A. B. Effect of exposure conditions on self healing behavior of strain hardening cementitious composites incorporating various cementitious materials. **Construction and Building Materials**, v. 42, p. 217–224, 1 maio 2013.

SLATE, F. O.; HOVER, K. C. Microcracking in concrete. *In*: CARPINTERI, A.; INGRAFFEA, A. R. (Eds.). **Fracture mechanics of concrete: Material characterization and testing**. Boston: MARTINUS NIJHOFF PUBLISHERS, 1984. p. 210.

SNOECK, D.; DE BELIE, N. Repeated Autogenous Healing in Strain-Hardening Cementitious Composites by Using Superabsorbent Polymers. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 28, n. 1, p. 04015086, jan. 2016.

SULEIMAN, A. R.; NEHDI, M. L. Effect of environmental exposure on autogenous self-healing of cracked cement-based materials. **Cement and Concrete Research**, v. 111, p. 197–208, set. 2018.

SUN, Beibei *et al.* Design methodology and mechanical properties of Superabsorbent Polymer (SAP) cement-based materials. **Construction and Building Materials**, v. 204, p. 440–449, abr. 2019.

TAKAGI, Emilio M. **Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto-forno ativados por catalizador cristalino**. Dissertação—São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2013.

TAKAGI, Emilio M. *et al.* Concretos autocicatrizantes com cimentos brasileiros de escória de alto forno ativados por catalisador cristalino. n. 5º, p. 39–45, abr. 2018.

TANG, Waiching; KARDANI, Omid; CUI, Hongzhi. Robust evaluation of self-healing efficiency in cementitious materials – A review. **Construction and Building Materials**, v. 81, p. 233–247, 15 abr. 2015.

TAVARES, Ludmila Rodrigues Costa. **AVALIAÇÃO DA RETRAÇÃO AUTÓGENA EM CONCRETOS DE ALTO DESEMPENHO COM DIFERENTES ADIÇÕES**. Dissertação—Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

TAYLOR, H. F. W. **Cement chemistry**. 2nd ed ed. London: T. Telford, 1997.

THOMAZ, Ercio. **Trincas em edifícios: causas, prevenção e recuperação**. 2º ed. São Paulo: Oficina de textos, 2020.

TOLEDO FILHO, Romildo D. *et al.* Free, restrained and drying shrinkage of cement mortar composites reinforced with vegetable fibres. **Cement and Concrete Composites**, Natural fibre reinforced cement composites. v. 27, n. 5, p. 537–546, 1 maio 2005.

VALVERDES, Leila Cristina. **Manifestações patológicas em estruturas de concreto: fissuras**. São Paulo, 2023.

VAN TITTELBOOM, Kim *et al.* Influence of mix composition on the extent of autogenous crack healing by continued hydration or calcium carbonate formation. **Construction and Building Materials**, Non Destructive Techniques for Assessment of Concrete. v. 37, p. 349–359, 1 dez. 2012.

VAN TITTELBOOM, Kim *et al.* Comparison of different approaches for self-healing concrete in a large-scale lab test. **Construction and Building Materials**, v. 107, p. 125–137, mar. 2016.

VAN TITTELBOOM, Van; DE BELIE, Nele. Self-Healing in Cementitious Materials—A Review. **Materials**, v. 6, n. 6, p. 2182–2217, 27 maio 2013.

VIJAY, Kunamineni; MURMU, Meena; DEO, Shirish V. Bacteria based self healing concrete – A review. **Construction and Building Materials**, v. 152, p. 1008–1014, out. 2017.

VON GREVE-DIERFELD, Stefanie *et al.* Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. **Materials and Structures**, v. 53, n. 6, p. 136, 22 out. 2020.

WANG, Chen; WANG, Yuanxi; MENG, Zhiliang. Resistance to Chloride Ion Permeability of Concrete Mixed with Fly Ash, Slag Powder, and Silica Fume. **Annales de Chimie - Science des Matériaux**, v. 44, n. 1, p. 67–72, 15 mar. 2020.

WANG, Jianyun *et al.* Use of silica gel or polyurethane immobilized bacteria for self-healing concrete. **Construction and Building Materials**, v. 26, n. 1, p. 532–540, 1 jan. 2012.

WANG, Kejin *et al.* Permeability study of cracked concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 27, n. 3, p. 381–393, mar. 1997.

WANG, Ling *et al.* Prediction of concrete strength considering thermal damage using a modified strength-maturity model. **Construction and Building Materials**, v. 400, p. 132779, out. 2023.

WANG, X. F. *et al.* Evaluation of the mechanical performance recovery of self-healing cementitious materials – its methods and future development: A review. **Construction and Building Materials**, v. 212, p. 400–421, jul. 2019.

WANG, Xianfeng *et al.* A self-healing cementitious composite with mineral admixtures and built-in carbonate. **Cement and Concrete Composites**, v. 92, p. 216–229, 1 set. 2018.

WATANUKI FILHO, Adhemar. **FACULDADE DE ENGENHARIA CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**. Tese—Ilha Solteira: Universidade Estadual Paulista, 2021.

WU, Min; JOHANNESSON, Björn; GEIKER, Mette. A review: Self-healing in cementitious materials and engineered cementitious composite as a self-healing material. **Construction and Building Materials**, v. 28, n. 1, p. 571–583, mar. 2012.

XU, Jing; WU, Yao; JIANG, Zhengwu. Journal of materials in civil engineering. **Non-Ureolytic Bacterial Carbonate Precipitation as a Surface Treatment Strategy on Cementitious Materials**, p. 983–981, 2014.

YANG, Yingzi *et al.* Autogenous healing of engineered cementitious composites under wet–dry cycles. **Cement and Concrete Research**, v. 39, n. 5, p. 382–390, maio 2009.

YILDIRIM, Gürkan *et al.* Self-healing performance of aged cementitious composites. **Cement and Concrete Composites**, v. 87, p. 172–186, mar. 2018.

ZAYED, Abla *et al.* **Effects of chemical and mineral admixtures on performance of Florida structural concrete.** [S.l.: S.n.]. Disponível em: <<https://rosap.nrl.bts.gov/view/dot/30987>>. Acesso em: 19 set. 2023.

ZIEGLER, Fabiana. **Avaliação da autocicatrização de fissuras em concretos com aditivos cristalizantes.** Dissertação—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2020.

ZIEGLER, Fabiana *et al.* Evaluation of Internal and Superficial Self-Healing of Cracks in Concrete with Crystalline Admixtures. **Materials**, v. 13, n. 21, p. 4947, jan. 2020.

ZIMMERMAN, Robert W.; BODVARSSON, Gudmundur S. Hydraulic conductivity of rock fractures. **Transport in Porous Media**, v. 23, n. 1, p. 1–30, 1 abr. 1996.

APÊNDICE A – FICHAS DO BANCO DE DADOS *INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA* (ICDD): NUMERAÇÃO, DENOMINAÇÃO QUÍMICA, FÓRMULA E SÍMBOLO

No Quadro 16 estão os dados das fichas do banco de dados ICDD utilizadas na identificação dos picos obtidos no ensaio de DRX.

Quadro 16 - Informações das fichas do ICDD

Nome do composto	Nome Mineral	Nº ICDD	Fórmula química	Legenda
Carbonato de cálcio	Calcita	00-005-0586	CaCO ₃	c
Carbonato de cálcio e magnésio	Dolomita	00-036-0426	CaMg(CO ₃) ₂	d
Carbonato de cálcio e silicato hidratado	Scawtita	00-031-0261	Ca ₇ (Si ₆ O ₁₈)(CO ₃) · 2H ₂ O	t
Carbonato de cálcio, ferro e magnésio	Ankerite	00-041-0586	Ca(Fe ₂ , Mg)(CO ₃) ₂	A
Carboneto de silício	-	00-022-1273	SiC	SiC
Hidrato de sulfato de cálcio e alumínio	Etringita	00-041-1451	Ca ₆ Al ₂ (SO ₄) ₃ (OH) ₁₂ · 26H ₂ O	e
Hidróxido de cálcio	Portlandita	00-044-1481	Ca(OH) ₂	p
Óxido de cálcio e alumínio	-	00-052-1722	Ca ₂ Al ₂ O ₅	&
Óxido de Cálcio, Alumínio e Ferro (C ₄ AF)	-	00-030-0226	Ca ₂ (Al, Fe ³⁺) ₂ O ₅	b
Óxido de silício	Quartzo	00-033-1161	SiO ₂	Q
Óxido de silício	Quartzo	00-046-1045	SiO ₂	Q
Silicato de cálcio (C ₃ S)	-	00-042-0551	Ca ₃ SiO ₅	s
Silicato de cálcio (C ₃ S)	-	00-049-0442	Ca ₃ SiO ₅	s
Silicato de cálcio (C ₃ S)	-	00-017-0445	Ca ₃ SiO ₅	s
Silicato de Cálcio (C ₂ S)	-	00-033-0302	Ca ₃ SiO ₅	*
Silicato de Cálcio e Alumínio	Grossular	00-039-0368	Ca ₃ Al ₂ (SiO ₄) ₃	g
Silicato de Cálcio e Alumínio	-	00-052-1344	Al _{1.77} Ca _{0.88} O ₈ Si _{2.23}	%
Óxido de Cálcio, Alumínio e Ferro	-	00-042-1469	Ca ₂ Al _{1.38} Fe _{0.62} O ₅	#
Silicato de cálcio e alumínio (S)	-	00-052-1344	Al _{1.77} Ca _{0.88} O ₈ Si _{2.23}	%
Silicato de cálcio e alumínio hidratado	Cowlesite	00-046-1405	CaAl ₂ Si ₃ O ₁₀ · 6H ₂ O	W
Silicato de cálcio, ferro e alumínio (I)	Esseneite	00-040-0496	AlCaFeO ₆ Si	n
Nome do composto	Nome Mineral	Nº ICDD	Fórmula química	Legenda
Silicato de potássio e alumínio (S)	Orthoclase	00-019-0931	KAlSi ₃ O ₈	O

APÊNDICE A – FICHAS DO BANCO DE DADOS *INTERNATIONAL CENTRE FOR DIFFRACTION DATA* (ICDD): NUMERAÇÃO, DENOMINAÇÃO QUÍMICA, FÓRMULA E SÍMBOLO

Nome do composto	Nome Mineral	Nº ICDD	Fórmula química	Legenda
Silicato de sódio e alumínio (c)	Albite	01-071-1156	Na (AlSi ₃ O ₈)	a
Silicato de sódio e alumínio (c)	Albite	00-010-0393	Na (AlSi ₃ O ₈)	a
Silicato de sódio, cálcio e alumínio (C)	Andesina	01-083-1938	Na _{0.622} Ca _{0.368} Al _{1.29} Si _{2.71} O ₈	#
Silício	-	00-027-1402	SiO ₂	Si
Sulfato de cálcio	Anidrite	00-037-1496	CaSO ₄	a
Sulfato de cálcio hidratado	Gipsita	00-033-0311	CaSO ₄ · 2H ₂ O	G
Sulfato de cálcio hidratado	Gipsita	00-021-0816	CaSO ₄ · 2H ₂ O	G
Sulfito de cálcio hidratado	Hannebachite	00-039-0725	CaSO ₃ · 0,5H ₂ O	H
Sulfito de Magnésio hidratado	-	00-024-0738	MgSO ₃ · 3H ₂ O	S

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE B — RESULTADOS DO TESTE DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PELAS FISSURAS

Nas Tabelas 17, 18 e 19 estão dispostos respectivamente os resultados de fluxo de água normalizado (Q_N) e do índice de cicatrização (I_C) nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} das subclasses do concreto C30-R, C30-A e C30-B.

Tabela 17 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C30-R

C30-R													
Identificação	e_0 (μm)	Fluxo de água normalizado						Índice de cicatrização					
		Q_{N0}	Q_{N28}	Q_{N56}	Q_{N84}	Q_{N180}	Q_{N365}	I_{C0}	I_{C28}	I_{C56}	I_{C84}	I_{C180}	I_{C365}
C30-R	149	1%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	9%	100%	100%	100%	100%
C30-R	164	16%	2%	1%	0%	0%	0%	0%	88%	94%	100%	97%	100%
C30-R	192	26%	11%	1%	0%	0%	0%	0%	58%	96%	100%	100%	100%
C30-R	231	80%	42%	21%	10%	0%	0%	0%	48%	74%	88%	100%	99%
C30-R	243	90%	75%	22%	18%	0%	0%	0%	16%	76%	80%	99%	99%
C30-R	244	8%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	89%	94%	94%	100%	100%
C30-R	247	76%	52%	31%	13%	0%	0%	0%	31%	58%	83%	99%	99%
C30-R	249	100%	75%	50%	28%	0%	0%	0%	25%	50%	72%	100%	100%
C30-R	253	85%	55%	30%	16%	0%	0%	0%	36%	65%	82%	100%	100%
C30-R	299	100%	99%	56%	13%	27%	35%	0%	1%	44%	87%	73%	65%
C30-R	301	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
C30-R	312	100%	100%	100%	100%	41%	5%	0%	0%	0%	0%	59%	95%
C30-R	315	100%	100%	100%	86%	70%	24%	0%	0%	0%	14%	30%	76%
C30-R	347	99%	37%	0%	0%	0%	0%	0%	63%	100%	100%	100%	100%
C30-R	358	100%	100%	77%	61%	1%	3%	0%	0%	23%	39%	99%	97%
C30-R	376	100%	99%	72%	73%	16%	0%	0%	1%	28%	27%	84%	100%
C30-R	413	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
C30-R	439	100%	100%	86%	73%	37%	37%	0%	0%	14%	27%	63%	63%
C30-R	450	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
C30-R	483	100%	100%	100%	100%	85%	100%	0%	0%	0%	0%	15%	0%

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE B — RESULTADOS DO TESTE DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PELAS FISSURAS

Tabela 18– Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C30-A

C30-A													
Identificação	e_0 (μm)	Fluxo de água normalizado						Índice de cicatrização					
		Q_{N0}	Q_{N28}	Q_{N56}	Q_{N84}	Q_{N180}	Q_{N365}	I_{C0}	I_{C28}	I_{C56}	I_{C84}	I_{C180}	I_{C365}
C30-A	127	28%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	83%	97%	100%	100%	100%
C30-A	182	100%	23%	6%	1%	0%	0%	0%	77%	94%	99%	100%	100%
C30-A	210	61%	10%	10%	6%	4%	0%	0%	84%	84%	89%	93%	100%
C30-A	215	75%	27%	11%	1%	0%	0%	0%	64%	85%	99%	100%	100%
C30-A	241	100%	100%	77%	63%	27%	0%	0%	0%	23%	37%	73%	100%
C30-A	255	100%	68%	67%	33%	0%	0%	0%	33%	33%	68%	100%	100%
C30-A	259	70%	31%	22%	4%	1%	0%	0%	55%	68%	94%	99%	100%
C30-A	264	100%	78%	78%	61%	6%	0%	0%	22%	22%	39%	94%	100%
C30-A	266	100%	56%	32%	0%	0%	0%	0%	44%	68%	100%	100%	100%
C30-A	270	100%	71%	43%	25%	0%	0%	0%	29%	57%	75%	100%	100%
C30-A	283	100%	74%	45%	32%	0%	0%	0%	26%	55%	68%	100%	100%
C30-A	289	100%	33%	18%	16%	0%	0%	0%	67%	82%	84%	100%	100%
C30-A	291	100%	100%	63%	49%	30%	0%	0%	0%	37%	51%	70%	100%
C30-A	298	100%	100%	98%	87%	2%	0%	0%	0%	2%	13%	98%	100%
C30-A	301	100%	100%	90%	77%	21%	0%	0%	0%	10%	23%	79%	100%
C30-A	303	100%	50%	47%	33%	1%	7%	0%	50%	53%	67%	99%	93%
C30-A	334	100%	100%	100%	90%	9%	0%	0%	0%	0%	10%	91%	100%
C30-A	349	100%	100%	60%	54%	13%	0%	0%	0%	40%	46%	87%	100%
C30-A	381	100%	100%	59%	57%	49%	6%	0%	0%	41%	43%	51%	94%
C30-A	406	100%	100%	100%	100%	58%	8%	0%	0%	0%	0%	42%	92%

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE B — RESULTADOS DO TESTE DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PELAS FISSURAS

Tabela 19- Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C30-B

C30-B													
Identificação	e_0 (μm)	Fluxo de água normalizado						Índice de cicatrização					
		Q_{N0}	Q_{N28}	Q_{N56}	Q_{N84}	Q_{N180}	Q_{N365}	I_{C0}	I_{C28}	I_{C56}	I_{C84}	I_{C180}	I_{C365}
C30-B	178	24%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	98%	100%	100%	98%	100%
C30-B	212	93%	60%	42%	20%	15%	62%	0%	35%	55%	79%	83%	34%
C30-B	232	100%	78%	46%	34%	0%	1%	0%	22%	54%	66%	100%	99%
C30-B	262	100%	100%	87%	11%	12%	17%	0%	0%	13%	89%	88%	83%
C30-B	278	100%	100%	100%	100%	71%	19%	0%	0%	0%	0%	29%	82%
C30-B	282	100%	100%	100%	100%	66%	15%	0%	0%	0%	0%	34%	85%
C30-B	286	100%	100%	100%	51%	0%	22%	0%	0%	0%	49%	100%	78%
C30-B	294	100%	100%	100%	55%	0%	0%	0%	0%	0%	45%	100%	100%
C30-B	304	100%	100%	100%	59%	35%	54%	0%	0%	0%	41%	65%	46%
C30-B	316	100%	100%	69%	28%	1%	6%	0%	0%	31%	72%	99%	94%
C30-B	335	100%	100%	100%	100%	100%	81%	0%	0%	0%	0%	0%	19%
C30-B	336	100%	100%	100%	100%	45%	35%	0%	0%	0%	0%	55%	65%
C30-B	340	100%	100%	100%	100%	63%	44%	0%	0%	0%	0%	37%	56%
C30-B	352	100%	100%	100%	100%	100%	37%	0%	0%	0%	0%	0%	63%
C30-B	363	100%	100%	100%	100%	47%	25%	0%	0%	0%	0%	53%	75%
C30-B	365	100%	100%	100%	100%	100%	84%	0%	0%	0%	0%	0%	16%
C30-B	430	100%	100%	100%	100%	39%	39%	0%	0%	0%	0%	61%	61%
C30-B	467	100%	100%	100%	100%	100%	87%	0%	0%	0%	0%	0%	14%
C30-B	469	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%
C30-B	497	100%	100%	100%	100%	89%	78%	0%	0%	0%	0%	11%	22%

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE B — RESULTADOS DO TESTE DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PELAS FISSURAS

Nas Tabelas 20, 21 e 22 estão dispostos respectivamente os resultados de fluxo de água normalizado (Q_N) e do índice de cicatrização (I_C) nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} das subclasses do concreto C50-R, C50-A e C50-B.

Tabela 20 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C50-R

C50-R													
Identificação	e_0 (μm)	Fluxo de água normalizado						Índice de cicatrização					
		Q_{N0}	Q_{N28}	Q_{N56}	Q_{N84}	Q_{N180}	Q_{N365}	I_{C0}	I_{C28}	I_{C56}	I_{C84}	I_{C180}	I_{C365}
C50-R	97	15%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	90%	100%	100%	100%	100%
C50-R	129	4%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	88%	88%	100%	100%	100%
C50-R	133	3%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	100%	100%	100%	100%	100%
C50-R	137	34%	7%	2%	0%	0%	0%	0%	78%	93%	100%	100%	100%
C50-R	145	20%	1%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	98%	98%	100%	100%
C50-R	189	31%	10%	3%	1%	0%	0%	0%	66%	89%	97%	98%	100%
C50-R	191	44%	14%	1%	0%	0%	0%	0%	69%	98%	100%	100%	100%
C50-R	200	17%	3%	0%	0%	0%	0%	0%	83%	97%	100%	100%	100%
C50-R	228	56%	25%	5%	0%	0%	0%	0%	56%	91%	100%	100%	100%
C50-R	232	52%	14%	4%	1%	0%	0%	0%	74%	92%	99%	100%	100%
C50-R	234	67%	12%	0%	0%	0%	0%	0%	83%	100%	100%	100%	100%
C50-R	239	87%	74%	30%	17%	1%	0%	0%	16%	66%	81%	98%	100%
C50-R	244	70%	29%	2%	0%	0%	0%	0%	58%	97%	100%	100%	100%
C50-R	254	74%	4%	0%	0%	0%	0%	0%	95%	100%	100%	100%	100%
C50-R	271	63%	19%	3%	2%	0%	0%	0%	70%	95%	97%	99%	100%
C50-R	291	100%	54%	24%	11%	1%	0%	0%	46%	76%	89%	99%	100%
C50-R	299	100%	100%	37%	8%	0%	0%	0%	0%	63%	92%	100%	100%
C50-R	334	70%	46%	3%	0%	0%	0%	0%	34%	95%	100%	100%	100%
C50-R	408	100%	100%	84%	53%	0%	0%	0%	0%	16%	47%	100%	100%
C50-R	459	100%	100%	83%	11%	31%	21%	0%	0%	18%	89%	69%	79%

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE B — RESULTADOS DO TESTE DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PELAS FISSURAS

Tabela 21 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C50-A

C50-A													
Identificação	e_0 (μm)	Fluxo de água normalizado						Índice de cicatrização					
		Q_{N0}	Q_{N28}	Q_{N56}	Q_{N84}	Q_{N180}	Q_{N365}	I_{C0}	I_{C28}	I_{C56}	I_{C84}	I_{C180}	I_{C365}
C50-A	155	7%	5%	1%	0%	0%	0%	0%	33%	80%	100%	100%	100%
C50-A	179	30%	10%	4%	0%	0%	0%	0%	66%	86%	100%	100%	100%
C50-A	186	5%	3%	2%	0%	0%	0%	0%	45%	55%	91%	91%	100%
C50-A	187	23%	8%	6%	0%	0%	0%	0%	65%	74%	100%	100%	100%
C50-A	187	30%	11%	5%	1%	0%	0%	0%	65%	83%	97%	100%	100%
C50-A	189	38%	19%	16%	0%	0%	0%	0%	51%	57%	100%	100%	100%
C50-A	197	52%	29%	30%	0%	0%	0%	0%	45%	43%	100%	100%	100%
C50-A	199	16%	5%	3%	0%	0%	0%	0%	65%	81%	100%	100%	100%
C50-A	219	26%	13%	9%	4%	0%	0%	0%	51%	67%	85%	100%	100%
C50-A	223	26%	9%	6%	0%	0%	0%	0%	66%	77%	100%	100%	100%
C50-A	231	18%	6%	9%	0%	0%	0%	0%	67%	49%	100%	100%	100%
C50-A	236	22%	10%	9%	4%	0%	0%	0%	55%	59%	82%	98%	100%
C50-A	261	25%	15%	11%	6%	0%	0%	0%	40%	57%	75%	100%	100%
C50-A	267	27%	10%	9%	14%	0%	0%	0%	65%	69%	48%	100%	100%
C50-A	334	100%	100%	100%	100%	51%	33%	0%	0%	0%	0%	49%	67%
C50-A	342	51%	32%	28%	0%	0%	0%	0%	38%	46%	100%	100%	100%
C50-A	345	99%	100%	100%	92%	12%	24%	0%	0%	0%	7%	88%	76%
C50-A	352	23%	9%	5%	3%	0%	0%	0%	62%	79%	87%	98%	100%
C50-A	378	100%	100%	100%	100%	21%	12%	0%	0%	0%	0%	79%	88%

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE B — RESULTADOS DO TESTE DE PERCOLAÇÃO DE ÁGUA PELAS FISSURAS

Tabela 22 - Resultados do Q_N e I_C nas idades t_0 , t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da subclasse de concreto C50-B

C50-B													
Identificação	e_0 (μm)	Fluxo de água normalizado						Índice de cicatrização					
		Q_{N0}	Q_{N28}	Q_{N56}	Q_{N84}	Q_{N180}	Q_{N365}	I_{C0}	I_{C28}	I_{C56}	I_{C84}	I_{C180}	I_{C365}
C50-B	218	89%	50%	14%	10%	0%	0%	0%	44%	84%	89%	100%	100%
C50-B	222	100%	85%	85%	66%	37%	13%	0%	15%	15%	34%	63%	87%
C50-B	231	100%	85%	71%	53%	0%	7%	0%	15%	29%	47%	100%	93%
C50-B	293	100%	100%	100%	100%	53%	69%	0%	0%	0%	0%	47%	32%
C50-B	318	100%	100%	100%	100%	42%	23%	0%	0%	0%	0%	58%	77%
C50-B	330	100%	100%	100%	100%	100%	84%	0%	0%	0%	0%	0%	16%
C50-B	331	100%	40%	23%	0%	0%	3%	0%	60%	78%	100%	100%	97%
C50-B	347	100%	100%	100%	100%	69%	28%	0%	0%	0%	0%	31%	72%
C50-B	347	100%	100%	100%	99%	42%	8%	0%	0%	0%	1%	58%	92%
C50-B	353	99%	79%	80%	80%	74%	74%	0%	21%	19%	19%	26%	26%
C50-B	356	100%	100%	100%	100%	58%	53%	0%	0%	0%	0%	42%	47%
C50-B	358	100%	100%	100%	100%	25%	9%	0%	0%	0%	0%	75%	91%
C50-B	360	100%	100%	100%	100%	66%	51%	0%	0%	0%	0%	34%	49%
C50-B	362	100%	100%	100%	100%	100%	77%	0%	0%	0%	0%	0%	23%
C50-B	375	100%	100%	100%	100%	95%	50%	0%	0%	0%	0%	5%	50%
C50-B	405	100%	100%	100%	100%	71%	72%	0%	0%	0%	0%	29%	28%
C50-B	449	100%	100%	100%	100%	79%	70%	0%	0%	0%	0%	21%	30%
C50-B	452	100%	100%	100%	100%	100%	100%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
C50-B	490	100%	100%	100%	100%	81%	7%	0%	0%	0%	0%	19%	93%

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE C – RESULTADOS DO TESTE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Nas Tabelas 23, 24 e 25 estão dispostos respectivamente os resultados do teste de penetração de íons cloreto, tanto pela superfície externa quanto ao longo da fissura das subclasses C30-R, C30-A e C30-B

Tabela 23 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C30-R

C30-R																	
Identificação	$e_0(\mu m)$	Superfície externa (μm)									Ao longo da fissura (μm)						
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	$S_{média}$	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	$F_{média}$
C30-R	149	0.00	3.47	4.55	5.17	2.47	0.00	0.00	0.00	1.96	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C30-R	192	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C30-R	231	2.31	1.75	3.58	2.81	5.54	3.58	2.66	3.16	3.17	0.00	0.00	0.00	4.63	3.23	1.19	1.51
C30-R	243	0.00	0.74	0.00	5.76	0.00	0.00	0.00	5.43	1.49	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C30-R	244	9.50	2.18	5.22	1.87	3.97	0.00	0.00	0.47	2.90	0.00	3.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.61
C30-R	247	0.95	0.58	0.00	6.54	2.98	0.00	2.98	3.56	2.20	3.63	3.49	1.82	4.58	2.40	3.05	3.16
C30-R	249	0.00	0.00	2.61	0.00	0.00	1.68	0.00	1.64	0.74	0.00	8.10	8.06	0.00	0.00	2.46	3.10
C30-R	253	0.00	0.83	0.00	0.00	2.49	0.00	0.00	0.00	0.42	0.00	1.04	0.00	0.00	0.00	0.00	0.17
C30-R	347	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.05	0.00	0.86	0.24	0.64	1.64	0.52	4.86	0.00	0.00	1.28

Fonte: Autora (2025)

Tabela 24 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C30-A

C30-A																	
Identificação	$e_0(\mu m)$	Superfície externa (μm)									Ao longo da fissura (μm)						
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	$S_{média}$	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	$F_{média}$
C30-A	127	1.37	5.18	7.62	4.27	1.14	8.38	5.64	5.26	4.86	13.57	12.27	1.45	5.49	9.15	4.42	7.72
C30-A	182	3.12	1.88	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.63	7.03	4.96	1.59	8.55	8.12	13.04	7.22
C30-A	215	8.03	0.38	5.96	1.30	13.15	0.31	9.94	2.29	5.17	10.09	4.28	7.42	9.79	4.82	4.59	6.83
C30-A	255	3.15	5.95	2.10	9.94	0.00	9.31	4.48	2.45	4.67	10.99	5.18	7.42	4.48	8.26	5.04	6.90
C30-A	259	8.94	5.14	3.35	0.00	0.00	1.79	2.83	0.00	2.76	19.45	22.13	16.99	0.00	11.62	17.66	14.64
C30-A	266	0.00	4.15	0.00	3.11	0.00	1.80	0.00	0.00	1.13	11.90	6.43	13.35	4.29	8.71	15.08	9.96
C30-A	270	0.89	0.00	0.00	1.25	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	4.72	2.51	8.78	6.56	3.98	25.22	8.63
C30-A	283	3.01	2.55	14.12	0.00	3.64	0.82	9.38	0.00	4.19	4.65	0.00	1.09	7.92	11.93	9.75	5.89
C30-A	289	7.90	1.86	0.60	4.17	7.60	0.00	7.53	6.56	4.53	13.26	7.68	9.91	20.86	10.88	4.17	11.13
C30-A	303	1.58	5.16	4.59	7.02	4.80	1.43	0.00	3.44	3.50	11.32	12.68	5.16	6.30	11.61	21.20	11.38

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE C — RESULTADOS DO TESTE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Tabela 25 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C30-B

C30-B																	
Identificação		$e_0(\mu m)$	Superfície externa (μm)								Ao longo da fissura (μm)						
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	$S_{média}$	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	$F_{média}$
C30-B	178	2.16	3.09	5.42	3.88	3.05	6.94	3.88	2.73	3.89	6.93	0.00	12.93	8.19	3.74	9.05	6.81
C30-B	212	5.69	4.35	7.54	10.66	8.70	3.84	1.85	8.92	6.45	9.28	7.83	3.63	7.83	11.97	25.67	11.03
C30-B	232	6.79	5.78	3.83	5.13	1.81	3.22	10.69	8.02	5.66	10.26	11.56	22.69	3.90	7.08	9.68	10.86
C30-B	262	2.01	0.00	11.77	7.53	4.52	8.23	2.51	4.38	5.12	13.06	10.90	8.03	14.63	11.33	6.46	10.74
C30-B	286	21.04	3.59	4.05	5.97	18.54	0.92	1.14	7.46	7.84	11.22	8.88	11.08	23.30	21.45	22.37	16.38
C30-B	294	0.00	4.59	0.00	1.00	0.00	4.36	2.59	4.29	2.10	10.06	7.91	0.00	5.18	0.00	2.89	4.34
C30-B	304	0.00	8.99	1.66	12.81	0.00	0.00	0.00	0.00	2.93	15.61	16.69	11.80	4.32	10.58	7.41	11.07
C30-B	316	7.46	4.16	3.87	0.00	6.60	5.17	0.54	0.00	3.47	17.58	14.49	24.18	13.20	26.11	25.75	20.22
C30-B	336	0.00	10.53	0.00	9.14	0.00	0.00	0.00	1.54	2.65	16.52	15.28	12.35	4.68	12.87	12.50	12.37
C30-B	430	0.00	0.00	3.42	0.00	3.49	0.00	6.40	10.68	3.00	18.90	14.68	5.74	4.72	14.97	14.75	12.29

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE C — RESULTADOS DO TESTE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Nas Tabelas 26, 27 e 28 estão dispostos respectivamente os resultados do teste de penetração de íons cloreto, tanto pela superfície externa quanto ao longo da fissura das subclasses C50-R, C50-A e C50-B

Tabela 26 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C50-R

C50-R																	
Identificação	$e_0(\mu m)$	Superfície externa (μm)									Ao longo da fissura (μm)						
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	$S_{média}$	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	$F_{média}$
C50-R	,	0.87	4.04	0.00	0.00	5.12	0.58	3.10	0.00	1.71	0.52	8.01	6.96	0.87	4.76	1.73	3.81
C50-R	133	0.00	0.00	1.03	0.00	2.72	0.81	3.30	0.88	1.09	0.00	0.00	0.00	5.07	1.62	2.86	1.59
C50-R	137	0.00	2.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	4.80	0.88	4.80	0.47	0.75	0.00	0.00	0.65	1.11
C50-R	191	0.00	2.42	3.00	0.00	0.00	1.47	0.64	0.00	0.94	1.29	4.57	0.86	6.57	7.25	5.86	4.40
C50-R	200	0.00	8.73	3.00	0.00	3.29	9.52	0.00	0.00	3.07	4.36	8.51	0.00	0.00	0.00	2.28	2.53
C50-R	228	2.16	1.24	0.00	0.00	0.00	1.17	0.73	0.00	0.66	5.19	6.43	4.75	1.34	5.70	3.84	4.54
C50-R	232	0.00	0.00	0.00	8.51	0.00	0.00	0.93	5.15	1.82	10.38	5.65	6.94	9.16	0.00	6.30	6.40
C50-R	299	0.00	0.00	0.89	0.00	0.00	0.00	0.35	1.98	0.40	5.67	5.94	4.60	0.39	4.53	4.54	4.28
C50-R	334	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.49	0.31	4.72	7.30	16.88	10.54	3.92	0.00	7.23
C50-R	408	0.00	2.33	0.00	0.00	0.00	0.00	1.68	0.00	0.50	0.31	1.97	0.00	0.00	2.44	1.82	1.09

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE C — RESULTADOS DO TESTE DE PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO

Tabela 27 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C50-A

C50-A																	
Identificação	$e_0(\mu m)$	Superfície externa (μm)									Ao longo da fissura (μm)						
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	$S_{média}$	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	$F_{média}$
C50-A	155	0.00	0.00	1.72	1.64	5.45	4.76	0.79	2.47	2.10	0.00	0.00	4.87	1.48	0.00	2.91	1.54
C50-A	179	2.89	2.93	1.41	5.71	0.00	3.07	0.00	6.50	2.81	0.00	2.29	0.00	0.00	0.00	6.65	1.49
C50-A	187	0.00	2.21	0.00	3.36	2.40	0.00	0.89	4.13	1.62	4.65	5.83	0.00	5.38	5.16	1.86	3.81
C50-A	187	3.94	2.58	3.73	1.72	3.08	2.87	0.00	0.72	2.33	3.34	2.26	3.73	2.47	1.01	4.66	2.91
C50-A	189	0.00	3.90	3.32	2.77	0.00	3.53	1.43	0.74	1.96	3.65	2.40	3.75	3.44	0.77	0.00	2.34
C50-A	223	5.61	6.93	3.39	2.95	5.20	4.57	3.98	3.69	4.54	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C50-A	236	2.54	6.01	0.00	0.00	3.04	0.00	2.57	1.96	2.02	4.78	3.04	8.70	5.15	4.13	4.50	5.05
C50-A	267	0.00	0.00	0.00	0.00	3.08	1.40	4.99	0.00	1.18	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.13
C50-A	334	0.00	4.78	0.00	0.00	0.00	3.74	3.67	0.35	1.57	4.71	11.08	1.39	5.13	3.39	8.80	5.75
C50-A	342	4.02	5.78	2.12	3.59	3.38	2.23	4.67	1.15	3.37	8.69	6.03	11.35	5.68	0.00	9.91	6.94
C50-A	378	4.54	1.96	4.94	2.83	0.00	3.13	1.60	4.36	2.92	8.58	6.40	9.52	2.76	6.98	4.95	6.53

Fonte: Autora (2025)

Tabela 28 - Resultados do teste de penetração íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da subclasse de concreto C50-B

C50-B																	
Identificação	$e_0(\mu m)$	Superfície externa (μm)									Ao longo da fissura (μm)						
		S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	$S_{média}$	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5	F_6	$F_{média}$
C50-B	218	0.00	0.00	3.14	0.00	0.00	0.00	3.95	0.00	0.89	0.00	3.00	0.00	0.80	6.14	0.00	1.66
C50-B	222	0.00	3.35	0.00	0.72	0.00	0.00	1.27	0.81	0.77	2.24	3.28	1.57	1.49	3.13	0.00	1.95
C50-B	231	2.56	2.35	0.00	6.77	7.12	1.71	0.00	0.00	2.56	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C50-B	293	2.15	0.00	2.72	0.00	0.00	1.58	3.08	8.45	2.25	0.00	0.00	0.00	0.00	1.50	5.30	1.13
C50-B	318	4.16	2.15	0.00	0.00	0.00	0.00	3.76	0.00	1.26	0.87	1.88	4.03	1.34	0.00	3.09	1.87
C50-B	331	0.00	0.00	2.18	1.16	0.00	5.20	0.00	2.62	1.39	1.16	2.18	4.94	1.16	5.09	6.03	3.43
C50-B	347	0.00	0.00	1.18	3.29	0.00	0.00	0.00	0.64	0.64	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
C50-B	356	0.00	0.00	3.93	0.00	0.00	0.00	2.15	0.00	0.76	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE D — ANÁLISE MULTIVARIADA DA VARIÂNCIA (MANOVA)

Nas Tabelas 29 e 30 estão dispostos respectivamente as análises multivariadas de variância do parâmetro I_C nos períodos de cura t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} das classes de concreto C30 e C50.

Tabela 29 - MANOVA dos índices de cicatrização nos períodos de cura t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da classe de concreto C30

Fator	Variável dependente	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
eo por intervalo	I_{C28}	3	2.323	0.7744	16.049	< .001
	I_{C56}	3	4.226	1.4087	27.393	< .001
	I_{C84}	3	5.302	1.7674	27.201	< .001
	I_{C180}	3	3.958	1.3195	19.894	< .001
	I_{C365}	3	2.195	0.7318	20.559	< .001
Presença de adição cristalizante	I_{C28}	2	0.227	0.1133	2.348	0.106
	I_{C56}	2	0.762	0.3809	7.406	0.002
	I_{C84}	2	0.464	0.2322	3.574	0.036
	I_{C180}	2	0.571	0.2854	4.303	0.019
	I_{C365}	2	0.600	0.3000	8.428	< .001
Total		25	20.628			

Fonte: Autora (2025)

Tabela 30 - MANOVA dos índices de cicatrização nos períodos de cura t_{28} , t_{56} , t_{84} , t_{180} e t_{365} da classe de concreto C50

Fator	Variável dependente	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
eo por intervalo	I_{C28}	3	1.4323	0.4774	12.689	< .001
	I_{C56}	3	1.6033	0.5344	13.523	< .001
	I_{C84}	3	1.3979	0.4660	8.475	< .001
	I_{C180}	3	0.6624	0.2208	7.027	< .001
	I_{C365}	3	0.3210	0.1070	2.983	0.040
Presença de adição cristalizante	I_{C28}	2	2.7925	1.3963	37.109	< .001
	I_{C56}	2	5.0844	2.5422	64.324	< .001
	I_{C84}	2	6.7059	3.3530	60.986	< .001
	I_{C180}	2	3.7410	1.8705	59.526	< .001
	I_{C365}	2	2.0140	1.0070	28.073	< .001
Total		25	25.755			

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE D — ANÁLISE MULTIVARIADA DA VARIÂNCIA (MANOVA)

Nas Tabelas 31 e 32 estão dispostos respectivamente as análises multivariadas de variância do parâmetro penetração de íons cloreto das classes de concreto C30 e C50.

Tabela 31 - MANOVA dos testes de penetração de íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da classe de concreto C30

Fator	Variável dependente	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Subclasse do concreto	Fissura	2	561.827	280.913	27.579	< .001
	Superfície	2	38.863	19.432	7.336	0
e₀	Fissura	1	28.612	28.612	2.809	0.11
	Superfície	1	6.123	6.123	2.314	0.14
Ic₂₈	Fissura	1	1.921	1.921	0.189	0.67
	Superfície	1	0.018	0.018	0.007	0.94
Ic₅₆	Fissura	1	2.975	2.975	0.292	0.60
	Superfície	1	1.096	1.096	0.414	0.53
Ic₈₄	Fissura	1	14.998	14.998	1.472	0.24
	Superfície	1	0.888	0.888	0.335	0.57
Ic₁₈₀	Fissura	1	2.408	2.4077	0.236	0.63
	Superfície	1	11.660	11.660	4.402	0.05
Ic₃₆₅	Fissura	1	1.045	1.045	0.103	0.75
	Superfície	1	1.178	1.178	0.445	0.51
Total		16	673.615			

Legenda: Os termos indicam o local da penetração de íons cloreto: “Fissura” corresponde à penetração ao longo da fissura, e “Superfície” à penetração pela superfície externa do concreto.

Fonte: Autora (2025)

Tabela 32 - MANOVA dos testes de penetração de íons cloreto pela superfície externa e ao longo da fissura da classe de concreto C30

Fator	Variável dependente	Grau de liberdade	Soma quadrada	Média quadrada	F	Valor P
Subclasse do concreto	Fissura	2	9.720	14.966	3.608	0.046
	Superfície	2	29.932	4.860	6.731	0.006
e₀	Fissura	1	16.215	16.215	3.909	0.062
	Superfície	1	0.650	0.899	0.900	0.354
Ic₂₈	Fissura	1	0.622	0.622	0.150	0.703
	Superfície	1	0.899	0.899	1.245	0.278
Ic₅₆	Fissura	1	3.587	3.587	0.865	0.364
	Superfície	1	0.475	0.475	0.658	0.427
Ic₈₄	Fissura	1	1.071	1.071	0.258	0.617
	Superfície	1	0.867	0.867	1.201	0.286
Ic₁₈₀	Fissura	1	7.362	7.362	1.775	0.198
	Superfície	1	0.105	0.105	0.145	0.707
Ic₃₆₅	Fissura	1	14.440	14.440	0.165	0.689
	Superfície	1	1.912	1.912	2.648	0.119
Total		16	74.102			

Legenda: Os termos indicam o local da penetração de íons cloreto: “Fissura” corresponde à penetração ao longo da fissura, e “Superfície” à penetração pela superfície externa do concreto.

Fonte: Autora (2025)

APÊNDICE E — RESUMO DA CARACTERIAÇÃO DO CONCRETO E DA OCORRÊNCIA DE CICATRIZAÇÃO DE FISSURAS

No Quadro 17 apresenta a síntese dos resultados de caracterização do concreto e das medidas de desempenho da cicatrização de fissuras.

Quadro 17 – Síntese dos resultados de caracterização do concreto e da ocorrência de cicatrização de fissuras

COMPOSIÇÃO																	
Materiais (kg/m³)					C30-R		C30-A		C30-B		C50-R		C50-A		C50-B		
Cimento Portland (CPII-F 40)					301,00							367,00					
Escória de alto-forno					100,00							NA					
Sílica ativa					NA							23,00					
Mistura cristalina (1%)*					0,00		3,00		3,00		0,00		3,67		3,67		
Areia fina					745,00							NA					
Areia grossa					NA							768,00					
Brita 9,5/25 (B1)					1146,00							815,00		815,00		815,00	
Brita 4,75/12,5 (pedrisco)					NA							349,00		349,00		349,00	
Aditivo plastificante (1,1%)*					2,47							NA					
Aditivo suplastificante (1,1%)*					NA							3,90					
Fibra metálica					34,92							30,00					
a/c					0,56							0,51					
CARACTERÍSTICA FÍSICO-MECÂNICO																	
Abatimento					130,00		125,00		118,00		160,00		155,00		140,00		
Resistência característica aos 28 dias (MPa)					36,31		39,10		38,94		55,94		56,90		64,64		
ÍNDICE DE CICATRIZAÇÃO (I _c)																	
Análise por classe de concreto																	
Classe de concreto C30-					Classe de concreto C50												
I _c (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm	I _c (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm	I _c (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm			
I _{C0}	0	0	0	0	I _{C0}	0	0	0	0	I _{C0}	0	0	0	0			
I _{C28}	69	28	6	0	I _{C28}	69	48	13	0	I _{C28}	69	48	13	0			
I _{C56}	97	46	17	2	I _{C56}	83	68	19	6	I _{C56}	83	68	19	6			
I _{C84}	100	67	25	3	I _{C84}	99	80	24	23	I _{C84}	99	80	24	23			
I _{C180}	99	90	57	21	I _{C180}	99	95	55	39	I _{C180}	99	95	55	39			
I _{C365}	100	93	78	39	I _{C365}	100	95	69	55	I _{C365}	100	95	69	55			
e ₀ (µm)	165	260	336	450	e ₀ (µm)	169	247	348	444	e ₀ (µm)	169	247	348	444			

Legenda: NA não aplicável

Análise por subclasse do concreto									
Classe do concreto C30					Classe do concreto C50				
Subclasse de concreto C30-R					Subclasse de concreto C50-R				
I _C (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm	I _C (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm
I _{C0}	0	0	0	0	I _{C0}	0	0	0	0
I _{C28}	52	35	11	0	I _{C28}	84	55	34	0
I _{C56}	97	66	25	4	I _{C56}	95	87	95	17
I _{C84}	100	84	30	7	I _{C84}	99	95	100	68
I _{C180}	99	96	62	19	I _{C180}	100	100	100	85
I _{C365}	100	95	94	16	I _{C365}	100	100	100	90
e ₀ (µm)	168	252	335	446	e ₀ (µm)	153	255	334	433
Subclasse de concreto C30-A					Subclasse de concreto C50-A				
I _C (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm	I _C (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm
I _{C0}	0	0	0	0	I _{C0}	0	0	0	
I _{C28}	80	35	10	0	I _{C28}	54	57	20	
I _{C56}	95	51	29	0	I _{C56}	70	63	25	
I _{C84}	100	68	38	0	I _{C84}	99	82	39	
I _{C180}	100	94	81	42	I _{C180}	99	100	83	
I _{C365}	100	100	98	92	I _{C365}	100	100	86	
e ₀ (µm)	154	262	333	406	e ₀ (µm)	185	239	350	
Subclasse de concreto C30-B					Subclasse de concreto C50-B				
I _C (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm	I _C (%)	e ₀ < 200 µm	200 µm ≤ e ₀ < 300 µm	300 µm ≤ e ₀ < 400 µm	400 µm ≤ e ₀ < 500 µm
I _{C0}	0	0	0	0	I _{C0}	-	0	0	0
I _{C28}	98	8	0	0	I _{C28}	-	19	7	0
I _{C56}	100	17	4	0	I _{C56}	-	32	9	0
I _{C84}	100	47	14	0	I _{C84}	-	43	11	0
I _{C180}	98	76	39	19	I _{C180}	-	78	39	17
I _{C365}	100	80	54	49	I _{C365}	-	78	58	38
e ₀ (µm)	178	264	339	466	e ₀ (µm)	-	241	349	449

Porcentagem de amostras que ocorreram cicatrização no período de cura t_{365}							
Análise por classe de concreto							
Classe de concreto C30				Classe de concreto C50			
e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula	e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula
$e_0 < 200 \mu m$	83%	17%	0%	$e_0 < 200 \mu m$	100%	0%	0%
$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	62%	38%	0%	$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	84%	16%	0%
$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	32%	68%	0%	$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	18%	82%	0%
$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	11%	67%	22%	$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	17%	66%	17%
Análise por subclasse de concreto							
Subclasse de concreto C30-R				Subclasse de concreto C50-R			
e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula	e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula
$e_0 < 200 \mu m$	100%	0%	0%	$e_0 < 200 \mu m$	100%	0%	0%
$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	50%	50%	0%	$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	100%	0%	0%
$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	50%	50%	0%	$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	100%	0%	0%
$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	0%	25%	75%	$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	50%	50%	0%
Subclasse de concreto C30-A				Subclasse de concreto C50-A			
e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula	e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula
$e_0 < 200 \mu m$	100%	0%	0%	$e_0 < 200 \mu m$	100%	0%	0%
$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	100%	0%	0%	$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	100%	0%	0%
$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	60%	40%	0%	$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	40%	60%	0%
$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	0%	100%	0%	$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	-	-	-
Subclasse de concreto C30-B				Subclasse de concreto C50-B			
e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula	e_0 (por intervalo)	$I_{C365} = 100\%$ Cicatrização total	Cicatrização parcial	$I_{C365} = 0\%$ Cicatrização nula
$e_0 < 200 \mu m$	100%	50%	0%	$e_0 < 200 \mu m$	-	-	-
$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	17%	83%	0%	$200 \mu m \leq e_0 < 300 \mu m$	25%	75%	0%
$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	0%	100%	0%	$300 \mu m \leq e_0 < 400 \mu m$	0%	100%	0%
$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	25%	75%	0%	$400 \mu m \leq e_0 < 500 \mu m$	0%	75%	25%

PENETRAÇÃO DE ÍONS CLORETO							
Classe de concreto C30				Classe de concreto C50			
Subclasse do concreto	e_0 (μm)	Superfície externa (μm)	Ao longo da fissura (μm)	Subclasse do concreto	e_0 (μm)	Superfície externa (μm)	Ao longo da fissura (μm)
C30-R	239	1,46	1,09	C50-R	226	1,14	3,70
C30-A	245	3,17	9,03	C50-A	243	2,40	3,32
C30-B	285	4,31	11,61	C50-B	290	1,31	1,25

Fonte: Autora (2025)