

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE PONTA GROSSA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

BIANCA SALDANHA PINHEIRO

ANÁLISE DE MECANISMOS POTENCIALMENTE ASSOCIADOS AO ATAQUE
INTERNO POR SULFATO EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO
RECICLADO DE CONCRETO CONTAMINADO POR GESSO

PONTA GROSSA

2026

BIANCA SALDANHA PINHEIRO

ANÁLISE DE MECANISMOS POTENCIALMENTE ASSOCIADOS AO ATAQUE
INTERNO POR SULFATO EM CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADO
RECICLADO DE CONCRETO CONTAMINADO POR GESSO

Dissertação apresentada para obtenção do título de
mestre na Universidade Estadual de Ponta Grossa,
Área de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Patrícia Kruger.

PONTA GROSSA

2026

Pinheiro, Bianca Saldanha

P654 Análise de mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato em concretos produzidos com agregado reciclado de concreto contaminado por gesso / Bianca Saldanha Pinheiro. Ponta Grossa, 2026.
113 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental - Área de Concentração: Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos), Universidade Estadual de Ponta Grossa.

Orientadora: Profa. Dra. Patrícia Kruger.

1. ARCO. 2. Sulfato. 3. Etringita. 4. Degradação. 5. Colmatação. I. Kruger, Patrícia. II. Universidade Estadual de Ponta Grossa. Saneamento Ambiental e Recursos Hídricos. III.T.

CDD: 628.4

**CERTIFICADO - 3238844/2025 - PPGESA****PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
SANITÁRIA E AMBIENTAL**

Certificado nº 3238844/2026 PPGESA

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO - DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Título da Dissertação: “Análise de Mecanismos Potencialmente Associados ao Ataque Interno por Sulfato em Concretos Produzidos com Agregado Reciclado de Concreto Contaminado por Gesso”

Nome: **BIANCA SALDANHA PINHEIRO**Orientadora: **Profª. Drª. Patrícia Kruger**

Aprovado pela Comissão Examinadora:

Profª. Drª. Patrícia Kruger

Universidade Estadual de Ponta Grossa – UEPG

Profª. Drª. Juliana de Abreu Pietrobelli

Universidade Tecnológica Federal do Paraná - UTFPR

Profª. Drª. Giovana Kátie Wiecheteck

Universidade Estadual de Ponta Grossa - UEPG

Ponta Grossa, 13 de agosto de 2026



Documento assinado eletronicamente por **Patricia Kruger, Professor(a)**, em 14/08/2026, às 15:14, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Giovana Katie Wiecheteck, Professor(a)**, em 14/08/2026, às 15:33, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



Documento assinado eletronicamente por **Juliana Martins Teixeira de Abreu Pietrobelli, Usuário Externo**, em 18/08/2026, às 15:09, conforme Resolução UEPG CA 114/2018 e art. 1º, III, "b", da Lei 11.419/2006.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.uepg.br/autenticidade> informando o código verificador **3238844** e o código CRC **9A6E7948**.

26.000038572-3

3238844v5

Aos meus pais, Kleber e Val, minha irmã,
Karine e meu noivo, Leonardo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por todas as oportunidades que me trouxeram até aqui, pelo sustento ao longo dessa pesquisa e por me capacitar a cada dia para que a finalização deste trabalho fosse possível. Sem Deus, nada podemos fazer.

Agradeço à minha orientadora, prof.^a Dr.^a Patrícia Kruger por todo auxílio, ensino e apoio, obrigada por acreditar no meu potencial e por ter me orientado no decorrer desta pesquisa.

Agradeço aos meus pais, Kleber e Val, por sempre terem confiado em mim, apoiado e me incentivado ao longo de toda minha trajetória acadêmica, desde o maternal até a conclusão desta dissertação de mestrado. Obrigada pela ajuda e companhia no laboratório. Sem seus ensinamentos, cuidados e carinho, eu jamais chegaria até aqui.

Agradeço muitíssimo à minha irmã, Karine, que foi minha companheira em todos os momentos ao longo da elaboração deste trabalho, sempre me ajudando e motivando. Ela foi a minha maior ajudante durante as longas horas que passamos no laboratório, fazendo ensaios e executando os concretos. Obrigada irmã, sua ajuda foi fundamental, sem ela, esse trabalho não teria sido concluído.

Agradeço ao meu noivo, Leonardo, por todo apoio, torcida e ajuda para realização deste trabalho. Obrigada por ser incansável na missão de me incentivar e apoiar, estando sempre disposto a me ajudar todas as vezes que eu precisei, você faz parte dessa conquista.

Agradeço a todos os meus familiares e amigos que torceram, oraram e me incentivaram durante toda minha jornada acadêmica, vocês são muito importantes e fundamentais para essa realização.

Agradeço aos meus colegas do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, especialmente, à minha amiga Maitê por sempre me dar forças, ajudar e compartilhar dessa jornada que muitas vezes pode ser solitária e cansativa que é o mestrado.

Agradeço aos meus amigos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais, Adriana e Rafael, que compartilharam comigo seus conhecimentos valiosos para análise de resultados, a ajuda de vocês foi essencial para a finalização deste estudo.

Agradeço ainda, ao Departamento de Engenharia Civil da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), ao Laboratório de Materiais de Construção Civil da UEPG, ao Complexo de Laboratórios Multiusuários da Universidade Estadual de Ponta Grossa (CLABMU/UEPG), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química e ao Laboratório de Difração de Raios-X da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, campus Ponta Grossa, pelo apoio e disponibilização de suas infraestruturas e equipamentos para a realização dos ensaios necessários a essa pesquisa. E à CAPES por conceder a bolsa de estudo.

“Para que todos vejam e saibam,
considerem e juntamente entendam que a
mão do Senhor fez isso, e que o Santo de
Israel o criou.”

Isaías 41:20

RESUMO

O uso de agregados reciclados de concreto (ARCO) representa uma alternativa sustentável para a gestão dos resíduos da construção civil, porém a presença de gesso pode aumentar a disponibilidade de sulfatos no sistema cimentício e influenciar a durabilidade dos concretos. Neste contexto, esta pesquisa teve como objetivo avaliar a influência da contaminação por gesso em agregados reciclados de concreto sobre o comportamento físico, mecânico e microestrutural dos concretos produzidos, investigando mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato. Para isso, foram produzidos concretos com agregados naturais e reciclados, com e sem adição de gesso, os quais foram submetidos à caracterização física e química dos agregados, ensaios de absorção de água, resistência à compressão, variação dimensional, microscopia eletrônica de varredura (MEV) e difração de raios X (DRX). Os resultados indicaram que a incorporação do agregado reciclado promoveu um aumento, em média, de 74,89% da absorção de água e uma redução de 25,56% nos valores de resistência a compressão em concretos moldados com ARCO em relação aos moldados com agregado natural; além de indicarem maior heterogeneidade microestrutural, enquanto os concretos contendo gesso apresentaram maior ocorrência de formações cristalinas compatíveis com etringita. A análise integrada demonstrou que o comportamento dos concretos não foi determinado exclusivamente pela presença de sulfatos ou pela formação desses produtos, mas pela interação entre disponibilidade de sulfatos, estrutura porosa da matriz e localização dos produtos de reação. Conclui-se que os concretos produzidos com agregado reciclado contaminado por gesso apresentaram os comportamentos mais compatíveis com mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato, pois combinam estrutura porosa e maior disponibilidade de sulfato.

Palavras-chave: ARCO; sulfato; etringita; degradação; colmatção; durabilidade.

ABSTRACT

The use of recycled concrete aggregates (RCA) represents a sustainable alternative for construction and demolition waste management; however, the presence of gypsum can increase sulfate availability in the cementitious system and influence concrete durability. In this context, this research aimed to evaluate the influence of gypsum contamination in recycled concrete aggregates on the physical, mechanical, and microstructural behavior of the produced concretes, investigating mechanisms potentially associated with internal sulfate attack. To this end, concretes specimens were cast with natural and recycled aggregates, with and without the addition of gypsum. These were subjected to physical and chemical characterization of the aggregates, water absorption tests, compressive strength tests, dimensional variation analysis, scanning electron microscopy (SEM), and X-ray diffraction (XRD). The results indicated that the incorporation of recycled aggregate promoted an average increase of 74.89% in water absorption and a reduction of 25.56% in compressive strength in concretes cast with RCA compared to those cast with natural aggregate. Furthermore, the results indicated greater microstructural heterogeneity, while the gypsum-containing concretes exhibited a higher occurrence of crystalline formations compatible with ettringite. The integrated analysis demonstrated that the behavior of the concretes was not exclusively determined by the presence of sulfates or the formation of these products, but by the interaction among sulfate availability, the porous structure of the matrix, and the location of the reaction products. It is concluded that concrete specimens produced with gypsum-contaminated recycled aggregate exhibited behaviors most compatible with mechanisms potentially associated with internal sulfate attack, as they combine a porous structure with greater sulfate availability.

Keywords: RCA; sulfate; ettringite; degradation; pore clogging; durability.

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Mecanismo de Ataque Interno por Sulfato (ISA)	25
Figura 2 - Fluxograma experimental	31
Figura 3 - Porta amostras para recobrimento da amostra com ouro	39
Figura 4 - Cristais formados na matriz (T1 – 28 dias).....	54
Figura 5 - Cristais formados no interior do poro (T1 – 28 dias)	55
Figura 6 - Cristais formados na parede do poro (T1 – 28 dias)	55
Figura 7 - Poro não preenchido por cristais (T1 – 28 dias).....	56
Figura 8 - Formação não compatível com etringita no interior do poro (T1 – 180 dias).....	57
Figura 9 - Formação de cristais na parede do poro (T1 – 180 dias).....	58
Figura 10 - Formação de cristais na parede do poro (T1 – 180 dias).....	58
Figura 11 - Formação de cristais na matriz (T1 – 180 dias)	59
Figura 12 – Poro não preenchido e formação de portlandita na matriz (T1 – 240 dias)	60
Figura 13 – Poros não preenchidos (T1 – 240 dias).....	60
Figura 14 - Formação de cristais no interior do poro (T1 – 240 dias).....	61
Figura 15 - Cristais formados na parede do poro (T2 – 28 dias)	61
Figura 16 - Cristais formados na matriz (T2 – 28 dias).....	62
Figura 17 - Cristais em microfissuras (T2 - 28 dias)	62
Figura 18 – Microfissuras no interior do poro (T2 - 28 dias)	63
Figura 19 - Formação de cristais na matriz (T2 – 180 dias)	64
Figura 20 - Formação de cristais na matriz (T2 – 180 dias)	65
Figura 21 - Formação de cristais no interior do poro (T2 – 180 dias).....	65
Figura 22 - Formação de cristais em espaço confinado (T2 – 180 dias).....	66
Figura 23 - Formação de cristais na matriz (T2 – 240 dias)	68
Figura 24 - Formação de cristais no interior de microfissura (T2 – 240 dias)	68
Figura 25 - Formação de cristais no interior de microfissura (T2 – 240 dias)	69
Figura 26 - Cristais formados na parede do poro (T3 – 28 dias)	70
Figura 27 - Cristais formados na matriz (T3 – 28 dias).....	70
Figura 28 – Microfissuras no interior do poro (T3 - 28 dias)	71
Figura 29 – Cristais formados na matriz (T3 - 28 dias).....	71
Figura 30 - Formação de cristais no interior do poro (T3 – 180 dias).....	73
Figura 31 - Formação de cristais em microfissuras e no interior do poro (T3 – 180 dias)	74
Figura 32 - Formação de cristais dispersos no interior do poro (T3 – 180 dias)	75
Figura 33 - Formação de cristais na matriz (T3 – 240 dias)	76
Figura 34 - Formação de cristais na matriz (T3 – 240 dias)	77
Figura 35 - Formação de cristais no interior do poro (T3 – 240 dias).....	77
Figura 36 - Cristais formados no interior dos poros (T4 – 28 dias).....	78
Figura 37 - Cristais formados no interior do poro (T4 – 28 dias)	79
Figura 38 – Microfissuras na matriz (T4 – 28 dias).....	79
Figura 39 – Microfissuras na parede do poro (T4 – 28 dias)	80
Figura 40 - Formação de cristais em microfissuras (T4 – 180 dias).....	81
Figura 41 - Formação de cristais e portlandita no interior do poro (T4 – 180 dias).....	82
Figura 42 - Formação de cristais e portlandita no interior do poro (T4 – 180 dias).....	82
Figura 43 - Formação de cristais em microfissuras no interior do poro (T4 – 240 dias)	84
Figura 44 - Formação de cristais em microfissuras no interior do poro e na matriz (T4 – 240 dias) ...	85
Figura 45 - Formação de cristais em microfissuras (T4 – 240 dias).....	85

LISTAS DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Granulometria da areia	42
Gráfico 2 - Granulometria da brita natural	43
Gráfico 3 - Granulometria do gesso e do cimento	44
Gráfico 4 - Absorção por imersão	46
Gráfico 5 - Resistência a compressão	49
Gráfico 6 - Variação dimensional	51
Gráfico 7 - DRX realizado nas amostras de 28 dias	86
Gráfico 8 - DRX realizado nas amostras de 180 dias	88
Gráfico 9 - DRX realizado nas amostras de 240 dias	91

LISTAS DE TABELAS

Tabela 1 – Tratamentos utilizados para moldagem dos Corpos de Prova	32
Tabela 2 – Consumo de materiais - concretos, em kg/m ³	33
Tabela 3 - Ensaíos realizados nos agregados	36
Tabela 4 - Resultados de caracterização dos agregados.....	40
Tabela 5 - Massa específica - cimento e gesso.....	45
Tabela 6 - Absorção por imersão	46
Tabela 7 - Resistência a compressão (MPa)	48
Tabela 8 - Efeitos do ARCO e do gesso	96
Tabela 9 - Resumo das análises dos tratamentos	103

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ARCO	Agregado reciclado de concreto
CLABMU	Complexo de Laboratórios Multiusuário
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
CP	Corpo de prova
CP-II F	Cimento Portland tipo II com fíler
DEF	Formação de etringita tardia
DRX	Difração de raios X
ESA	Ataque externo por sulfato
ISA	Ataque interno por sulfato
ITZ	Zona de transição interfacial
MEV	Microscopia eletrônica de varredura
MPa	Mega Pascal
MF	Módulo de finura
NBR	Norma Brasileira
RCC	Resíduo de construção e demolição
RCD	Resíduo de construção e demolição
SO ₄ ⁻²	Íons sulfato
TAA	Teor de argamassa aderida

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo geral	18
1.1.2	Objetivos específicos	18
1.2	JUSTIFICATIVA	19
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	22
2.1	RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO	22
2.1.1	Propriedades dos agregados reciclados de concreto.	22
2.1.2	Impacto das impurezas no concreto.....	23
2.2	ATAQUE INTERNO POR SULFATO	24
2.3	PRESSÃO DE CRISTALIZAÇÃO.....	26
2.4	ATAQUE INTERNO POR SULFATO EM CONCRETOS MOLDADOS COM AGREGADO RECICLADO	27
3	METODOLOGIA	31
3.1	DELINEAMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.2	MATERIAIS	34
3.2.1	AGREGADO RECICLADO DE CONCRETO E AGREGADOS NATURAIS	34
3.2.2	GESSO RECICLADO	34
3.2.3	CIMENTO	35
3.3	CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS.....	35
3.3.1	CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS AGREGADOS	35
3.3.2	CARACTERIZAÇÃO MINERALÓGICA DOS AGREGADOS	36
3.4	CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES	37
3.5	VARIÁVEIS DE ESTUDO.....	37
3.5.1	Variáveis independentes	37
3.5.2	Variáveis de controle.....	38
3.5.3	Variáveis dependentes.....	38
3.5.4	Ensaio realizado nos concretos	38
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	40
4.1	CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS	40
4.1.1	Agregados (natural e ARCO)	40
4.1.2	Gesso reciclado e cimento	44
4.2	PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO	46
4.2.1	Absorção por imersão	46
4.2.2	Resistência à compressão	48
4.2.3	Variação dimensional/expansão	51
4.3	ANÁLISES MICROESTRUTURAIS	54
4.3.1	T1	54
4.3.2	T2	61
4.3.3	T3	69
4.3.4	T4	78
4.3.5	DRX.....	86
4.4	DISCUSSÃO INTEGRADORA DOS RESULTADOS	95
4.4.1	Interpretação geral do comportamento dos concretos	95
4.4.2	Diferenciação entre os efeitos do ARCO e dos sulfatos.....	96
4.4.3	Colmatação <i>versus</i> degradação interna.....	97
4.4.4	Síntese interpretativa dos tratamentos	99

4.4.5	Integração entre comportamento microestrutural e macroscópico.....	101
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	104
5.1	CONCLUSÃO.....	104
5.2	SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS	106
	REFERÊNCIAS.....	108

1 INTRODUÇÃO

O aumento populacional associado ao desenvolvimento urbano, exige melhorias em infraestrutura, seja na construção de novas edificações, na ampliação da malha rodoviária, assim como nas redes de água e de esgoto urbano. Todas essas intervenções demandam o uso de materiais de construção civil, tais quais, areia, brita, cimento, revestimentos cerâmicos, entre outros.

Além da demanda por recursos naturais se tornar cada vez maior, o mesmo acontece com a geração de resíduos, o que acarreta danos em larga escala ao meio ambiente (Barboza et al., 2019). Por isso, reciclar e reutilizar estes resíduos é necessário para promover o desenvolvimento sustentável na construção civil (Shi et al., 2016).

De acordo com dados recentes do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024), o país gera anualmente cerca de 44.464.751 milhões de toneladas de resíduos da construção civil (RCC), o que representa cerca de 54,92% dos Resíduos Sólidos Urbanos totais gerados no país. Desse total, apenas 8,31% são efetivamente reciclados em usinas licenciadas. Apesar do avanço das políticas públicas, a contaminação dos resíduos por impurezas como gesso, argamassas e materiais cerâmicos, ainda limita a produção de agregados reciclados de qualidade, restringindo seu uso em concretos estruturais e revestimentos de desempenho controlado.

Este resíduo pode ser reutilizado de diversas formas, desde o uso em base e sub base de pavimento asfáltico (Ali et al., 2025; Arshad; Ahmed, 2017; Lunardi, 2020; Pitso; Mostafa; Elsaigh, 2024), até o uso mais específico como agregado em concretos e argamassas (Almeida et al., 2019; Awoyera; Akinmusuru; Ndambuki, 2016; Kruger, 2021; Tenório et al., 2012). Para este último fim, é preciso que o resíduo passe por um processo de beneficiamento, que o transforma em agregado reciclado de concreto.

Como mencionado por Kruger (2021), o agregado reciclado de concreto (ARCO) pode apresentar determinado teor de contaminantes (material assim definido pela NBR 15116:2021), entre eles, o resíduo de gesso, que é largamente utilizado na construção civil.

A presença de gesso, pode culminar no fenômeno do ataque interno por sulfato (ISA) que, segundo Valdes (2023), acontece quando íons sulfato são liberados, devido a outras reações, no interior da pasta cimentícia, e reagem com aluminatos

que estão presentes no cimento Portland hidratado, o que resulta em compostos expansivos. Tal interação pode produzir variação dimensional, fissuração e aumento de tensões internas no concreto, o que prejudica o desempenho e a durabilidade do material.

Considerando a possibilidade de contaminação por gesso, é possível perceber que os agregados reciclados, quando contaminados, são mais suscetíveis a apresentarem o fenômeno descrito. Nesses casos, íons sulfato (SO_4^{2-}) já fazem parte da constituição da pasta de cimento, pois, quando contaminados, estão presentes na argamassa aderida ao grão do agregado de RCD (Kruger, 2021).

O mecanismo do ataque interno por sulfato acontece quando os íons de sulfato, provenientes da contaminação do agregado, reagem com hidróxido de cálcio presente na argamassa aderida, formando a gipsita; enquanto isso, fases de aluminato do cimento combinam-se com a gipsita e íons sulfato resultando na etringita, chamada etringita secundária, uma vez que a primária é produzida no concreto fresco. Os produtos formados, especialmente a etringita, dependendo do local onde são formados, podem ocupar mais espaço do que os elementos consumidos na geração desses e, dependendo da resistência à tração da matriz, ocorre a fissuração do material (Santillán; Zega; Irassar, 2024).

Embora esse fenômeno seja amplamente reconhecido em sistemas contaminados externamente, ainda há poucos estudos que abordam o ISA em concretos produzidos com agregados reciclados graúdos contaminados, principalmente considerando o comportamento em longo prazo e os efeitos microestruturais resultantes.

Outro fator associado ao agregado reciclado que favorece o fenômeno do ISA é o fato deste agregado ser mais poroso que o agregado natural, devido à parcela de argamassa aderida proveniente do concreto original (Santillán; Zega; Irassar, 2024), o que favorece o transporte e acúmulo de água, elemento primordial para o início do fenômeno.

Assim, compreender os efeitos da contaminação por gesso no desempenho do concreto reciclado é fundamental para ampliar o conhecimento sobre os mecanismos envolvidos e fornecer subsídios para critérios de aceitação e controle da qualidade de agregados reciclados. Além de contribuir para a redução do descarte de RCD, o entendimento dos mecanismos de ataque interno por sulfato em concretos com ARCO permite correlacionar fenômenos físico-químicos e propriedades

mecânicas, fornecendo subsídios técnicos para o emprego sustentável desses materiais em obras públicas e privadas.

Evidencia-se, portanto, a relevância de avaliar a influência da contaminação por sulfatos em concretos com agregados reciclados, visando compreender mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato e seus possíveis efeitos sobre o desempenho e a durabilidade do material e fortalecer a viabilidade técnica e ambiental do uso desse recurso em larga escala na construção civil.

Diante desse contexto, esta dissertação tem como propósito investigar experimentalmente a influência da contaminação por gesso em agregados reciclados de concreto sobre o comportamento físico, mecânico e microestrutural dos concretos produzidos, avaliando mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato. Busca-se compreender a interação entre disponibilidade de sulfatos, estrutura porosa e formação de produtos de reação ao longo do envelhecimento dos concretos, contribuindo para o avanço do conhecimento sobre a durabilidade de concretos produzidos com agregados reciclados contaminados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência da contaminação por gesso em agregados reciclados de concreto (ARCO) sobre o comportamento físico, mecânico e microestrutural dos concretos, investigando mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato.

1.1.2 Objetivos específicos

- a) Caracterizar física e mineralogicamente os agregados graúdos de RCD utilizados na pesquisa, a fim de relacionar e investigar o comportamento do concreto que será moldado com esse agregado;
- b) Avaliar indícios de formação de produtos cristalinos compatíveis com etringita e sua relação com o desempenho mecânico do concreto;
- c) Analisar o efeito do agregado graúdo reciclado contaminado por gesso no comportamento mecânico e microestrutural do concreto, considerando a

formação de produtos associados às reações sulfatadas e sua interação com a microestrutura do material;

- d) Comparar o comportamento dos concretos produzidos com agregado reciclado e dos concretos convencionais, identificando diferenças relacionadas às propriedades físicas, mecânicas e microestruturais.

1.2 JUSTIFICATIVA

A crescente geração de resíduos de construção e demolição (RCD) tem impulsionado a busca por soluções sustentáveis que possibilitem sua reintegração ao ciclo produtivo da construção civil. Portanto, o uso de ARCO na produção de novos concretos apresenta-se como uma estratégia ambientalmente viável, reduzindo a demanda por agregados naturais, através da substituição destes, e contribuindo para a mitigação de impactos ambientais causados pela geração e disposição final inadequada de resíduos de construção e demolição, uma vez que estes resíduos compreendem mais de 50% dos resíduos sólidos totais gerados no Brasil e apenas 8,31% deles é reciclado (Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente, 2024).

No entanto, a variabilidade composicional do RCD, especialmente quando contaminado por materiais ricos em sulfato, como o gesso, representa um desafio técnico relevante, pois pode introduzir sulfatos solúveis capazes de desencadear o ISA, comprometendo a durabilidade e o desempenho das estruturas (Kruger, 2021; Mehta; Monteiro, 2006; Yehia et al., 2015). As NBR's 6118 (ABNT, 2014a) e 12655 (ABNT, 2015a), abrangem a expansão gerada por sulfatos entre os mecanismos de deterioração do concreto.

A presença de sulfatos provenientes do gesso no agregado reciclado pode induzir à formação de etringita secundária, produto cristalino expansivo resultante da reação entre íons sulfato e aluminatos hidratados do cimento. Esse fenômeno é potencializado em concretos reciclados devido à maior porosidade e à presença de múltiplas zonas de transição interfacial (ITZ), que favorecem tanto a difusão iônica quanto a nucleação dos produtos de reação (Abid et al., 2018; Shi et al., 2016).

As normas que tratam sobre o controle tecnológico de agregados naturais e reciclado, tanto nacionais quanto internacionais, estabelecem padrões relação ao teor de material contaminante. Em relação ao teor de SO_3 permitido como material contaminante, os valores variam entre 0,15% e 1% em relação à massa de agregado

(ABNT, 2021; ABNT, 2019a). Entretanto, estudos como o de Kruger (2021) apontam que estes teores podem ser conservadores.

São diversos os estudos que abordam a incorporação de resíduo de construção e demolição em concretos (Frotté et al., 2017; Rizzo, 2018; Salles et al., 2021; Shi et al., 2016). Entretanto, poucos estudos abordam os efeitos da adição de sulfatos na matriz cimentícia (De Aguiar, 2004; Gallias, 1998; Kruger, 2021; Tovar-Rodríguez et al., 2013), dentre esses, apenas o estudo de Gallias (1998) foca na inserção de sulfato em concretos.

Como constatado por Kruger (2021), ainda não está consolidada a interferência da granulometria e tipologia do agregado reciclado sobre a quantidade, tipologia e local de formação dos cristais e suas consequências nas propriedades das matrizes cimentícias. Sendo a lacuna de conhecimento a necessidade de entender a influência do agregado reciclado de concreto contaminado por gesso sobre as propriedades físicas, químicas e microestruturais de materiais cimentícios, considerando ainda a morfologia do agregado, sendo ele gráúdo. O estudo de Leite (2001) aborda características e particularidades do agregado gráúdo reciclado de concreto que interferem nas propriedades do material formado por ele. Entretanto, ainda não está consolidada a interferência do gesso associada a essas propriedades.

O tema ganha relevância adicional no contexto atual, onde o uso de agregados reciclados vem sendo estimulado por programas de sustentabilidade e economia circular, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Brasil, 2010) . Entretanto, o reaproveitamento de resíduos contaminados por gesso ainda é evitado, em razão da possibilidade de expansões tardias e perda de desempenho mecânico, o que limita a aplicabilidade do ARCO em obras estruturais e não estruturais (Colman et al., 2021; De Aguiar, 2004; Gallias, 1998). Assim, compreender a influência da presença de sulfatos provenientes da contaminação por gesso na estabilidade volumétrica e nas propriedades microestruturais do concreto torna-se fundamental para o uso seguro e normativamente embasado desses materiais.

Diante desse cenário, esta pesquisa justifica-se pela necessidade de compreender a influência da contaminação por gesso em agregados reciclados de concreto sobre o comportamento físico, mecânico e microestrutural dos concretos produzidos, contribuindo para o entendimento dos mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato. Além de ampliar o conhecimento sobre a

interação entre sulfatos, porosidade e produtos de reação, o estudo fornece subsídios técnicos para futuras discussões relacionadas ao controle da qualidade e à utilização de agregados reciclados contaminados por gesso.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 RESÍDUO DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO

No Brasil, estima-se que os resíduos de construção e demolição representem em torno de 50% a 70% da massa total dos resíduos sólidos urbanos (Torres, 2015), sendo o concreto o principal constituinte. Nesse contexto, a reutilização desses materiais tem sido incentivada por políticas públicas, como a Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010) e a Resolução CONAMA 307/2002 (CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA, 2002) além de normas técnicas voltadas ao uso de agregados reciclados em concretos, como a NBR 15116:2021.

Entre os resíduos de construção civil, destacam-se os resíduos Classe A, passíveis de reutilização como agregados. Nesse grupo insere-se o ARCO, objeto deste estudo, compostos predominantemente por resíduos de demolição de concreto, sem inclusão significativa de resíduos cerâmicos. O uso desses materiais em novos concretos tem sido amplamente estudado devido ao potencial de redução da extração de agregados naturais e mitigação dos impactos ambientais associados à disposição inadequada do RCD (Frotté et al., 2017; Resende et al., 2024; Revilla-Cuesta et al., 2021; Rizzo, 2018; Salles et al., 2021; Shi et al., 2016).

Para sua reutilização em matrizes cimentícias, os agregados reciclados exigem etapas de triagem, processamento (britagem) e controle da qualidade, especialmente em relação à remoção de contaminantes (Angulo, 2000). Nesse contexto, a presença de impurezas, como materiais ricos em sulfato, torna-se um aspecto relevante para o desempenho e a durabilidade dos concretos reciclados.

2.1.1 Propriedades dos agregados reciclados de concreto.

As propriedades do ARCO dependem diretamente das propriedades e da qualidade do concreto que originou ele, pois o agregado reciclado é composto por: argamassa + agregado natural, provenientes da moldagem originária (Santillán; Zega; Irassar, 2024).

Uma das propriedades do ARCO que difere do agregado natural é o teor de absorção, que está diretamente ligado à quantidade de argamassa aderida ao grão. A argamassa aderida é proveniente do concreto que originou o agregado reciclado e, dependendo desse concreto original, a argamassa pode garantir maior porosidade ao

RCD quando comparado com o agregado natural, o que acarreta maior absorção de água (Shi et al., 2016).

Outra característica desse tipo de material é a baixa massa específica e dependendo do concreto que deu origem ao agregado reciclado, propriedades mecânicas inferiores aos agregados naturais. Além disso, o agregado reciclado é bastante heterogêneo, pois é composto por diferentes fases, como concreto, argamassa, cerâmica, vidro, entre outros, o que dificulta a separação eficiente das diferentes porções (Resende et al., 2024).

Além das diferenças físicas e mecânicas, o ARCO apresenta uma rede porosa mais interconectada, resultante da argamassa aderida e das microfissuras formadas durante a britagem. Essa microestrutura influencia diretamente a difusão de íons e a absorção capilar, favorecendo o transporte de água e sulfatos para o interior do concreto (Flatt, 2002). A zona de transição interfacial, já naturalmente porosa no concreto convencional, tende a se duplicar nos concretos reciclados, o que pode potencializar tanto efeitos deletérios (como o ataque interno por sulfato) quanto mecanismos de densificação por colmatção (Abid et al., 2018; Pereira, 2018).

2.1.2 Impacto das impurezas no concreto.

A presença de impurezas nos agregados reciclados de concreto (ARCO) pode comprometer o desempenho destes, no aspecto físico e mecânico, assim como a sua durabilidade (Yehia et al., 2015). Essas impurezas podem ser materiais orgânicos, micropartículas finas, gesso, argila, metais, resíduos cerâmicos, vidro, entre outros.

Cada impureza reage de uma forma particular na mistura de concreto, entre essas, as micropartículas finas, também conhecidas como material pulverulento, afetam a quantidade de água aderida ao grão, aumentando-a devido a maior superfície específica das partículas finas, o que prejudica a trabalhabilidade e a resistência mecânica do concreto (Mehta; Monteiro, 2006). Já os contaminantes metálicos, polímeros e vidros aumentam a heterogeneidade dos agregados, enquanto o gesso, objeto deste estudo, pode gerar fenômenos expansivos no concreto endurecido (Kruger, 2021), o que pode ocasionar fissuras, dependendo do local onde os produtos expansivos são gerados, e prejudicar a durabilidade do concreto.

Segundo Santillán; Zega; Irassar (2024), a presença de impurezas, ou contaminantes, como materiais ricos em sulfato, pode gerar o fenômeno do ataque

interno por sulfato. Entretanto, eles ressaltam que, apesar da maioria das regulamentações prescreverem teores máximos de sulfatos nos agregados entre 0,2% e 1,0% do peso total, muitos estudos, como o de Kruger (2021), mostram que esses limites podem ser conservadores.

A presença de partículas de gesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) nos agregados reciclados promove a liberação gradual de íons sulfato na solução intersticial, especialmente em ambientes saturados, podendo reagir com aluminatos de cálcio hidratados ($\text{C}_3\text{A} \cdot \text{Ca}(\text{OH})_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) para formar etringita secundária ($\text{C}_6\text{AS}_3\text{H}_{32}$). Estudos de Kruger (2021) mostraram que teores de sulfato superiores a 3% em massa no agregado já podem induzir expansões mensuráveis em concretos reciclados. Essa interação é mais pronunciada quando o sulfato provém de resíduos de gesso, cuja pureza em sulfato de cálcio é elevada e cuja granulometria fina aumenta a solubilidade do contaminante (Abid et al., 2018).

2.2 ATAQUE INTERNO POR SULFATO

O termo “ataque por sulfato” se refere à deterioração do concreto envolvendo a interação entre sulfato e pasta de cimento, independente da fonte de sulfato e temperatura de cura (Collepari, 2003). Embora frequentemente associado à formação tardia de etringita (DEF – *Delayed Ettringite Formation*), o ataque interno por sulfato distingue-se por, além de ter a fonte de sulfatos dentro do próprio material, não ser dependente de temperaturas elevadas durante a cura (Collepari, 2003). Essa diferenciação é relevante para o entendimento do presente estudo, uma vez que o sulfato provém de partículas de gesso incorporadas ao ARCO.

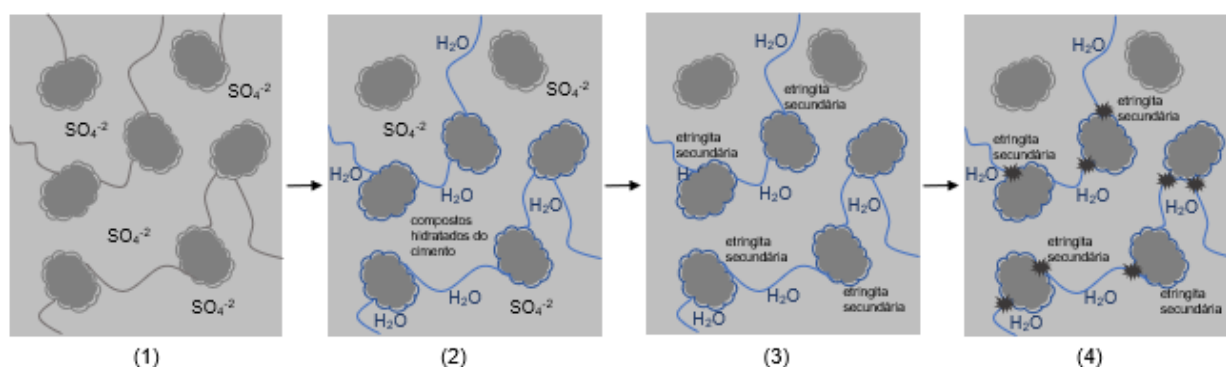
Além assim, é importante diferenciar o ataque por sulfato dito externo (ESA) do interno (ISA):

No primeiro caso, os íons SO_4^{2-} ingressam a partir do meio ambiente (Capraro; Hoppe Filho; Medeiros, 2021). As principais fontes de íons sulfato em ESA são solos ricos em sódio, potássio, magnésio e sulfato de cálcio, e para que esse fenômeno ocorra, três condições precisam ser atendidas: meio ambiente rico em sulfato, presença de água e concreto com alta permeabilidade (Collepari, 2003).

Enquanto o segundo tipo refere-se aos casos em que o sulfato está dentro da matriz cimentícia, como por exemplo, sulfatos presentes em agregados reciclados contaminados por gesso ou oriundos da oxidação de sulfetos. De acordo com a

abordagem holística de Collepardi (2003), os danos causados pelo ISA decorrem de três fatores simultâneos: microfissuras, liberação tardia de sulfato e exposição à água. A liberação tardia de sulfatos resulta da decomposição térmica da etringita ou da presença de agregado contaminado por gesso, esse fenômeno pode levar à formação tardia de etringita em microfissuras preexistentes. A Figura 1 mostra o mecanismo do ataque interno por sulfato por meio de figura esquemática.

Figura 1 - Mecanismo de Ataque Interno por Sulfato (ISA)



Fonte: A autora (2026).

Na fase 1, é possível observar a matriz cimentícia e os agregados, assim como as microfissuras preexistentes, a região da zona de transição e o sulfato contido nos poros e nas microfissuras. A fase 2 mostra a entrada de água no sistema, promovendo o transporte iônico e possibilitando a reação entre íons sulfato e o aluminato de cálcio hidratado ($C_3A \cdot Ca(OH)_2 \cdot 12H_2O$), além disso, a presença de água também possibilita a liberação de íons sulfato de forma gradual, a partir de partículas de gesso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) presentes no agregado. A fase 3 apresenta a formação de etringita secundária ($C_6AS_3H_{32}$), enquanto a fase 4 mostra a possível expansão da etringita que pode resultar em dano ao material.

É importante destacar que a formação de etringita não implica necessariamente em uma expansão deletéria ao material cimentício. Quando isso ocorre na mistura em estado fresco (nas primeiras horas), não há expansão significativa e a formação de etringita primária é vantajosa para retardar o tempo de pega do cimento Portland (Collepardi, 2003).

Entretanto, quando a etringita é formada após o endurecimento do concreto, pode ser considerada como etringita secundária, e estar associada a processos expansivos que podem gerar patologias (Colman et al., 2021). A nucleação dessa fase tende a acontecer preferencialmente em zonas de ponta de trinca ou em vazios capilares, onde há disponibilidade de solução supersaturada em íons sulfato e

aluminato, condições que favorecem o crescimento cristalino e o desenvolvimento de pressões de cristalização (Fu et al., 1994).

O mecanismo de deterioração decorre do fato de que, em espaços confinados, o crescimento das agulhas de etringita pode exercer tensões internas superiores à resistência à tração da matriz cimentícia, promovendo a abertura e a propagação de microfissuras. Em particular, observa-se que a disponibilidade de sulfato proveniente de agregados contaminados com gesso, ou da liberação tardia de fases anidras presentes nos agregados reciclados, pode ser determinante para acelerar esse processo (Kruger, 2021).

Nesse contexto, a avaliação da suscetibilidade do concreto ao ISA exige não apenas a caracterização química dos componentes, mas também uma análise da sua microestrutura porosa, uma vez que a conectividade de poros e a difusividade iônica controlam a intensidade do ataque e a extensão da formação expansiva de etringita secundária (Flatt, 2002).

2.3 PRESSÃO DE CRISTALIZAÇÃO

A pressão de cristalização é um fenômeno associado ao crescimento de sais ou produtos de reação, como a etringita, no interior dos poros e microfissuras do concreto. De acordo com Flatt; Scherer (2008), a magnitude dessa pressão está relacionada ao grau de supersaturação da solução e às características geométricas dos poros, sendo mais significativa em espaços confinados. Nessas condições, o crescimento dos cristais pode gerar tensões internas capazes de induzir fissuração na matriz cimentícia.

O desenvolvimento dessas tensões depende da manutenção de níveis elevados de supersaturação no sistema, bem como das condições de transporte iônico e disponibilidade de água. Em materiais cimentícios porosos, como concretos produzidos com agregados reciclados, a conectividade dos poros pode favorecer tanto a difusão de íons sulfato quanto a nucleação e o crescimento de cristais em regiões confinadas (Flatt, 2002).

Entretanto, a formação de etringita não implica necessariamente em dano expansivo. Em determinadas condições, os produtos de reação podem ocupar parcialmente os poros da matriz cimentícia, promovendo colmatação e densificação localizada. Pereira (2018) e Kruger (2021) observaram que esse fenômeno pode estar

associado, inicialmente, à redução da absorção e ao aumento de resistência mecânica. Contudo, com a continuidade das reações sulfáticas e o crescimento dos cristais em regiões restritas, podem ocorrer tensões internas suficientes para promover fissuração e degradação do material.

Segundo Scherer (1999), para que o dano ocorra, as tensões geradas pelo crescimento cristalino devem superar a resistência à tração da matriz cimentícia. Além disso, a propagação das fissuras depende da continuidade do processo de nucleação e crescimento dos cristais em regiões confinadas, especialmente em zonas de ponta de fissura, onde a supersaturação tende a ser mais elevada (Fu et al., 1994).

No contexto dos concretos reciclados avaliados neste estudo, a compreensão da pressão de cristalização é importante para interpretar possíveis variações de absorção, expansão e resistência mecânica. A maior porosidade do ARCO pode favorecer tanto a formação de produtos associados às reações sulfáticas quanto processos localizados de colmatção, de modo que o comportamento do material depende do equilíbrio entre densificação e dano microestrutural.

2.4 ATAQUE INTERNO POR SULFATO EM CONCRETOS MOLDADOS COM AGREGADO RECICLADO

Os agregados reciclados de concreto (ARCO) podem incorporar, além da argamassa aderida típica, fragmentos e resíduos de outros materiais de construção (revestimentos, argamassas, placas de gesso/drywall) que atuam como fontes internas de sulfato. Partículas de gesso ou fases anidras presentes no ARCO dissolvem-se em presença de água/umidade e liberam íons SO_4^{2-} na solução intersticial da pasta, fornecendo o reagente sulfato necessário para a formação de etringita secundária (Colman et al., 2020; Silva; De Brito; Dhir, 2014).

A formação de etringita secundária é um processo controlado por disponibilidade de aluminato e sulfato, água e condições de transporte iônico; contudo, o efeito mecânico depende fortemente de onde, da quantidade e de como os cristais se formam (Fu et al., 1994; Kruger, 2021; Pereira, 2015; Taylor; Famy; Scrivener, 2001). Sendo assim, existem três aspectos importantes a serem considerados:

1. Localização preferencial para formação dos cristais: a nucleação tende a ocorrer em zonas de ponta de fissura, interfaces agregado-pasta (zona de transição) e poros capilares confinados, onde a supersaturação local se desenvolve mais

facilmente e os cristais podem exercer pressões de cristalização contra paredes rígidas. A deposição em microfissuras é particularmente danosa porque o crescimento confinado de agulhas de etringita gera tensões concentradas que podem favorecer a propagação das fissuras (Fu et al., 1994; Scherer, 1999).

2. Quantidade de cristais: quanto maior o estoque de sulfato disponível, maior o potencial de formação de etringita em escala volumétrica, uma vez que, segundo Collepardi (2003), a liberação de sulfato é um dos três fatores determinantes para a formação de etringita secundária.

3. Morfologia dos cristais: cristais “agulhosos” de etringita geram pressões localizadas mais elevadas quando crescem em espaços confinados, dependendo do ângulo formado com a parede do poro (Scherer, 1999); cristais menores e distribuídos podem inicialmente preencher poros (colmatação) e até aumentar resistência aparente, mas o crescimento subsequente pode gerar tensões deletérias (Kruger, 2021; Pereira, 2018). A termodinâmica e mecânica da cristalização mostram que a pressão efetiva depende da supersaturação e da geometria do poro/cristal (Flatt; Scherer, 2008; Scherer, 1999).

Considerando esses aspectos, algumas propriedades do ARCO, especialmente, da parcela graúda dele se fazem notáveis como, por exemplo, a argamassa aderida ao grão, uma vez que, dependendo do tipo de concreto que originou o agregado reciclado, esta argamassa aderida pode fornecer maior quantidade de poros do que o agregado natural forneceria (Shi et al., 2016), sendo locais favoráveis à nucleação de cristais.

Ainda é importante ressaltar que, por se tratar da parcela graúda do agregado, o volume de argamassa aderida é maior, pois o grão é maior, o que pode fornecer mais poros. Além disso, outro fator a ser ressaltado acerca dos concretos de agregado reciclado, diz respeito à zona de transição, pois eles possuem duas zonas de transição: uma posicionada entre o agregado original e a argamassa aderida, e outra posicionada entre a nova pasta e o agregado reciclado; gerando regiões mais frágeis e favoráveis a formação de fissuras (locais onde pode ocorrer nucleação) (Abid et al., 2018).

Outro fator é a disponibilidade de sulfato no agregado reciclado que pode decorrer tanto de fases anidras do agregado quanto de impurezas que possam estar presentes no grão, o que, segundo (Santillán; Zega; Irassar, 2024), pode favorecer o fenômeno do ataque interno por sulfato.

Além disso, é necessário ressaltar outra característica que foi discutida por Leite (2001), trata-se da rugosidade encontrada na superfície do agregado reciclado, além da forma mais angular do grão. Esses fatores contribuem para que o agregado reciclado possua maior área específica do que o agregado natural, o que contribui para que haja maior aderência com a argamassa. Outro fator acarretado é a maior absorção da pasta de cimento pelo agregado, por meio dos poros do grão, o que proporciona maior cristalização nos poros, possibilitando “maior fechamento” da zona de transição, unificando a matriz cimentícia e o agregado.

Em se tratando de agregado graúdo, como é o objeto deste estudo, essas características abordadas por Leite (2001) se intensificam, uma vez que o grão é de maior dimensão, logo, maior área específica que o grão de agregado miúdo, o que proporciona maior aderência e maior ancoragem do grão à nova argamassa, por meio do mecanismo descrito acima.

Ao longo da análise dos resultados, Leite (2001) comprova a densificação ocorrida na zona de transição de concretos moldados com agregados reciclados, comparando com a zona de transição de um concreto moldado com agregado natural, por meio da execução de microscopia eletrônica de varredura (MEV). Foi possível observar a existência de um espaço entre a matriz e o agregado no concreto convencional, o que não ocorreu nos concretos moldados com agregado reciclado, nestes a matriz quase se confunde com a zona de transição, pois os produtos de hidratação acabam cobrindo a superfície do agregado reciclado, o que gerou melhoria da aderência pasta/agregado. Essa melhoria também foi comprovada por meio dos resultados das propriedades mecânicas do concreto reciclado.

Essas propriedades mecânicas são melhoradas pois cria-se uma interligação entre a pasta e a superfície do agregado por meio dos produtos de hidratação, causando a diminuição do tamanho e da quantidade de fissuras nessa zona. As fissuras ainda podem ser geradas, entretanto, prejudicam menos a resistência do concreto. Entretanto, é importante ressaltar que apenas a melhoria da zona de transição não garante, por si só, aumento de resistência do concreto, uma vez que, ao melhorar esta fase, o agregado reciclado pode passar a ser o elo mais frágil da mistura, dependendo da porosidade e das características do concreto original (Leite, 2001).

Portanto, ao se considerar concretos moldados com substituição total do agregado graúdo natural por ARCO contaminado por gesso, espera-se que a maior

porosidade e a presença de duplas zonas de transição proporcionem tanto maior disponibilidade de sítios de nucleação para a etringita quanto caminhos preferenciais para o transporte de íons. Consequentemente, o efeito combinado dessas características pode manifestar-se em expansões iniciais mais pronunciadas e variações na resistência mecânica ao longo do tempo, em consonância com observações de Kruger (2021).

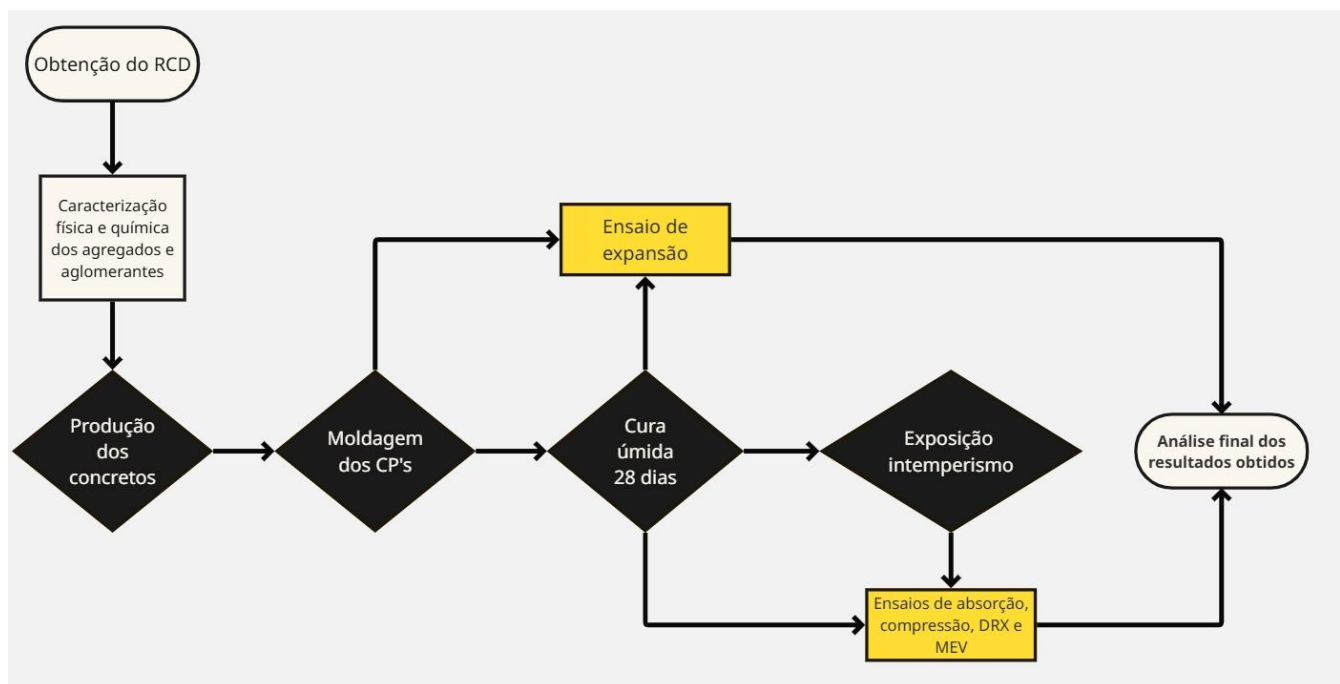
3 METODOLOGIA

O estudo foi conduzido de forma experimental em laboratório, adotando delineamento comparativo entre concretos com agregado natural e reciclado, com e sem contaminação por gesso, visando avaliar a influência da contaminação por gesso sobre o comportamento físico, mecânico e microestrutural dos concretos.

3.1 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL

O programa experimental foi delineado em esquema fatorial 2×2 , combinando dois tipos de agregado graúdo (natural e reciclado) e dois níveis de contaminação por sulfato (0% e 5% de SO_3 em relação à massa de areia), totalizando quatro tratamentos experimentais. Em cada tratamento, foram moldados corpos de prova para ensaios de resistência à compressão, variação dimensional e absorção por imersão, além de amostras destinadas às análises microestruturais. A Figura 2 apresenta o fluxo geral das etapas experimentais.

Figura 2 - Fluxograma experimental



Fonte: A autora (2026).

Inicialmente, foi obtido o resíduo de construção e demolição (RCD) a partir de concretos rompidos e britados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Ponta Grossa, resultantes de análises de controle

tecnológico realizadas pelo laboratório. É importante ressaltar que os concretos utilizados não possuem adição de gesso ou sulfato. No entanto, mesmo na hipótese de ocorrência de alguma contaminação, toda a massa de resíduo apresentaria o mesmo teor, não exercendo influência sobre os resultados obtidos, dado que a análise é conduzida de forma comparativa entre os diferentes tratamentos que são mostrados na Tabela 1.

Tabela 1 – Tratamentos utilizados para moldagem dos Corpos de Prova

Tratamento	Teor de ARCO	Sulfato (SO ₃)
T1 (referência)	0%	0%
T2	0%	5%
T3	100%	0%
T4	100%	5%

Fonte: A autora (2026).

Posteriormente, foi realizada a caracterização do resíduo e dos aglomerantes, e, em seguida, houve a produção dos concretos e a moldagem dos corpos de prova (CP's). Todas as misturas foram preparadas em betoneira de eixo inclinado com capacidade de 150 L, com motor elétrico, modelo 56 B 0877 BL 100 - Líder, garantindo uniformidade da mistura. O ensaio de abatimento de tronco de cone foi realizado conforme NBR NM 67:1998.

Nos tratamentos contaminados (T2 e T4), o resíduo de gesso foi previamente homogeneizado à areia em estado seco antes da produção dos concretos. A homogeneização foi realizada por adição gradual dos materiais em camadas sucessivas, visando maior uniformidade de distribuição do contaminante na mistura.

Para cada tratamento, foram moldados três corpos de prova para cada idade de ensaio (28, 180 e 240 dias), as idades foram definidas em função do tempo disponível para realização da pesquisa. Os CP's moldados foram destinados aos ensaios de resistência à compressão e absorção de água por imersão. Adicionalmente, foram moldados dois corpos de prova para monitoramento da variação dimensional. Dessa forma, cada tratamento totalizou 11 corpos de prova, resultando em 44 corpos de prova no programa experimental.

Foram moldados corpos de prova cilíndricos com dimensões de 100 mm × 200 mm (diâmetro × altura), conforme os procedimentos estabelecidos pela NBR 5738:2016. O adensamento foi realizado conforme norma ABNT 5738:2016. O traço utilizado foi 1:2:3 em massa e a relação água/cimento de 0,60, definidos com base em

estudo prévio de Kruger (2021), conforme Tabela 2 que compila o consumo de materiais.

Tabela 2 – Consumo de materiais - concretos, em kg/m³

Materiais (kg/m ³)	Teor de gesso por tratamento			
	T1 0%	T2 5%	T3 0%	T4 5%
Cimento CP-II F	362,31	367,23	332,64	336,79
Areia	724,63	655,51	665,29	601,16
Brita/RCD	1086,94	1101,7	997,93	1010,36
Gesso	0	39,48	0	36,2
Água (a/c)	217,39	220,34	199,59	202,07
Água de umedecimento	0	0	38,39	38,86

Fonte: A autora (2026)

Após essa etapa, os CP's passaram pela cura úmida, ou seja, foram submersos em água (em tanque a 23 ± 2 °C) por 28 dias. Entretanto, após 2 dias de imersão, os CP's destinados ao ensaio de expansão foram retirados da água para colocação dos pinos que foram usados para realizar a medição do comprimento deles. Os demais materiais permaneceram submersos até o fim da cura úmida, assim como os que foram retirados para colocação dos pinos.

Os pinos foram inseridos após a execução de furos nas faces dos corpos de prova, utilizando furadeira de bancada, sendo posteriormente fixados com borracha termoplástica.

Após a cura úmida, os corpos de prova foram mantidos em ambiente natural expostos ao ar até as idades de ensaio (180 e 240 dias). As condições ambientais do período experimental corresponderam ao clima subtropical úmido característico da região de Ponta Grossa-PR, com variações de temperatura e umidade ao longo do período de exposição, conforme dados do Atlas Climático do Estado do Paraná (Nitsche et al., 2019).

Em cada idade de ensaio (180 e 240 dias), os corpos de prova foram submetidos aos ensaios de absorção de água por imersão e resistência à compressão. Após a ruptura dos corpos de prova, fragmentos representativos da matriz cimentícia foram selecionados para realização das análises microestruturais por Microscopia Eletrônica de Varredura com emissão de campo (MEV-FEG) e Difração de Raios X (DRX).

3.2 MATERIAIS

3.2.1 Agregado reciclado de concreto e agregados naturais

O agregado reciclado de concreto (ARCO) foi obtido a partir de resíduos de construção e demolição provenientes de concretos rompidos e britados no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), oriundos de ensaios de controle tecnológico realizados pelo próprio laboratório. Os concretos utilizados para obtenção do ARCO não continham adição intencional de gesso.

Após a britagem, o material foi peneirado manualmente para seleção da faixa granulométrica entre 4,8 mm e 19,0 mm, selecionada de modo a apresentar características granulométricas semelhantes às do agregado graúdo natural utilizado na pesquisa. A areia natural e a brita natural utilizadas na pesquisa foram disponibilizadas pelo Laboratório de Materiais de Construção da UEPG.

Nos tratamentos com agregado reciclado (T3 e T4), o agregado graúdo natural foi substituído integralmente pelo ARCO, em massa. Diferentemente do estudo desenvolvido por Kruger (2021), que avaliou agregados miúdos reciclados, o presente trabalho investigou especificamente o comportamento de concretos produzidos com substituição total do agregado graúdo natural por agregado reciclado de concreto.

3.2.2 Gesso reciclado

O resíduo de utilizado na pesquisa foi produzido no Laboratório de Materiais de Construção da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), a partir da hidratação de gesso comercial em pó (sulfato de cálcio hemi-hidratado – $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$), utilizando-se a proporção de 700 mL de água para cada 1 kg de gesso.

Após a hidratação, o material foi submetido à secagem em estufa a 100 °C por 24 h. Em seguida, o gesso foi britado manualmente e peneirado até obtenção da faixa granulométrica entre 0,15 mm e 1,18 mm, semelhante à do agregado miúdo natural utilizado na pesquisa.

Nos tratamentos contaminados (T2 e T4), o gesso reciclado foi incorporado em substituição parcial à areia natural, em massa. A adoção dessa estratégia buscou favorecer a distribuição homogênea do contaminante na matriz cimentícia e viabilizar

experimentalmente a produção das misturas propostas, considerando que a substituição direta do cimento por gesso demandaria quantidades significativamente maiores de gesso.

O teor de gesso incorporado às misturas foi definido com base na proporção de SO_3 presente na gipsita, conforme metodologia de cálculo apresentada por Kruger (2021). Considerando que o SO_3 corresponde a aproximadamente 46,5% da massa do gesso diidratado, determinou-se a incorporação de 10,75% de gesso hidratado para obtenção do teor de 5% de SO_3 nas misturas contaminadas.

3.2.3 Cimento

O cimento utilizado foi do tipo CP II-F 32, escolhido por apresentar apenas adição de filer calcário, minimizando possíveis interferências de adições minerais suplementares na análise das reações associadas à presença de sulfatos. A caracterização física do cimento foi realizada por meio de ensaios de granulometria a laser, massa específica e área específica, conforme metodologias descritas na seção de caracterização dos materiais.

3.3 CARACTERIZAÇÃO DOS AGREGADOS

3.3.1 Caracterização física dos agregados

A areia foi submetida aos ensaios de granulometria conforme NBR 17054:2022 para agregado miúdo; massa específica e absorção de água seguindo a NBR 16916:2021, massa unitária e índice de vazios de acordo com a NBR 16972:2021; e material pulverulento conforme NBR 16973:2021.

Enquanto isso, os agregados graúdos (natural: T1 e T3; e reciclado: T2 e T4) passaram pelos seguintes ensaios: granulometria seguindo a NBR 17054:2022; massa específica e absorção de água conforme NBR 16917:2021; massa unitária de acordo com a NBR 16972:2021; e material pulverulento seguindo a NBR 16973:2021.

Todos os ensaios foram realizados em duplicata, em conformidade e recomendações das normas aplicáveis, assim como as massas e números de amostras seguiram as normas respectivas de cada ensaio realizado. Os resultados médios e os desvios-padrão obtidos serão apresentados no capítulo de Resultados e

Discussões. A Tabela 3 compila os ensaios realizados em cada agregado e suas respectivas normativas.

Tabela 3 - Ensaios realizados nos agregados

Material	Origem/Tipo	Ensaios realizado	Norma
Areia	Leito de rio	Granulometria	NBR 17054:2022
		Massa específica e absorção de água	NBR 16916:2021
		Massa unitária e índice de vazios	NBR 16972:2021
		Material pulverulento	NBR 16973:2021
Brita	Diabásio	Granulometria	NBR 17054:2022
		Massa específica e absorção de água	NBR 16917:2021
		Massa unitária e índice de vazios	NBR 16972:2021
		Material pulverulento	NBR 16973:2021
RCD	Concreto	Granulometria	NBR 17054:2022
		Massa específica e absorção de água	NBR 16917:2021
		Massa unitária e índice de vazios	NBR 16972:2021
		Material pulverulento	NBR 16973:2021
Cimento	CP II-F	Teor de argamassa aderida	Literatura (Kruger, 2021; Dobrovolski, 2025)
		Granulometria	A laser
Gesso	Comercial	Massa específica	NBR 16605:2017
		Granulometria	A laser

Fonte: A autora (2026).

3.3.2 Caracterização mineralógica dos agregados

Foi realizado ensaio de difração de raios X (DRX), utilizando o difratômetro Ultima IV da Rigaku em análise contínua, intervalo de varredura de 5° a 75°, com passo de 0,02°, à 30°/min, adotando radiação de 30 kV/10 mA. O ensaio foi realizado no Complexo de Laboratórios Multiusuários da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

Outro ensaio realizado, dessa vez apenas no ARCO, foi o de teor de argamassa aderida (TAA), conforme metodologia adaptada dos trabalhos de Kruger (2021) e Dobrovolski (2025). Foi separada uma amostra de 50 g de agregado que,

após seca em estufa, foi submersa em 50 mL de uma solução de ácido clorídrico (HCl) a 0,36 mol, por 7 dias. Posteriormente, a amostra foi lavada sobre um par de peneiras de 4,75 mm para retenção das partículas de agregado graúdo.

Após isso, o material foi seco em estufa, e, novamente, submerso em solução de ácido clorídrico (HCl), desta vez 60 mL da mistura a 1 mol, por mais 7 dias. Depois desse período o material foi seco em estufa e colocado, novamente em solução de HCl, a 2 mols por 14 dias.

Por fim, o material foi seco em estufa para determinação de sua massa, a fim de verificar o percentual de agregado graúdo, agregado miúdo e pasta de cimento do agregado reciclado analisado.

A concentração das soluções de HCl utilizadas foram de 0,36, 1 e 2 mol L⁻¹. O teor de argamassa aderida (TAA) foi calculado pela diferença entre a massa inicial (mi) e a massa final (mf) após os ciclos de ataque ácido.

3.4 CARACTERIZAÇÃO DOS AGLOMERANTES

O cimento CP II-F e o gesso reciclado foram caracterizados quanto à granulometria a laser e massa específica. Os ensaios de granulometria foram realizados no Complexo de Laboratórios Multiusuários da Universidade Estadual de Ponta Grossa (CLABMU/UEPG), utilizando granulômetro a laser modelo CILAS 920, com faixa de medição de 0,02–2600 µm. A determinação da massa específica foi realizada conforme a NBR 16605:2017, utilizando frasco volumétrico de Le Chatelier.

3.5 VARIÁVEIS DE ESTUDO

3.5.1 Variáveis independentes

As variáveis independentes avaliadas neste estudo foram:

- Tipo de agregado graúdo utilizado na mistura (agregado natural ou agregado reciclado de concreto – ARCO);
- Presença de sulfato incorporado por meio da adição de resíduo de gesso, correspondente ao teor de 5% de SO₃ nas misturas contaminadas.

Vale ressaltar que o teor de gesso foi definido em função dos resultados obtidos por Kruger (2021) em seus estudos que utilizou teor máximo de 3% de SO₃.

3.5.2 Variáveis de controle

A idade dos corpos de prova foi adotada como variável de controle, sendo avaliadas as idades de 28, 180 e 240 dias.

3.5.3 Variáveis dependentes

As variáveis dependentes são as respostas obtidas por meio da variação de determinada característica (variáveis independentes). Nesse caso, as variáveis analisadas foram:

- Variação dimensional;
- Resistência à compressão axial;
- Absorção de água por imersão;
- Alterações microestruturais avaliadas por DRX e MEV-FEG.

3.5.4 Ensaios realizados nos concretos

A variação dimensional dos corpos de prova foi monitorada ao longo de 240 dias. Após 2 dias da moldagem, foram fixados pinos metálicos nas extremidades dos corpos de prova utilizando borracha termoplástica. As leituras foram realizadas a cada 7 dias, com auxílio de paquímetro digital, adotando-se como referência inicial a primeira medição após a fixação dos pinos.

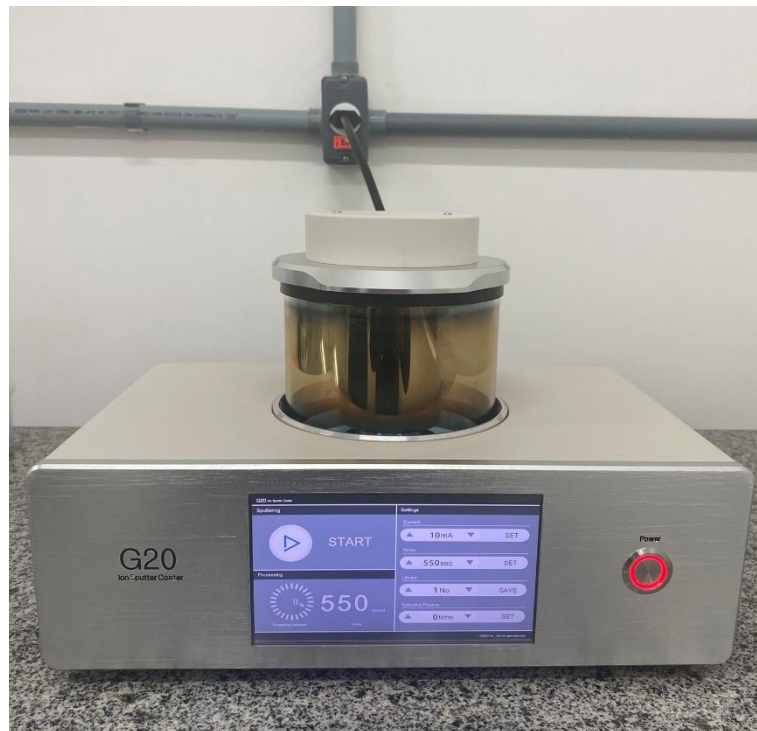
A resistência à compressão axial foi determinada conforme a NBR 5739:2018, enquanto a absorção de água por imersão seguiu os procedimentos estabelecidos pela NBR 9778:2020.

O ensaio de Difração de Raios X (DRX) foi realizado em amostras representativas provenientes da moagem de um corpo de prova. Após moagem, o material foi peneirado em malha de 0,075 mm e seco em estufa a 40 °C até a realização do ensaio.

As análises por Microscopia Eletrônica de Varredura com emissão de campo (MEV-FEG) foram realizadas em amostras com dimensões aproximadas de 2 cm × 2 cm × 1 cm, previamente secas em estufa a 40 °C. As amostras foram fixadas em suporte metálico com fita condutiva de carbono e submetidas ao recobrimento com ouro (Figura 3), visando aumentar a condutividade elétrica superficial da amostra durante a análise. Adicionalmente, foi aplicada tinta de carbono para auxiliar na condução dos elétrons e obtenção das imagens microestruturais.

As análises de ambos os ensaios foram conduzidas no CLABMU/UEPG.

Figura 3 - Porta amostras para recobrimento da amostra com ouro



Fonte: A autora (2026).

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DOS MATERIAIS

4.1.1 Agregados (natural e ARCO)

A Tabela 4 apresenta os resultados de massa específica, absorção de água, índice de vazios e teor de material pulverulento dos agregados utilizados na pesquisa.

Tabela 4 - Resultados de caracterização dos agregados

Material	Massa específica (g/cm ³)	Absorção (%)	Índice de vazios (%)	Material Pulverulento (%)	Teor de Argamassa Aderida (%)
Areia	2,568	0,54	41,89	4,74	-
Brita	2,818	0,76	43,21	0,75	-
ARCO	2,287	7,85	45,23	3,00	40,4

Fonte: A autora (2026).

A areia natural exibiu uma massa específica de 2,568 g/cm³ e uma taxa de absorção de água de 0,54%. O índice de vazios foi determinado em 41,89%, sendo este parâmetro influenciado pelos aspectos granulométricos e pela morfologia dos grãos. Além disso, o teor de material pulverulento, correspondente a 4,74%, encontra-se dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 7211:2022 para utilização em concretos.

A brita natural apresentou a maior massa específica entre os materiais avaliados, com valor de 2,818 g/cm³, e apresentou baixa taxa de absorção de água, de 0,76%. O índice de vazios de 43,21% está correlacionado à morfologia angular dos grãos. O teor de material pulverulento foi de 0,75%, demonstrando uma baixa proporção de finos aderidos, estando este valor dentro dos limites estabelecidos pela norma NBR 7211:2022.

Por sua vez, o ARCO exibiu um comportamento substancialmente divergente em relação aos agregados naturais. O índice de vazios foi de 45,23%, o maior entre os materiais estudados. A massa específica do ARCO foi de 2,287 g/cm³, inferior à da brita natural, devido à presença de argamassa aderida ao grão e à possível formação de microfissuras durante o processo de britagem. Tal resultado está em consonância com a literatura, que indica que a massa específica do agregado reciclado é menor que a do agregado natural devido ao caráter mais poroso da argamassa aderida ao grão (Leite, 2001; Santillán; Zega; Irassar, 2024; Shi et al., 2016).

A taxa de absorção do ARCO é aproximadamente dez vezes superior à do agregado graúdo natural. Esse comportamento está diretamente associado à elevada porosidade da argamassa aderida e à maior conectividade da rede porosa do agregado reciclado, fatores que favorecem a retenção e o transporte de água no interior do material (Flatt, 2002). Isso ocorre pois os espaços vazios no interior da argamassa aderida tendem a ser preenchidos pelo líquido no qual o material estiver submerso. Da mesma maneira, esse líquido pode transitar através da interconectividade dos poros.

Essa característica é relevante para o presente estudo, uma vez que a disponibilidade de água constitui um dos fatores necessários para o desenvolvimento de reações associadas ao ataque interno por sulfato. Entretanto, a caracterização física do agregado, isoladamente, não permite inferir a ocorrência dessas reações ou seus possíveis efeitos sobre o concreto. A influência dessa condição deve ser analisada em conjunto com os resultados obtidos nos concretos endurecidos e nas análises microestruturais.

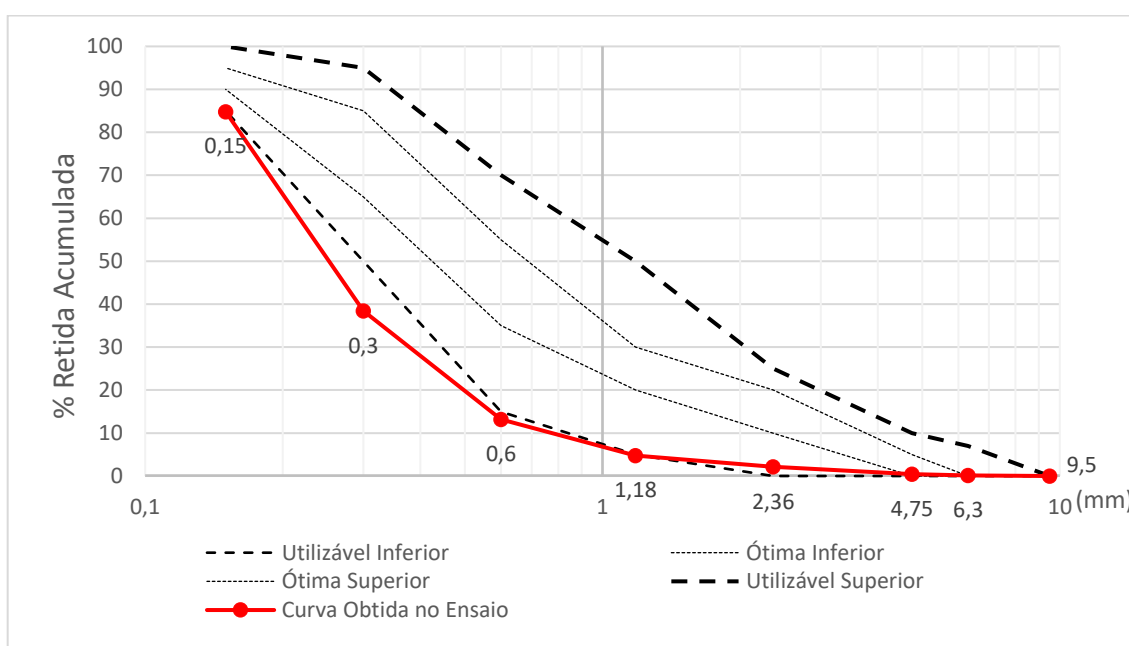
Além disso, a maior porosidade observada no ARCO pode favorecer tanto o armazenamento de água quanto a disponibilidade de espaços para precipitação de produtos de reação. A literatura indica que a formação desses produtos em regiões porosas pode inicialmente ocorrer sem provocar alterações significativas na integridade da matriz, dependendo da quantidade formada e do local de crescimento dos cristais (Scherer, 1999). Assim, os efeitos associados à presença de sulfatos serão discutidos posteriormente com base nos resultados integrados dos ensaios realizados.

O teor de material pulverulento do ARCO foi de 3,0%, valor superior ao da brita natural, porém inferior ao observado para a areia. Esse resultado indica a presença de partículas finas provenientes da britagem do concreto original e da argamassa aderida ao agregado reciclado. Segundo Santillán; Zega; Irassar (2024) e Abid et al. (2018), partículas finas presentes em agregados reciclados podem conter compostos remanescentes da matriz cimentícia capazes de participar de reações associadas à formação de etringita secundária quando expostos à disponibilidade de sulfatos e umidade. Entretanto, a caracterização realizada neste estudo não permite identificar diretamente a composição mineralógica dessas partículas, de modo que sua possível contribuição para os mecanismos observados será discutida posteriormente com base nos resultados microestruturais e mineralógicos.

O teor de argamassa aderida (TAA) determinado para o ARCO foi de 40,4%, valor compatível com a elevada absorção de água (7,85%) e a menor massa específica observadas para esse material. Segundo Santillán; Zega; Irassar (2024), a argamassa aderida é a principal responsável pela maior porosidade dos agregados reciclados, enquanto Kruger (2021) destaca que essa fração concentra parte dos compostos remanescentes da matriz cimentícia original. Dessa forma, o elevado teor de argamassa aderida observado reforça o potencial de influência do ARCO sobre o transporte de umidade e sobre a evolução microestrutural dos concretos produzidos com esse agregado. A participação desses mecanismos nas reações observadas será discutida com base nos resultados obtidos para os concretos endurecidos.

Abaixo serão apresentados os resultados da granulometria dos agregados. O Gráfico 1 exibe a granulometria da areia.

Gráfico 1 - Granulometria da areia

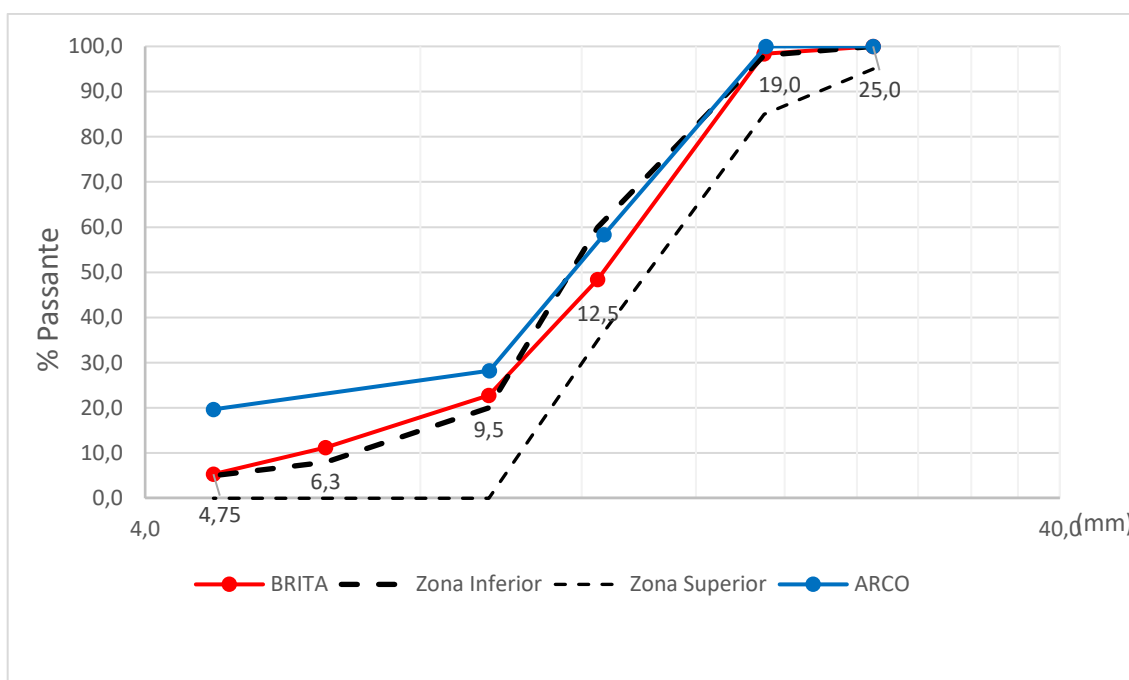


Fonte: A autora (2026).

A curva obtida no ensaio demonstra que a maior parte dos grãos se encontram abaixo da Zona Utilizável Inferior, conforme NBR 7211:2022. A maior parte dos grãos ficou retida nas peneiras de abertura 0,3 mm e 0,15 mm, o que representa uma quantidade maior de finos na mistura e contribui para o aumento da superfície específica do agregado miúdo. A dimensão máxima característica do agregado é de 1,18 mm, enquanto o módulo de finura é igual a 1,44.

O Gráfico 2 mostra a curva granulométrica da brita natural e do ARCO.

Gráfico 2 - Granulometria da brita natural



Fonte: A autora (2026).

A curva granulométrica da brita natural apresenta distribuição contínua e bem ajustada à zona utilizável definida pela norma, permanecendo majoritariamente entre os limites inferior e superior. Observa-se que a distribuição dos grãos é equilibrada ao longo das peneiras analisadas, sem concentrações excessivas em faixas específicas, o que indica bom empacotamento granulométrico.

A curva granulométrica do ARCO também se encontra majoritariamente dentro da faixa utilizável estabelecida pela NBR 7211:2022, indicando que, do ponto de vista granulométrico, o material apresenta potencial para uso em concreto. Entretanto, quando comparada à brita natural, observa-se um deslocamento da curva com maior quantidade de material passante nas peneiras de menor abertura, especialmente na peneira de 4,75 mm.

Sendo o módulo de finura (MF) da brita natural igual a 2,11 e do ARCO igual a 1,94, o que reafirma a maior presença de partículas menores no ARCO, resultado típico do processo de britagem do concreto original, que gera fragmentação adicional da argamassa aderida e produção de partículas mais finas. Esse resultado corrobora o maior índice de vazios (45,23%) do ARCO.

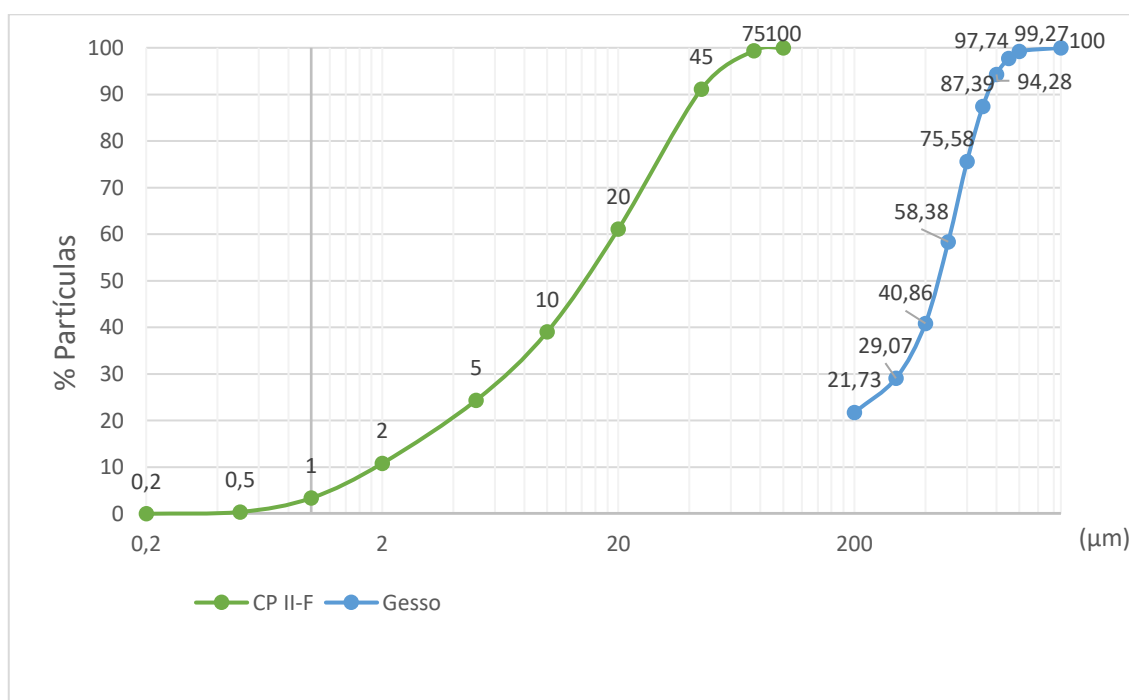
O menor módulo de finura do ARCO (1,94) também indica maior proporção de partículas de menor dimensão e, conseqüentemente, maior área superficial quando comparado à brita natural. Essa característica favorece o aumento da superfície de

contato entre o agregado reciclado e a nova pasta cimentícia. Segundo Abid et al. (2018), concretos produzidos com agregados reciclados apresentam maior quantidade de zonas de transição interfacial, regiões frequentemente associadas à nucleação e ao crescimento de produtos de reação. Dessa forma, a maior área superficial observada para o ARCO representa uma característica potencialmente relevante para a evolução microestrutural dos concretos produzidos com esse agregado, cuja influência será analisada a partir dos resultados obtidos nos concretos endurecidos.

4.1.2 Gesso reciclado e cimento

O Gráfico 3 mostra as curvas granulométricas do gesso reciclado e do cimento.

Gráfico 3 - Granulometria do gesso e do cimento



Fonte: A autora (2026).

A curva granulométrica do cimento CP II-F utilizado na pesquisa mostra que o material é bastante fino, apresentando distribuição equilibrada entre os tamanhos analisados. Trata-se de um perfil típico de cimentos Portland comerciais, pois as partículas finas promovem maior área específica e reatividade aos grãos.

Em contrapartida, a granulometria do gesso é significativamente deslocada para a direita, o que indica que os grãos são maiores do que os grãos de cimento.

Este perfil condiz com o procedimento de obtenção do gesso reciclado que foi adotado na metodologia, no qual o gesso hidratado foi britado e peneirado de modo a obter a mesma faixa granulométrica da areia.

Como o gesso é mais grosso, ele tende a apresentar taxa de dissolução potencialmente mais lenta, o que favorece a liberação mais lenta e contínua do sulfato. Ou seja, as partículas de gesso funcionariam como um “reservatório” de sulfato dentro da matriz cimentícia, tendo esse comportamento intensificado pela granulometria mais grossa do material.

Além disso, é importante analisar a massa específica do cimento e do gesso, trazendo novamente a massa específica da areia para que ela seja comparada com a do resíduo de gesso, a Tabela 5 mostra os resultados.

Tabela 5 - Massa específica - cimento e gesso

Material	Massa específica absoluta (g/cm ³)
Cimento Portland	3,1662
Resíduo de gesso	2,2994
Areia	2,568

Fonte: A autora (2026).

Ao analisar os resultados, pode-se observar que a massa específica do resíduo de gesso é, consideravelmente, inferior à do cimento, embora o cimento possua partículas mais finas. A massa específica deste resíduo é, também, menor que a da areia que possui granulometria semelhante a dele. Este dado sugere maior volume específico e possível maior porosidade.

Além disso, a menor massa específica indica que o volume ocupado pelo gesso reciclado é maior do que o da areia para uma mesma massa, o que é um aspecto importante a ser considerado, dado que este material foi adicionado em substituição parcial à areia nos tratamentos T2 e T4.

Sendo assim, do ponto de vista físico, os tratamentos que possuem substituição parcial da areia, podem ter sua resistência afetada negativamente pela parcela de gesso substituída. Assim como, do ponto de vista químico, a resistência desses tratamentos pode ser afetada pela possível liberação de sulfato na matriz cimentícia e possível formação de etringita secundária que cause danos ao material.

Estas hipóteses poderão ser confirmadas ao analisar os resultados dos ensaios de resistência a compressão, absorção de água, MEV e DRX.

4.2 PROPRIEDADES DOS CONCRETOS NO ESTADO ENDURECIDO

4.2.1 Absorção por imersão

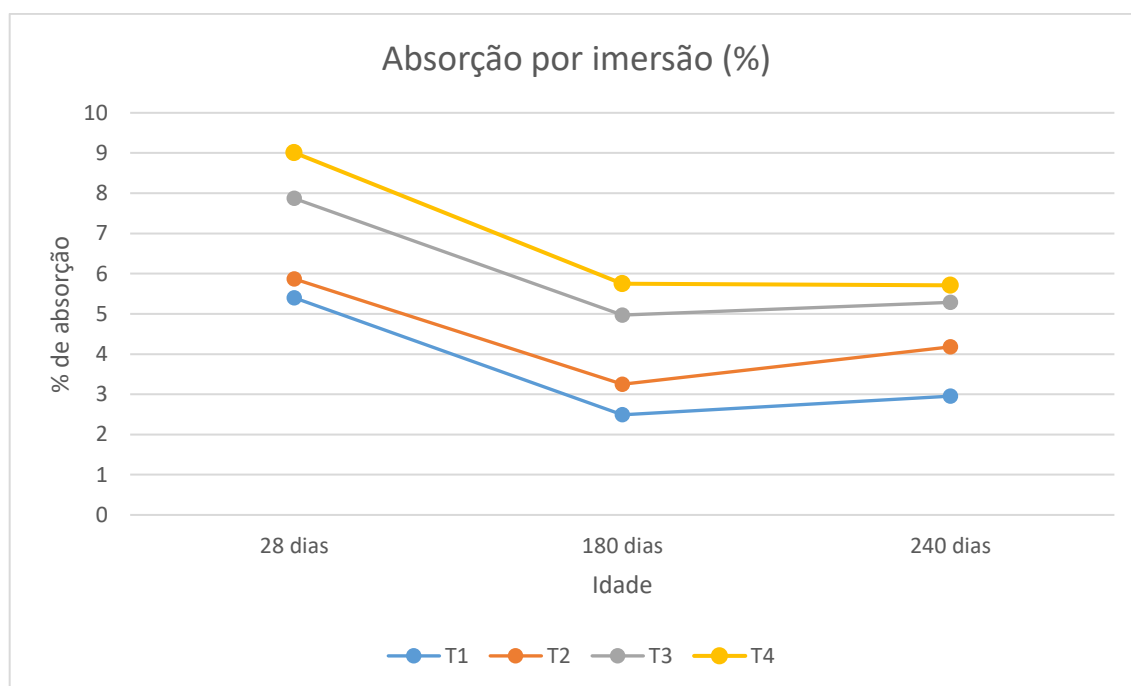
A Tabela 6 e o Gráfico 4 mostram os resultados do ensaio de absorção por imersão para cada tratamento e idade.

Tabela 6 - Absorção por imersão

Tratamento	Absorção por imersão (%)		
	28 dias	180 dias	240 dias
T1	5,4	2,49	2,95
T2	5,87	3,25	4,18
T3	7,87	4,97	5,29
T4	9,01	5,75	5,71

Fonte: A autora (2026).

Gráfico 4 - Absorção por imersão



Fonte: A autora (2026).

É importante destacar que o ensaio de absorção por imersão fornece informações relacionadas à conectividade da rede de poros acessíveis à água, ou seja, poros conectados à superfície do material, sendo uma ferramenta importante para análise da estrutura porosa do material. Entretanto, esse ensaio não permite, isoladamente, identificar mecanismos microestruturais específicos ou confirmar a ocorrência de processos expansivos internos.

Os resultados mostram que os concretos moldados com agregado reciclado (T3 e T4) apresentaram maior absorção de água em todas as idades, do que os que foram moldados com agregado natural (T1 e T2), o que é coerente com o resultado de 40,4% de teor de argamassa aderida apresentado na caracterização dos materiais. Tanto a presença de argamassa aderida quanto microfissuras originadas durante o processo de britagem, proporcionam maior absorção de água devido ao maior volume de poros acessíveis (Santillán; Zega; Irassar, 2024).

Nos concretos contendo gesso (T2 e T4), os valores de absorção foram superiores aos seus respectivos traços de referência sem gesso (T1 e T3), especialmente aos 28 dias. O concreto T4 apresentou o maior valor de absorção nessa idade (9,01%). Esse comportamento pode estar associado à combinação entre a maior porosidade característica do ARCO e as alterações físicas decorrentes da substituição parcial da areia por gesso reciclado. Considerando a menor massa específica do gesso em relação à areia, a substituição realizada resulta em maior volume absoluto de material incorporado à mistura, condição que pode influenciar a estrutura porosa do concreto e contribuir para os maiores valores de absorção observados.

Aos 180 dias, observa-se redução dos valores de absorção em todos os tratamentos, especialmente no T4. Esse comportamento indica diminuição da conectividade dos poros acessíveis à água ao longo do período de envelhecimento. Entretanto, a interpretação desse resultado deve considerar conjuntamente os demais parâmetros avaliados, uma vez que a redução da absorção não foi acompanhada pelo mesmo comportamento mecânico em todos os tratamentos.

A redução da absorção associada ao aumento da resistência mecânica pode ser compatível com processos de colmatação dos poros. Esse fenômeno é descrito na literatura como o preenchimento progressivo dos vazios por produtos sólidos, reduzindo a permeabilidade e a absorção de água do material (Kruger, 2021; Pereira, 2018). No contexto do presente estudo, a eventual formação de produtos associados às reações sulfáticas pode contribuir para esse comportamento. Entretanto, essa hipótese só poderá ser confirmada posteriormente.

Caso a hipótese de colmatação seja corroborada pelas análises subsequentes, o comportamento observado poderá ser interpretado à luz do mecanismo descrito por Pereira (2018), no qual produtos de reação passam a ocupar progressivamente os espaços disponíveis nos poros da matriz cimentícia. Segundo

Flatt (2002); Flatt; Scherer (2008); e Taylor; Famy; Scrivener (2001) em determinadas condições esses produtos podem continuar a crescer em regiões confinadas, gerando tensões internas associadas à pressão de cristalização. A relevância desse mecanismo para os concretos avaliados será discutida posteriormente com base nos resultados microestruturais obtidos.

Entre 180 e 240 dias, observa-se leve aumento da absorção nos tratamentos T1, T2 e T3, enquanto o tratamento T4 apresentou comportamento praticamente estável. Entretanto, a estabilização ou redução da absorção não deve ser interpretada, isoladamente, como indicativo da ausência de alterações microestruturais. Como o ensaio avalia predominantemente a conectividade dos poros acessíveis à água, outros processos internos podem ocorrer simultaneamente e influenciar o desempenho do material. Dessa forma, a interpretação final do comportamento dos concretos requer a análise conjunta dos resultados mecânicos, microestruturais e mineralógicos apresentados nas seções seguintes.

4.2.2 Resistência à compressão

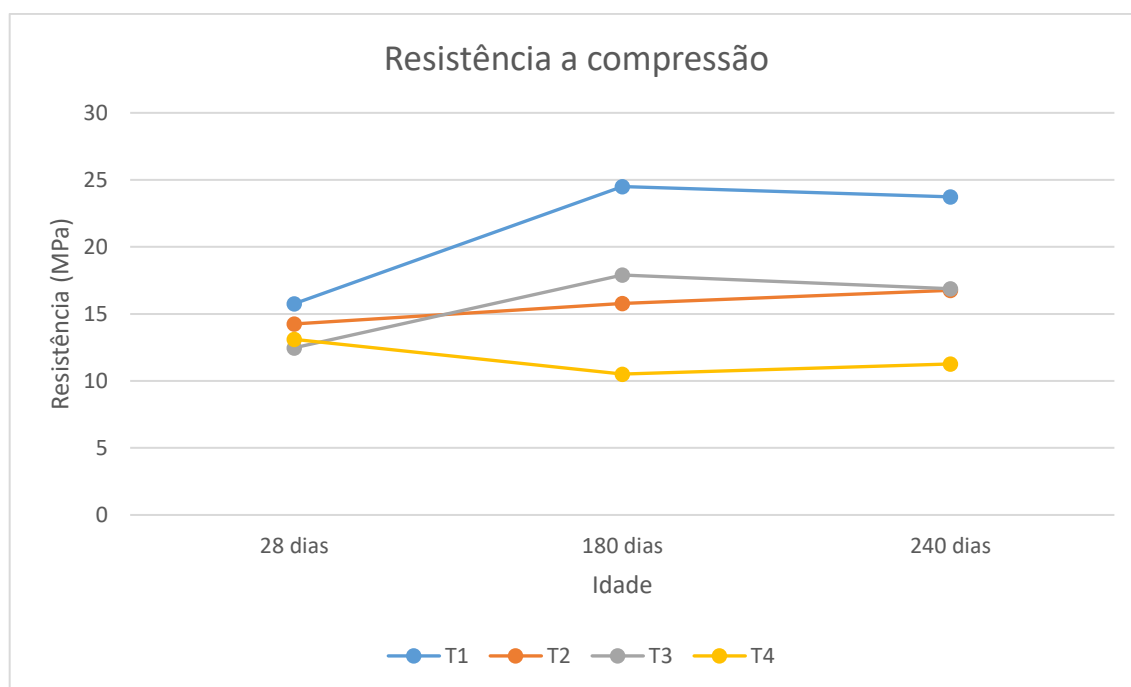
A Tabela 7 e o Gráfico 5 exibem os resultados de resistência à compressão dos tratamentos em cada idade.

Tabela 7 - Resistência à compressão (MPa)

Tratamento	Resistência à compressão (MPa)		
	28 dias	180 dias	240 dias
T1	15,76	24,5	23,73
T2	14,25	15,77	16,76
T3	12,47	17,9	16,88
T4	13,1	10,51	11,27

Fonte: A autora (2026).

Gráfico 5 - Resistência à compressão



Fonte: A autora (2026).

Observa-se que os concretos com agregado natural e sem contaminação por gesso (T1) apresentaram as maiores resistências em todas as idades avaliadas. Esse comportamento é coerente com as características físicas do agregado natural, que apresentou menor absorção de água e menor porosidade em comparação ao ARCO. Entre 28 e 180 dias ocorreu expressivo ganho de resistência, acompanhado pela redução da absorção de água observada anteriormente, indicando evolução da estrutura interna do material ao longo do período de envelhecimento.

O tratamento T2, moldado com agregado natural e adição de gesso, também apresentou aumento progressivo da resistência ao longo das idades, com ganho mais pronunciado entre 28 e 180 dias e evolução mais discreta até os 240 dias. Esse comportamento é coerente com os resultados de absorção de água, que indicaram redução da conectividade dos poros ao longo do período analisado. Considerando a presença adicional de sulfatos introduzida pelo gesso, torna-se relevante avaliar se a evolução observada está associada apenas ao processo normal de hidratação ou também à formação de produtos de reação no interior da matriz. Essa interpretação será aprofundada posteriormente com base nos resultados microestruturais e mineralógicos.

O tratamento T3 apresentou comportamento semelhante ao observado para o T1, com aumento expressivo da resistência entre 28 e 180 dias e posterior redução

aos 240 dias. Esse resultado acompanha a tendência observada na absorção de água, que apresentou redução inicial seguida de leve aumento na idade final. Como esse tratamento não recebeu adição de gesso, as diferenças observadas em relação ao concreto de referência podem ser associadas principalmente às características inerentes ao agregado reciclado, tais como, maior porosidade, presença de argamassa aderida e maior heterogeneidade da matriz.

O concreto contendo ARCO e gesso (T4) apresentou o comportamento mais crítico entre os tratamentos avaliados, com resistência inicial de 13,10 MPa aos 28 dias, redução para 10,51 MPa aos 180 dias e discreta recuperação aos 240 dias (11,27 MPa). Esse comportamento contrasta com a tendência observada para a absorção de água, que apresentou redução ao longo do tempo. Tal resultado evidencia que a diminuição da absorção não implica necessariamente melhoria do desempenho mecânico, uma vez que os dois ensaios avaliam aspectos distintos da estrutura do material.

Além disso, o tratamento T4 incorpora um agregado reciclado com elevado teor de argamassa aderida (40,4%), característica associada à maior porosidade observada na caracterização dos materiais. Esse comportamento é compatível com os maiores valores de absorção registrados para o tratamento em todas as idades avaliadas, mesmo após a redução observada ao longo do envelhecimento.

Adicionalmente, a presença de gesso representa uma fonte adicional de sulfatos no sistema. Segundo Collepardi (2003); Flatt; Scherer (2008); Kruger (2021); e Scherer (1999), a disponibilidade de sulfatos pode favorecer a formação de produtos associados às reações sulfáticas em materiais cimentícios. Entretanto, a identificação desses mecanismos requer a análise conjunta dos resultados microestruturais e mineralógicos, não sendo possível confirmá-los apenas a partir do comportamento mecânico.

De forma geral, o comportamento do T4 sugere que a combinação entre agregado reciclado e adição de gesso produziu efeitos distintos daqueles observados nos demais tratamentos, especialmente em relação à evolução da resistência mecânica ao longo do tempo. Entretanto, os resultados obtidos nesta seção não permitem, isoladamente, identificar os mecanismos responsáveis por esse comportamento. Dessa forma, a interpretação das diferenças observadas será complementada pelas análises microestruturais e mineralógicas apresentadas a

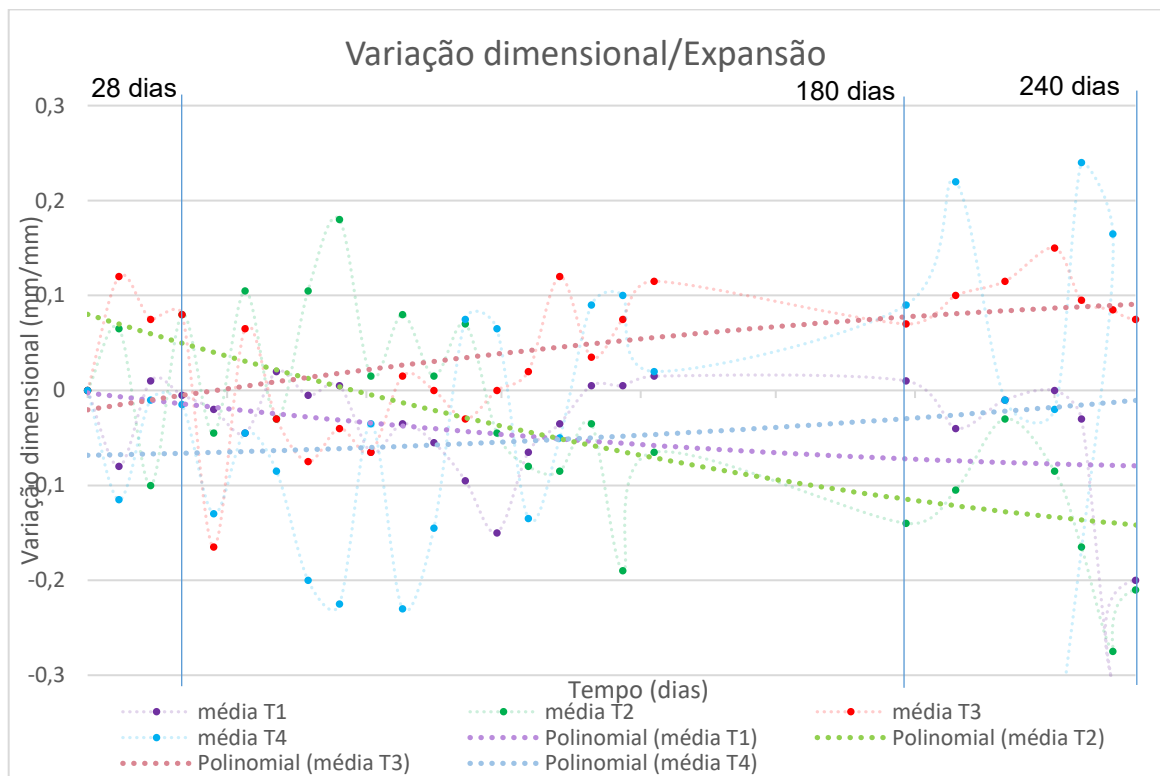
seguir, permitindo uma avaliação integrada da influência da porosidade, da presença de sulfatos e da evolução interna da matriz cimentícia

4.2.3 Variação dimensional/expansão

O ensaio de expansão foi realizado em dois corpos de prova para cada tratamento, os quais foram deixados em cura úmida por 28 dias e, após esse período, foram expostos ao intemperismo por 240 dias, tendo sua dimensão longitudinal medida semanalmente com o uso de um paquímetro. Para realizar a medição dos concretos, foram fixados pinos nas extremidades dos CP's usando uma furadeira de bancada para furar o material e cola termoplástica para fixar o pino. Os resultados obtidos foram compilados e tratados na forma de médias e estão demonstrados no Gráfico 6.

Destaca-se que o ensaio de variação dimensional foi conduzido com caráter exploratório, utilizando número reduzido de amostras e método não normatizado. Dessa forma, os resultados apresentam elevada variabilidade e devem ser interpretados como indicativos de tendência, não sendo adequados para inferências quantitativas conclusivas.

Gráfico 6 – Resultados do ensaio de variação dimensional dos corpos de prova



Fonte: A autora (2026).

O Gráfico apresenta as médias de cada tratamento por medição realizada (linhas com transparência), bem como as respectivas linhas de tendência (linhas sem transparência) utilizadas com o objetivo de auxiliar na visualização do comportamento global dos materiais ao longo do tempo.

Destaca-se que os resultados do ensaio de expansão apresentaram significativa dispersão dos dados ao longo do tempo, sendo difícil identificar um padrão consistente entre todas as amostras de um mesmo tratamento, porém as linhas de tendência permitem identificar comportamentos distintos entre os tratamentos. Ressalta-se que essas tendências devem ser interpretadas de forma cautelosa, considerando o caráter exploratório do ensaio.

Ao observar o Gráfico 6, a linha pontilhada roxa que representa a tendência do comportamento do concreto T1 apresenta uma linha descendente, assim como o concreto T2, representado pela linha pontilhada verde, embora este, apresente uma inclinação maior, demonstrando que a variação dimensional foi mais expressiva. Ambos os tratamentos, foram moldados com agregado natural (brita), entretanto, o concreto T2 teve acréscimo de gesso. A linha descendente indica que a variação dimensional foi negativa, ou seja, observa-se tendência de retração, a ser interpretada em conjunto com os demais resultados.

Por outro lado, as linhas pontilhadas vermelha e azul representam os comportamentos dos concretos T3 e T4, respectivamente. Ambas apresentam trajetória ascendente, indicando tendência de variação dimensional positiva ao longo do período monitorado. Os dois tratamentos foram moldados com agregado reciclado de concreto, sendo que o T4 recebeu adição de gesso. Embora os resultados indiquem comportamento distinto daquele observado nos concretos produzidos com agregado natural, a interpretação dos mecanismos responsáveis por essa tendência deve ser realizada de forma integrada aos resultados microestruturais e mineralógicos apresentados posteriormente.

Ressalta-se que a variação dimensional pode ser influenciada por múltiplos mecanismos, incluindo retração por secagem, variações higroscópicas e processos expansivos. Dessa forma, a interpretação isolada deste ensaio não permite atribuir, de forma direta, a ocorrência de expansão ao ataque interno por sulfato.

Nos concretos produzidos com agregado reciclado, a maior porosidade e a presença de múltiplas zonas de transição podem influenciar a resposta volumétrica do material ao longo do tempo. Essas características diferenciam os concretos com

ARCO daqueles produzidos com agregado natural e podem contribuir para os comportamentos observados nos ensaios de absorção, resistência e variação dimensional.

No caso do concreto T2, apesar da adição de gesso, observa-se tendência de retração mais acentuada que a verificada para o T1. Dentro das condições avaliadas neste estudo, não foram observadas evidências de tendência expansiva para esse tratamento. Esse resultado sugere que a simples presença de sulfatos não foi suficiente para produzir comportamento semelhante ao observado no T4, indicando que outros fatores relacionados à estrutura do material podem exercer influência sobre a resposta volumétrica observada.

Por outro lado, o concreto T4, que combina o uso de agregado reciclado e adição de gesso, apresentou a tendência de variação dimensional positiva mais pronunciada entre os tratamentos avaliados. Considerando o caráter exploratório do ensaio, esse resultado deve ser interpretado como um indicativo de comportamento diferenciado do material, cuja compreensão depende da análise integrada dos resultados físicos, mecânicos e microestruturais.

A análise das linhas de tendência permite identificar comportamentos distintos entre os tratamentos. Os concretos com agregado reciclado (T3 e T4) apresentaram tendência de variação dimensional positiva, enquanto os concretos produzidos com agregado natural (T1 e T2) apresentaram comportamento predominantemente estável ou de retração. O tratamento T3 apresentou comportamento intermediário, com tendência positiva menos acentuada que a observada para o T4. Esses resultados sugerem que a utilização de ARCO influencia a resposta volumétrica do material ao longo do tempo, especialmente quando associada à adição de gesso.

Dessa forma, a interpretação da variação dimensional deve ser realizada de forma integrada aos resultados de absorção de água, resistência à compressão e análises microestruturais, que fornecem evidências complementares para compreensão dos mecanismos envolvidos. Observa-se que os tratamentos com maiores valores de absorção e menores resistências mecânicas, especialmente o T4, também apresentaram tendência de variação dimensional positiva, demonstrando coerência entre os diferentes parâmetros avaliados. Entretanto, a confirmação dos mecanismos responsáveis por esse comportamento depende da análise conjunta dos resultados apresentados nas seções subsequentes.

4.3 ANÁLISES MICROESTRUTURAIS

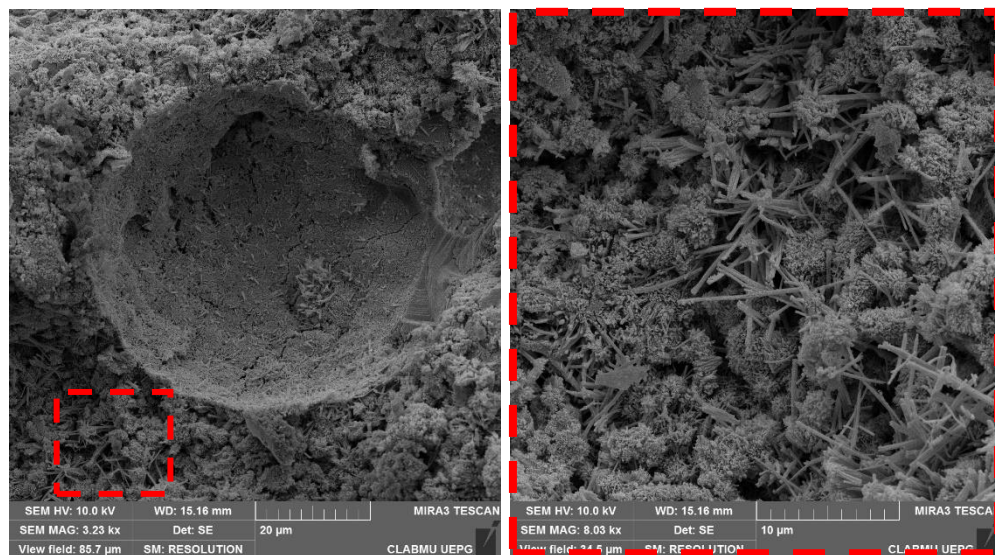
As análises de MEV representam observações localizadas da microestrutura, permitindo identificar morfologia e distribuição espacial dos produtos observados. Entretanto, os resultados devem ser interpretados de forma integrada aos demais ensaios, considerando que as imagens obtidas representam regiões específicas do material. Enquanto o DRX foi utilizado como ferramenta complementar para identificação mineralógica das fases presentes nos concretos, permitindo correlacionar os produtos identificados com as alterações microestruturais observadas por MEV e com o comportamento macroscópico dos materiais.

As análises dos dados microestruturais serão feitas por tratamento para que seja possível avaliar a evolução dos tratamentos ao longo do tempo.

4.3.1 T1

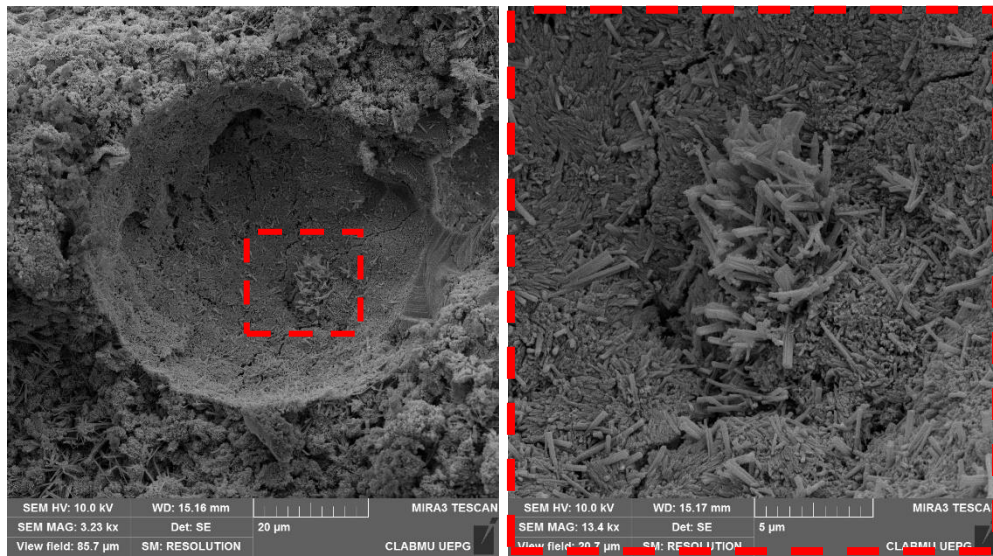
As micrografias eletrônicas de varredura das amostras de concreto da idade de 28 dias do T1 são mostradas nas Figura 4 à Figura 7.

Figura 4 - Cristais formados na matriz (T1 – 28 dias)



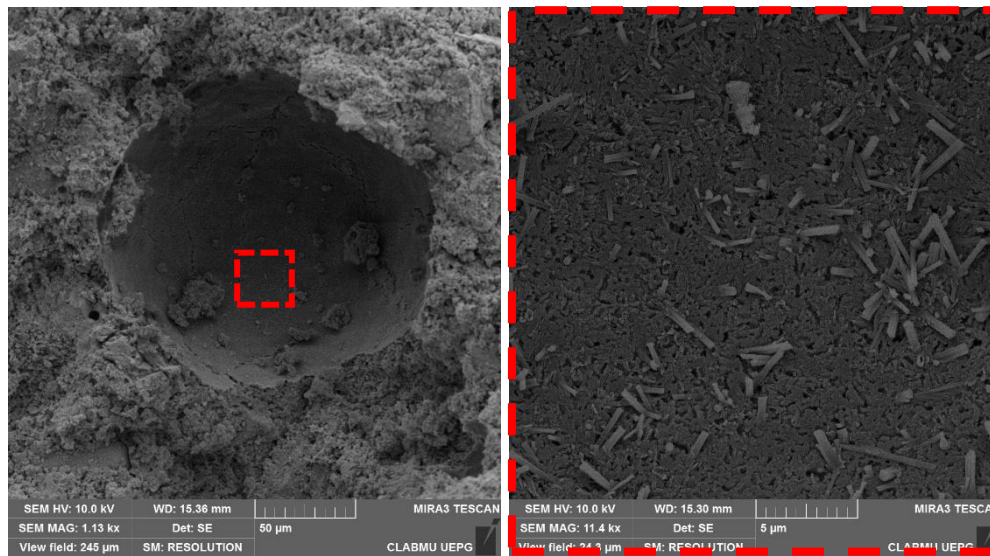
Fonte: A autora (2026).

Figura 5 - Cristais formados no interior do poro (T1 – 28 dias)



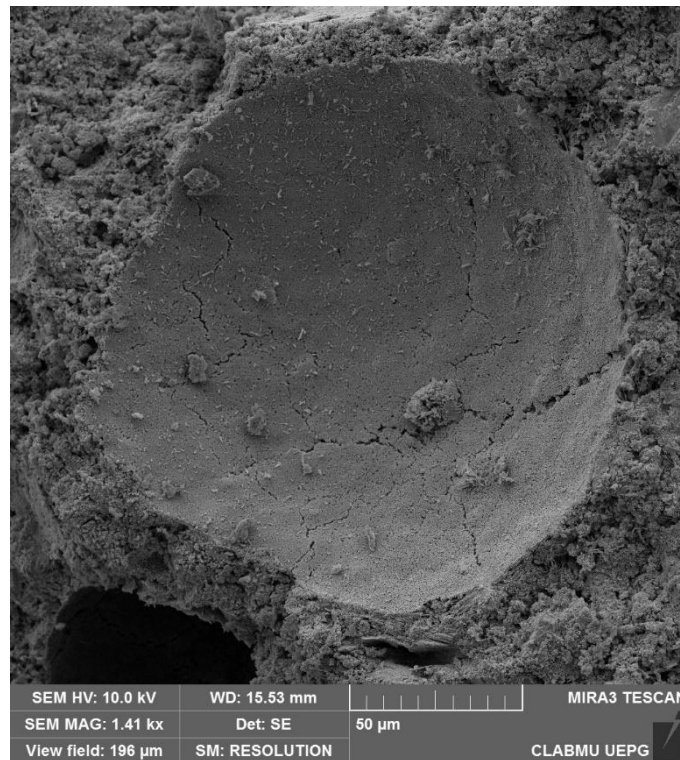
Fonte: A autora (2026).

Figura 6 - Cristais formados na parede do poro (T1 – 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

Figura 7 - Poro não preenchido por cristais (T1 – 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

Foram identificadas estruturas cristalinas com morfologia acicular distribuídas de forma homogênea na matriz e em regiões de poros. Essas formações apresentam características morfológicas compatíveis com etringita, frequentemente descrita na literatura como produto da hidratação do cimento Portland. As estruturas observadas apresentam-se sob a forma de agulhas finas organizadas em feixes e arranjos radiais, sem associação aparente com fissuras ou regiões de descontinuidade da matriz.

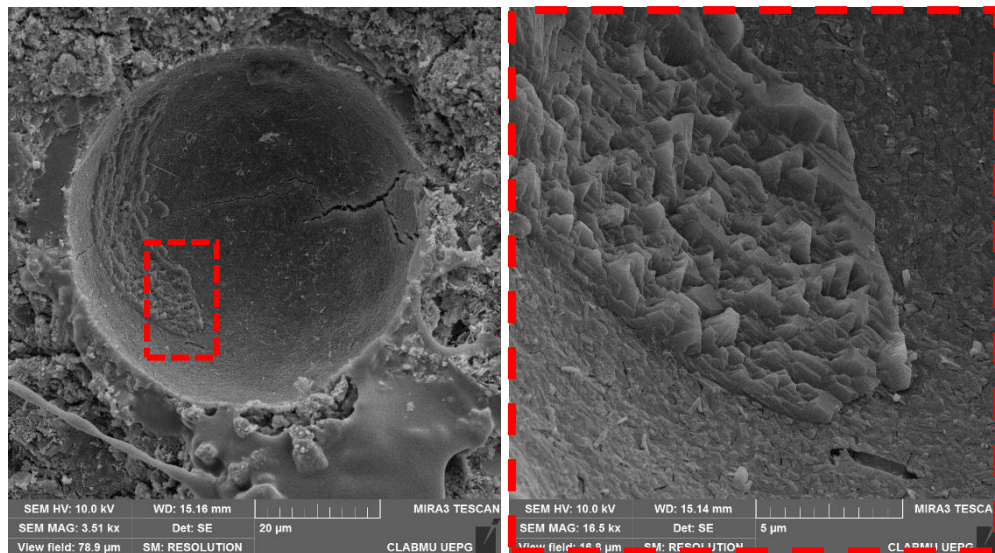
As micrografias também evidenciam poros não preenchidos por cristais e alguns parcialmente preenchidos por produtos de hidratação, esse fenômeno pode estar associado à continuidade das reações de hidratação. Dessa forma, a microestrutura do concreto T1 aos 28 dias caracteriza-se pela presença de produtos típicos da hidratação do cimento distribuídos de maneira relativamente homogênea na matriz, sem evidências visuais de descontinuidades ou alterações microestruturais relevantes nas regiões analisadas.

As micrografias do concreto T1 estão apresentadas na Figura 8 à Figura 11. Entretanto, nas regiões analisadas, os cristais foram observados predominantemente em espaços disponíveis da matriz e dos poros, sem associação evidente com regiões de descontinuidade ou microfissuras.

Também foram observados cristais compatíveis com etringita no interior da matriz, como mostrado na Figura 11, uma das principais distinções do mesmo traço aos 28 dias, foi o aspecto, aparentemente, mais denso da matriz que pode ser observado em todas as micrografias.

Foram observados vazios esféricos não preenchidos, apresentando formações não compatíveis com etringitas no interior, a Figura 8 mostra a presença de formações com morfologia lamelar e aspecto estratificado, exibindo crescimento em placas sobrepostas. Diferentemente da etringita, essas formações não apresentam hábito acicular, indicando tratar-se de uma fase distinta que pode estar associada ao processo normal de hidratação do cimento, não possuindo indícios de correlação com fenômenos expansivos.

Figura 8 - Formação não compatível com etringita no interior do poro (T1 – 180 dias)

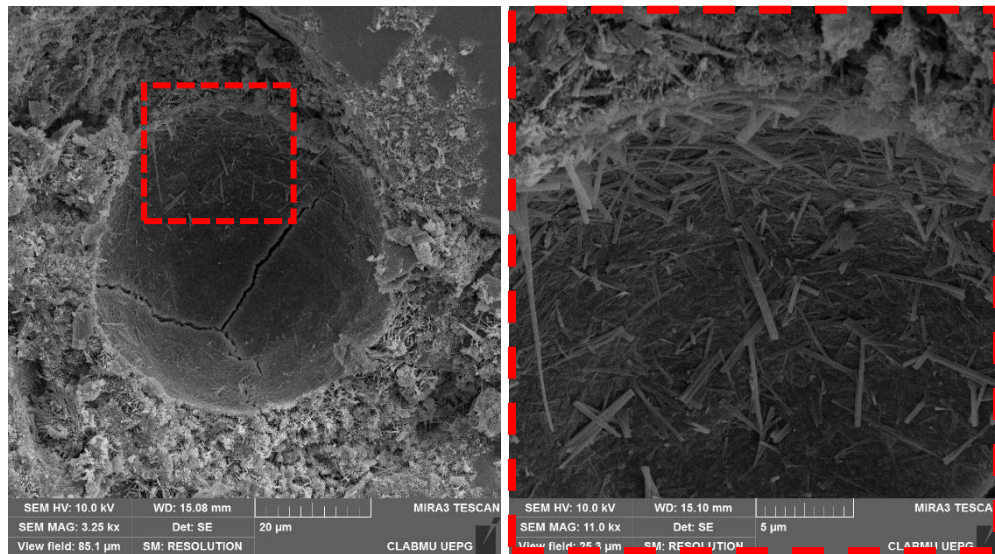


Fonte: A autora (2026).

Também foram observados poros com distribuição de cristais morfologicamente compatíveis com etringita dispersos em suas paredes, como mostrado na Figura 9 e na Figura 10. Os cristais se mostram mais alongados do que os presentes nos concretos T1 de 28 dias, o que pode indicar a evolução e crescimento desse produto.

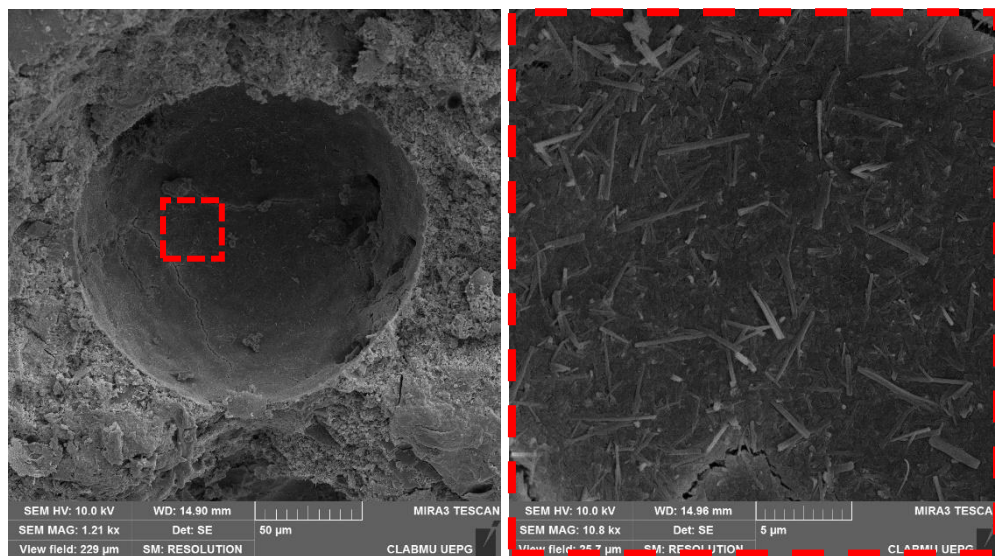
Além disso, foram observadas microfissuras no interior dos vazios, o que sugere a ocorrência de retração, possivelmente associada à perda de umidade. Esse comportamento está em concordância com os resultados do ensaio de variação dimensional, nos quais o tratamento T1 apresentou tendência de retração.

Figura 9 - Formação de cristais na parede do poro (T1 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

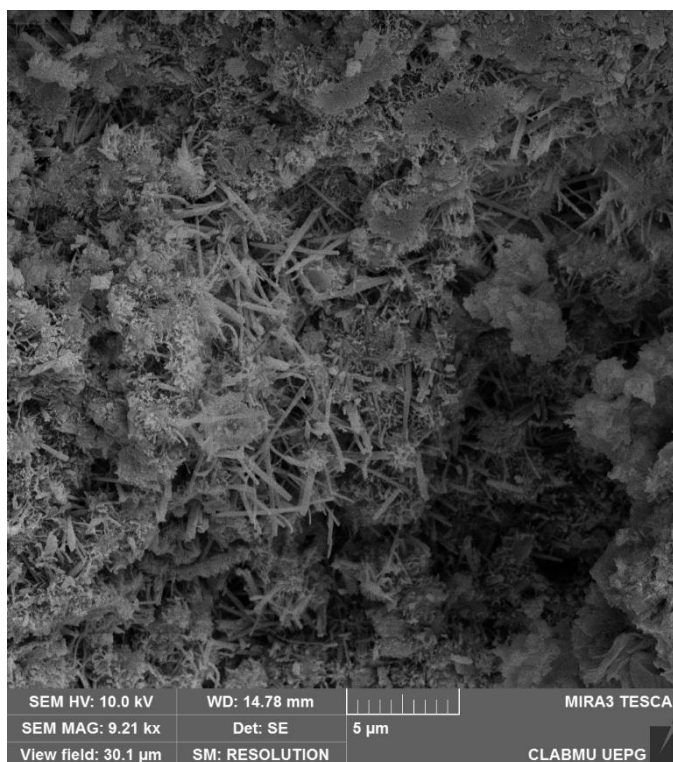
Figura 10 - Formação de cristais na parede do poro (T1 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Também foram observados cristais compatíveis com etringita no interior da matriz, como mostrado na Figura 11. Entretanto, nas regiões analisadas, os cristais foram observados predominantemente em espaços disponíveis da matriz e dos poros, sem associação evidente com regiões de descontinuidade ou microfissuras.

Figura 11 - Formação de cristais na matriz (T1 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

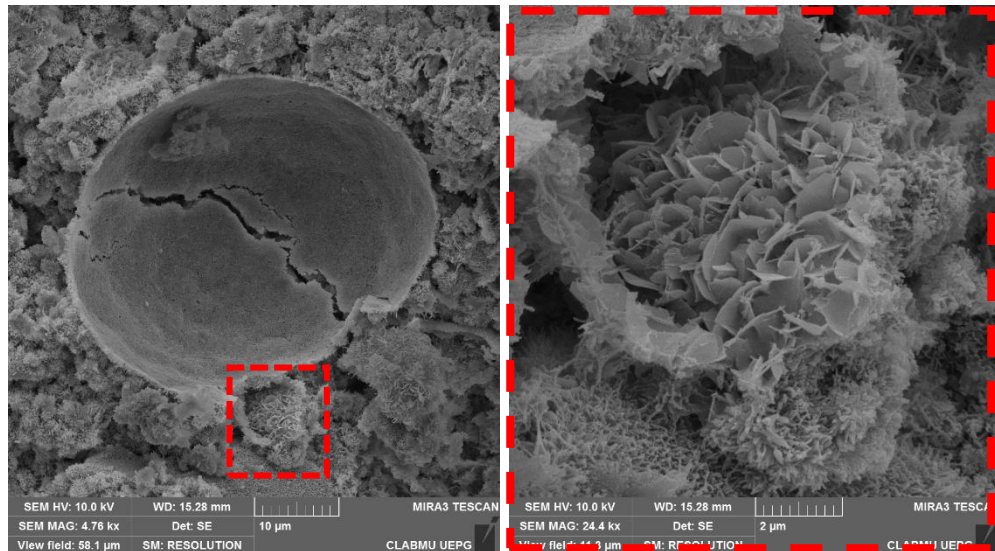
Em suma, comparativamente aos 28 dias, observou-se uma microestrutura mais densificada com maior desenvolvimento de produtos de hidratação compatíveis com etringita, distribuída, predominantemente, em vazios. Apesar desse aumento, não foram observadas evidências visuais de crescimento cristalino em regiões confinadas ou associadas a microfissuras nas áreas analisadas. Estas, por sua vez, podem estar associadas a processos de retração, o que está em concordância com a tendência observada no ensaio de variação dimensional.

A presença de vazios, já identificada em idades iniciais, permanece aos 180 dias, podendo contribuir para a absorção de água; entretanto, o preenchimento parcial desses espaços por produtos de hidratação tende a reduzir essa propriedade ao longo do tempo. Além disso, a presença de produtos de hidratação distribuídos na matriz e em regiões de poros é compatível com a redução da absorção de água e com o aumento da resistência à compressão observados nessa idade.

Aos 240 dias, observa-se uma estrutura mais coesa, indicando redução da porosidade efetiva ao longo do tempo, são observadas formações lamelares atribuídas à portlandita (Figura 12), bem como regiões com produtos de hidratação mais densos, sugerindo a evolução do gel C-S-H. Microfissuras pontuais ainda podem ser observadas (Figura 12 e Figura 13), entretanto, sem a presença de cristais

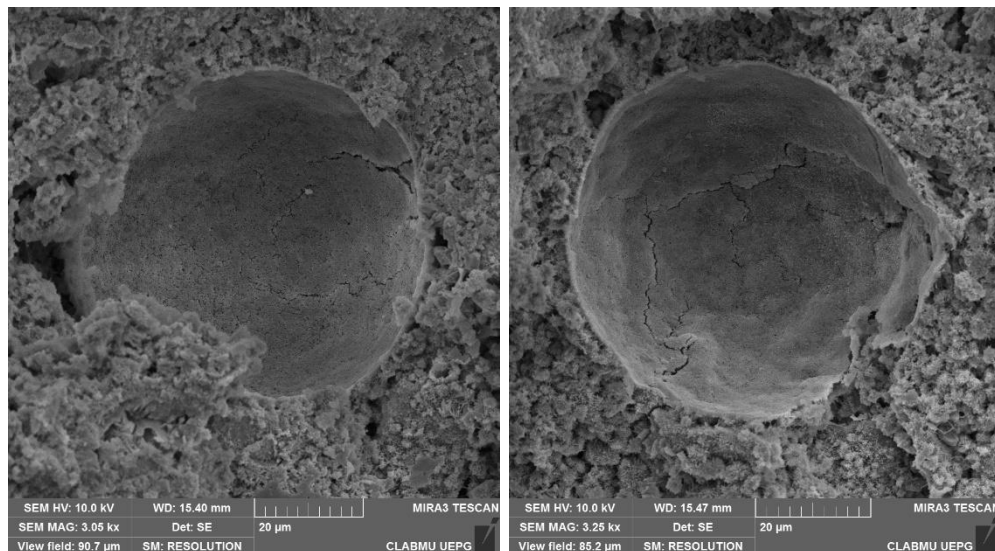
compatíveis com etringita, o que sugere que esta micro fissuração pode estar associada a processos de retração, como evidenciado por meio do ensaio de variação dimensional (Gráfico 6), não a processos expansivos.

Figura 12 – Poro não preenchido e formação de portlandita na matriz (T1 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

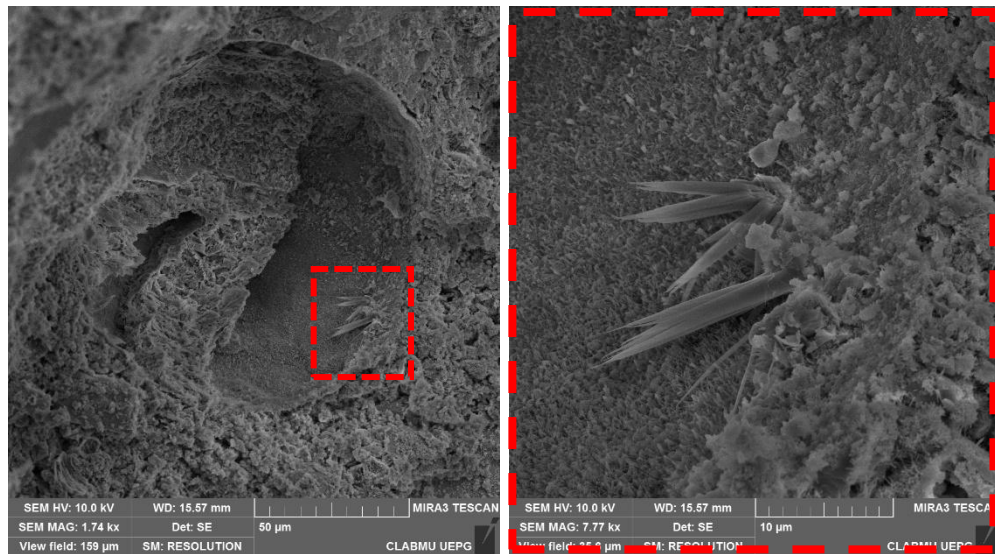
Figura 13 – Poros não preenchidos (T1 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

As formações aciculares, compatíveis com etringita, aparecem pontualmente, como mostrado na Figura 14, e distribuídas em espaços livres, sem indícios de crescimento significativo em regiões confinadas. Essa característica sugere que, nas regiões analisadas, as formações cristalinas permanecem predominantemente distribuídas em espaços livres, sem associação evidente com descontinuidades da matriz.

Figura 14 - Formação de cristais no interior do poro (T1 – 240 dias)



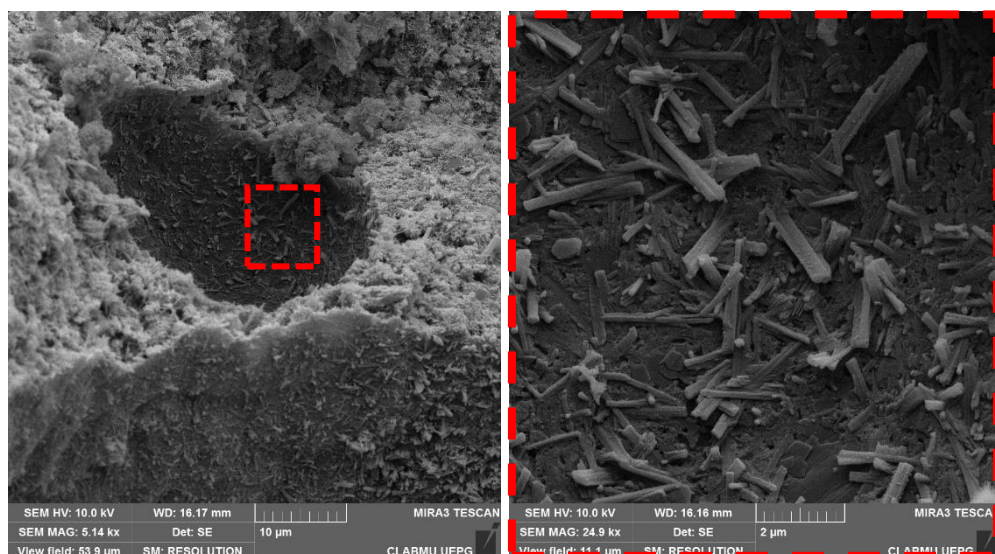
Fonte: A autora (2026).

O comportamento microestrutural observado está em concordância com os resultados macroscópicos, nos quais o T1 apresentou tendência de retração, redução gradual da absorção de água e ganho de resistência à compressão ao longo do tempo, indicando comportamento microestrutural relativamente homogêneo nas regiões analisadas, sem evidências visuais relevantes de discontinuidades associadas ao crescimento cristalino.

4.3.2 T2

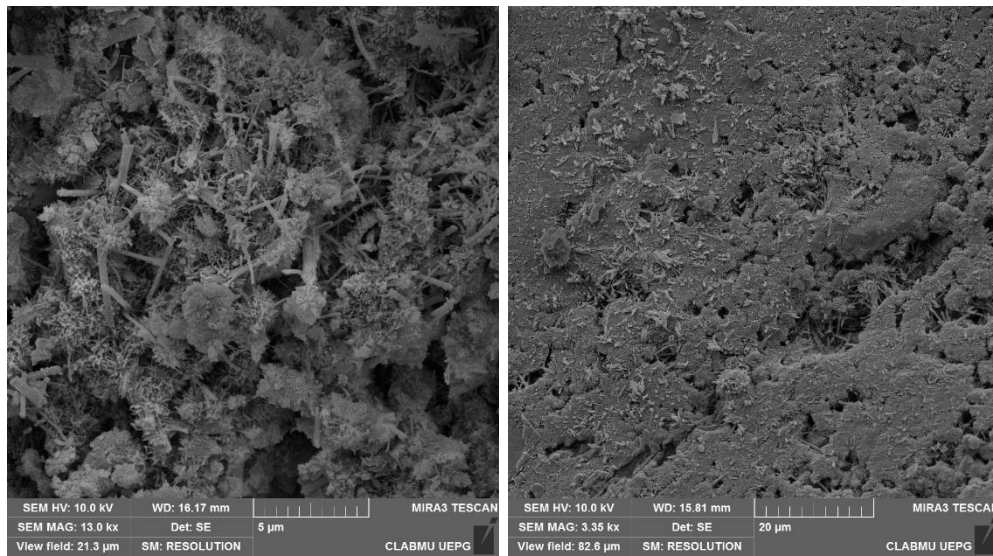
As MEV's do concreto T2, 28 dias, são mostradas das Figura 15 a Figura 18.

Figura 15 - Cristais formados na parede do poro (T2 – 28 dias)



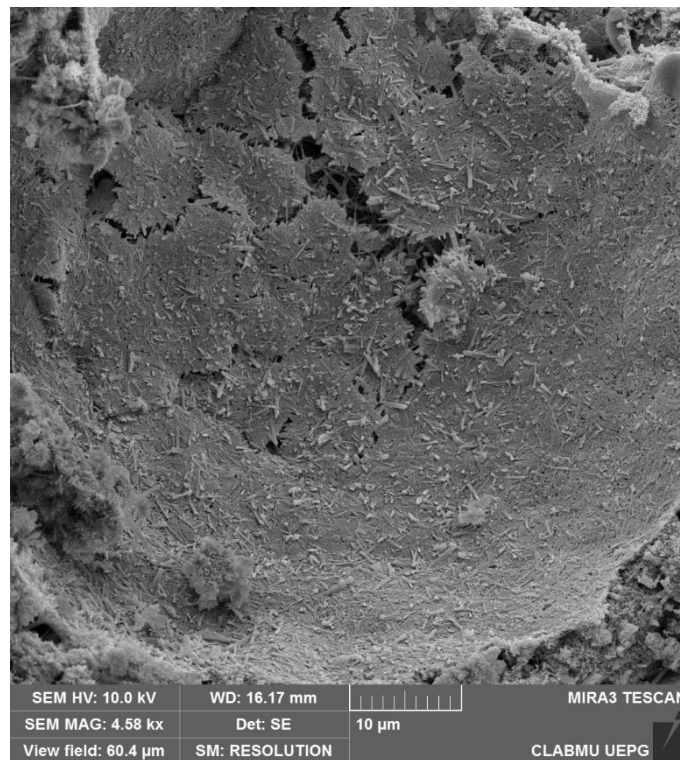
Fonte: A autora (2026).

Figura 16 - Cristais formados na matriz (T2 – 28 dias)



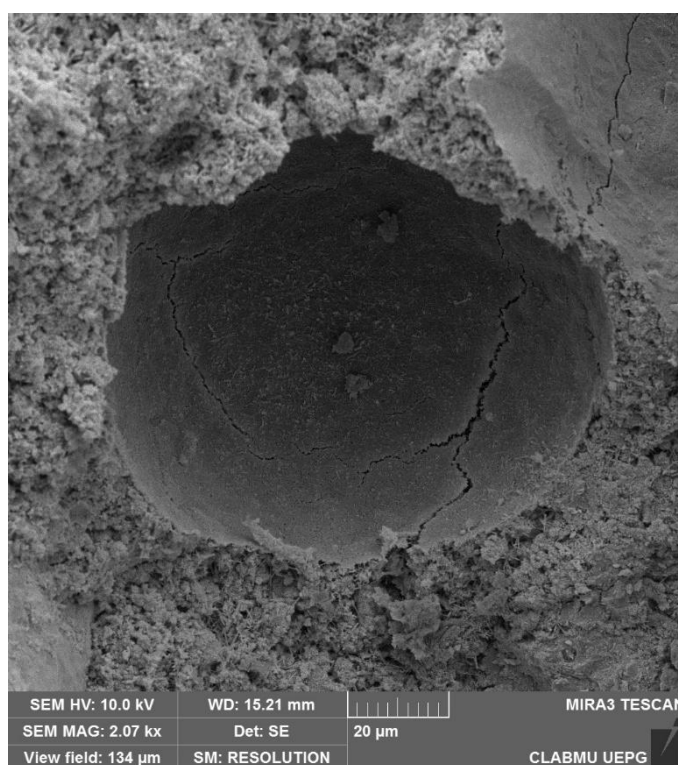
Fonte: A autora (2026).

Figura 17 - Cristais em microfissuras (T2 - 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

Figura 18 – Microfissuras no interior do poro (T2 - 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

As micrografias evidenciam produtos típicos de hidratação do cimento, com predominância do gel C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) (Figura 16), assim como formações cristalinas aciculares. Em comparação ao concreto T1 de mesma idade, há um aumento na ocorrência de estruturas aciculares que se apresentam longas, espessas e organizadas em feixes e aglomerados, espalhadas principalmente sobre as paredes dos poros, mas também houve registro em microfissuras.

O comportamento observado na Figura 17 sugere a precipitação de produtos cristalinos em regiões da matriz cimentícia e em espaços vazios, indicando possível preenchimento parcial desses locais. Entretanto, a confirmação de processos de colmatação requer análise integrada com os resultados de absorção de água e evolução microestrutural nas idades posteriores. Entretanto, apesar da maior quantidade de etringita observada, não foram identificadas evidências de crescimento expansivo associado à formação dessas fases, como fissuração induzida ou desagregação da matriz.

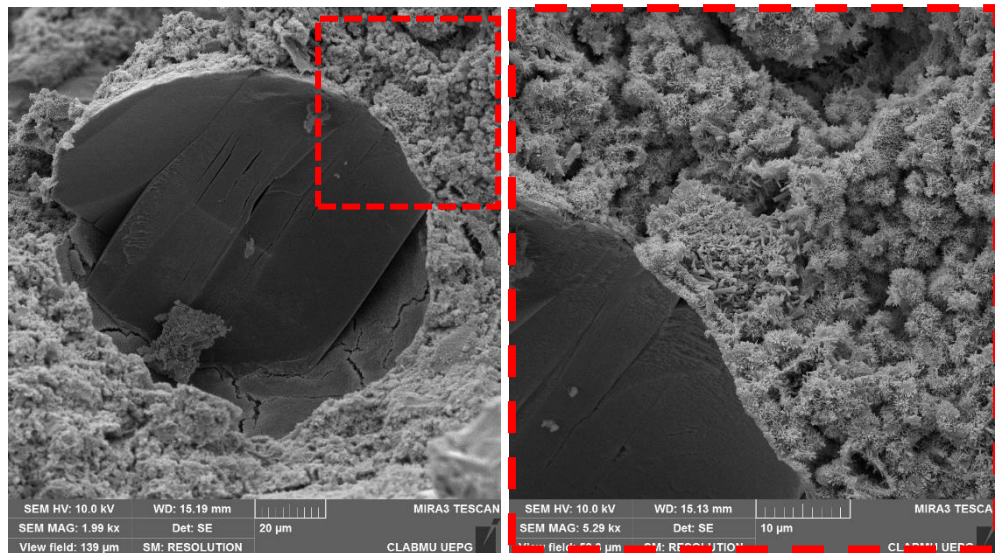
Esse comportamento microestrutural é coerente com os resultados de absorção de água, que indicam redução da conectividade capilar ao longo do tempo, sugerindo que a presença desses produtos pode estar associada às alterações

observadas nas propriedades físicas do material. A interpretação desse comportamento será aprofundada por meio da análise conjunta dos resultados obtidos nas idades posteriores.

As micrografias do concreto T2 de 180 dias evidenciaram intensa formação de produtos cristalinos, com predominância de estruturas aciculares características de etringita, frequentemente organizadas em aglomerados. Observa-se que tais formações ocorrem tanto na matriz e no interior de vazios quanto ao longo de fissuras e interfaces, indicando crescimento em espaços confinados.

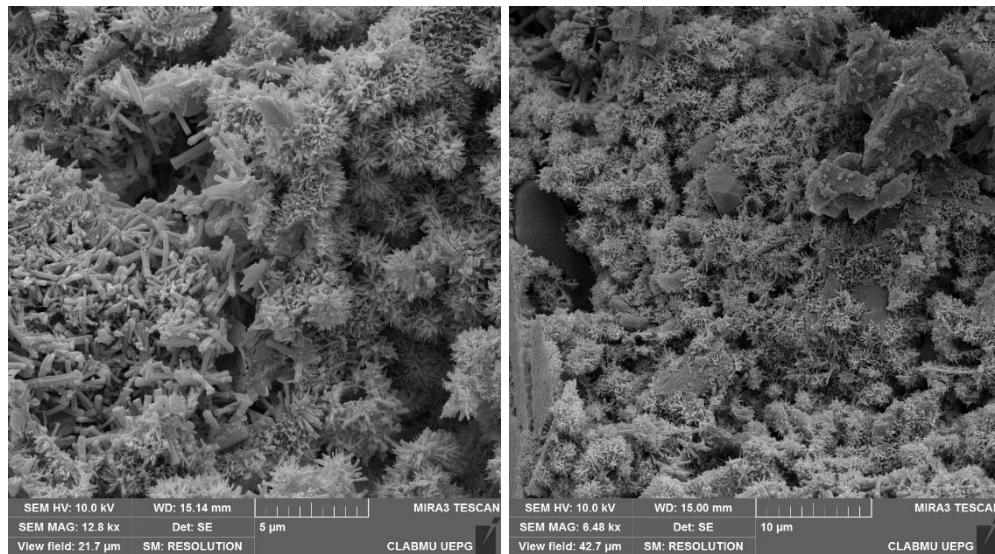
A Figura 19 e a Figura 20 mostram a formação de cristais compatíveis com etringita dentro da matriz cimentícia, algo que já havia sido observado na idade de 28 dias (Figura 16), porém, aos 180 dias, aparece de forma mais intensa.

Figura 19 - Formação de cristais na matriz (T2 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

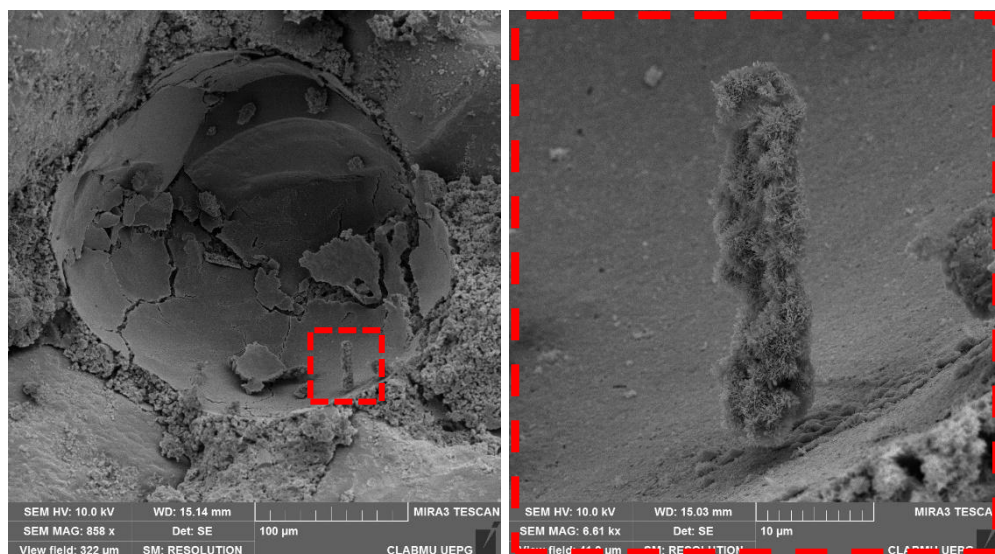
Figura 20 - Formação de cristais na matriz (T2 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Já a Figura 21 e a Figura 22 exibem a continuidade da formação de produtos cristalinos observada aos 28 dias, comportamento compatível com a evolução das reações ocorridas no interior da matriz cimentícia.

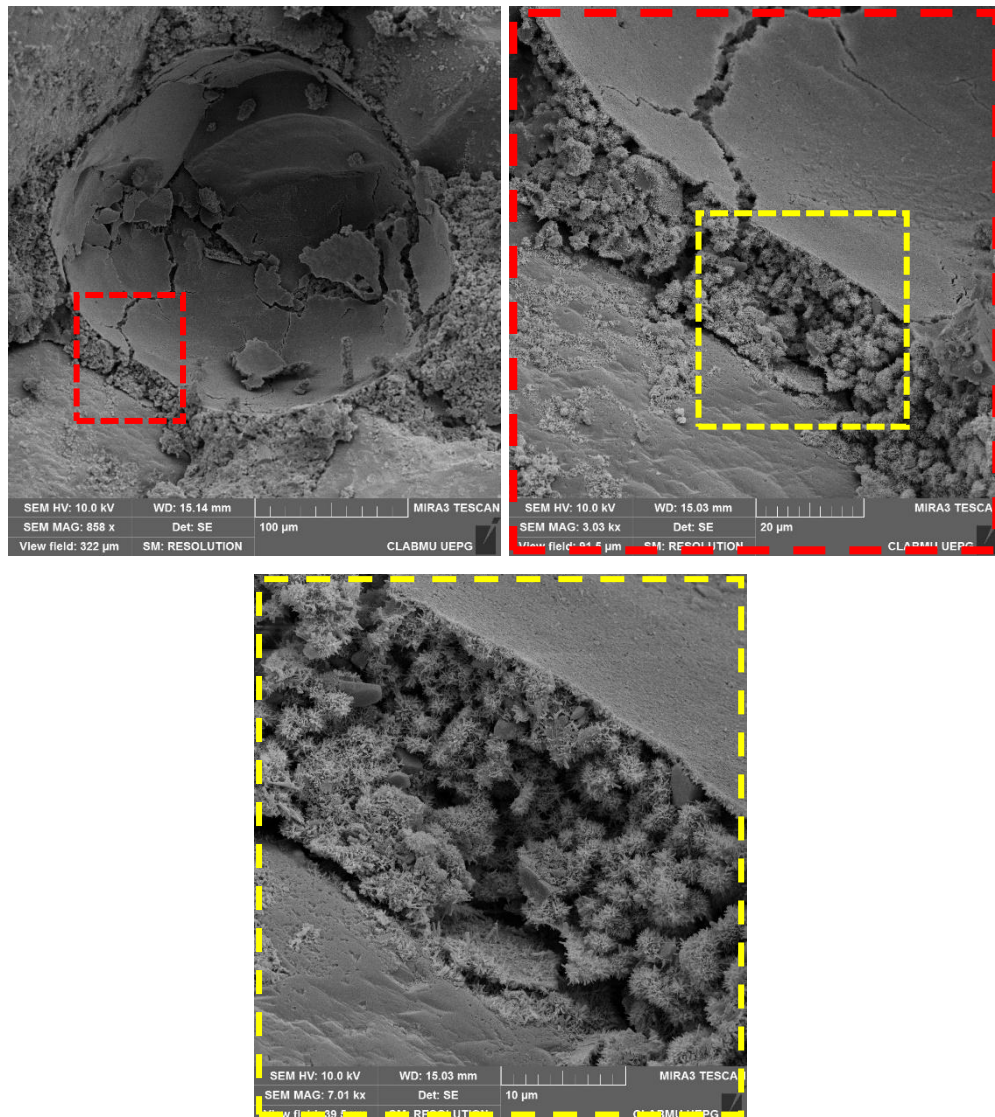
Figura 21 - Formação de cristais no interior do poro (T2 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Também é possível observar que o interior do poro retratado apresenta regiões de deslocamento além de microfissuras e interfaces que são preenchidas por cristais (Figura 22). A presença de cristais em regiões confinadas indica um contexto potencialmente favorável ao desenvolvimento de tensões internas, aspecto que deve ser analisado em conjunto com os demais resultados experimentais.

Figura 22 - Formação de cristais em espaço confinado (T2 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Portanto, ao comparar o T2 de 28 dias com o mesmo traço aos 180 dias, verificou-se pronunciada evolução dos cristais identificados como etringita, que, antes, apareciam dispersos nas paredes dos poros e na matriz, assim como em microfissuras, em menor quantidade, indicando a continuidade das reações associadas à formação de cristais de etringita.

Em comparação com o T1 da mesma idade, o tratamento sem adição de gesso (T1) apresentou uma matriz mais densa e relativamente homogênea, com presença pontual de produtos hidratados, incluindo formações aciculares atribuídas à etringita, porém em menor quantidade e distribuição mais localizada. Além disso, notou-se o preenchimento parcial de vazios ao longo do tempo, sem indícios de

crescimento cristalino em regiões confinadas que possam gerar tensões internas significativas.

Em contrapartida, o concreto T2 apresentou intensa formação de produtos cristalinos, com predominância de estruturas aciculares bem desenvolvidas. Essa maior quantidade de cristais deve estar diretamente associada à presença de sulfatos provenientes do gesso, favorecendo a continuidade das reações ao longo do tempo. Adicionalmente, observou-se que esses cristais, frequentemente, crescem em espaços confinados, como poros e microfissuras, o que pode gerar tensões internas e contribuir para o desenvolvimento de descontinuidades na matriz. Esse comportamento foi menos evidente no T1, indicando diferenças na evolução microestrutural entre os tratamentos.

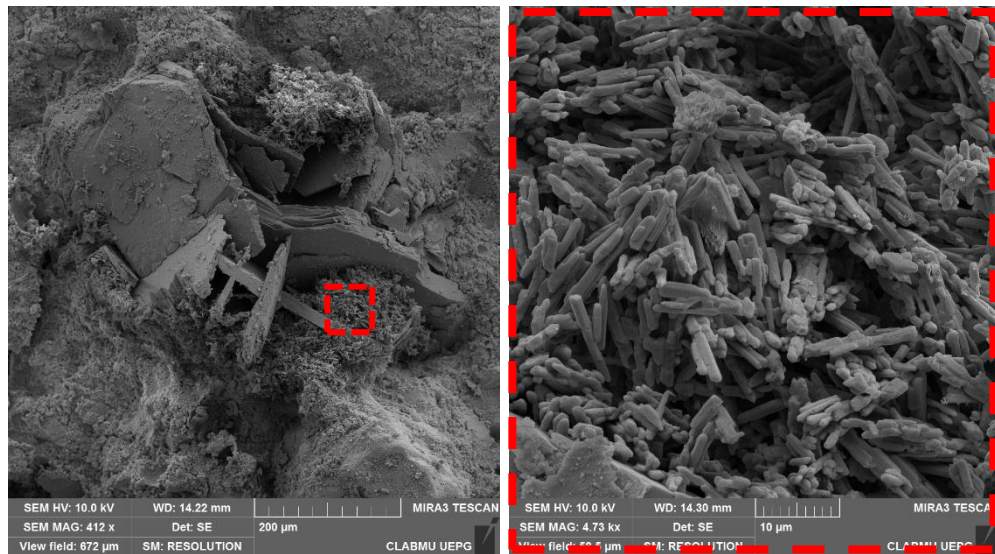
Por último, é possível correlacionar o que foi observado nas MEV's com os resultados dos ensaios realizados no concreto endurecido. Com essa idade, foi observada redução da absorção de água e aumento da resistência à compressão, o que pode ser entendido como coerente com o observado nas micrografias, pois os cristais aparecem preenchendo interfaces, microfissuras e se desenvolvendo em regiões de vazios, causando a colmatação dessas áreas.

O T2 aos 240 dias apresentou continuidade na formação de produtos de hidratação, com destaque para a presença significativa de estruturas aciculares compatíveis com etringita, frequentemente organizadas em feixes e aglomerados. Esses cristais são observados tanto no interior de vazios quanto na matriz e, em alguns casos, associados a microfissuras.

Em comparação aos 180 dias, foi observada a manutenção da elevada quantidade de cristais compatíveis com etringita, bem como o avanço no preenchimento de cavidades, indicando a continuidade das reações associadas à presença de sulfatos provenientes do gesso.

A Figura 23 mostra a formação de cristais na matriz, esse preenchimento contribui para a densificação local da matriz, o que é chamado de colmatação, entretanto, essa densificação não é homogênea.

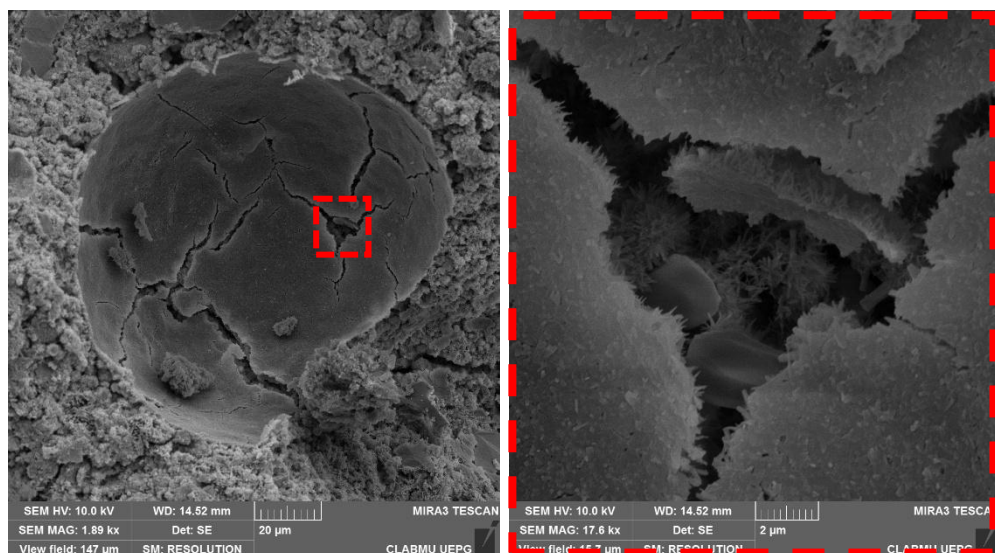
Figura 23 - Formação de cristais na matriz (T2 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

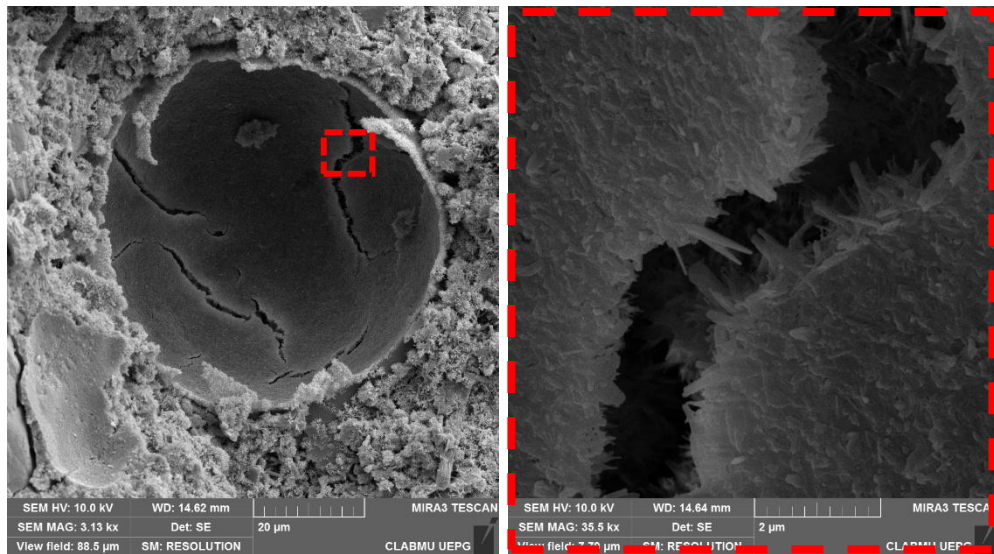
A Figura 24 e a Figura 25 exibem elevada ocorrência de microfissuras associadas a formações cristalinas morfológicamente compatíveis com etringita. A associação entre crescimento cristalino e regiões fissuradas é compatível com mecanismos descritos na literatura para sistemas submetidos à disponibilidade de sulfatos. Dessa forma, o sistema apresenta comportamento heterogêneo, no qual coexistem processos de densificação e geração de descontinuidades.

Figura 24 - Formação de cristais no interior de microfissura (T2 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

Figura 25 - Formação de cristais no interior de microfissura (T2 – 240 dias)



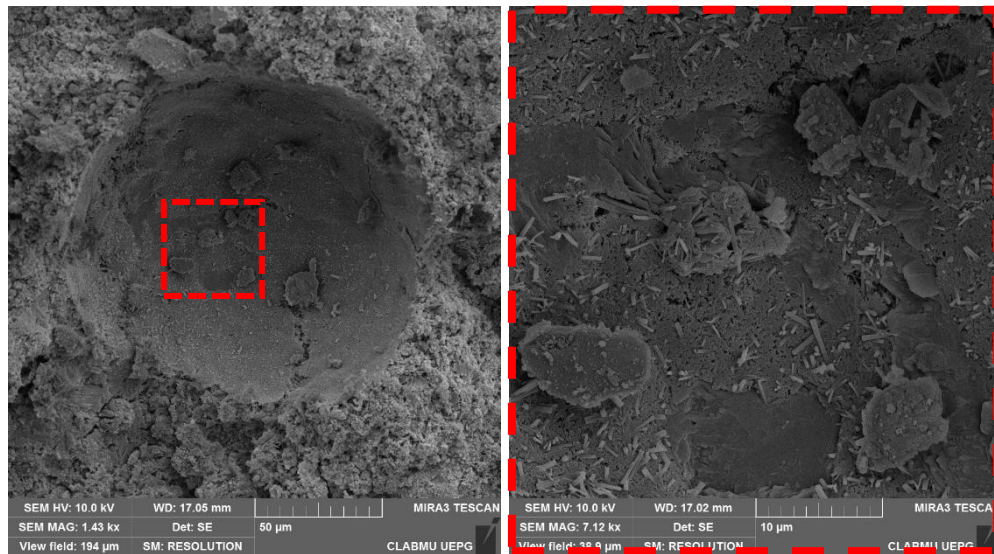
Fonte: A autora (2026).

O comportamento observado está em concordância com os resultados macroscópicos, sugerindo colmatção da matriz por formação de cristais. Além disso, observou-se que a resistência à compressão pode ser afetada por efeitos concorrentes de preenchimento de poros e desenvolvimento de micro fissuração, mantendo-se semelhante à resistência aos 180 dias, enquanto a absorção de água permaneceu abaixo do resultado apresentado aos 28 dias, concordando com a hipótese de colmatção dos vazios.

4.3.3 T3

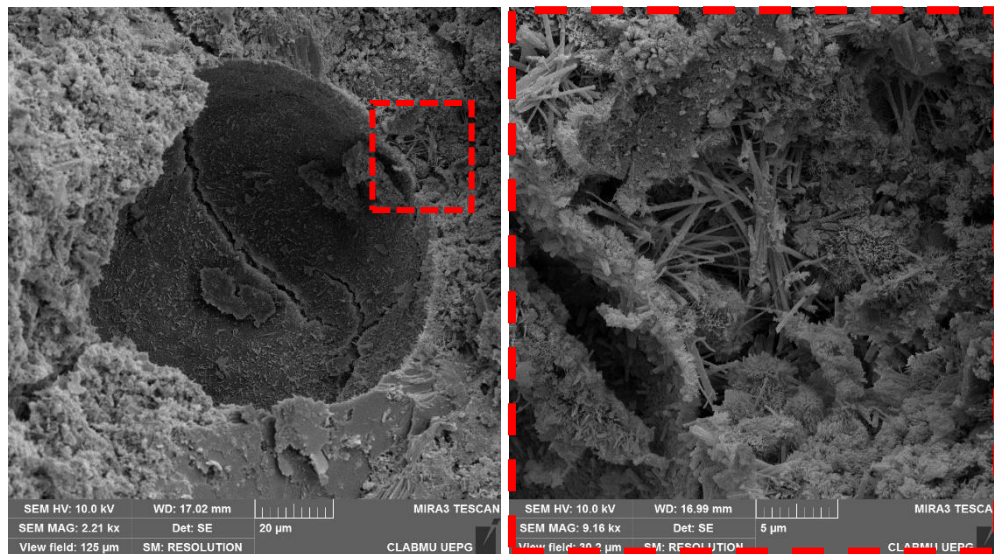
O concreto T3 (moldado com agregado reciclado) de 28 dias apresentou microestrutura mais heterogênea e micro fissurada em comparação aos concretos moldados com agregado natural, as micrografias são apresentadas nas Figura 26 a Figura 29.

Figura 26 - Cristais formados na parede do poro (T3 – 28 dias)



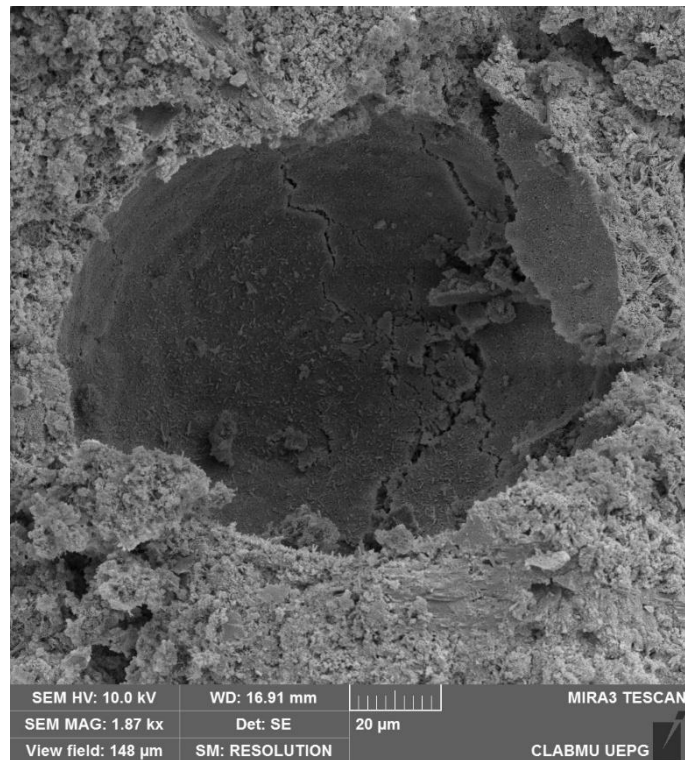
Fonte: A autora (2026).

Figura 27 - Cristais formados na matriz (T3 – 28 dias)



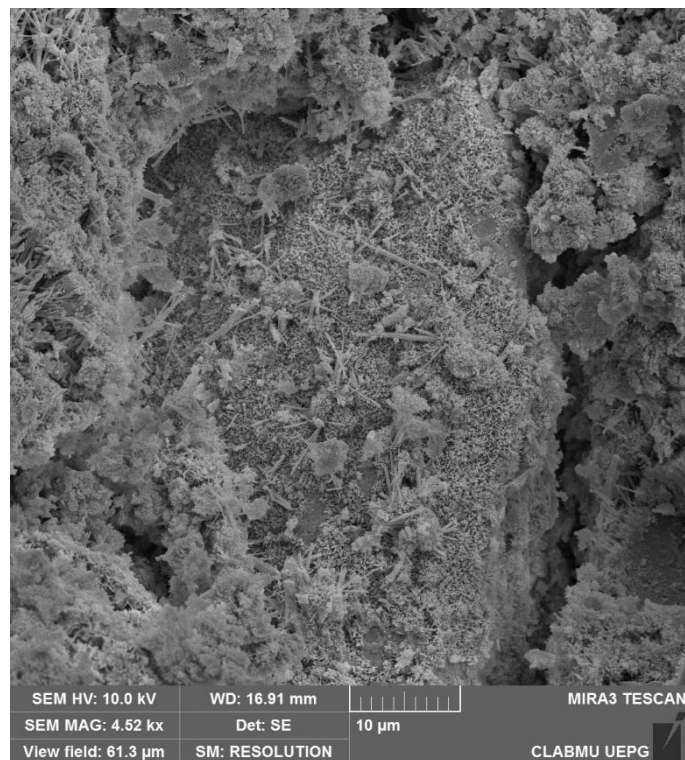
Fonte: A autora (2026).

Figura 28 – Microfissuras no interior do poro (T3 - 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

Figura 29 – Cristais formados na matriz (T3 - 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

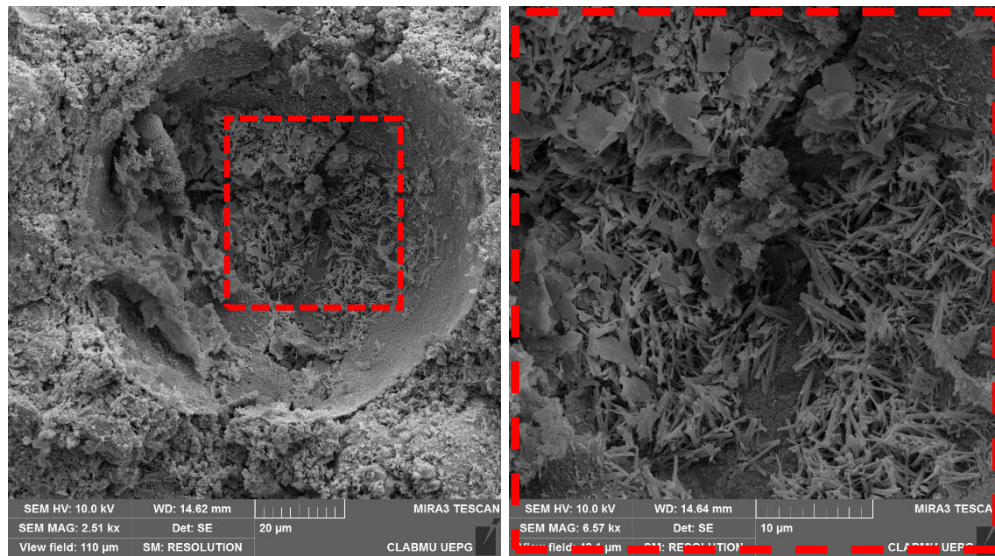
Foram identificadas formações cristalinas com morfologia acicular, típicas de etringita, distribuídas principalmente em poros e superfícies da matriz cimentícia. A elevada quantidade de poros e microfissuras presentes no ARCO cria condições favoráveis para a precipitação de produtos de hidratação e reação, promovendo o preenchimento parcial dos vazios. Esse fenômeno caracteriza um processo de colmatação dos poros, que contribui para a densificação local da microestrutura ao longo do tempo (Kruger, 2021; Pereira, 2018).

Entretanto, a distribuição das formações aciculares apresenta-se menos homogênea quando comparada ao concreto T2 e mais disposta na matriz do que em micro poros e microfissuras, se assemelhando mais ao concreto T1 neste quesito. Apesar desse tratamento apresentar mais microfissuras do que o T1, essas ocorrências podem estar associadas às características inerentes ao agregado reciclado e à heterogeneidade da matriz produzida com ARCO. Nas regiões analisadas, não foram observadas formações cristalinas associadas diretamente a essas descontinuidades.

Aos 180 dias, esse tratamento manteve a configuração heterogênea já observada aos 28 dias, porém, notou-se maior presença de microfissuras no interior dos poros e maior formação de cristais morfologicamente compatíveis com etringita, como mostrado na Figura 30 a Figura 32.

A Figura 30 evidencia elevada formação de cristais no interior do poro que se encontram aglomerados nas paredes, observando-se o preenchimento parcial desse vazio. Também é possível verificar a existência de microfissuras no interior e na matriz, além da formação de produtos aciculares na matriz. Por se tratar de um concreto moldado com agregado reciclado de concreto, essas formações podem ser provenientes de fases anidras do concreto original.

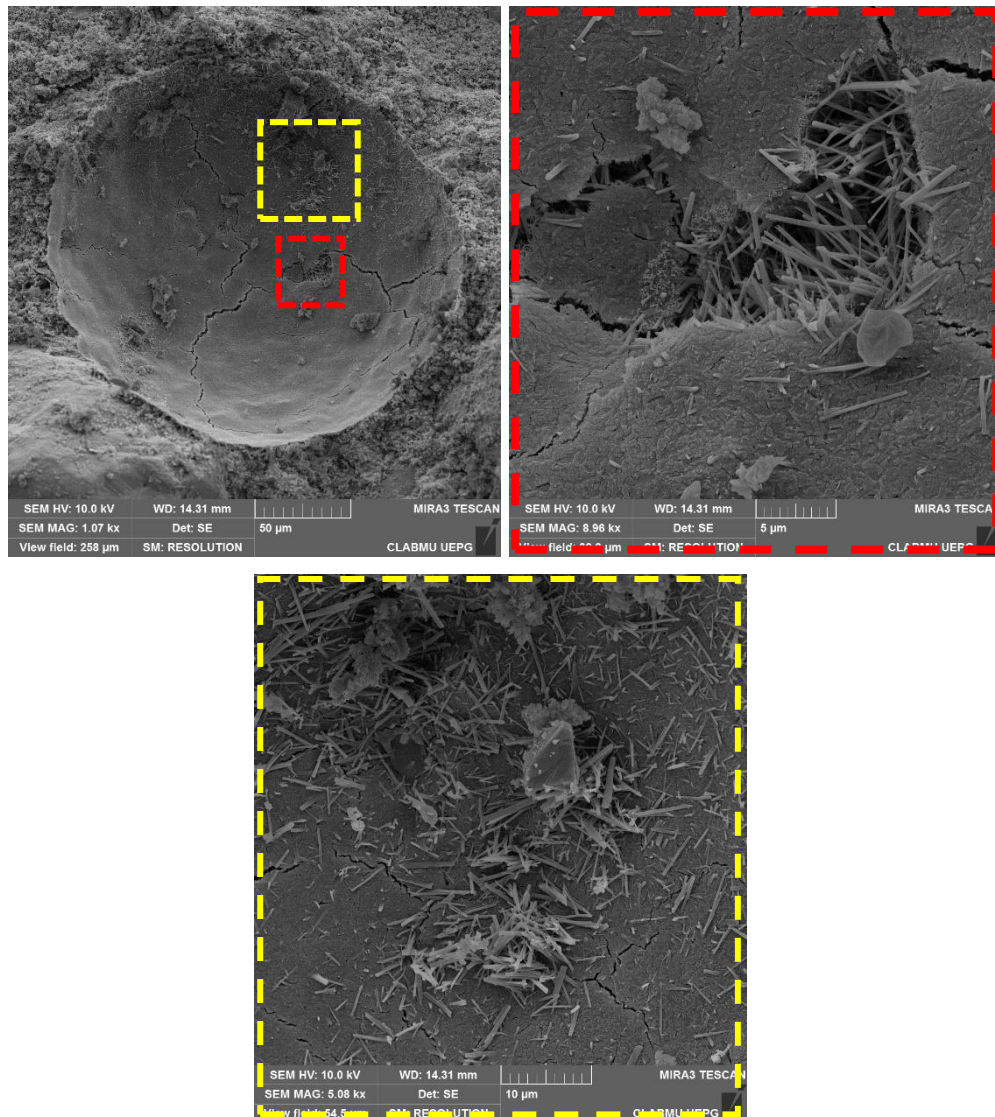
Figura 30 - Formação de cristais no interior do poro (T3 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Já a Figura 31 exibe a formação do mesmo tipo de cristais tanto no interior do poro quanto no interior de microfissuras. Essas formações parecem mais finas e alongadas do que as registradas no T3 aos 28 dias, o que pode indicar evolução dos produtos de hidratação entre 28 e 180 dias.

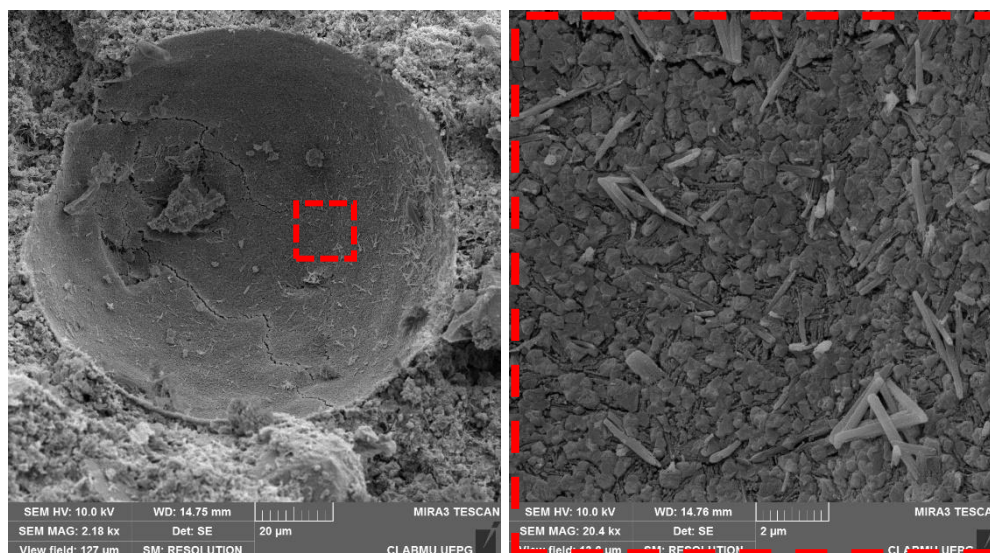
Figura 31 - Formação de cristais em microfissuras e no interior do poro (T3 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

A Figura 32 mostra um poro com menor formação de cristais que estão mais dispersos na parede, assim como é possível perceber a presença constante de microfissuras no interior do poro e cristais dispersos, também, na matriz.

Figura 32 - Formação de cristais dispersos no interior do poro (T3 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Em suma, o concreto apresentou uma microestrutura parecida com a vista aos 28 dias, exceto pela evolução observada do cenário, que pode estar associada à continuidade das reações de hidratação. Aos 28 dias, o concreto T3 já apresentava uma microestrutura heterogênea, caracterizada pela presença de vazios e superfícies irregulares. Nessa idade, observavam-se produtos de hidratação distribuídos de forma menos organizada, com formação pontual de estruturas aciculares.

Já aos 180 dias, verifica-se uma evolução desses produtos, com maior desenvolvimento de fases hidratadas, incluindo formações compatíveis com etringita e C-S-H, além de um preenchimento parcial de vazios. No entanto, diferentemente do observado em sistemas com maior disponibilidade de sulfatos, esse preenchimento não ocorre de forma suficiente para promover uma densificação efetiva da matriz, permanecendo uma estrutura relativamente porosa e heterogênea. Ainda foi observada, ocorrência de microfissuras e descontinuidades parcialmente preenchidas por cristais.

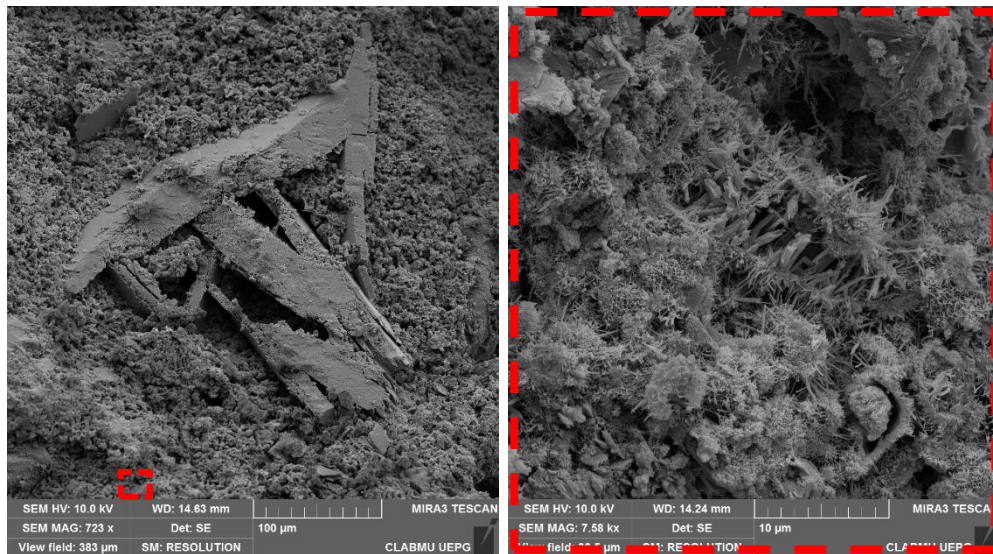
Do ponto de vista macroscópico, essa evolução microestrutural está em concordância com os resultados de absorção de água, que apresentou uma redução em comparação com o resultado aos 28 dias, e com o resultado de resistência à compressão que apresentou aumento, estes resultados podem estar associados ao

preenchimento parcial observado nas microfissuras e poros, pelos cristais. Em relação à variação dimensional, a estrutura mais aberta e menos confinada favorece maior mobilidade interna, o que pode estar relacionado ao comportamento de variação dimensional observado para esse tratamento.

Este concreto, aos 240 dias, mantém a característica de heterogeneidade da microestrutura já observada aos 180 e 28 dias, apresentando regiões densas intercaladas com áreas porosas. Apesar a continuidade das reações de hidratação, a matriz não apresentou densificação significativa comparada às idades anteriores, como pode ser observado nas Figura 33 a Figura 35.

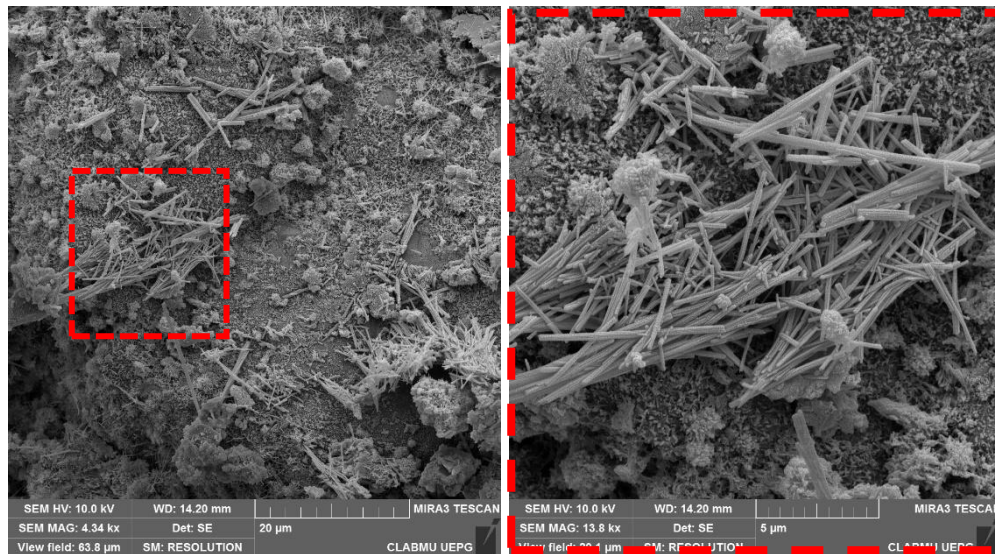
As Figura 33 e Figura 34 mostram a formação de cristais aciculares dispersas na matriz do concreto, como já havia sido observado anteriormente. Apesar dessas formações, a matriz ainda apresenta vazios, não estando completamente densificada. Permanecem evidentes cavidades de diferentes dimensões, algumas parcialmente preenchidas por produtos de hidratação, enquanto outras permanecem abertas.

Figura 33 - Formação de cristais na matriz (T3 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

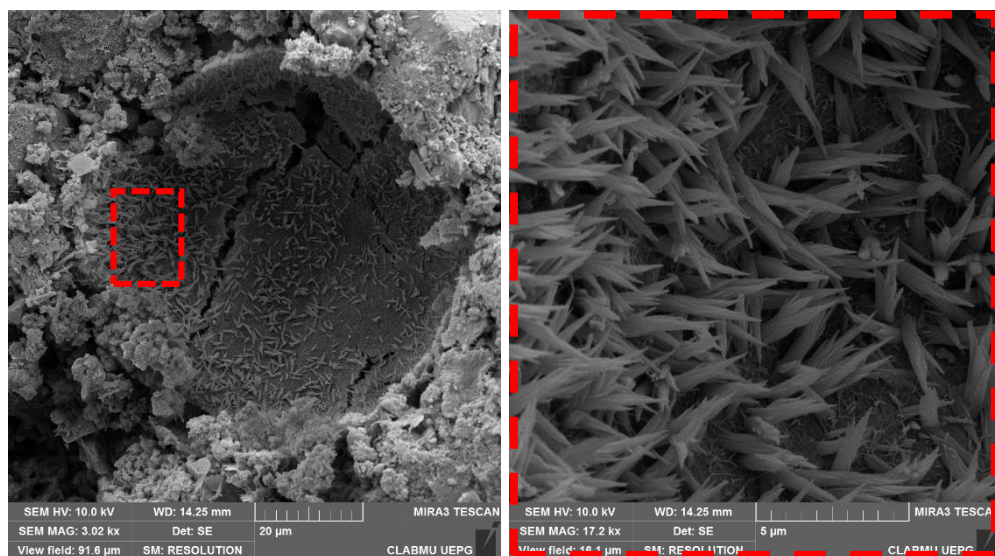
Figura 34 - Formação de cristais na matriz (T3 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

Já a Figura 35 mostra a formação dos mesmos cristais no interior de um poro, assim como é observada a ocorrência de micro fissuração no mesmo poro. Os cristais, apesar de existirem, encontram-se dispersos na superfície, não em regiões confinadas como microfissuras, sugerindo que, nas regiões analisadas, as formações cristalinas permanecem predominantemente distribuídas em espaços disponíveis da matriz. O que é coerente uma vez que não foi adicionado sulfato ao traço, sendo o comportamento do T3 influenciado pelo uso de agregado reciclado.

Figura 35 - Formação de cristais no interior do poro (T3 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

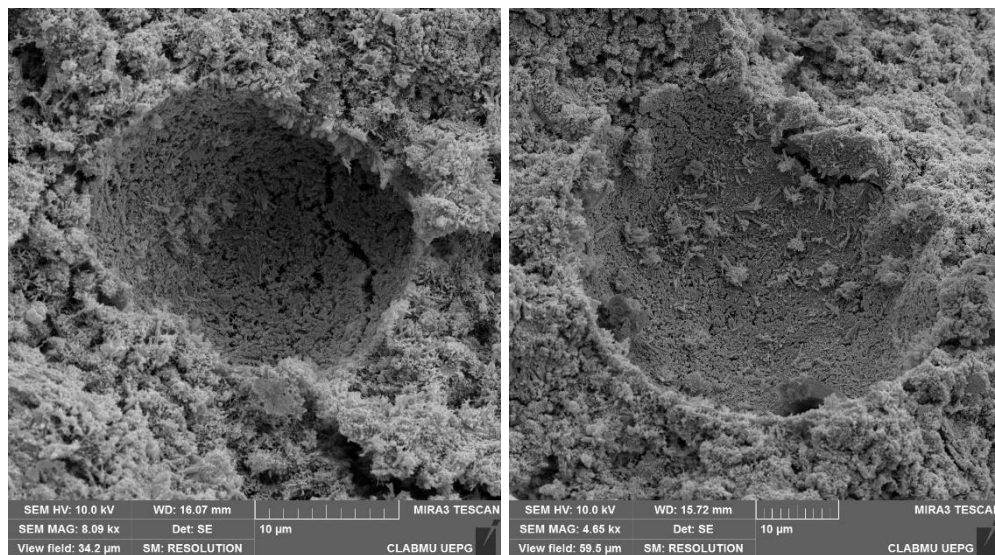
O comportamento observado é coerente com os resultados dos ensaios no concreto endurecido assim como mostra um sistema com poucas alterações em

relação ao já observado nas idades anteriores. O resultado de absorção de água evidenciou aumento, enquanto a resistência à compressão demonstrou redução, o que pode estar associado à presença de vazios observada nas micrografias. Essa característica também pode estar associada à tendência de variação dimensional positiva, que proporciona maior mobilidade interna ao sistema, assim como na idade de 180 dias, uma vez que não há indícios de expansão por geração de cristais pressionando as paredes dos poros.

4.3.4 T4

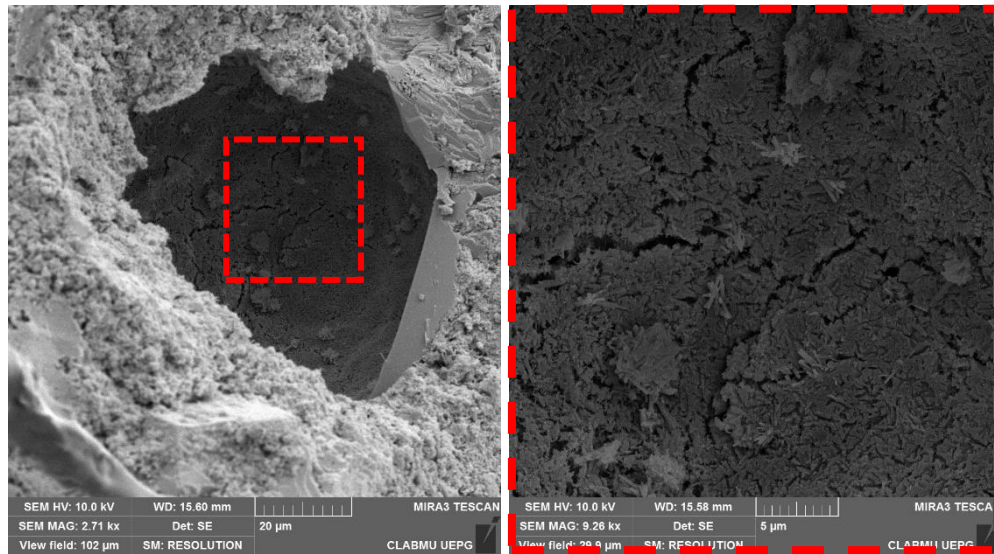
As Figura 36 a Figura 39 apresentarão as micrografias referentes ao concreto T4 de 28 dias que foi moldado com agregado reciclado de concreto e adição de gesso em sua composição. Este tratamento apresentou a maior frequência de estruturas cristalinas com morfologia compatível com etringita entre os tratamentos avaliados aos 28 dias.

Figura 36 - Cristais formados no interior dos poros (T4 – 28 dias)



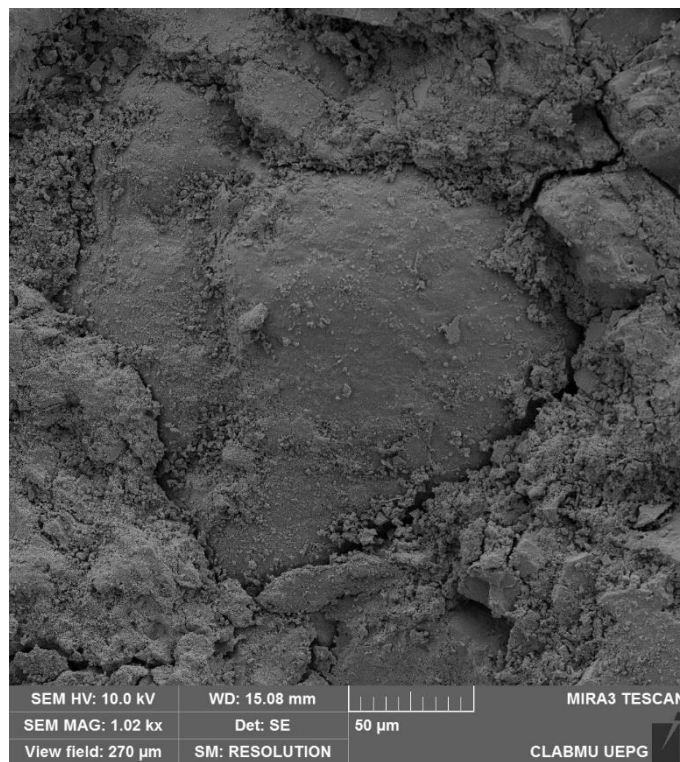
Fonte: A autora (2026).

Figura 37 - Cristais formados no interior do poro (T4 – 28 dias)



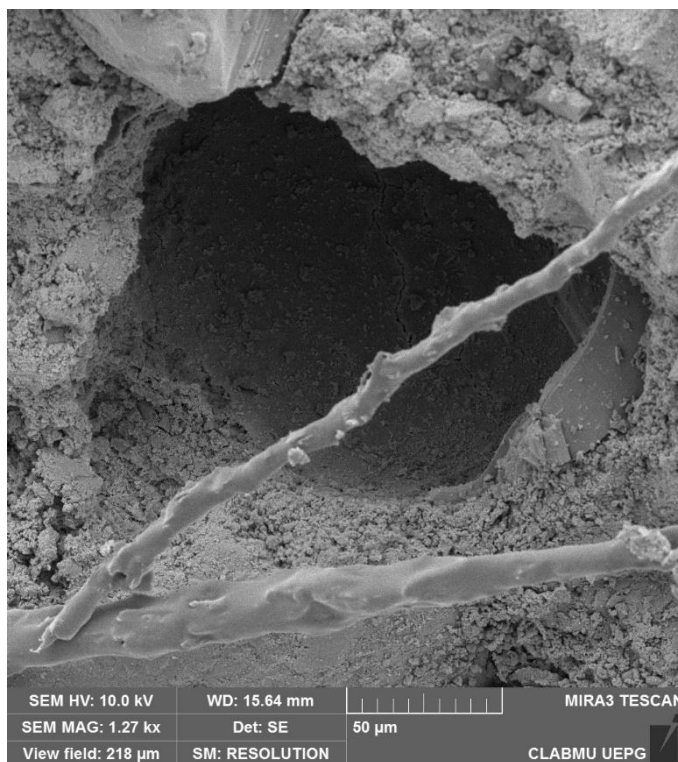
Fonte: A autora (2026).

Figura 38 – Microfissuras na matriz (T4 – 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

Figura 39 – Microfissuras na parede do poro (T4 – 28 dias)



Fonte: A autora (2026).

Este tratamento evidenciou microestrutura significativamente distinta dos demais, apresentando uma matriz com regiões, visualmente, menos coesas, presença de vazios e superfícies com aspecto mais irregular e fragmentado. Além disso, foram identificadas formações aciculares compatíveis com etringita, distribuídas de forma irregular nos poros. Diferentemente do comportamento observado nos tratamentos T1 e T2, essas formações apresentam menor organização em feixes e maior dispersão, indicando um ambiente de crescimento menos controlado.

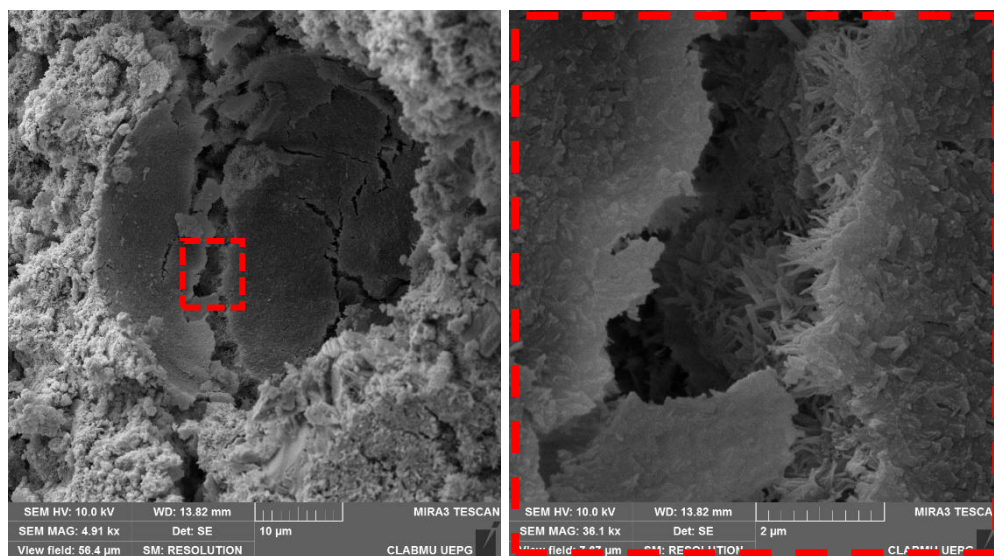
Ademais, foram observadas regiões com indícios de descontinuidade na matriz cimentícia e microfissuras (Figura 38 e Figura 39, respectivamente). Esses aspectos podem estar relacionados à maior heterogeneidade da matriz produzida com agregado reciclado, uma vez que nas regiões observadas não foram identificadas formações cristalinas com morfologia compatível com etringita.

Em contrapartida, foi observada significativa ocorrência de cristais aciculares espalhados nas paredes dos poros, inclusive próximos a regiões micro fissuradas (Figura 36 e Figura 37). Este comportamento é coerente uma vez que houve adição de gesso neste tratamento.

Este tratamento, aos 180 dias, apresentou a microestrutura mais alterada entre os concretos de mesma idade, caracterizada por elevada heterogeneidade, presença de vazios irregulares e regiões com indícios de degradação da matriz cimentícia.

Observou-se a intensa formação de estruturas aciculares, compatíveis com etringita, frequentemente organizadas em feixes e aglomerados radiais, distribuídas no interior de vazios e microfissuras. A Figura 40 mostra essas formações no interior de microfissuras que aparecem expressamente no interior do poro.

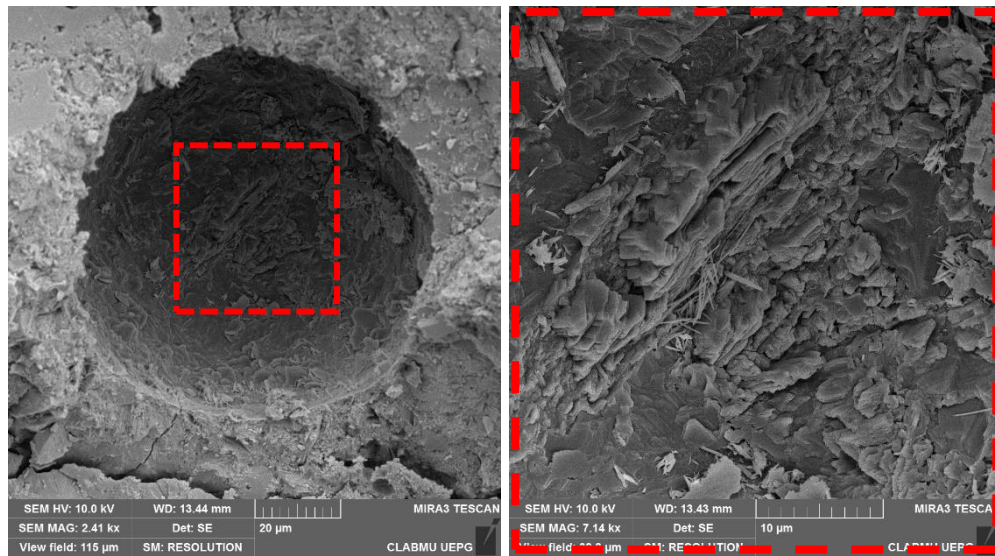
Figura 40 - Formação de cristais em microfissuras (T4 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

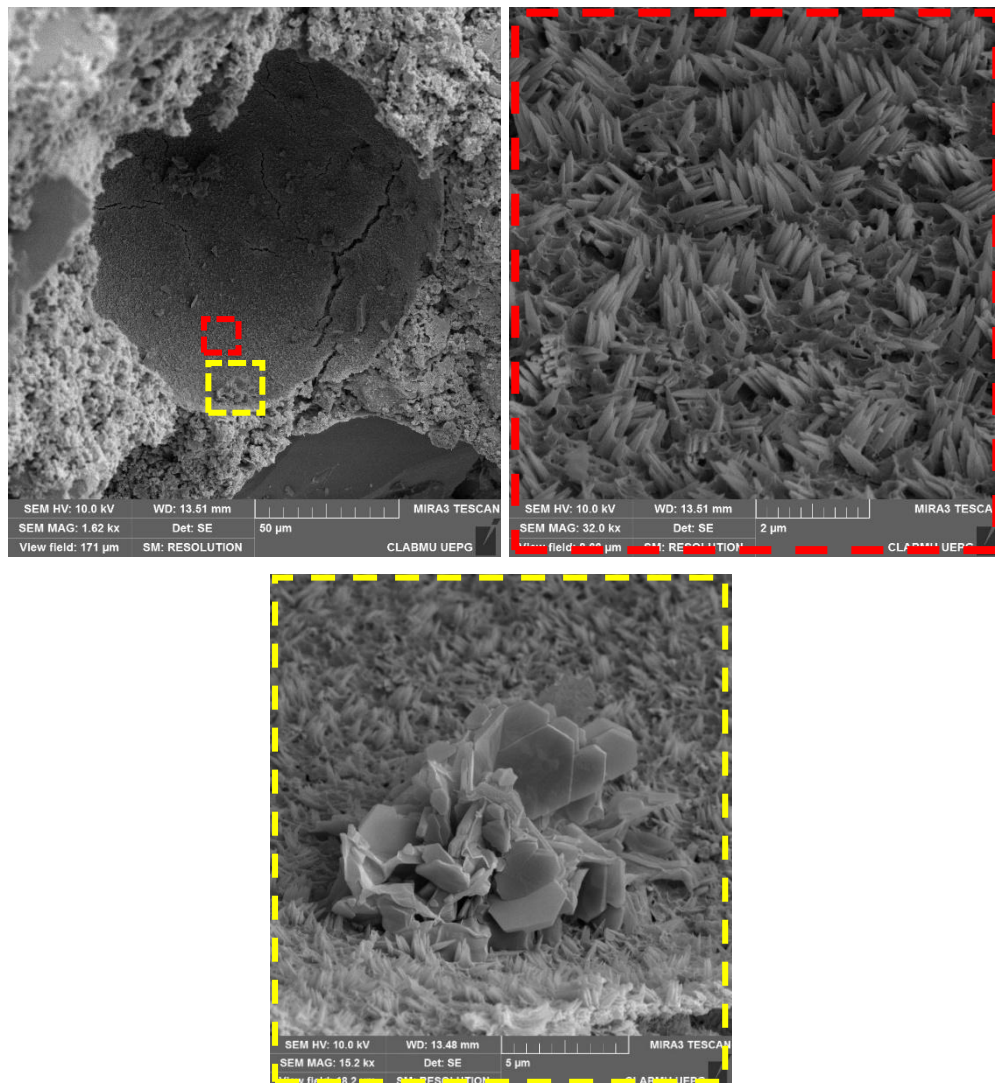
Já as Figura 41 e Figura 42 mostram a formação de cristais compatíveis com etringita juntamente com formações morfológicamente compatíveis com portlandita. Os cristais aciculares encontram-se dispersos, na Figura 41, e organizados em feixes na Figura 42, em ambos os casos, eles se encontram espalhados no interior da parede dos poros.

Figura 41 - Formação de cristais e portlandita no interior do poro (T4 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Figura 42 - Formação de cristais e portlandita no interior do poro (T4 – 180 dias)



Fonte: A autora (2026).

Em comparação aos 28 dias, verifica-se um aumento significativo na quantidade e no grau de organização desses cristais, indicando a continuidade das reações associadas à presença de sulfatos provenientes do gesso. Destaca-se que, aos 180 dias, essas formações foram registradas em regiões confinadas, como fissuras, condição que favorece o desenvolvimento de tensões internas devido ao crescimento cristalino.

Além disso, aos 28 dias, a matriz se mostrava mais irregular, fragmentada e com aspecto menos coeso, o que não se repete aos 180 dias. Nesta idade, a matriz aparece mais densificada e, em alguns pontos, micro fissurada e descontínua, especialmente em áreas associadas à presença de cristais aciculares, o que pode indicar continuidade dos processos de hidratação e evolução desses cristais em espaços confinados, sugerindo alterações microestruturais mais pronunciadas quando comparadas aos demais tratamentos. Esse comportamento é compatível com mecanismos descritos na literatura, nos quais o crescimento de cristais em regiões confinadas pode estar associado ao desenvolvimento de tensões internas e à propagação de fissuras (Fu et al., 1994; Scherer, 1999).

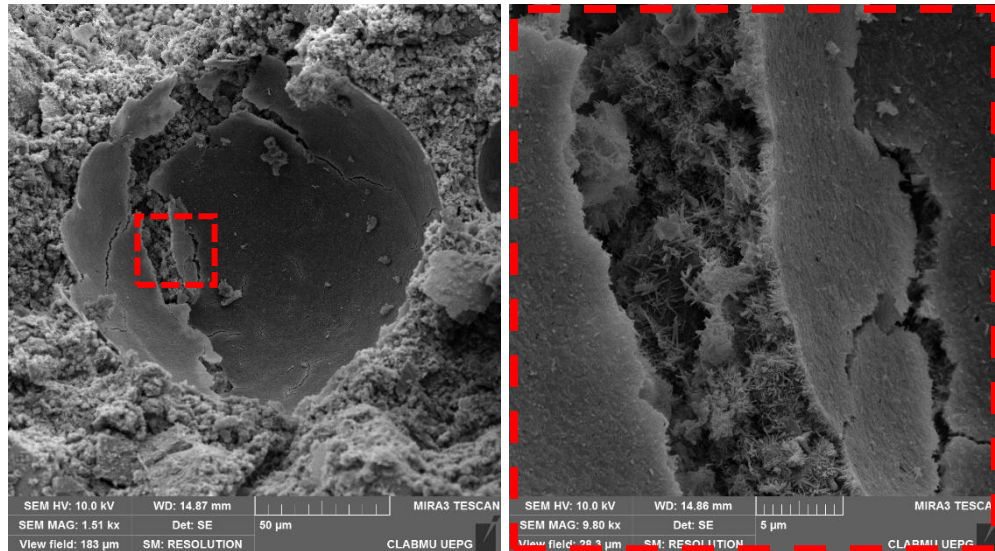
Esses resultados estão alinhados com os ensaios macroscópicos, nos quais o T4 apresentou tendência de expansão, maior absorção de água para esta idade e redução da resistência à compressão. A combinação entre a elevada porosidade do agregado reciclado e a disponibilidade adicional de sulfatos cria um ambiente favorável tanto à formação de produtos expansivos quanto ao desenvolvimento de tensões internas, caracterizando um sistema com características compatíveis com aquelas frequentemente associadas ao ataque interno por sulfato.

Por fim, o concreto T4, aos 240 dias, apresentou a microestrutura mais comprometida entre os concretos analisados, caracterizada por elevada heterogeneidade, presença de vazios irregulares e regiões com indícios de degradação da matriz cimentícia. Observou-se intensa formação de estruturas aciculares, compatíveis com etringita, organizadas em feixes e aglomerados radiais, distribuídas no interior de vazios, na matriz e, principalmente, em microfissuras, como é possível observar nas Figura 43 a Figura 45.

A Figura 43 mostra região de microfissura no interior do poro preenchida por cristais compatíveis com etringita, a aparência da região sugere que a associação entre formações cristalinas e descontinuidades da matriz sugere interação entre esses fenômenos, observando-se localmente regiões com aparente deslocamento da

superfície do poro. O comportamento é compatível com processos expansivos descritos na literatura.

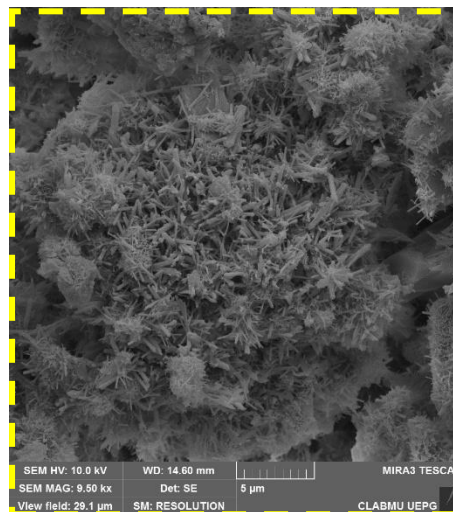
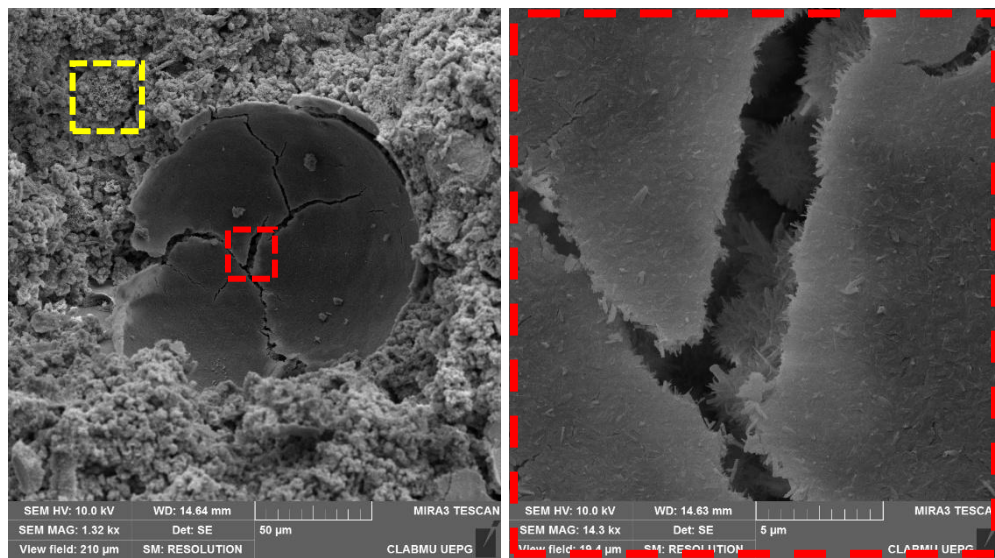
Figura 43 - Formação de cristais em microfissuras no interior do poro (T4 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

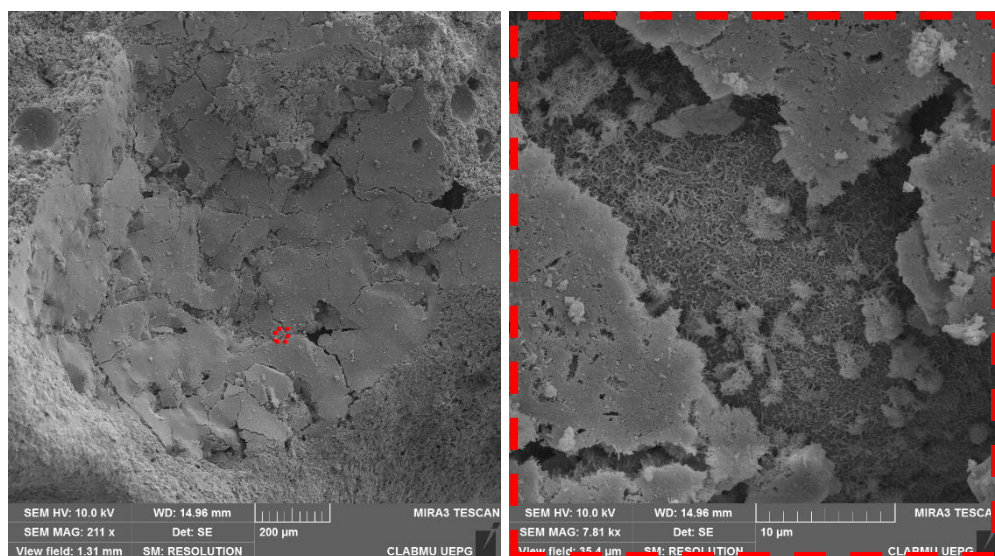
Já as Figura 44 e Figura 45, mostram a presença elevada de microfissuras e descontinuidades associadas à ocorrência de cristais aciculares, que aparecem também na matriz, evidenciando o intenso processo de formação de cristais morfológicamente compatíveis com etringita neste concreto, o que sugere a progressão de processos de deterioração microestrutural. Este comportamento é compatível com mecanismos descritos na literatura, nos quais o crescimento de cristais em regiões confinadas pode estar associado ao desenvolvimento de tensões internas e à propagação de fissuras (Fu et al., 1994; Kruger, 2021; Pereira, 2018; Scherer, 1999).

Figura 44 - Formação de cristais em microfissuras no interior do poro e na matriz (T4 – 240 dias)



Fonte: A autora (2026).

Figura 45 - Formação de cristais em microfissuras (T4 – 240 dias)



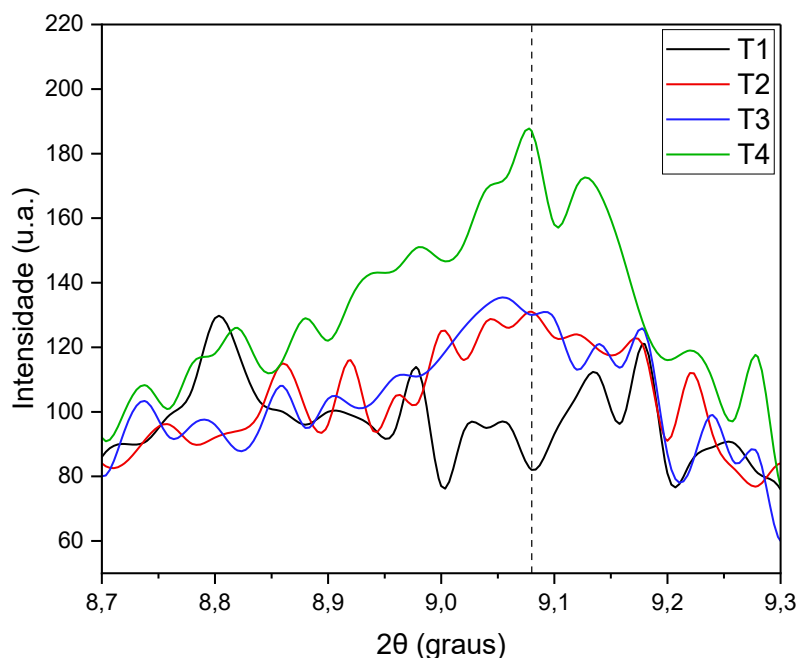
Fonte: A autora (2026).

As micrografias do concreto T4 estão em concordância com os ensaios macroscópicos, nos quais esse tratamento apresentou tendência de expansão, elevados valores de absorção de água em comparação com os outros tratamentos e a menor resistência à compressão entre os tratamentos dessa idade. A combinação entre a elevada porosidade do agregado reciclado e a disponibilidade adicional de sulfatos pode ter criado um ambiente altamente favorável à formação de produtos expansivos e ao desenvolvimento de tensões internas, caracterizando um sistema potencialmente suscetível ao ataque interno por sulfato.

4.3.5 DRX

Os resultados de DRX obtidos aos 28 dias foram utilizados para complementar as observações realizadas por MEV. O Gráfico 7 exibe um comparativo das intensidades do pico característico de etringita observados para cada tratamento dentro da idade de 28 dias.

Gráfico 7 - DRX realizado nas amostras de 28 dias



Obs: A linha tracejada preta indica a posição do pico característico de etringita ($2\theta = 9,08^\circ$)

Fonte: A autora (2026).

É possível perceber que o T4 apresentou a maior intensidade relativa de etringita, seguido pelos concretos T2 e T3, e, por fim, o concreto T1 apresentou a

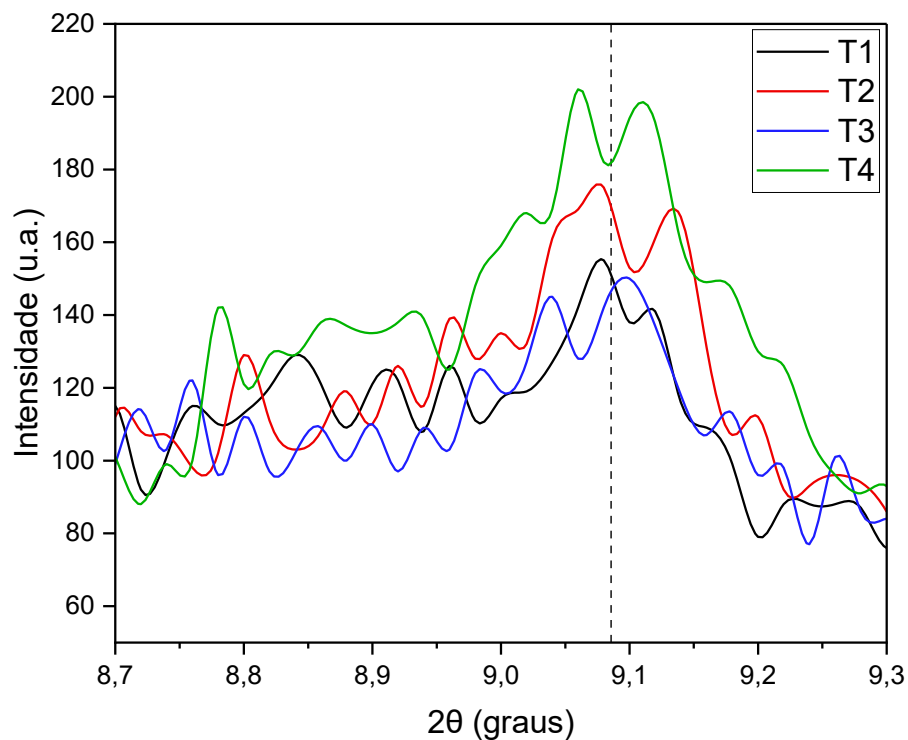
menor intensidade relativa. Esses resultados corroboram as observações realizadas por MEV, nas quais foi identificada maior ocorrência de formações aciculares nos tratamentos contendo ARCO e/ou sulfato. A maior intensidade observada no T4 sugere que a combinação de maior porosidade proveniente do ARCO e disponibilidade adicional de sulfato pode ter colaborado para a formação de cristais de etringita.

Por outro lado, os concretos T2 e T3 apresentaram uma formação similar de etringita, o que sugere que a formação de etringita, aos 28 dias, parece ser influenciada tanto pela disponibilidade de sulfatos quanto pelas características físicas do agregado reciclado. Enquanto a presença de gesso (T2) favorece o fornecimento de sulfato para as reações, a maior porosidade e heterogeneidade do ARCO (T3) oferecem sítios adicionais para nucleação e crescimento dos cristais. Já a menor intensidade registrada em T1 é compatível com a menor quantidade de formações aciculares observadas na microestrutura. Dessa forma, os resultados de DRX confirmam a tendência observada nas análises de microscopia eletrônica de varredura, indicando que tanto a presença de sulfato quanto as características físicas do ARCO podem influenciar a formação de produtos associados ao ataque interno por sulfato desde as primeiras idades.

Por fim, as análises microscópicas estão de acordo com o que foi evidenciado por meio do ensaio de absorção, no qual o T4 se mostrou o tratamento que mais absorveu água, condizente com a matriz e poros micro fissurados. Sendo, também, coerente com o resultado de resistência à compressão que foi inferior aos concretos moldados com agregado natural, o que condiz com o comportamento microestrutural comparativo do T4 com os concretos T1 e T2, sabendo que a microestrutura daquele apresentou mais vazios do que a dos dois últimos.

O Gráfico 8 apresenta a comparação da intensidade do pico característico da etringita na região de aproximadamente $9,08^\circ$ (2θ) para os quatro tratamentos aos 180 dias de idade.

Gráfico 8 - DRX realizado nas amostras de 180 dias



Obs: A linha tracejada preta indica a posição do pico característico de etringita ($2\theta = 9,08^\circ$)
 Fonte: A autora (2026).

Em suma, ao comparar os 4 tratamentos da mesma idade, é possível perceber que as diferenças na composição dos concretos resultaram em microestruturas distintas, refletindo diretamente nos comportamentos observados nos ensaios macroscópicos.

No tratamento T1, constituído por agregado natural e sem adição de gesso, observa-se um aumento moderado da intensidade do pico característico de etringita em relação aos 28 dias. Esse comportamento é compatível com as observações realizadas por MEV, nas quais o tratamento apresentou a microestrutura mais densa e homogênea, com produtos de hidratação distribuídos de forma mais equilibrada e formação de etringita predominantemente em espaços disponíveis, ou seja, preenchimento parcial de vazios.

A presença dessa fase em T1 indica a continuidade das reações de hidratação e a formação de cristais em pequenas quantidades, sem evidências de crescimento excessivo ou de mecanismos associados à deterioração da matriz. A distribuição esparsa dos cristais e a ausência de micro fissuração significativa sugerem que sua

formação ocorreu predominantemente em espaços disponíveis, sem geração de pressões internas relevantes. Com relação aos ensaios macroestruturais, esse comportamento está associado à tendência de retração, menores valores de absorção de água e melhor desempenho mecânico.

O tratamento T2, por sua vez, apresentou aumento expressivo da intensidade do pico de etringita quando comparado ao T1 e aos resultados obtidos aos 28 dias, o que corrobora com a maior formação de cristais aciculares observada nas imagens de MEV, com cristais distribuídos em vazios e microfissuras. A coexistência de regiões densificadas e áreas localmente fissuradas sugere que a formação de produtos sulfatados ocorreu de maneira heterogênea, sendo favorecida pela disponibilidade adicional de sulfatos proveniente do gesso. Embora o preenchimento parcial dos poros contribua para a densificação local da matriz, a ocorrência dessas formações em regiões confinadas pode indicar o desenvolvimento de tensões internas, indicando haver coexistência de mecanismos nesse sistema.

Já o tratamento T3 destacou-se pela elevada porosidade e heterogeneidade, decorrentes da utilização de agregado reciclado. O comportamento observado é, particularmente, relevante para a interpretação dos efeitos associados ao uso do agregado reciclado de concreto. Apesar da elevada heterogeneidade microestrutural identificada por MEV, bem como da maior porosidade decorrente da presença de argamassa aderida ao agregado reciclado, esse tratamento apresentou a menor intensidade relativa do pico de etringita aos 180 dias. Esse resultado sugere que a maior porosidade do sistema, embora forneça sítios favoráveis para nucleação e crescimento de produtos hidratados, não é suficiente, isoladamente, para promover níveis elevados de formação de etringita.

Apesar da microestrutura permanecer com vazios e microfissuras, como foi observado nas imagens de MEV, houve o preenchimento parcial desses espaços por produtos de hidratação, o que se refletiu em redução nos valores de absorção de água, maior resistência à compressão e tendência de variação dimensional positiva. Dessa forma, os resultados reforçam que o agregado reciclado influencia significativamente a estrutura física da matriz, mas que a disponibilidade de sulfatos permanece um fator determinante para o desenvolvimento mais intenso de cristais de etringita.

Por fim, o tratamento T4 apresentou a condição mais crítica entre os analisados, com maior intensidade relativa do pico de etringita dentre todos os

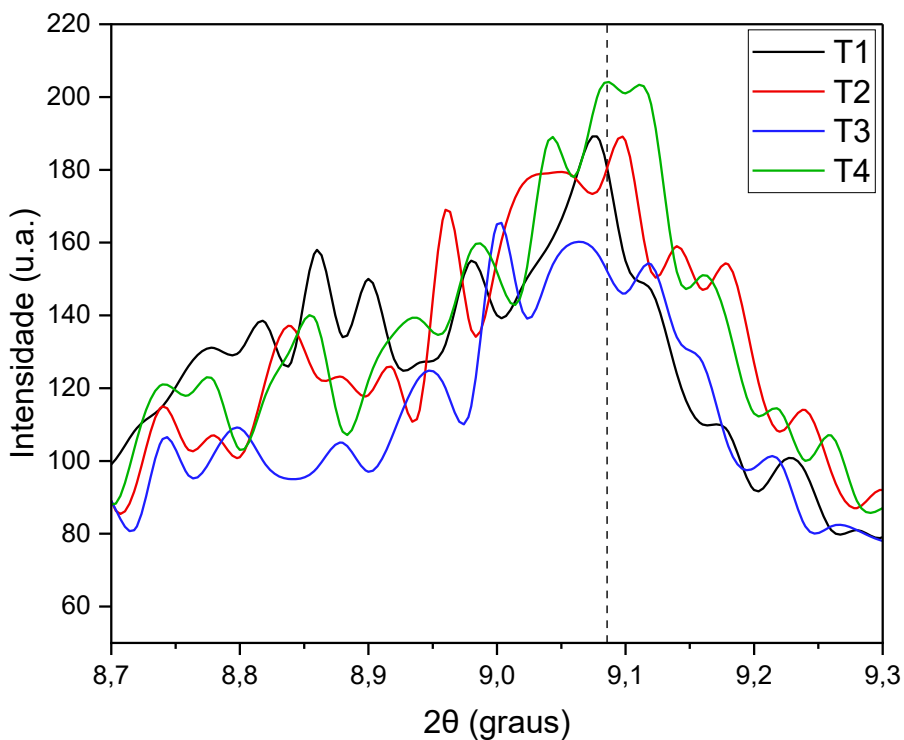
concretos analisados, mantendo a tendência já observada aos 28 dias. Esse comportamento está em concordância com os resultados de MEV, que evidenciaram a formação de etringita, frequentemente em regiões confinadas, associada à presença de microfissuras e maior desorganização da matriz. A combinação entre a elevada porosidade proporcionada pelo agregado reciclado e a disponibilidade adicional de sulfatos oriundos do gesso parece ter criado condições particularmente favoráveis para a nucleação e o crescimento da etringita. Esse cenário favorece o desenvolvimento de tensões internas e possíveis processos de deterioração, sendo compatível com os resultados de expansão, absorção e menor resistência à compressão.

Embora os resultados não permitam afirmar a ocorrência de ataque interno por sulfato de forma conclusiva, a associação entre elevada intensidade de etringita, presença de cristais em regiões restritas, ocorrência de microfissuras e tendência expansiva observada nos ensaios macroscópicos constitui um conjunto de evidências compatível com mecanismos frequentemente relacionados ao desenvolvimento desse fenômeno.

De forma geral, os resultados de DRX aos 180 dias concordam com as observações obtidas por MEV, demonstrando que a formação de etringita foi mais intensa nos tratamentos contendo sulfato adicional (T2 e T4). Além disso, a comparação entre T3 e T4 evidencia que a presença do agregado reciclado, embora importante para a definição da microestrutura do concreto, não explica isoladamente o aumento da formação dessa fase. Os resultados sugerem que a combinação entre elevada porosidade e disponibilidade de sulfatos apresenta a condição mais favorável para o desenvolvimento de produtos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato, comportamento observado de maneira mais pronunciada no tratamento T4.

Por fim, o Gráfico 9 apresenta a comparação da intensidade do pico característico da etringita na região próxima a $9,08^\circ$ (2θ) para os concretos analisados aos 240 dias. Observa-se que todos os tratamentos apresentaram aumento da intensidade relativa do pico em comparação às idades anteriores, indicando continuidade dos processos de hidratação e precipitação de produtos sulfatados ao longo do período de exposição.

Gráfico 9 - DRX realizado nas amostras de 240 dias



Obs: A linha tracejada preta indica a posição do pico característico de etringita ($2\theta = 9,08^\circ$)
 Fonte: A autora (2026).

Em síntese, os quatro tratamentos dessa idade evidenciam a evolução diferenciada das microestruturas em função da composição dos concretos, especialmente quanto à presença de agregado reciclado e de sulfatos provenientes do gesso, refletindo diretamente no comportamento macroscópico dos materiais.

O concreto T1 apresentou crescimento da intensidade do pico em relação aos 180 dias, alcançando valores próximos aos observados para o T3. Tal resultado sugere que a formação de etringita pode ocorrer mesmo em sistemas sem adição de sulfatos externos, em decorrência da continuidade das reações de hidratação do cimento. As observações por MEV indicaram que esses cristais permaneceram dispersos e sem associação evidente com processos de degradação microestrutural, o que concorda com a tendência de retração, menores valores de absorção de água e melhor desempenho mecânico observados.

O concreto T2, por sua vez, apresentou aumento significativo da intensidade do pico em relação aos 180 dias, aproximando-se dos valores observados para o T4.

Esse resultado está de acordo com as análises microestruturais, que evidenciaram intensa formação de cristais aciculares e preenchimento progressivo dos vazios da matriz. Apesar da elevada quantidade de etringita identificada, a maior parte dos cristais permaneceu associada a espaços previamente existentes, esse comportamento indica que a formação desses produtos ocorreu, predominantemente, em regiões com capacidade de acomodação, favorecendo o preenchimento parcial dos poros e promovendo densificação local da microestrutura, fenômeno associado à colmatação descrita na literatura por Kruger (2021) e Pereira (2018).

Esse comportamento é importante pois evidencia que a formação de produtos sulfatados não necessariamente implica em degradação ao material. O dano depende não somente da quantidade de cristais formados, mas também da localização da formação, se ela ocorrer em espaços livres com capacidade para acomodar tais produtos, não será observada degradação do material.

Nesse caso, embora sejam observadas microfissuras pontuais em algumas regiões, essas descontinuidades não se apresentam de forma disseminada ou associadas a evidências robustas de degradação expansiva significativa. Dessa forma, os resultados sugerem um sistema heterogêneo, no qual coexistem mecanismos locais de preenchimento de poros e tensões internas pontuais, sem que haja comprometimento significativo da estabilidade global da matriz. Essa interpretação está em concordância com os resultados macroscópicos obtidos, nos quais o tratamento T2 apresentou comportamento intermediário, com variação negativa nos ensaios de expansão e manutenção relativamente estável das propriedades mecânicas ao longo do tempo.

Já os concretos moldados com agregado reciclado evidenciaram comportamento distinto, apesar de apresentar a mesma microestrutura heterogênea e porosa. O concreto T3 também apresentou aumento da intensidade relativa da etringita em comparação às idades anteriores. Entretanto, os valores permaneceram inferiores aos observados nos tratamentos contendo gesso, indicando que a utilização do agregado reciclado, isoladamente, não promoveu níveis equivalentes de formação dessa fase. Esse concreto exibiu formação de cristais aciculares em menor quantidade que o T4 e que o T2 (concreto com adição de sulfato), estas formações, apesar de ocorrerem na matriz, não foram suficientes para densificá-la.

Esse comportamento reforça a hipótese de que a disponibilidade de sulfatos desempenhou papel mais relevante que a própria porosidade do sistema no desenvolvimento da etringita ao longo do tempo.

Diferentemente dos tratamentos produzidos com agregado natural, o T3 apresentou microestrutura mais heterogênea e aberta, caracterizada pela presença de vazios interconectados, dupla zona de transição interfacial e regiões com argamassa aderida ao agregado reciclado. Essas características são inerentes ao ARCO e estão diretamente associadas à elevada absorção de água e à maior mobilidade interna observadas no material.

Embora tenham sido identificados produtos de hidratação e formações aciculares compatíveis com etringita, o T3 não apresentou o mesmo grau de formação cristalina e de preenchimento de espaços confinados observado nos tratamentos com adição de gesso (T2 e T4), especialmente no T4. Dessa forma, os resultados sugerem que, no T3, o comportamento do material é predominantemente governado pelos efeitos físicos da elevada porosidade e heterogeneidade do agregado reciclado, e não pela atuação de mecanismos expansivos provenientes do efeito químico da presença de sulfatos.

Assim, o T3 evidencia que a utilização do ARCO, mesmo sem contaminação por sulfatos, já promove alterações importantes na microestrutura do concreto, tornando o sistema mais suscetível à absorção de água, à variabilidade dimensional e à redução do desempenho mecânico quando comparado ao concreto convencional.

Por fim, o concreto T4 manteve a maior intensidade de pico dentre todos os concretos avaliados, comportamento já observado aos 28 e 180 dias. Esse resultado corrobora as observações realizadas por microscopia eletrônica de varredura, nas quais foram identificadas elevadas concentrações de cristais aciculares preenchendo vazios e regiões confinadas da matriz cimentícia, com microestrutura altamente heterogênea, caracterizada por elevada porosidade, presença de vazios irregulares e regiões com micro fissuração. Observou-se intensa formação de estruturas aciculares compatíveis com etringita, frequentemente organizadas em feixes e aglomerados radiais, distribuídas no interior de poros, interfaces e microfissuras.

A persistência desse comportamento ao longo do tempo sugere que a combinação entre a elevada porosidade associada ao agregado reciclado de concreto e a disponibilidade adicional de sulfatos proporcionada pelo gesso continuou favorecendo a nucleação e o crescimento da etringita.

Diferentemente do observado nos tratamentos T1 e T2, nos quais os produtos de hidratação se desenvolveram predominantemente em espaços disponíveis da matriz, no T4 os cristais foram frequentemente identificados em regiões confinadas como poros e microfissuras, favorecendo o surgimento de tensões internas associadas ao crescimento cristalino e à propagação de descontinuidades.

Os resultados sugerem que a combinação entre a elevada porosidade do ARCO e a disponibilidade adicional de sulfatos provenientes do gesso cria um ambiente favorável ao desenvolvimento de mecanismos expansivos associados ao ataque interno por sulfato.

Além disso, a associação entre formação de cristais aciculares, presença de microfissuras e maior heterogeneidade da matriz está em concordância com os resultados macroscópicos obtidos para o T4. A elevada porosidade observada contribui para os maiores valores de absorção de água, enquanto a presença de fissuras e descontinuidades pode estar relacionada ao comportamento mecânico mais variável do material. Da mesma forma, o crescimento de produtos cristalinos em regiões confinadas é compatível com a tendência de expansão observada nos ensaios dimensionais.

Dessa forma, os resultados indicam que o T4 representa a condição mais crítica do estudo, evidenciando que a associação entre formação de etringita, microfissuração e redução do desempenho mecânico sugere possível contribuição desses processos para a degradação observada no concreto T4.

De maneira geral, os resultados de DRX obtidos aos 240 dias reforçam as tendências observadas nas análises microestruturais. Os concretos contendo gesso (T2 e T4) apresentaram os maiores teores relativos de etringita, enquanto os tratamentos sem adição de sulfato (T1 e T3) apresentaram intensidades inferiores. A comparação entre T3 e T4 demonstra que a presença do agregado reciclado influencia a estrutura física da matriz, porém a disponibilidade adicional de sulfatos é o principal fator associado ao aumento da formação de etringita. Além disso, a manutenção das maiores intensidades no tratamento T4, associada à presença de cristais em regiões confinadas e à ocorrência de microfissuração observada por MEV, constitui um conjunto de evidências compatível com mecanismos potencialmente relacionados ao desenvolvimento de processos expansivos associados ao ataque interno por sulfatos.

4.4 DISCUSSÃO INTEGRADORA DOS RESULTADOS

4.4.1 Interpretação geral do comportamento dos concretos

O comportamento dos concretos avaliados foi governado pela interação entre porosidade do sistema, presença de sulfatos, evolução microestrutural e localização dos produtos de reação formados ao longo do envelhecimento. Dessa forma, os diferentes tratamentos apresentaram respostas distintas em função das características inerentes aos materiais empregados e dos mecanismos predominantes em cada sistema.

A incorporação do ARCO aos concretos (T3 e T4) alterou significativamente a estrutura porosa dos materiais, resultando em matrizes mais heterogêneas e com maior conectividade de vazios quando comparadas aos concretos moldados com agregado natural (T1 e T2). Paralelamente, a adição de gesso aumentou a disponibilidade de sulfatos no sistema, favorecendo a formação de produtos associados às reações sulfatadas observadas nas análises microestruturais e mineralógicas.

Os resultados indicam que nem a presença de sulfatos, isoladamente, nem a maior porosidade associada ao agregado reciclado são suficientes para explicar as diferenças observadas entre os tratamentos. A análise integrada dos dados sugere que o desempenho dos concretos foi governado pela interação entre esses fatores, influenciando tanto a formação quanto a localização dos produtos de reação ao longo do tempo.

Nesse contexto, os concretos T1 e T2, moldados com agregado natural, apresentaram microestruturas mais densas e homogêneas quando comparados aos concretos T3 e T4, produzidos com agregado reciclado e caracterizados por maior heterogeneidade e presença de vazios. Adicionalmente, os tratamentos com adição de gesso (T2 e T4) apresentaram maior disponibilidade de sulfatos, condição associada à maior ocorrência de formações cristalinas observadas nas análises de MEV e DRX.

Dessa forma, a interpretação integrada indica que a resposta dos concretos ao longo do tempo não depende exclusivamente da presença de produtos de reação, mas também da estrutura porosa disponível para seu crescimento e da região da matriz em que esses produtos se desenvolvem. A interação entre esses fatores

mostrou-se fundamental para compreender as diferenças observadas nos comportamentos físicos, mecânicos e microestruturais dos tratamentos avaliados.

4.4.2 Diferenciação entre os efeitos do ARCO e dos sulfatos

A comparação entre os tratamentos T1, T2, T3 e T4 permitiu separar os efeitos predominantemente físicos associados à incorporação do agregado reciclado de concreto (ARCO) daqueles relacionados ao aumento da disponibilidade de sulfatos promovido pela adição de gesso, a Tabela 8 mostra o efeito isolado da inserção cada elemento.

Tabela 8 - Efeitos do ARCO e do gesso

ARCO (efeito físico)	Gesso (efeito químico)
↑ porosidade	↑ sulfatos disponíveis
↑ heterogeneidade	↑ formação de etringita
↑ absorção	↑ intensidade no DRX
↑ microfissuras	↑ produtos de reação

Fonte: A autora (2026).

A incorporação de agregado reciclado altera fisicamente a estrutura interna dos concretos, promovendo uma matriz mais heterogênea, com maior porosidade e maior quantidade de microfissuras e, conseqüentemente, maior absorção. Essas características aumentam a disponibilidade de regiões potencialmente favoráveis à precipitação e ao crescimento de produtos de hidratação e de reação. Por outro lado, a adição de gesso atua como fonte adicional de sulfatos, fornecendo os reagentes necessários para a formação de produtos sulfatados, especialmente a etringita.

A comparação entre os tratamentos T1 e T3, ambos sem adição de gesso, permitiu avaliar de forma mais direta o efeito físico associado ao ARCO. Embora os dois concretos tenham apresentado formações cristalinas compatíveis com etringita ao longo do envelhecimento, as imagens de MEV evidenciaram diferenças significativas em suas microestruturas. O concreto T1 apresentou uma matriz mais densa e homogênea, com menor ocorrência de vazios e microfissuras, enquanto o concreto T3 exibiu uma estrutura mais heterogênea, porosa e micro fissurada. Dessa forma, os resultados sugerem que a influência da porosidade e da heterogeneidade associadas ao agregado reciclado exerceu papel predominante no comportamento observado para o T3, refletindo-se nos resultados físicos e mecânicos.

A comparação entre os tratamentos T2 e T4 permitiu avaliar a interação entre a presença adicional de sulfatos e a influência da microestrutura. Os resultados de DRX indicaram aumento da intensidade relativa do pico associado à etringita ao longo do envelhecimento em ambos os tratamentos, que mantiveram os maiores valores relativos entre os concretos avaliados. Entretanto, as imagens de MEV demonstraram que a distribuição e a localização desses produtos diferiram entre os dois sistemas.

No concreto T2, os cristais aciculares foram observados tanto em vazios e microfissuras quanto em regiões da própria matriz cimentícia, indicando que o crescimento ocorreu em um sistema relativamente mais homogêneo e menos poroso. Já no concreto T4, observou-se maior ocorrência de formações cristalinas em regiões como poros, vazios e microfissuras, comportamento associado à maior porosidade e heterogeneidade introduzidas pelo ARCO. Essa diferença na localização dos produtos de reação constitui um aspecto relevante para a interpretação dos resultados, uma vez que a disponibilidade de espaços livres tende a influenciar a forma como os produtos cristalinos se desenvolvem e interagem com a matriz cimentícia.

Sendo assim, os resultados obtidos indicam que a presença de sulfatos, isoladamente, não explica os diferentes comportamentos observados entre os tratamentos. A interação entre disponibilidade de sulfatos e características microestruturais mostrou-se determinante para a evolução dos concretos, evidenciando que a resposta do material depende não apenas da formação de produtos de reação, mas também da estrutura porosa disponível para seu crescimento e da região da matriz em que esses produtos se desenvolvem.

4.4.3 Colmatação *versus* degradação interna

As análises de resultados indicaram que a simples presença de produtos associados às reações sulfatadas não foi suficiente para explicar o comportamento dos concretos avaliados. Embora os tratamentos contendo gesso (T2 e T4) tenham apresentado maior intensidade de formação de etringita ao longo do envelhecimento, os efeitos observados nos ensaios físicos, mecânicos e microestruturais não foram equivalentes.

Esse comportamento sugere que a influência dos produtos de reação depende não apenas de sua quantidade, mas também da localização em que se desenvolvem e das características microestruturais do sistema em que ocorre seu

crescimento. Em sistemas cimentícios, a precipitação de cristais pode contribuir para o preenchimento parcial de vazios e redução da conectividade dos poros, fenômeno frequentemente associado à colmatação da microestrutura. Por outro lado, quando o crescimento ocorre em regiões confinadas ou em uma matriz mais heterogênea, podem ser desenvolvidas tensões internas capazes de favorecer a formação de microfissuras e processos de degradação.

Dessa forma, a interpretação dos resultados requer uma análise conjunta entre a formação dos produtos sulfatados, a estrutura porosa disponível para seu desenvolvimento e os efeitos observados no desempenho dos concretos. Nesse contexto, a comparação entre os tratamentos T2 e T4 mostrou-se particularmente relevante para compreender a diferença entre mecanismos predominantemente associados à densificação local da matriz e aqueles potencialmente relacionados ao desenvolvimento de processos expansivos internos.

Indícios de colmatação foram observados principalmente no concreto T2 que apresentou, nas imagens de MEV, a formação de cristais preenchendo parcialmente os vazios e descontinuidades da matriz, além de menor ocorrência de microfissuras quando comparado ao T4. Apesar da intensa formação de etringita identificada por meio do ensaio de DRX, as análises microestruturais não evidenciaram sinais expressivos de degradação interna, sugerindo que os produtos de reação se desenvolveram predominantemente em espaços previamente existentes e com capacidade de acomodação. Nesse contexto, a presença desses cristais em espaços previamente disponíveis mostrou-se compatível com a densificação local da microestrutura, comportamento coerente com a manutenção do desempenho mecânico e com a estabilidade observada nos resultados de absorção de água ao longo do envelhecimento.

Entretanto, os resultados obtidos indicam que a quantidade de etringita formada não foi o único fator determinante para o comportamento dos concretos. A localização dos produtos de reação mostrou-se igualmente relevante para a interpretação dos mecanismos envolvidos.

Nesse sentido, o concreto T4 apresentou comportamento distinto. As imagens de MEV evidenciaram a formação de cristais tanto em vazios quanto em regiões confinadas da matriz cimentícia, além da presença de microfissuras e áreas com indícios de deslocamento observadas, principalmente, aos 240 dias. Embora parte dos produtos de reação também tenha sido observada em vazios da matriz, a

coexistência de crescimento cristalino em regiões restritas e de descontinuidades microestruturais caracteriza um sistema com condições mais favoráveis ao desenvolvimento de tensões internas.

Essa interpretação é coerente com os resultados macroscópicos obtidos para o T4, que apresentou maiores valores de absorção de água, menor resistência e tendência expansiva ao longo do envelhecimento. Dessa forma, os resultados sugerem que os efeitos potencialmente deletérios observados nesse tratamento estão associados não apenas à formação de produtos sulfatados, mas à interação entre elevada porosidade, disponibilidade adicional de sulfatos e crescimento desses produtos em regiões confinadas da microestrutura.

4.4.4 Síntese interpretativa dos tratamentos

A análise integrada dos resultados permitiu estabelecer uma interpretação global do comportamento dos diferentes tratamentos ao longo do envelhecimento. A combinação dos ensaios físicos, mecânicos, microestruturais e mineralógicos demonstrou que cada concreto respondeu de forma distinta à interação entre porosidade, disponibilidade de sulfatos e evolução dos produtos de reação. A Tabela 9 resume a análise integrada dos resultados.

Tabela 9 - Resumo da síntese interpretativa

Tratamento	Interpretação
T1	Sistema de referência
T2	Formação de etringita + colmatação
T3	Efeito físico do ARCO
T4	Sistema mais suscetível ao ISA

Fonte: A autora (2026).

Nesse contexto, os tratamentos podem ser interpretados como representativos de diferentes condições de interação entre os fatores físicos e químicos avaliados nesta pesquisa. Enquanto alguns sistemas apresentaram comportamento predominantemente influenciado pelas características físicas da matriz, outros foram influenciados pela maior disponibilidade de sulfatos ou pela interação simultânea entre esses fatores. Dessa forma, a análise individual de cada tratamento contribui para compreender os mecanismos responsáveis pelos comportamentos observados ao longo do período experimental.

O concreto T1 pode ser interpretado como a referência de comportamento convencional do sistema cimentício avaliado nesta pesquisa. A utilização de agregados naturais e a ausência de adição de gesso resultaram em uma microestrutura relativamente mais homogênea e menos porosa quando comparada aos concretos produzidos com ARCO. Essas características estiveram associadas a uma matriz mais densa, com menor ocorrência de descontinuidades observadas nas análises microestruturais e menor intensidade relativa do pico associado à etringita ao longo do envelhecimento. Dessa forma, os produtos observados foram predominantemente associados à continuidade das reações de hidratação do cimento, refletindo-se em um comportamento físico, mecânico e microestrutural mais estável.

O concreto T2 representa a condição em que há disponibilidade adicional de sulfatos em um sistema com microestrutura relativamente densa. A adição de gesso esteve associada à maior ocorrência de formações cristalinas compatíveis com etringita e ao aumento da intensidade relativa do pico correspondente nos resultados de MEV e DRX. Entretanto, a maior parte dos cristais desenvolveu-se em vazios e descontinuidades previamente existentes, contribuindo para o preenchimento parcial desses espaços. A ausência de evidências robustas de degradação expansiva significativa sugere que os processos de preenchimento de vazios e densificação local da microestrutura exerceram papel predominante nesse tratamento, permitindo a formação de produtos sulfatados sem comprometimento expressivo do desempenho do material.

O concreto T3 evidencia, principalmente, os efeitos físicos decorrentes da incorporação do agregado reciclado. A presença de argamassa aderida e a maior porosidade associada ao agregado reciclado resultaram em uma microestrutura mais heterogênea e menos compacta que a observada no T1. Embora tenha apresentado formação de etringita ao longo do envelhecimento, os resultados indicam que seu comportamento foi predominantemente governado pelas características físicas do ARCO, refletidas nos maiores valores de absorção de água, na maior variabilidade dimensional e no desempenho mecânico inferior em relação aos concretos produzidos com agregado natural.

Por sua vez, o concreto T4 representa a condição mais crítica avaliada nesta pesquisa, resultante da interação entre elevada porosidade e disponibilidade adicional de sulfatos. A combinação desses fatores esteve associada não apenas à maior

ocorrência de formações cristalinas compatíveis com etringita, mas também à sua presença em regiões como poros, vazios e microfissuras da microestrutura. As análises microestruturais evidenciaram maior ocorrência de descontinuidades e sinais de degradação local da matriz, enquanto os resultados macroscópicos indicaram maiores valores de absorção de água, tendência expansiva e comportamento mecânico mais variável. Dessa forma, os resultados sugerem que o T4 representou a condição mais favorável ao desenvolvimento de mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato, em função da atuação simultânea de fatores físicos e químicos.

4.4.5 Integração entre comportamento microestrutural e macroscópico

A análise integrada dos resultados obtidos nesta pesquisa demonstrou que o comportamento dos concretos não foi determinado exclusivamente pela presença e intensidade relativa das fases associadas à etringita, mas pela interação entre disponibilidade de sulfatos, estrutura porosa da matriz e localização dos produtos de reação. Os resultados evidenciaram que sistemas mais porosos e heterogêneos apresentaram maior ocorrência de produtos cristalinos em regiões preferenciais da microestrutura, enquanto matrizes mais densas permitiram sua acomodação em vazios previamente existentes, sem alterações significativas do desempenho observadas ao longo do envelhecimento.

Os tratamentos contendo ARCO apresentaram maiores valores de absorção de água, comportamento compatível com a microestrutura mais heterogênea observada por MEV. A presença de argamassa aderida e de uma rede de vazios mais conectada favoreceu a mobilidade de fluidos e influenciou a evolução das reações ao longo do envelhecimento.

A comparação entre os diferentes tratamentos permitiu verificar que a presença de sulfatos promoveu aumento da formação de etringita, conforme evidenciado pelos resultados de DRX e MEV. Entretanto, os efeitos observados variaram de acordo com as características microestruturais de cada sistema. A análise conjunta dos resultados de DRX e MEV mostrou que a formação de etringita ocorreu em todos os tratamentos, porém em diferentes condições microestruturais. Os resultados sugerem que a localização dos cristais exerceu influência mais significativa sobre o comportamento dos concretos do que a simples presença dessa fase mineral.

Nos concretos com microestrutura mais densa, os produtos de reação foram predominantemente observados em vazios previamente existentes, comportamento compatível com processos de preenchimento parcial da matriz. Em contrapartida, nos sistemas mais heterogêneos e porosos, observou-se maior ocorrência de cristais em regiões confinadas e coexistência com microfissuras, condição compatível com o desenvolvimento de tensões internas.

Nos sistemas mais heterogêneos, a coexistência entre crescimento cristalino e micro fissuração esteve associada a maior variabilidade das propriedades mecânicas e dimensionais. Entretanto, os resultados não permitem estabelecer relações diretas de causa e efeito, indicando apenas que esses fenômenos ocorreram de forma concomitante ao longo do envelhecimento.

A integração entre os resultados de absorção de água, resistência à compressão, expansão, microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X permitiu identificar tendências consistentes entre o comportamento macroscópico e a evolução microestrutural dos concretos. De forma geral, os tratamentos contendo agregado reciclado apresentaram maiores valores de absorção de água e maior heterogeneidade microestrutural, enquanto os tratamentos com adição de gesso apresentaram maior intensidade relativa dos picos associados à etringita ao longo do envelhecimento.

Os resultados demonstram que a resposta dos concretos não foi determinada exclusivamente pela quantidade de etringita formada, mas pela interação entre estrutura porosa, disponibilidade de sulfatos e localização dos produtos de reação. Enquanto sistemas mais densos permitiram a acomodação dos cristais sem alterações significativas do desempenho, sistemas mais heterogêneos apresentaram maior ocorrência de crescimento cristalino em regiões confinadas e comportamento mais compatível com mecanismos potencialmente deletérios.

Por fim, destaca-se que os resultados obtidos permitiram identificar comportamentos compatíveis com mecanismos associados ao ataque interno por sulfato, especialmente no tratamento T4. As análises por microscopia eletrônica de varredura possibilitaram a avaliação morfológica dos produtos de reação e da evolução microestrutural dos concretos, enquanto os ensaios de difração de raios X corroboraram a presença e a evolução de fases cristalinas compatíveis com aquelas observadas por MEV.

Entretanto, embora a integração dessas técnicas tenha fornecido evidências consistentes sobre os processos ocorridos no interior dos concretos, a identificação definitiva dos mecanismos associados ao ataque interno por sulfato poderia ser complementada por análises adicionais, como espectroscopia por dispersão de energia (EDS) ou métodos quantitativos de determinação de fases cristalinas. Dessa forma, os resultados não permitem afirmar de maneira conclusiva a ocorrência de ataque interno por sulfato, mas indicam comportamentos compatíveis com esse fenômeno, especialmente em sistemas que combinam elevada porosidade e disponibilidade adicional de sulfatos.

A Tabela 10 exibe o resumo integrado dos tratamentos e observações feitas ao longo desta pesquisa, de modo a proporcionar melhor observação dos dados obtidos por meio dos ensaios e análises realizadas.

Tabela 10 - Resumo das análises dos tratamentos

Tratamento	ARCO	Gesso	Absorção	Resistência	Etringita	Interpretação
T1	Não	Não	Baixa	Alta	Baixa	Hidratação convencional
T2	Não	Sim	Moderada	Estável	Alta	Preenchimento de vazios
T3	Sim	Não	Alta	Intermediária	Moderada	Efeito físico do ARCO
T4	Sim	Sim	Mais alta	Mais baixa	Mais intensa	Interação ARCO + sulfatos

Fonte: A autora (2026).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 CONCLUSÃO

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a influência da contaminação por gesso em agregados reciclados de concreto (ARCO) sobre o desenvolvimento de mecanismos associados ao ataque interno por sulfato, correlacionando a presença de sulfatos com o comportamento físico, mecânico e microestrutural dos concretos produzidos.

A caracterização dos materiais permitiu verificar que o agregado reciclado utilizado apresentou elevada porosidade e significativa quantidade de argamassa aderida, características que influenciaram diretamente o comportamento dos concretos produzidos com ARCO. Os resultados evidenciaram que a incorporação desse agregado esteve associada ao aumento da absorção de água, à maior heterogeneidade microestrutural e à maior ocorrência de vazios observados nos concretos produzidos com ARCO quando comparados aos concretos moldados com agregado natural.

Com relação à formação de produtos de reação, as análises por microscopia eletrônica de varredura e difração de raios X permitiram identificar a presença e a evolução de fases compatíveis com etringita em todos os tratamentos, com intensidades mais elevadas nos concretos contendo adição de gesso. Os resultados indicaram que os concretos contendo adição de gesso apresentaram maior ocorrência de formações compatíveis com etringita e maior intensidade relativa dos picos correspondentes ao longo do envelhecimento.

A análise integrada dos resultados físicos, mecânicos, microestruturais e mineralógicos indicou que o efeito da formação de etringita depende não apenas de sua quantidade, mas também das condições microestruturais em que ocorre seu crescimento. Nos concretos produzidos com agregado natural, os produtos sulfatados foram observados predominantemente em espaços disponíveis da matriz, comportamento compatível com o preenchimento parcial de vazios e sem evidências robustas de degradação expansiva significativa. Em contrapartida, os concretos produzidos com ARCO contaminado por gesso apresentaram maior ocorrência de cristais em regiões confinadas, coexistindo com microfissuras e maior heterogeneidade microestrutural.

A comparação entre os tratamentos permitiu diferenciar os efeitos físicos associados ao uso do agregado reciclado daqueles relacionados à disponibilidade adicional de sulfatos. O concreto T3 demonstrou que a incorporação do ARCO, mesmo na ausência de gesso, já promove alterações significativas na estrutura porosa do material. Por outro lado, o concreto T2 evidenciou que a presença de sulfatos, isoladamente, favorece a formação de etringita sem necessariamente resultar em degradação expansiva significativa. Já o concreto T4 apresentou o comportamento mais crítico dentre os tratamentos avaliados, sugerindo que a combinação entre elevada porosidade e disponibilidade adicional de sulfatos constitui a condição mais favorável ao desenvolvimento de mecanismos potencialmente associados ao ataque interno por sulfato.

Dessa forma, conclui-se que a presença de sulfatos, isoladamente, não explica os comportamentos observados nos concretos avaliados e não se mostrou suficiente para promover manifestações compatíveis com processos expansivos potencialmente deletérios nas condições estudadas. Os resultados indicam que o comportamento do material é governado pela interação entre disponibilidade de sulfatos, estrutura porosa da matriz e localização dos produtos de reação. Nesse contexto, a formação de etringita mostrou-se mais relevante quando associada a sistemas com maior heterogeneidade e presença de regiões confinadas, condições observadas principalmente nos concretos produzidos com agregado reciclado contaminado por gesso.

Sendo assim, os achados desta pesquisa contribuem para a compreensão dos mecanismos envolvidos na utilização de agregados reciclados contaminados por gesso e de sua influência sobre a evolução microestrutural, o comportamento físico e o desempenho mecânico dos concretos ao longo do tempo, fornecendo subsídios para a avaliação da durabilidade desses materiais.

Os resultados obtidos indicam que a avaliação do potencial de degradação associado à contaminação por gesso em agregados reciclados não deve considerar apenas a presença de sulfatos ou a formação de etringita, mas também as características microestruturais do sistema em que esses produtos se desenvolvem. Nesse sentido, a interação entre porosidade, disponibilidade de sulfatos e localização dos produtos de reação mostrou-se determinante para a interpretação do comportamento dos concretos avaliados.

5.2 SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

Com base nos resultados obtidos e nas limitações inerentes às técnicas empregadas nesta pesquisa, recomenda-se o desenvolvimento de estudos complementares que contribuam para ampliar a compreensão dos mecanismos associados ao comportamento de concretos produzidos com agregados reciclados contaminados por gesso. Nesse sentido, sugerem-se os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Realizar análises químicas complementares, por meio de espectroscopia por dispersão de energia (EDS) acoplada à microscopia eletrônica de varredura, visando complementar a identificação dos cristais observados e confirmar a composição química das formações associadas às reações sulfatadas;
- Empregar técnicas quantitativas de difração de raios X, como o refinamento pelo método de Rietveld, para determinar a evolução do teor das fases cristalinas ao longo do tempo e quantificar a formação de etringita e outros produtos sulfatados;
- Avaliar períodos de envelhecimento superiores aos adotados nesta pesquisa, permitindo verificar a continuidade dos mecanismos observados e identificar possíveis alterações tardias associadas à evolução das reações sulfatadas e ao desempenho dos concretos;
- Investigar diferentes teores de contaminação por gesso em agregados reciclados, visando estabelecer limites de utilização;
- Avaliar o comportamento de concretos produzidos com diferentes percentuais de substituição de agregado natural por agregado reciclado, de modo a identificar níveis de incorporação que conciliem desempenho mecânico e durabilidade;
- Estudar a influência de diferentes tipos de cimento e composições cimentícias sobre a formação de produtos associados ao ataque interno por sulfato em concretos produzidos com agregados reciclados contaminados;
- Investigar a influência física da substituição da areia por gesso, além dos efeitos químicos proporcionados como o ataque interno por sulfato;
- Realizar ensaios de durabilidade complementares, incluindo permeabilidade, migração de íons, ciclos de umedecimento e secagem e exposição a

ambientes agressivos, a fim de ampliar a compreensão do desempenho desses materiais em condições de serviço;

- Investigar a aplicação de tratamentos ou processos de beneficiamento dos agregados reciclados contaminados por gesso, visando reduzir os efeitos da presença de sulfatos e ampliar a viabilidade de utilização desses materiais na produção de concretos.

Por fim, recomenda-se a realização de pesquisas que integrem análises microestruturais, mineralógicas e químicas associadas ao monitoramento de longo prazo e à avaliação do desempenho físico e mecânico dos concretos, permitindo compreender de forma mais abrangente os mecanismos envolvidos na interação entre agregados reciclados contaminados por gesso, formação de produtos sulfatados e durabilidade dos materiais produzidos.

REFERÊNCIAS

ABID, Sallal R. *et al.* Expansion and strength properties of concrete containing contaminated recycled concrete aggregate. *Case Studies in Construction Materials*, v. 9, 1 dez. 2018.

ALI, Syed Ashik *et al.* Durability of Recycled Concrete Aggregate as a Pavement Base Material Including Drainage: A Laboratory and Simulation Study. *Sustainability* (Switzerland), v. 17, n. 13, 1 jul. 2025.

ALMEIDA, Diego Henrique de *et al.* Properties of concrete manufactured with use of ceramic sanitary ware waste as aggregate. *Revista Matéria*, v. 24, n. 2, 2019.

ANGULO, Sérgio Cirelli. VARIABILIDADE DE AGREGADOS GRAÚDOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO RECICLADOS. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2000.

ARSHAD, Muhammad; AHMED, Muhammad Farooq. Potential use of reclaimed asphalt pavement and recycled concrete aggregate in base/subbase layers of flexible pavements. *Construction and Building Materials*, v. 151, p. 83–97, 1 out. 2017.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15113: *Resíduos sólidos da construção civil e resíduos inertes — Aterros — Diretrizes para projeto, implantação e operação*. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7211:2022: *Agregados para concreto — Requisitos*. Rio de Janeiro: ABNT, 2022

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE RESÍDUOS E MEIO AMBIENTE. *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil*. [S.l.: S.n.].

AWOYERA, Paul O.; AKINMUSURU, Joseph O.; NDAMBUKI, Julius M. Green concrete production with ceramic wastes and laterite. *Construction and Building Materials*, v. 117, p. 29–36, 1 ago. 2016.

BARBOZA, Douglas Vieira *et al.* Aplicação da Economia Circular na Construção Civil. *Research, Society and Development*, v. 8, n. 7, p. e9871102, 16 maio 2019.

CAPRARO, Ana Paula Brandão; HOPPE FILHO, Juarez; MEDEIROS, Marcelo Henrique. Influence of internal sulfate attack on cement paste properties: contamination by pyrite. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, v. 14, n. 6, 2021.

COLLEPARDI, M. A state-of-the-art review on delayed ettringite attack on concrete. *Cement and Concrete Composites*, v. 25, n. 4- 5 SPEC, p. 401–407, 2003.

COLMAN, C. *et al.* Internal sulfate attack in mortars containing contaminated fine recycled concrete aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 272, 22 fev. 2021.

COLMAN, Charlotte *et al.* Valorization of fine recycled aggregates contaminated with gypsum residues: Characterization and evaluation of the risk for secondary ettringite formation. *Materials*, v. 13, n. 21, p. 1–12, 1 nov. 2020.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE-CONAMA. RESOLUÇÃO No 307, de 5 de julho de 2002. *Diário Oficial da União*, Brasil, 5 jul. 2002.

DE AGUIAR, Gerusa. ESTUDO DE ARGAMASSAS COM AGREGADOS RECICLADOS CONTAMINADOS POR GESSO DE CONSTRUÇÃO. Dissertação de Mestrado—São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2004.

DOBROVOLSKI, Emilin Regina Gomes. AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA DE AGREGADO RECICLADO TRATADO COM ÁLCOOL POLIVINÍLICO (PVA) NA MITIGAÇÃO DA PEGADA DE CARBONO. Dissertação de Mestrado—Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2025.

FLATT, Robert J. Salt damage in porous materials: how high supersaturations are generated. *Journal of Crystal Growth*, v. 242, p. 435–454, 2002.

FLATT, Robert J.; SCHERER, George W. Thermodynamics of crystallization stresses in DEF. *Cement and Concrete Research*, v. 38, p. 325–336, mar. 2008.

FROTTÉ, Camila *et al.* Estudo das propriedades físicas e mecânicas de concreto com substituição parcial de agregado natural por agregado reciclado proveniente de RCD. *Revista Materia*, v. 22, n. 2, 2017.

FU, Yan *et al.* SIGNIFICANCE OF PRE-EXISTING CRACKS ON NUCLEATION OF SECONDARY ETTRINGITE IN STEAM CURED CEMENT PASTE. *Cement and Concrete Research*, v. 24, n. 6, p. 1015–1024, 1994.

GALLIAS, J. L. Action of gypsum on recycled aggregate concrete. *MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR SUSTAINABLE CONSTRUCTION–CIB WORLD BUILDING CONGRESS*, p. 175–182, 1998.

KRUGER, Patrícia. EFEITO DE DIFERENTES TEORES DE RESÍDUO DE GESSO SOBRE O ATAQUE INTERNO POR SULFATO EM ARGAMASSAS INCORPORANDO AGREGADOS RECICLADOS DE CONCRETO (ARC) OU MISTO (ARM). Tese de Doutorado—Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2021.

LEITE, Mônica Batista. AVALIAÇÃO DE PROPRIEDADES MECÂNICAS DE CONCRETOS PRODUZIDOS COM AGREGADOS RECICLADOS DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO. Tese de Doutorado—Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2001.

LUNARDI, Cecilia Vione. ESTUDO DA VIABILIDADE TÉCNICA DO USO DE RESÍDUOS DE CONSTRUÇÃO E DEMOLIÇÃO EM CAMADAS INFERIORES DE PAVIMENTOS RODOVIÁRIOS. Dissertação de Mestrado—Canoas: Universidade LaSalle, 2020.

MEHTA, P. Kumar; MONTEIRO, Paulo J. M. Concrete: Microstructure, Properties, and Materials. 3. ed. [S.l.: S.n.].

NITSCHKE, Pablo Ricardo *et al.* ATLAS CLIMÁTICO DO ESTADO DO PARANÁ. IAPAR, Londrina, 2019.

PEREIRA, Eduardo. INVESTIGAÇÃO E MONITORAMENTO DO ATAQUE POR SULFATOS DE ORIGEM INTERNA EM CONCRETOS NAS PRIMEIRAS IDADES. Tese de Doutorado—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2015.

PEREIRA, Elias. EFEITO DA REAÇÃO ÁLCALI-AGREGADO (RAA) ASSOCIADA AO ATAQUE INTERNO POR SULFATO (ISA) NA ABSORÇÃO E POROSIDADE DE COMPÓSITO DE MATRIZ CIMENTÍCIA. Dissertação de Mestrado—Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa, 2018.

PITSO, Reatile I.; MOSTAFA, Mohamed M. H.; ELSAIGH, Walied A. Incorporation of Recycled Concrete Aggregates as Road Pavement Material in South Africa. *International Journal of Pavement Research and Technology*, 2024.

Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasil, 2 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em: 14 jan. 2026

RESENDE, Heron Freitas *et al.* Uso de resíduos de construção e demolição como agregado reciclado no concreto: uma breve revisão de literatura. *Revista Principia - Divulgação Científica e Tecnológica do IFPB*, v. 61, n. 3, p. 691–709, 10 jul. 2024.

REVILLA-CUESTA, Víctor *et al.* Temporal flowability evolution of slag-based self-compacting concrete with recycled concrete aggregate. *Journal of Cleaner Production*, v. 299, 25 maio 2021.

RIZZO, Giovanna Falzetta. DURABILIDADE DE CONCRETOS COM AGREGADOS RECICLADOS. Dissertação de Mestrado—Campinas: PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE CAMPINAS, 2018.

SALLES, Pedro Valle *et al.* A importância da segregação do agregado reciclado na resistência e na durabilidade do concreto estrutural. *Ambiente Construído*, v. 21, n. 3, p. 177–196, set. 2021.

SANTILLÁN, Lautaro R.; ZEGA, Claudio J.; IRASSAR, Edgardo F. Current Knowledge and Pending Research on Sulfate Resistance of Recycled Aggregate Concrete. *Sustainability* (Switzerland), v. 16, n. 3, 1 fev. 2024.

SCHERER, George W. Crystallization in pores. *Cement and Concrete Research*, 1999.

SHI, Caijun *et al.* Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review. *Journal of Cleaner Production*, v. 112, p. 466–472, 20 jan. 2016.

SILVA, R. V.; DE BRITO, J.; DHIR, R. K. Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. *Construction and Building Materials*, v. 65, p. 201–217, 29 ago. 2014.

TAYLOR, H. F. W.; FAMY, C.; SCRIVENER, K. L. Delayed ettringite formation. *Cement and Concrete Research*, v. 31, p. 683–693, 2001.

TENÓRIO, J. J. L. *et al.* Concrete produced with recycled aggregates. *Revista IBRACON de Estruturas e Materiais*, 2012.

TORRES, Levi. Gestão de resíduos garante benefícios na construção civil. Disponível em: <<https://abrecon.org.br/artigos/gestao-de-residuos-garante-beneficios-na-construcao-civil>>.

TOVAR-RODRÍGUEZ, Gustavo *et al.* Expansion of mortars with gypsum contaminated fine recycled aggregates. *Construction and Building Materials*, v. 38, p. 1211–1220, jan. 2013.

VALDES, Analiet Calvo. ATAQUE INTERNO POR SULFATO: PARÂMETROS QUE INFLUENCIAM NA CINÉTICA DO PROCESSO DE DEGRADAÇÃO DO MATERIAL CIMENTÍCIO. Tese de Doutorado—Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 2023.

YEHIA, Sherif *et al.* Strength and Durability Evaluation of Recycled Aggregate Concrete. *International Journal of Concrete Structures and Materials*, v. 9, n. 2, p. 219–239, 1 jun. 2015.