



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
Campus de Ilha Solteira

LARISSA FÁTIMA VENDRAME VOURLIS

**Desenvolvimento de pastas cimentícias contendo hidrogel:  
uma opção sustentável para uso na Engenharia Civil**

A large, stylized graphic in the bottom right corner of the page. It features a light blue background with a pattern of small white dots. Overlaid on this is a white geometric design consisting of several thick lines that intersect to form a star-like or web-like pattern, with some triangular areas also filled with the dotted pattern.

Ilha Solteira  
2025



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA  
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

Campus de Ilha Solteira

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DOS MATERIAIS

LARISSA FÁTIMA VENDRAME VOURLIS

Desenvolvimento de pastas cimentícias contendo hidrogel:  
uma opção sustentável para uso na Engenharia Civil

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais, Universidade Estadual Paulista – UNESP, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – SP, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciência dos Materiais.

Área de concentração: Engenharia dos Materiais.

Prof. Dr. Fauze Ahmad Aouada (orientador)

Prof. Dr. Adhemar Watanuki Filho (coorientador)

Ilha Solteira  
2025

FICHA CATALOGRÁFICA  
Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

V973d Vourlis, Larissa Fátima Vendrame.  
Desenvolvimento de pastas cimentícias contendo hidrogel: uma opção sustentável para uso na engenharia civil / Larissa Fátima Vendrame Vourlis. -- Ilha Solteira: [s.n.], 2025  
113 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Engenharia dos Materiais, 2025

Orientador: Fauze Ahmad Aouada  
Coorientador: Adhemar Watanuki Filho  
Inclui bibliografia

1. Hidrogel. 2. Nanocompósitos. 3. Matriz cimentícia. 4. Cura interna.

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta pesquisa tem como objetivo explorar o potencial de um aditivo polimérico baseado em hidrogel de poliacrilamida, carboximetilcelulose e nanoargila cloisita- $\text{Na}^+$ , que usado na proporção adequada, age como um agente de cura interna. A adição desse aditivo e sua possível utilização para a autocura de pastas de cimento visa reduzir a dependência do processo de cura do cimento pelo procedimento usual. Há um grande desperdício de água nestes processos. Desta forma, a utilização da cura interna minimiza essa questão, promovendo um consumo eficiente dos recursos globais nas obras de engenharia. A pesquisa e a Universidade trouxeram a aplicação prática do conhecimento científico do estudante e a oportunidade de interagir com problemas reais do dia-a-dia.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This research aims to develop a polymeric hydrogel admixture based on polyacrylamide, carboxymethylcellulose, and cloisite- $\text{Na}^+$  nanoclay, which, when used in adequate proportion acts as an internal curing agent. The addition of this admixture and its possible application for the self-healing of cement pastes seeks to make conventional curing less necessary. There is a great waste of water in traditional curing methods. Therefore, the use of internal curing minimizes this issue, promoting the efficient consumption of global resources in engineering works. The research and the University brought the practical application of the student's scientific knowledge and the opportunity to interact with real-world problems of everyday life.

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

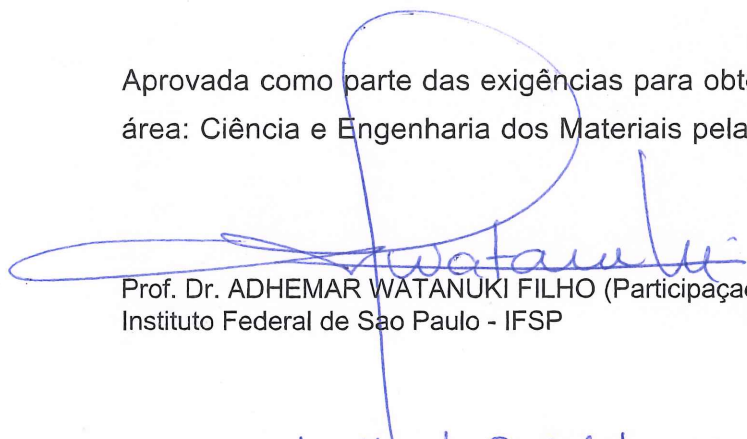
**TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Desenvolvimento de pastas cimentícias contendo hidrogel:  
uma opção sustentável para uso na Engenharia Civil**

**AUTORA: LARISSA FÁTIMA VENDRAME VOURLIS**

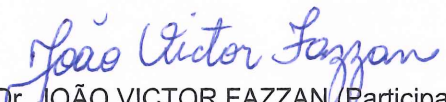
**ORIENTADOR: FAUZE AHMAD AOUADA**

**COORDENADOR: ADHEMAR WATANUKI FILHO**

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Mestra em Ciência dos Materiais,  
área: Ciência e Engenharia dos Materiais pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. ADHEMAR WATANUKI FILHO (Participação Presencial)  
Instituto Federal de São Paulo - IFSP

  
Prof. Dr. ALEX MICAEL DANTAS DE SOUSA (Participação Presencial)  
Departamento de Engenharia Civil / Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira - UNESP

  
Prof. Dr. JOÃO VICTOR FAZZAN (Participação Presencial)  
Departamento de Construção Civil / Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo - IFSP

Ilha Solteira, 27 de agosto de 2025

## **Dedicatória**

*Dedico esta dissertação a todos aqueles que têm medo de abraçar suas escolhas.  
A coragem vale a pena.*

*“Busquem conhecimento.” (E.T. Bilu)*

## **Agradecimentos**

O ser humano não nasceu para viver sozinho, e muito menos foi feito para se desenvolver sem apoio. O conhecimento cresce quando é regado através dos ensinamentos passados, mas de nada adianta esse conhecimento se as mentes que o habitam são instáveis e sem base. Dessa forma, meus agradecimentos especiais para todas as pessoas e entidades que me ajudaram nessa jornada.

Gratidão a Deus, por ter criado a minha centelha divina e compartilhado comigo toda a grandeza do Universo. Gratidão pela Espiritualidade da verdadeira Luz que sempre me acompanha, nessa vida e em outras. Um reconhecimento sincero ao Caboclo das Águas, Boiadeiro das Águas, para as Moças Bonitas, Pombo-Giras, Exus, Sereias, Erês, Baiano Custódio e a linha de Baianos, Anjos da Guarda, falange de Pretos Velhos. Aos meus guias, em especial Cigana, Cabocla Jurema e muitos outros que estão na minha egrégora e de todos a minha volta. Foi essa espiritualidade cheia de luz que me mostrou a verdadeira força que habita dentro de mim e que me amparou em todos os meus muitos momentos de dificuldades, sempre com palavras de carinho, paciência e sabedoria. E, é claro, humor.

Gratidão a minha família, por me mostrar as diversas formas de amor. A minha mãe, Sônia Aparecida Vendrame Vourlis, pelo exemplo de resiliência e inteligência. Duas são as asas que nos levam até o céu, amor e sabedoria, e ela tem as duas. A meu pai, Constantino Alexandre Vourlis, pela garra infinita de lutar por aquilo que acredita e por manter sempre como norte a honestidade. Estes são os exemplos pilares das minhas decisões. E ao meu irmão caçula, Gabriel Alexandre Vendrame Vourlis, por estar sempre pronto a me proteger.

Agradecimentos ao meu orientador, Prof. Dr. Fauze Ahmad Aouada, por toda a paciência, dedicação e inspiração, sendo um exemplo de conduta e sabedoria, e ao meu coorientador, Prof. Dr. Adhemar Watanuki Filho, pelo acompanhamento cuidadoso nessa jornada e pelos ensinamentos edificantes. Um agradecimento especial para Prof.<sup>a</sup> Dr.<sup>a</sup> Marcia Regina de Moura Aouada por conta do seu carinho e acolhimento.

Agradeço ao grupo de pesquisa Grupo de Compósitos e Nanocompósitos Híbridos (GCNH) pelo apoio e companheirismo e a Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira (FEIS), Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais (PPGCM), pela oportunidade.

Agradecimentos aos técnicos dos departamentos de Engenharia Civil e de Física e Química, pela paciência e ajuda necessária não só nos ensaios, mas também com conselhos. Em especial aos técnicos de laboratório Gilson, Flávio e Ozias.

Aos meus amigos, Amanda Gabriele Gobbo Kuhn, por me mostrar como, com a amizade certa, a vida pode ser doce, e a Max e Fernanda Negri, pelos conselhos, acolhimento e ajuda, tanto no plano físico quanto espiritual. Essa caminhada foi bem mais leve por causa de vocês.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo incentivo para realização desta pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - ***Código de Financiamento 001***.

## Resumo

O cimento é um dos materiais mais utilizados na construção civil ao redor do mundo, desde a Roma Antiga, por sua durabilidade e resistência a compressão. Contudo, para que tais características se tornem adequadas, a cura do cimento deve ser eficiente. Uma cura eficiente, com frequência, necessita de uma quantidade exacerbada de água. Desta forma, para minimizar essas desvantagens, aposta-se na cura interna em detrimento da cura externa, que é a mais usual. A cura interna necessita de um agente de cura interna, um aditivo. Assim, o presente estudo dedicou-se a entender como o hidrogel constituído por poliacrilamida, carboximetilcelulose e nanoargila cloisita- $\text{Na}^+$ , adicionado à pasta de cimento na proporção de 0,5% em relação à massa de cimento e razão água/cimento igual a 0,35, altera as propriedades da pasta cimentícia de Cimento Portland CPV ARI, favorecendo o processo de cura interna. O hidrogel analisado foi escolhido pela sua capacidade de absorção de água e sua posterior liberação. Os resultados mostraram que o uso do hidrogel foi capaz de reduzir a porcentagem de ar incorporado, a absorção de água e o índice de consistência, além de apresentar uma menor taxa de exsudação. Não foi observada alteração significativa na resistência à compressão. A retração da matriz contendo o hidrogel apresentou uma diminuição e estabilidade logo nas primeiras 24h de cura. Tais resultados apontam para a capacidade de absorção de água e liberação, a posteriori, do referido hidrogel, além da capacidade do mesmo em ocupar vazios, obstruindo a saída da água da pasta de cimento. Foi possível identificar, a partir da técnica de microscopia eletrônica de varredura, as estruturas referentes as fases do cimento e indícios da presença do hidrogel na matriz cimentícia. A análise de TG indica que entre as idades de cura de 56 e 112 dias há uma possível liberação da água de intumescimento do hidrogel, com um discreto aumento do grau de hidratação para a cura de 112 dias. Isso demonstra que essa pequena quantidade de aditivo polimérico é capaz de trazer mudanças significativas mesmo em longas idades, indicando sua ação como agente de cura interna, incentivando futuros estudos.

**Palavras Chave:** hidrogel, nanocompósitos, matriz cimentícia, cura interna.

## Abstract

Cement is one of the most widely used materials in civil construction worldwide, dating back to Ancient Rome, due to its durability and compressive strength. However, to ensure that such properties develop properly, an efficient curing process is required. Efficient curing often demands an excessive amount of water. Therefore, to minimize these disadvantages, internal curing is considered as an alternative to conventional external curing. Internal curing requires a specific curing agent, an additive. This study aimed to investigate how a hydrogel composed of polyacrylamide, carboxymethylcellulose, and cloisite- $\text{Na}^+$  nanoclay, when added to cement paste at a proportion of 0.5% relative to cement mass and water/cement ratio of 0.35, influences the properties of Portland cement paste (CPV ARI), favoring the internal curing process. The hydrogel was selected due to its water absorption capacity and subsequent release. The results demonstrated that the incorporation of the hydrogel reduced the percentage of entrained air, water absorption, and consistency index, as well as leading to a lower bleeding rate. No significant change in compressive strength was observed. The shrinkage of the matrix containing hydrogel exhibited a decrease and stabilization within the first 24 hours of curing. These findings suggest that the hydrogel's ability to absorb and subsequently release water, as well as to occupy voids and obstruct water migration from the cement paste, were decisive factors. Scanning electron microscopy (SEM) enabled the identification of cement hydration phases and indications of hydrogel presence within the cementitious matrix. Thermogravimetric analysis (TG) indicated that, between 56 and 112 days of curing, there was a possible release of swelling water retained in the hydrogel, with a slight increase in the degree of hydration at 112 days. This demonstrates that even a small amount of polymeric additive is capable of producing significant changes at extended curing ages, reinforcing its potential for promoting internal curing and encouraging further research.

**Keywords:** hydrogel, nanocomposites, cement matrix, internal curing.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                                                                                      |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1.</b> Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU dos quais o presente trabalho se insere.....                                                                        | 24 |
| <b>Figura 2.</b> Diferentes classificações de hidrogel .....                                                                                                                         | 31 |
| <b>Figura 3.</b> Estrutura molecular de alguns polissacarídeos utilizados para obtenção de hidrogéis.....                                                                            | 32 |
| <b>Figura 4.</b> Estrutura molecular de alguns polímeros sintéticos que podem ser utilizados para obtenção de hidrogéis.....                                                         | 33 |
| <b>Figura 5.</b> Micrografia eletrônica obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura representando as diferentes fases presentes no clínquer .....                     | 40 |
| <b>Figura 6.</b> Representação esquemática de um sistema da cura a vapor em relação à temperatura e tempo .....                                                                      | 45 |
| <b>Figura 7.</b> Comparação de artigos científicos publicados no Site Science Direct sobre hidrogéis versus polímeros superabsorventes (SAP). Pesquisa realizada em 31/12/2024 ..... | 49 |
| <b>Figura 8.</b> Esquema ilustrativo das etapas da síntese do hidrogel.....                                                                                                          | 52 |
| <b>Figura 9.</b> Estrutura representativa da nanoargila cloisita- $\text{Na}^+$ .....                                                                                                | 54 |
| <b>Figura 10.</b> Esquema simplificado do processo de produção de pasta de cimento para o composto e o compósito contendo o hidrogel .....                                           | 56 |
| <b>Figura 11.</b> Fotografia digital da argamassadeira utilizada [1] e da pasta de cimento após o preparo [2].....                                                                   | 57 |
| <b>Figura 12.</b> Detalhes do equipamento para a determinação do índice de consistência.....                                                                                         | 58 |
| <b>Figura 13.</b> Fotografia digital da pasta de cimento antes [1] e depois [2] do abatimento do corpo de prova.....                                                                 | 59 |
| <b>Figura 14.</b> Fotografia digital da pasta de cimento em processo de medição da exsudação.....                                                                                    | 60 |
| <b>Figura 15.</b> Fotografia digital do aparelho relógio comparador mecânico vertical usado para a medição de retração .....                                                         | 62 |
| <b>Figura 16.</b> Fotografia digital das fôrmas usadas no teste de retração .....                                                                                                    | 63 |

|                   |                                                                                                                                                                                    |    |
|-------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 17.</b> | Marcações e dimensões do corpo de prova.....                                                                                                                                       | 64 |
| <b>Figura 18.</b> | Fotografia digital do equipamento Prensa de SBR prestes a realizar a divisão dos corpos de prova [1] e detalhes sobre a posição das marcações no corpo de prova no apoios [2]..... | 64 |
| <b>Figura 19.</b> | Fotografia digital das fôrmas lubrificadas [1] e corpos de prova em processo de cura [2].....                                                                                      | 65 |
| <b>Figura 20.</b> | Fotografia digital do equipamento Emic® DL30000N realizando o ensaio de compressão.....                                                                                            | 66 |
| <b>Figura 21.</b> | Fotografia digital das amostras submersas na câmara úmida .....                                                                                                                    | 67 |
| <b>Figura 22.</b> | Valores do índice de consistência obtidos para o controle e com hidrogel.....                                                                                                      | 71 |
| <b>Figura 23.</b> | Taxa de exsudação de pastas cimentícias com e sem hidrogel .....                                                                                                                   | 72 |
| <b>Figura 24.</b> | Volume total de exsudação em mL obtido para as pastas controle e contendo hidrogel.....                                                                                            | 73 |
| <b>Figura 25.</b> | Porcentagem de ar incorporado nas amostras de pastas de controle e com hidrogel.....                                                                                               | 74 |
| <b>Figura 26.</b> | Variação de retração hidráulica por secagem de pastas cimentícias de controle e produzidas com hidrogéis .....                                                                     | 76 |
| <b>Figura 27.</b> | Resultados de compressão para a pasta de controle e para a pasta com o hidrogel.....                                                                                               | 79 |
| <b>Figura 28.</b> | Absorção de água em massa em relação a massa seca da pasta de cimento e do controle.....                                                                                           | 81 |
| <b>Figura 29.</b> | Valores de densidade aparente em função do tempo de cura para as diferentes matrizes estudadas .....                                                                               | 82 |
| <b>Figura 30.</b> | Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra contendo hidrogel após 24h de cura. O círculo azul mostra indícios da presença do hidrogel. ....                                | 84 |
| <b>Figura 31.</b> | Imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura do hidrogel entumescido com água destilada. ....                                                                                    | 85 |

|                                                                                                                                                                                                                              |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 32.</b> Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra controle observando a presença de C-S-H (círculo vermelho), etringita (círculo amarelo), C-H (círculo rosa) e vazios (flecha), com 28 dias de cura..... | 86 |
| <b>Figura 33.</b> Micrografia eletrônica, obtida por MEV, do compósito observando a presença de C-S-H (círculo vermelho), etringita (círculo amarelo), C-H (círculo rosa) e vazios (flecha), com 28 dias de cura.....        | 86 |
| <b>Figura 34.</b> Micrografia eletrônica, obtida por MEV, do Controle observando a presença de vazios (flechas) e C-H (círculo rosa), com 56 dias de cura .....                                                              | 87 |
| <b>Figura 35.</b> Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da pasta com hidrogel observando a presença de vazios (flechas), C-H (círculo rosa) e C-S-H (círculo vermelho), com 56 dias de cura.....                           | 87 |
| <b>Figura 36.</b> Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra controle com 24h de cura (A) e 56 dias de cura (B) .....                                                                                                | 88 |
| <b>Figura 37.</b> Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra do compósito com 24h de cura (A) e 56 dias de cura (B).....                                                                                             | 89 |
| <b>Figura 38.</b> Curvas TG/DTG para pastas de cimento de controle e pastas de cimento contendo hidrogel com cura de 28 dias. ....                                                                                           | 91 |
| <b>Figura 39.</b> Curvas TG/DTG para pastas de cimento de controle e pastas de cimento contendo hidrogel com cura de 56 dias. ....                                                                                           | 92 |
| <b>Figura 40.</b> Curvas TG/DTG para pastas de cimento de controle e pastas de cimento contendo hidrogel com cura de 112 dias. ....                                                                                          | 92 |
| <b>Figura 41.</b> Comparação entre as curvas TG/DTG para as idades de 28, 56 e 112 dias para as pastas de controle .....                                                                                                     | 93 |
| <b>Figura 42.</b> Comparação entre as curvas TG/DTG para as idades de 28, 56 e 112 dias para as pastas de cimento contendo hidrogel.....                                                                                     | 93 |

## Lista de Tabelas

|                                                                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tabela 1.</b> Reações químicas do processo de obtenção do clínquer .....                                                                                                                             | 38 |
| <b>Tabela 2.</b> Nome e composição dos compostos do cimento.....                                                                                                                                        | 39 |
| <b>Tabela 3.</b> Limites de composição do cimento Portland (em porcentagem de massa).....                                                                                                               | 41 |
| <b>Tabela 4.</b> Dosagens estimadas para 1m <sup>3</sup> de pastas de cimento de controle e contendo hidrogel.....                                                                                      | 55 |
| <b>Tabela 5.</b> Elementos constituintes do clínquer e suas origens e fases associadas.....                                                                                                             | 89 |
| <b>Tabela 6.</b> Resultados da análise de EDS para a pasta de controle e a pasta contendo hidrogel para as curas de 1, 28 e 56 dias.....                                                                | 90 |
| <b>Tabela 7.</b> Detalhamentos das temperaturas e variações de massa das curvas TG/DTG de pastas de cimento de controle e pastas de cimento contendo hidrogel em cura de 28, 56 e 112 dias.....         | 94 |
| <b>Tabela 8.</b> Grau de hidratação, porcentagem de massa da amostra até 105°C, de massa de água livre e de água estrutural para os traços de controle e hidrogel nos dias de 28, 56 e 112 de cura..... | 95 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|                        |                                                                                                     |
|------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>3D</b>              | 3 dimensões                                                                                         |
| <b>a/c</b>             | Relação água/cimento                                                                                |
| <b>AAm</b>             | Acrilamida                                                                                          |
| <b>ABNT</b>            | Associação Brasileira de Normas Técnicas                                                            |
| <b>ABS</b>             | Poli(acrilonitrila-butadieno-estireno)                                                              |
| <b>ANOVA</b>           | Análise de variância                                                                                |
| <b>AP</b>              | Acelerador de Pega                                                                                  |
| <b>APP</b>             | Aceleradores de Pega para Concreto Projetado                                                        |
| <b>AR</b>              | Acelerador de resistência                                                                           |
| <b>ARI</b>             | Alta Resistência Inicial                                                                            |
| <b>AS/AM/HNTs-RDC</b>  | hidrogel anisotrópico biomimético híbrido                                                           |
| <b>ASCs</b>            | Células-tronco derivadas de tecido adiposo                                                          |
| <b>ASTM</b>            | American Society for Testing and Materials                                                          |
| <b>AWA</b>             | Aditivos anti-washout                                                                               |
| <b>C<sub>2</sub>S</b>  | Silicato dicálcico (Belita) (2CaO.SiO <sub>2</sub> )                                                |
| <b>C<sub>3</sub>A</b>  | Aluminato cálcico (3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )                                            |
| <b>C<sub>3</sub>S</b>  | Silicato Tricálcico (Alita) (3CaO.SiO <sub>2</sub> )                                                |
| <b>C<sub>4</sub>AF</b> | Ferroaluminato tetracálcico (4CaO. Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) |
| <b>Ca<sup>2+</sup></b> | Íons de cálcio                                                                                      |
| <b>CaAlg</b>           | Hidrogel de alginato de cálcio                                                                      |
| <b>CaO</b>             | Óxido de Cálcio (cal virgem)                                                                        |
| <b>CAPES</b>           | Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior                                         |
| <b>CCUS</b>            | Utilização e armazenamento de dióxido de carbono                                                    |
| <b>CH</b>              | Controladores de Hidratação                                                                         |
| <b>C-H</b>             | Hidróxido de Cálcio (cal hidratada)                                                                 |
| <b>CMC</b>             | Carboximetilcelulose                                                                                |
| <b>CO<sub>2</sub></b>  | Dióxido de Carbono (ar atmosférico)                                                                 |
| <b>-COOH</b>           | Ácido Carboxílico                                                                                   |

|                  |                                                               |
|------------------|---------------------------------------------------------------|
| <b>CP I</b>      | Cimento Portland comum                                        |
| <b>CP I – S</b>  | Cimento Portland comum com adições                            |
| <b>CP II – E</b> | Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno |
| <b>CP II – F</b> | Cimento Portland composto com material carbonático            |
| <b>CP II – Z</b> | Cimento Portland composto com material pozolânico             |
| <b>CP III</b>    | Cimento Portland de alto forno                                |
| <b>CP IV</b>     | Cimento Portland pozolânico                                   |
| <b>CP V</b>      | Cimento Portland de Alta Resistência Inicial                  |
| <b>CPB</b>       | Cimento Portland branco                                       |
| <b>CR</b>        | Compensadores de Retração                                     |
| <b>C-S-H</b>     | Silicato de Cálcico Hidratado                                 |
| <b>CVP</b>       | Aditivos específicos para concreto vidro-prensado             |
| <b>EDS</b>       | Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X             |
| <b>FEIS</b>      | Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira                      |
| <b>GCNH</b>      | Grupo de Compósitos e Nanocompósitos Híbridos                 |
| <b>GHz</b>       | GigaHertz                                                     |
| <b>HBC</b>       | Concreto à base de hidrogel                                   |
| <b>HEMC</b>      | Hidrogel de hidroxipropilmetilcelulose                        |
| <b>HPUC</b>      | Hidrogel de poliuretano-quitosana                             |
| <b>IA</b>        | Incorporadores de Ar                                          |
| <b>IA-L</b>      | Incorporadores de ar para Concreto Leve                       |
| <b>IPN</b>       | Rede Interpretante                                            |
| <b>m/v</b>       | Relação massa/volume                                          |
| <b>MBAAm</b>     | N'-N'-metilenobisacrilamida                                   |
| <b>MEV</b>       | Microscopia Eletrônica de Varredura                           |
| <b>MHz</b>       | MegaHertz                                                     |
| <b>MR</b>        | Mechanical Response                                           |
| <b>MV-AS</b>     | Modificadores de viscosidade antissegregante                  |
| <b>MV-RT</b>     | Modificadores de viscosidade de retenção de água              |
| <b>NBR</b>       | Norma Brasileira                                              |

|                        |                                                                  |
|------------------------|------------------------------------------------------------------|
| <b>-NH<sub>2</sub></b> | Aminas                                                           |
| <b>ODS</b>             | Objetivos de Desenvolvimento Sustentável                         |
| <b>OH<sup>-</sup></b>  | Íons hidróxido                                                   |
| <b>-OH</b>             | Hidroxila                                                        |
| <b>ONU</b>             | Organização das Nações Unidas                                    |
| <b>OS</b>              | Poliestireno                                                     |
| <b>PAAm</b>            | Poliacrilamida                                                   |
| <b>PEAD</b>            | Polietileno de alta densidade                                    |
| <b>PEBD</b>            | Polietileno de baixa densidade                                   |
| <b>PEG</b>             | Polietilenoglicol                                                |
| <b>PHEMA</b>           | Poli-(2-hidroxietil metacrilato)                                 |
| <b>PNIPAm</b>          | Poli(N-isopropilacrilamida)                                      |
| <b>PPGCM</b>           | Programa de Pós-Graduação em Ciência dos Materiais               |
| <b>PVC</b>             | Poli(cloreto de vinila)                                          |
| <b>RA1</b>             | Redutor de Água tipo 1                                           |
| <b>RA1-0</b>           | Redutor de Água tipo 1                                           |
| <b>RA1-R</b>           | Redutor de Água tipo 1                                           |
| <b>RA2</b>             | Redutor de Água tipo 2                                           |
| <b>RA2-A</b>           | Redutor de Água tipo 2                                           |
| <b>RA2-R</b>           | Redutor de Água tipo 2                                           |
| <b>RAC</b>             | Redutores de absorção capilar                                    |
| <b>RC</b>              | Redutores de Corrosão                                            |
| <b>RILEM</b>           | Réunion Internationale des Laboratoires et Experts des Matériaux |
| <b>RP</b>              | Redutores de Permeabilidade                                      |
| <b>RR</b>              | Redutores de Retração                                            |
| <b>SAP</b>             | Polímeros Superabsorventes                                       |
| <b>SH-ACE</b>          | Hidrogéis superabsorventes revestido com C-acetocloro            |
| <b>TEMED</b>           | N,N,N',N'-tetrametiletilenodiamina                               |
| <b>TG</b>              | Análise termogravimétrica                                        |
| <b>TGA</b>             | Análise termogravimétrica                                        |

|                                           |                                |
|-------------------------------------------|--------------------------------|
| <b>UNESP</b>                              | Universidade Estadual Paulista |
| <b><math>\alpha</math>-C<sub>2</sub>S</b> | Polimorfismo $\alpha$          |
| <b><math>\beta</math>-C<sub>2</sub>S</b>  | Polimorfismo $\beta$           |
| <b><math>\gamma</math>-C<sub>2</sub>S</b> | Polimorfismo $\gamma$          |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|                             |                                                                     |
|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| <b>%AB</b>                  | Porcentagem de absorção de água                                     |
| <b>®</b>                    | Marca Registrada                                                    |
| <b>°C</b>                   | Graus Célsius                                                       |
| <b>A</b>                    | Ar incorporado                                                      |
| <b>cm<sup>3</sup></b>       | Centímetros cúbicos                                                 |
| <b>D</b>                    | Densidade                                                           |
| <b>DH</b>                   | Grau de hidratação (%)                                              |
| <b>d<sub>t</sub></b>        | Densidade de massa teórica da pasta de cimento (g/cm <sup>3</sup> ) |
| <b>G</b>                    | Gramas                                                              |
| <b>kV</b>                   | Quilo Volts                                                         |
| <b>L<sub>dc</sub></b>       | Porcentagem de perda de peso da descarbonatação (%)                 |
| <b>L<sub>dh</sub></b>       | Porcentagem de perda de peso da desidratação (%)                    |
| <b>L<sub>dx</sub></b>       | Porcentagem de perda de peso da desidroxilação (%)                  |
| <b>m<sub>água</sub></b>     | Massa da água que compõe a pasta de cimento (g)                     |
| <b>m<sub>c</sub></b>        | Massa com conteúdo                                                  |
| <b>MI</b>                   | Mililitros                                                          |
| <b>m<sub>s</sub></b>        | Massa da pasta de cimento (g)                                       |
| <b>m<sub>sat</sub></b>      | Massa saturada                                                      |
| <b>m<sub>v</sub></b>        | Massa vazia                                                         |
| <b>Volume<sub>cp</sub></b>  | Volume do corpo de prova                                            |
| <b>V<sub>r</sub></b>        | Volume do recipiente cilíndrico (cm <sup>3</sup> ) sem vazios       |
| <b>WB</b>                   | Água quimicamente ligada (%)                                        |
| <b>γ<sub>s</sub></b>        | Massa específica da pasta de cimento                                |
| <b>Mm</b>                   | Micrometro                                                          |
| <b>ρ<sub>aparente</sub></b> | Densidade aparente                                                  |

## Sumário

|                                                                                                                 |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 1. Introdução .....                                                                                             | 22 |
| 2. Referencial Teórico .....                                                                                    | 26 |
| 2.1. Polímeros .....                                                                                            | 26 |
| 2.1.1. Classificações de Materiais Poliméricos .....                                                            | 28 |
| 2.2. Hidrogel .....                                                                                             | 30 |
| 2.2.1. Classificação do Hidrogel .....                                                                          | 31 |
| 2.2.2. Aplicações .....                                                                                         | 34 |
| 2.3. Cimento .....                                                                                              | 37 |
| 2.3.1. Cimento Portland: composição e fabricação .....                                                          | 37 |
| 2.4. Cura do cimento .....                                                                                      | 42 |
| 2.4.1. Tipos de cura .....                                                                                      | 44 |
| 2.5. Cura interna e hidrogel .....                                                                              | 48 |
| 3. Justificativas .....                                                                                         | 50 |
| 4. Objetivos .....                                                                                              | 51 |
| 5. Materiais e Métodos .....                                                                                    | 51 |
| 5.1. Síntese do hidrogel .....                                                                                  | 51 |
| 5.1.1. Características do hidrogel e fundamentação técnica para a escolha dos seus principais componentes ..... | 53 |
| 5.2. Pasta de Cimento .....                                                                                     | 55 |
| 5.3. Caracterização da pasta contendo nanocompósitos em estado fresco .....                                     | 58 |
| 5.3.1. Índice de Consistência .....                                                                             | 58 |
| 5.3.2. Exsudação .....                                                                                          | 60 |
| 5.3.3. Densidade e teor de ar incorporado .....                                                                 | 61 |
| 5.4. Caracterização das propriedades do sistema pasta-nanocompósito em seu estado endurecido .....              | 62 |

|        |                                                                  |    |
|--------|------------------------------------------------------------------|----|
| 5.4.1. | Retração Hidráulica .....                                        | 62 |
| 5.4.2. | Compressão Axial.....                                            | 64 |
| 5.4.3. | Absorção de Água.....                                            | 66 |
| 5.4.4. | Densidade Aparente.....                                          | 67 |
| 5.4.5. | Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) .....                  | 68 |
| 5.4.6. | Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) .....    | 68 |
| 5.4.7. | Análise Termogravimétrica .....                                  | 68 |
| 5.4.8. | Grau de Hidratação e Porcentagem de Água Livre e Estrutural..... | 69 |
| 5.4.9. | Análise Estatística.....                                         | 69 |
| 6.     | Resultados e Discussão.....                                      | 71 |
| 6.1.   | Estado Fresco.....                                               | 71 |
| 6.1.1. | Índice de Consistência .....                                     | 71 |
| 6.1.2. | Exsudação .....                                                  | 72 |
| 6.1.3. | Teor de ar incorporado.....                                      | 74 |
| 6.2.   | Estado Endurecido .....                                          | 76 |
| 6.2.1. | Retração Hidráulica .....                                        | 76 |
| 6.2.2. | Compressão Axial.....                                            | 78 |
| 6.2.3. | Absorção de Água.....                                            | 80 |
| 6.2.4. | Densidade Aparente.....                                          | 82 |
| 6.2.5. | Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV.....                   | 83 |
| 6.2.6. | Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) .....    | 89 |
| 6.2.7. | Análise Termogravimétrica .....                                  | 90 |
| 7.     | Conclusões.....                                                  | 97 |
| 8.     | Referências Bibliográficas.....                                  | 99 |

## 1. Introdução

Em todo o mundo, o concreto é utilizado na construção civil, por sua durabilidade intrínseca, decorrente de suas propriedades físico-químicas, que são semelhantes às rochas naturais. Embora seja um material poroso, este possui uma elevada resistência a choques mecânicos e à ação do fogo (Fusco; Onishi, 2017).

O uso do concreto remonta à antiguidade, onde suas técnicas de obtenção foram continuamente aprimoradas ao longo do tempo. Portanto, é natural supor que as tecnologias envolvendo concreto e seus componentes seguirão em pleno desenvolvimento (Neville, 2016).

Tradicionalmente, o concreto simples é composto por uma mistura de água, cimento e agregados miúdos e graúdos, sendo que suas proporções influenciam diretamente as propriedades físicas tanto no estado fresco quanto no estado endurecido. Com o avanço tecnológico, tornou-se comum a incorporação de outros elementos à matriz cimentícia, como aço, fibras e aditivos, com o intuito de melhorar as propriedades do concreto (NBR 7212, 2021; (NBR 6118, 2023).

Como exemplo, destaca-se o concreto com aço, também conhecido como concreto armado ou concreto protendido. A adição de aço supre a falta da resistência à tração da matriz cimentícia, o que permite a execução de construções mais complexas. Assim, quanto maior a complexidade na construção civil, maior é a necessidade de desenvolvimento de materiais com maior – e melhor desempenho, o que pode ser alcançado, entre outras estratégias, pelo uso de aditivos. Tais materiais proporcionam vantagens diversas ao concreto, sejam elas físicas, químicas ou econômicas, o que permite o seu uso em situações que antes eram impossíveis (Neville, 2016).

O principal objetivo do uso de aditivos é mitigar ou até mesmo eliminar patologias recorrentes do concreto, como fissuras, retração plástica, porosidade excessiva e elevada permeabilidade. Além disso, esses aditivos contribuem para o aumento da durabilidade e o do desempenho geral da estrutura (Mechtcherine; Secrieru; Schröfl, 2015). Quando incorporados à mistura, os aditivos conferem características com foco na solução de limitações estruturais e operacionais. Dessa forma, ao adicionar os aditivos, os concretos são chamados de concretos especiais (Santos; Tashima; Moura; Aouada, 2016).

De acordo com a NBR 11768-1:2019, os aditivos são geralmente acrescentados ao concreto em quantidades que não ultrapassam 5% da massa do ligante, a fim de reestruturar as propriedades do concreto em seu estado fresco ou endurecido.

É fundamental, no entanto, garantir que os aditivos utilizados apresentem compatibilidade química com os demais componentes da matriz cimentícia, para evitar qualquer efeito prejudicial, como perda da resistência ou reações indesejadas entre os materiais constituintes, o que pode resultar na formação de compostos prejudiciais à integridade do material (Aspiotis et al., 2021; Jiang; Li; Yuan, 2015).

Diversas classificações podem ser atribuídas aos aditivos utilizados em concretos. A norma brasileira NBR 11768-1:2019 apresenta uma atualização importante no arranjo dos aditivos químicos, estruturando-os em categorias modernas conforme sua função e desempenho. Segundo essa norma, os aditivos são classificados em: redutores de água tipo 1 (RA1; RA1-R; RA1-0), redutores de água tipo 2 (RA2; RA2-R; RA2-A), controladores de hidratação (CH), aceleradores de pega (AP), aceleradores de resistência (AR), aceleradores de pega para concreto projetado (APP), compensadores de retração (CR), redutores de retração (RR), incorporadores de ar (IA), incorporadores de ar para concreto leve (IA-L), redutores de corrosão (RC), modificadores de viscosidade de retenção de água (MV-RT), modificadores de viscosidade antissegregante (MV-AS), redutores de absorção capilar (RAC), redutores de permeabilidade (RP), além de aditivos específicos para concreto vidro-prensado (CVP).

Outra forma relevante de classificação dos aditivos considera o tipo de modificação que promovem na matriz cimentícia, podendo ser de natureza física ou química. Em relação aos efeitos físicos, estes influenciam as propriedades do concreto sem interferir diretamente nas reações químicas de hidratação. Um exemplo é a modificação da distribuição granulométrica. (Ramachandran, 1997).

Por outro lado, os aditivos químicos interagem quimicamente com os componentes do concreto, de forma a alterar suas características por meio de reações químicas específicas, como no caso de aceleradores de pega ou controladores de hidratação (NBR 11768-1, 2019).

Embora existam inúmeros materiais com potencial para aplicação como aditivos, esta dissertação concentra-se especificamente em aditivos poliméricos, com ênfase nos hidrogéis. Hidrogéis são materiais poliméricos com capacidade de absorver grande quantidade de líquidos em sua estrutura tridimensional sem comprometer sua integridade. Quando incorporados à matriz cimentícia, esses materiais atuam como agentes de cura interna, promovendo a liberação gradual de água durante o processo de hidratação. Esse mecanismo favorece a hidratação homogênea da pasta de cimento, atingindo tanto a região de interior quanto as zonas periféricas da matriz, contribuindo para um ganho mais uniforme de resistência e durabilidade.

Estudos recentes têm investigado diversas composições de hidrogéis e dosagens de concreto, indicando, em alguns casos, melhorias nas propriedades mecânicas do material. Além

disso, a eficácia na cura interna possibilita a redução ou até mesmo a eliminação da necessidade de métodos tradicionais de cura externa, que demandam grande volume de água. Práticas convencionais, como a saturação de lajes com água para evitar fissuração por retração, tornam-se, assim, menos necessárias, de forma a promover uma abordagem mais sustentável e eficiente no uso dos recursos hídricos (Saravanakumar et al., 2023).

As inovações propostas, como o uso de hidrogéis no concreto, alinham-se diretamente a 5 dos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) estabelecidos pela Organização das Nações Unidas (ONU), conforme ilustrado na Figura 1. Ao contribuir para o uso mais eficiente da água em atividades construtivas, essas tecnologias atendem ao ODS 6 — Água Potável e Saneamento. Simultaneamente, promovem o crescimento econômico sustentado por meio da modernização tecnológica, com responsabilidade ambiental e uso eficiente dos recursos naturais, em consonância com os ODS 8 — Trabalho Decente e Crescimento Econômico e 12 — Consumo e Produção Responsáveis.

**Figura 1.** Objetivos de Desenvolvimento Sustentável da ONU dos quais o presente trabalho se insere



(Fonte: adaptado de Nações Unidas, 2024)

Adicionalmente, considera-se a viabilidade de uma futura industrialização voltada à produção em larga escala desses aditivos, bem como o estímulo à pesquisa e ao desenvolvimento tecnológico na área, aspectos que se relacionam ao ODS 9 — Indústria,

Inovação e Infraestrutura. No contexto brasileiro, país em desenvolvimento cuja principal matéria-prima na construção civil é o concreto, tais avanços podem impulsionar significativamente o progresso técnico-científico e socioeconômico nacional.

Por fim, a adoção de soluções sustentáveis no setor da construção contribui para a redução do impacto ambiental negativo per capita nas áreas urbanas, atendendo ao ODS 11 — Cidades e Comunidades Sustentáveis (Nações Unidas, 2024).

## 2. Referencial Teórico

### 2.1. Polímeros

Falar em polímeros é, de certo modo, referir-se ao cotidiano contemporâneo, dada a vasta gama de aplicações desses materiais em diversos setores. Eles estão presentes em utensílios de cozinha, películas de proteção para dispositivos móveis, componentes de aparelhos eletrônicos, entre inúmeros outros produtos. Essa ampla versatilidade se deve à grande variedade de polímeros existentes, cada qual com propriedades físico-químicas distintas que os tornam adequados para diferentes finalidades. Do ponto de vista estrutural, polímeros são macromoléculas compostas por unidade de repetição chamada “mero”. Podem ser classificados em duas categorias: naturais, como a borracha natural e a celulose; e sintéticos, desenvolvidos em laboratório, como o poli(cloreto de vinila) (PVC) ou poliestireno (PS) (Canevarolo, 2010).

O primeiro polímero sintético a ser sintetizado foi a *baquelite*, desenvolvido em 1907 pelo químico Leo Baekeland, por meio da reação entre fenol e formaldeído. A principal característica da baquelite é sua rigidez após o resfriamento, o que a classifica como um polímero termorrígido. Entre as décadas de 1920 e 1950, foi amplamente utilizado em diversos produtos; no entanto, caiu em desuso devido à sua fragilidade e à inviabilidade de reciclagem, sendo gradualmente substituída por polímeros mais versáteis, como o PVC. Apesar disso, sua descoberta representou um marco histórico na Ciência dos Materiais, abrindo caminho para o desenvolvimento de uma ampla gama de polímeros sintéticos subsequentes (American Chemical Society, 1993).

Os polímeros sintéticos são obtidos pelo processo de polimerização, no qual uma molécula simples, denominada monômero, reage quimicamente e torna-se capaz de se unir a outras moléculas, idênticas ou diferentes, para assim formar uma cadeia de macromolécula com unidades de repetição que dará origem ao polímero. O monômero, portanto, é a substância precursora do polímero, enquanto o mero representa sua unidade de repetição. A quantidade de meros presentes na cadeia determina o grau de polimerização, o qual está diretamente relacionado à massa molar do polímero, e consequentemente, ao comprimento da cadeia (Canevarolo, 2010).

A polimerização pode ocorrer por diferentes rotas de síntese, sendo as mais comuns a polimerização por adição e por condensação. Na poliadição ocorre uma conversão praticamente completa dos monômeros em polímero, sem formação de subprodutos. Já na policondensação,

há eliminação de moléculas de baixa massa molar, como água ou metanol, durante a formação do polímero (Young; Lovell, 2011).

A polimerização também pode ser classificada com base no mecanismo de crescimento da cadeia polimérica. Na polimerização por etapas, o processo ocorre de maneira gradual e geralmente o resultado gera polímeros de massa molar maior, comparados aos obtidos pelo mecanismo seguinte. Já a polimerização em cadeia tem um mecanismo de reação com cinética rápida, onde o tamanho final da macromolécula é atingido quase que instantaneamente (Shackelford, 2011).

Assim, ao relacionar a definição de polímero, com mero e grau de polimerização é possível associar que a determinação da massa molar final de um polímero é a massa molar do mero multiplicada pelo seu grau de polimerização. Entretanto, tal valor não é fixo, uma vez que os polímeros apresentam distribuições de massa molar devido ao complexo mecanismo de formação, frequentemente do tipo gaussiana. O aumento da massa molar influencia significativamente diversas propriedades físico-químicas do polímero, como a viscosidade das soluções, a resistência à tração e ao impacto, além da solubilidade, que tende a diminuir com o aumento da massa (Askeland, 2011).

Para que uma molécula possa originar um polímero, ela deve apresentar funcionalidade no mínimo igual a 2, ou seja, possuir ao menos dois pontos reativos capazes de formar ligações sucessivas com outras unidades monoméricas, e assim, promover o crescimento da cadeia polimérica. Essa bifuncionalidade pode ser proporcionada por uma ligação dupla (poliadição) ou por dois grupos funcionais reativos (policondensação). Já a polifuncionalidade, caracterizada pela presença de três ou mais grupos reativos (ou por duas ligações duplas), é essencial para a formação de estruturas tridimensionais reticuladas, como ocorre no caso dos hidrogéis (Young; Lovell, 2011).

Além da classificação baseado no método de preparação, os polímeros também possuem outras classificações como às associadas a estrutura química, arranjo de meros, comportamento mecânicos entre outros fins. Sob essa perspectiva, serão detalhadas, algumas das principais classificações de materiais poliméricos.

### 2.1.1. Classificações de Materiais Poliméricos

Sabe-se que os polímeros são formados pela repetição de meros, o fato destes serem idênticos ou não, confere diferentes características ao polímero resultante. Quando a cadeia polimérica é composta por um único tipo de *mero*, o material é denominado homopolímero. Por outro lado, quando há dois ou mais tipos de *meros*, o polímero é classificado como copolímero (Askeland, 2011).

Dentro do conceito de copolímeros, a forma como os meros são organizados ao longo da cadeia é relevante e influencia significativamente as propriedades finais do material. Quando os *meros* não seguem uma sequência definida, como no caso do polibutadieno (SBR), o copolímero é classificado como *aleatório* ou *estatístico*. Já os copolímeros alternados apresentam uma disposição regular e intercalada de *meros*, como ocorre no poli(anidrido maleico-estireno). Quando essa distribuição intercalada se dá por meio de grandes blocos, como no caso do poliisopreno, então o polímero é classificado como *copolímero em blocos*. Por fim, quando uma cadeia principal de homopolímeros se ligue covalentemente a outra cadeia com homopolímero diferente, como no caso do poli(acrilonitrila-butadieno-estireno) (ABS), o material é denominado *copolímero graftizado ou enxertado* (Young; Lovell, 2011).

Em relação às configurações das cadeias poliméricas, estas podem ser classificadas de acordo com sua morfologia estrutural. Polímeros com apenas uma única cadeia principal, são denominados como *lineares*. Esse tipo de cadeia é formado, geralmente, a partir de monômeros bifuncionais e resulta em polímeros com maior resistência mecânica e opacidade, como é o caso do polietileno de alta densidade (PEAD). Por outro lado, cadeias ramificadas apresentam prolongamentos a partir da cadeia principal. Esses polímeros, que em regra, tendem a serem mais maleáveis e versáteis, como é o caso do polietileno de baixa densidade (PEBD). Há ainda os polímeros com *cadeias com ligações cruzadas*, caracterizados pela presença de monômeros com funcionalidade maior ou igual a três, os quais formam entre si uma rede tridimensional interligada, como o hidrogel. A maior ou menor porcentagem de ligações cruzadas determinam a maior ou menor densidade do polímero, pois estas ligam quimicamente as cadeias, impedindo sua livre movimentação (Nunes; Lopes, 2014).

A nomenclatura dos polímeros é resultante do nome da classificação química a qual pertence, e desta maneira, a estrutura química daqueles é essencial para classificá-los (Young; Lovell, 2011). Neste tipo de classificação, o objeto analisado é sempre a cadeia principal. Se as cadeias principais são compostas por átomos de carbono e hidrogênio são classificados como *polímeros de cadeia carbônica*, como é o caso do polipropileno. Por outro lado, quando a cadeia

principal inclui outros elementos são denominados de *polímeros de cadeias heterogêneas*, a exemplo do poliéster. Polímeros naturais ou semissintéticos (como a carboximetilcelulose) são mais heterogêneos, decorrente do menor controle sobre os parâmetros de reação e o ambiente de polimerização (Nunes; Lopes, 2014).

A compreensão sobre o comportamento mecânico dos polímeros é essencial definição de suas aplicações, e também, os procedimentos para que essa aplicação seja bem-sucedida (Askeland, 2011). Polímeros de comportamento mecânico *plástico* são sólidos em temperatura ambiente, mas podem se tornar maleáveis ou fluidos quando submetidos a condições de calor ou pressão, sendo capazes de serem moldados. Quanto a sua fusibilidade, são divididos em *termorrígidos* e *termoplásticos* (Bower, 2002).

Embora tanto os termoplásticos quanto os termorrígidos dependam da temperatura e pressão para serem moldados, apresentam comportamentos distintos após o processo de cura. Os termorrígidos, uma vez curados, ou seja, após atingirem suas propriedades finais tornam-se infusíveis e irreversivelmente rígidos. Assim, aplicações subsequentes de calor e pressão além de não permitir uma nova moldagem, levam o material à sua degradação, similar ao que ocorre com a baquelite (Canevaloro, 2010).

Já os termoplásticos, após sua cura, podem ser remodelados se aplicadas condições adequadas de temperatura e pressão, como é o caso do polietileno. Essa condição confere a estes polímeros a característica de serem recicláveis, enquanto os termorrígidos não são recicláveis por processos térmicos convencionais, uma vez que a presença de ligações cruzadas impede a re-fusibilidade (Shackelford, 2011).

Outra classificação relevante está relacionada ao comportamento mecânico dos polímeros, também conhecidos como *elastômeros*, que quando aplicado um esforço, mesmo em temperatura ambiente, aceitam grandes deformações. Esses materiais são capazes de apresentar grandes deformações sob tensão, podendo alcançar o dobro do seu comprimento original. Contudo, ao retirar esse esforço, estes polímeros retornam a sua forma original, recuperando-se rapidamente da deformação. Essa notável capacidade de recuperação elástica está associada à sua estrutura de cadeias flexíveis, com baixa ou nenhuma reticulação. Um exemplo representativo é a borracha natural (Canevarolo, 2010).

Além disso, os polímeros de comportamento mecânico de *fibras* são compostos por macromoléculas lineares orientadas longitudinalmente, onde a razão entre o comprimento e as dimensões laterais (razão de aspecto) é extremamente alta. Assim, ao orientar as cadeias e cristais no processo de fiação, a resistência mecânica aumenta, possibilitando que esses

materiais sejam melhor utilizados na forma de fios, um exemplo amplamente utilizado é o nylon (Bower, 2002).

## 2.2. Hidrogel

O conceito de hidrogel começou a ser estudado no século XIX, sendo definido como redes poliméricas tridimensionais formadas por polímeros hidrofílicos, capazes de absorver grandes quantidades de água (Machado; Gomes; Marques, 2024), aumentando significativamente a distância entre suas cadeias (Ma; Wen, 2020).

O primeiro hidrogel sintetizado com características semelhantes às utilizadas atualmente, foi o *pHEMA*, ou poli-(2-hidroxietil metacrilato), desenvolvido em 1936 por cientistas da empresa DuPont, sendo aplicados como matéria-prima de lentes de contato (Thakur; Thakur; Arotiba, 2018).

No entanto, foi apenas em 1960 que Otto Wichterle e Drahoslav Lim, na então Tchecoslováquia, consolidaram a aplicação biomédica dos hidrogéis, por serem biodegradáveis e terem capacidade de absorção de água, destacando-se seu uso em lentes de contato gelatinosas devido à transparência, flexibilidade e compatibilidade com tecidos biológicos (Wichterle; Lím, 2024).

A capacidade de retenção hídrica está diretamente relacionada à presença de grupos funcionais hidrofílicos, como hidroxilas, carboxilas e aminas. A absorção de grandes quantidades de água é responsável pela maciez e elasticidade do hidrogel (Ganji; Vasheghani-Farahani; Vasheghani-Farahani, 2010), e também pelo seu grau de intumescimento, uma vez que estes absorvem água e alteram seu volume (Dodda et al., 2023).

Devido à sua elevada capacidade de absorção, os hidrogéis têm sido amplamente utilizados em processos de separação por membranas, atuando no preenchimento de poros e favorecendo a difusão seletiva de solutos através da matriz polimérica (Fan et al., 2025).

Os hidrogéis podem ser obtidos a partir de materiais encontrados na natureza, como o alginato ou a quitosana, seriam os *hidrogéis naturais*, ou sintetizados em laboratórios, como o polietilenoglicol -PEG, chamados *hidrogéis sintéticos* (Dodda et al., 2023).

A síntese de hidrogéis envolve processos de polimerização e reticulação de um ou mais monômeros funcionais, usualmente em presença de um iniciador e, frequentemente, um catalisador. Os principais constituintes do hidrogel sintético são o monômero e o agente reticulador, cuja concentração e natureza influenciam diretamente as propriedades finais do material. Ressalta-se que os parâmetros como tempo e temperatura de reação também afetam

significativamente as características estruturais e funcionais do hidrogel (Thakur; Thakur; Arotiba, 2018).

### 2.2.1. Classificação do Hidrogel

A Figura 2 apresenta as principais classificações dos hidrogéis. Assim como ocorre com os polímeros de forma geral, essas classificações são inúmeras e estão sujeitas a modificações à medida que novas descobertas são realizadas. Todavia, algumas delas se destacam por sua relevância e cabe uma análise mais aprofundada.

**Figura 2.** Diferentes classificações de hidrogel



(Fonte: Dodda et al., 2023)

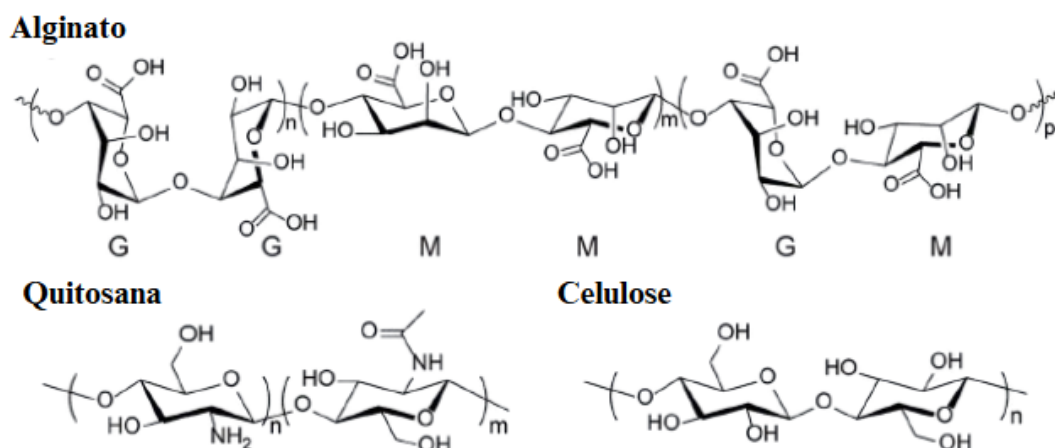
A principal classificação dos hidrogéis é quanto à sua origem, podendo ser classificados como *naturais* ou *sintéticos*. Os hidrogéis naturais são sintetizados, por exemplo, a partir de *proteínas* ou *polissacarídeos*. Aqueles derivados de proteínas, a exemplo do colágeno, elastina

fibrina e placenta, são encontrados em tecidos animais ou humanos, como tendões e pele. Devido à sua elevada biocompatibilidade, esses materiais têm sido amplamente utilizados em aplicações biomédicas, especialmente na engenharia de tecidos.

Já os hidrogéis baseados em polissacarídeos, como o alginato, a quitosana ou a celulose (Figura 3) são, na maioria das vezes, derivados de crustáceos marinhos, algas ou plantas. Esses materiais têm ganhado destaque na pesquisa científica em função do crescente interesse global por soluções ambientalmente sustentáveis, pois são não tóxicos, têm baixo custo, são biocompatíveis e biodegradáveis.

De forma comparativa, os hidrogéis de polissacarídeos também são mais vantajosos em relação aos de proteína em termos de estrutura molecular, especialmente no que diz respeito à funcionalização química. Como relatado anteriormente, suas estruturas moleculares podem possuir consideráveis quantidades de grupos funcionais como hidroxilas (-OH), ácido carboxílico (-COOH) ou aminas (-NH<sub>2</sub>) que fornecem uma base reativa conveniente para a acoplagem de outros grupos funcionais, o que facilita o processo de polimerização (Peppas; Khare, 1993).

**Figura 3.** Estrutura molecular de alguns polissacarídeos utilizados para obtenção de hidrogéis

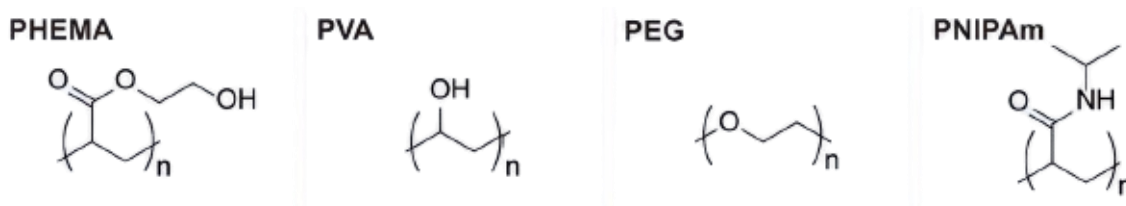


(Fonte: Zhao, 2021)

Embora os hidrogéis naturais apresentem vantagens ambientais significativas, os hidrogéis sintéticos destacam-se por sua estrutura química bem definida. Diferentemente dos naturais, os sintéticos permitem o ajuste preciso de sua composição molecular e um melhor controle da mesma, o que possibilita sua caracterização e reprodutibilidade. Exemplos são destacados na Figura 4. (Zhao, 2021).

Desta maneira, os hidrogéis sintéticos possuem elevada capacidade de absorção de água ou outros fluidos, além de estabilidade física e química. Essa estabilidade se traduz na manutenção das propriedades estruturais e funcionais ao longo do tempo, mesmo sob condições ambientais adversas, sem degradação significativa ou perda de desempenho e reprodutibilidade (Dodda et al., 2023).

**Figura 4.** Estrutura molecular de alguns polímeros sintéticos que podem ser utilizados para obtenção de hidrogéis



(Fonte: Zhao, 2021)

Em relação à preparação, os hidrogéis seguem a classificação geral dos polímeros, conforme abordado na sessão 2.1, podendo ser constituído como homopolímeros ou copolímeros. O diferencial é a possibilidade de serem formados por *Rede Interpretante (IPN)*, nas quais duas ou mais redes poliméricas reticuladas se entrelaçam fisicamente sem qualquer ligação química entre si. Na forma conhecida do tipo *Semi-IPN*, a estrutura é composta pela combinação de dois polímeros diferentes, um na forma reticulada e outro na forma linear (Yui, 2002).

Outra abordagem de classificação está relacionada à forma de reticulação, ou *crosslinking*, ou seja, ao mecanismo pelo qual se estabelece a formação das redes poliméricas do material. Este processo é fundamental para regular a capacidade de absorção de água e manter a estrutura tridimensional do hidrogel quando intumescido (Ali; Zaidi, 2005).

Na *reticulação física*, as interações entre as cadeias poliméricas possuem características transitórias e, geralmente resultam de entrelaçamentos de cadeias de polímeros ou interações físicas, como ligações iônicas, ligações de hidrogênio ou ligações hidrofóbicas (Wu; Li; Zhang, 2025). Já na *reticulação química*, as ligações químicas estabelecidas entre os polímeros são permanentes, consistindo em uma rede reticulada covalentemente, o que confere maior controle sobre a resistência mecânica e estabilidade fisiológica (Li et al., 2022).

A carga presente nas cadeias formadoras do hidrogel provem de seus grupos funcionais, como hidroxila ou carboxila, e determinam a capacidade de absorção de água, devido a repulsão eletrostática entre as cargas semelhantes nas cadeias (Peppas; Khare, 1993). De acordo com a

natureza dessas cargas, os *hidrogéis ionicamente carregados* podem ser classificados como *catiônicos* ou *aniônicos*. Os catiônicos são responsáveis pelo aumento do grau de intumescimento em pH ácido, contendo grupos carregados positivamente, como aminas e ácido sulfônico. Por outro lado, os hidrogéis aniônicos apresentam maior grau de intumescimento em pH básico, e os grupos existentes são negativamente carregados, como ácido carboxílico ou sulfônico (Thakur; Thakur; Arotiba, 2018). Já os *hidrogéis anfifílicos* dispõem de grupos funcionais positivos e negativos em uma mesma cadeia polimérica, equilibrando-se no ponto isoelétrico (Sidhu; Siddique, 2024).

Do ponto de vista estrutural, os hidrogéis podem ser classificados como *amorfos*, quando não há uma organização das cadeias; *semicristalinos*, quando há regiões aleatórias e ordenadas (cristalinas) presentes em sua configuração (Thakur; Thakur; Arotiba, 2018) ou *cristalinos* (Ahmed, 2015).

Também existe uma classe de hidrogel que são denominados como *hidrogéis inteligentes*, muito utilizados como sensores. Com base nisso, é possível inferir a classificação responsiva a estes hidrogéis, de acordo com o tipo de estímulo a ser adotado. Assim, os hidrogéis responsivos podem ser *químicos*, *físicos* e *bioquímicos* (Reis, 2007).

### **2.2.2. Aplicações**

Conforme apresentado, os hidrogéis apresentam inúmeras propriedades, e isso influencia também sua área de utilização em diversos setores. Dentre as principais aplicações, destacam-se os sistemas de liberação controlada de fármacos, sensores e condicionadores de solo, o que evidencia as diversas aplicações deste polímero (Reis, 2007).

Historicamente, a primeira aplicação de hidrogéis ocorreu em 1960 (Dodda et al., 2023), com a produção de lentes de contato. Desde então, a área médica tem se mantido como uma das principais áreas de pesquisas e desenvolvimento sobre este polímero. Recentemente, destaca-se o uso de hidrogel multifuncional reforçado com nanocristais de celulose para a cicatrização eficaz de feridas cutâneas, com propriedade antibacteriana, antiincrustante, antioxidante e adesiva, além de serem flexíveis (Liu et al, 2024).

Neste contexto, desenvolveu-se uma membrana de hidrogel de poliuretano-quitosana (HPUC) capaz de melhorar cicatrização de feridas, no modelo de rato diabético, ao ser usada com células de fração de medula óssea mononuclear (Viezzler et al., 2020).

Aplicações mais recentes se originaram a partir da utilização da impressão 3D, que vêm ampliando significativamente as aplicações dos hidrogéis na engenharia de tecidos. Um

exemplo, é a incorporação de células-tronco derivadas de tecido adiposo (ASCs) hibridamente misturadas em hidrogéis de alginato carregados com condrócitos, que demonstraram potencial na regeneração de cartilagem auricular (Jang; Koo; Kim, 2020).

Na área de meio ambiente e agrárias, as pesquisas mais recentes mostram que o hidrogel, carregado com hidrotalcita, apresentam elevada capacidade de retenção de elementos potencialmente tóxicos (Pfeifer et al., 2023). Adicionalmente, hidrogéis superabsorventes revestido com C-acetocloro (SH-ACE) proporcionaram a degradação mais completa de resíduos de herbicidas, como o acetocloro (Yang et al., 2022). Outro exemplo de destaque, trata-se do desenvolvimento de hidrogéis nanocompósitos magnéticos para a remoção de pesticidas solúveis em água (Tanaka et al., 2024). O emprego de materiais poliméricos à base de hidrogel para o tratamento de águas residuais tem sido amplamente estudado, observando-se vários métodos de síntese e funcionalização (Ahmaruzzaman et al., 2023).

Na agricultura, sua aplicação em cultura de tomate contribui para a redução da demanda por fertirrigação. Além disso, compósito de hidrogel reforçado com nanopartículas de carvão natural tem demonstrado capacidade de melhorias no crescimento de tomate em situação de déficit hídrico (Oliveira Neto et al., 2024).

Hidrogéis produzidos com celulose de bagaço de cana-de-açúcar têm sido aplicados como sistemas de liberação controlada de reguladores de crescimento vegetal, como o ácido salicílico, diminuindo os impactos ambientais associados ao uso irracional de agroquímicos (Chen; Cai; Pan, 2023).

Já o uso de hidrogéis como sensores também apresenta ampla aplicabilidade, onde pesquisas recentes demonstraram o desenvolvimento de hidrogéis transparentes, fototérmicos e flexíveis à base de alginato, capazes de atuar de forma remota e detecção de movimento humano (Sun, 2022). Além disso, hidrogéis nanocompósitos sensíveis ao pH (Ferreira Junior et al., 2020) têm sido desenvolvidos para responder a variações químicas em ambientes específicos. Hidrogéis fluorescentes baseados em pontos de carbono detectam e absorvem cromo hexavalente, um composto altamente tóxico e cancerígeno (Luo et al., 2021).

Contudo, apesar de inicialmente as aplicações serem em áreas biológicas, há uma gama de utilizações nas áreas de materiais em construção civil, em especial na aplicação de hidrogéis e polímeros superabsorventes como aditivo atuando como agente de cura interna de materiais cimentícios, que pode resultar em alguns casos, até melhorar as propriedades mecânicas do compósito. Essa abordagem, ao promover o controle da umidade interna durante o processo de hidratação do cimento, pode não apenas dispensar a necessidade de cura externa com água, o

que representa uma economia de recursos, como também contribuir para a sustentabilidade do processo construtivo (Saravanakumar et al., 2023).

Para a mitigação de microfissuras e microfraturas, resultantes das reações exotérmicas durante a hidratação do cimento, sobretudo para a construção de poços, no processo e armazenamento geológico de captura, utilização e armazenamento de dióxido de carbono (CCUS), a adição de hidrogel Ca-PAD demonstrou resultados significativos ao retardar a ocorrência de vazamentos acidentais (Xie et al., 2024). Em cimentos misturados com escória, cinza volante e sílica ativa, a adição de hidrogel de alginato de cálcio (CaAlg) tem se mostrado eficiente na manutenção da umidade da matriz cimentícia, o que pode melhorar a “cicatrização” de fissuras (He et al., 2024).

A aplicação de concreto à base de hidrogel (HBC) também foi investigada em contextos adversos, como matéria-prima de construção de bases no planeta Marte. Um estudo de modelagem por elementos finitos avaliou a viabilidade estrutural de um farol de quatro andares construído com HBC sob as condições atmosféricas simuladas de Marte (temperatura média de  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$  e pressão de 0,01 atm), o que demonstrou que hidrogéis congelados e liofilizados podem conferir a resistência mecânica adequada (Liu; Qiu, 2022).

Em tecnologias de impressão 3D (manufatura aditiva) aplicada na indústria de construção civil, um dos principais desafios é o desenvolvimento de pastas cimentícias com reologia compatível com o processo de deposição em camadas. Neste sentido, a adição de hidrogel de hidroxipropilmetilcelulose (HEMC) na proporção de 0,25 (relação mássica hidrogel / cimento) resultou em melhor desempenho quanto à resistência à distorção de formato no momento da impressão (Onanuga; Biernacki, 2023). Dessa forma, os hidrogéis vêm se consolidando como aditivos promissores em formulações avançadas para impressão 3D em construção civil.

Além disso, hidrogéis têm sido utilizados como aditivos anti-*washout* (AWA) para prevenir a perda de coesão, minimizar a segregação de componentes e reduzir a lixiviação de partículas finas de cimento em concretagens submersas ou em ambientes com presença de água em movimento. Assim, resultados recentes indicam que o uso de hidrogel nanocompósito superabsorvente melhorou a resistência ao *washout* de argamassas de cimento (Gou et al., 2021).

## 2.3. Cimento

Os primeiros registros sobre a utilização de materiais a base de cimento dão-se no Egito, com a utilização de gesso impuro em suas construções. Posteriormente, gregos e romanos desenvolveram sistemas mais avançados, utilizando o calcário calcinado, combinado com areia, pedras fragmentadas e água, formando o primeiro concreto da história (Neville, 2016).

A forma do cimento como é conhecido atualmente, cimento Portland, foi patenteada em 1824 por Joseph Aspdin. O nome deriva da semelhança visual do produto após hidratação semelhante às rochas da ilha britânica de Portland (Castro, 2021).

O cimento é uma substância pulverulenta que, em contato com a água, concebe características aglomerantes (Metha; Monteiro, 2008). Segundo a definição do Dicionário Online de Português (2013), o cimento trata-se de “matéria pulverulenta, que forma, com água ou uma solução salina, uma pasta plástica ligante, capaz de aglomerar, endurecendo, substâncias variadas”.

Na engenharia civil, o cimento é tradicionalmente obtido a partir da calcinação do calcário, sendo classificado como aglomerante hidráulico, ou seja, cujas reações de pega e endurecimento se efetivam na presença de água. Dentro dessa categoria, o cimento Portland se destaca pois, possui papel fundamental devido à sua ampla aplicação e desempenho técnico (Neville, 2016).

### 2.3.1. Cimento Portland: composição e fabricação

O cimento Portland é produzido, principalmente a partir da combinação de calcário e argila, matérias-primas que fornecem os óxidos responsáveis pela hidratação do cimento. Trata-se de um processo de industrial de elevada complexidade e tem como etapa principal a clínquerização, responsável pela formação do clínquer (Rodrigues et al., 2013).

O clínquer consiste em partículas com granulometria variável entre 5 a 25mm de diâmetro (Pinheiro; Crivelaro, 2020), podendo representar até 50% da massa do cimento Portland. As proporções dos principais componentes do clínquer são similares para todos os tipos deste cimento (Gosh, 2002).

A clínquerização ocorre em fornos rotativos, nos quais as matérias-primas, previamente secas e moídas, são submetidas a temperaturas que podem atingir até 1.450°C. Nos fornos ocorrem reações de sintetização e fundição parcial, formando, após o resfriamento, o clínquer (Castro, 2021). Durante esse processo ocorrem as reações químicas descritas na Tabela 1 (Rodrigues et al., 2013).

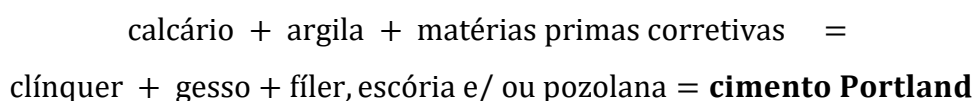
Durante a etapa de moagem, é adicionado sulfato de cálcio (gesso) para controlar o tempo de pega e evitar a pega instantânea do cimento (Metha; Monteiro, 2008). Além disso, é comum a adição de material pozolânico e filler, a fim de tornar o cimento mais econômico (Neville, 2016).

**Tabela 1.** Reações químicas do processo de obtenção do clínquer

| Etapa da clinquerização         | Reações químicas envolvidas na clinquerização                                                                              |
|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Descarbonatação                 | $CaCO_3 \xrightarrow{\Delta} CaO + CO_2$                                                                                   |
| Formação da fase líquida        | $3CaO + Al_2O_3 \rightarrow 3CaO \cdot Al_2O_3$<br>$4CaO + Al_2O_3 + Fe_2O_3 \rightarrow 4CaO \cdot Al_2O_3 \cdot Fe_2O_3$ |
| Formação do silicato dicálcico  | $2CaO + SiO_2 \rightarrow 2CaO \cdot SiO_2$                                                                                |
| Formação do silicato tricálcico | $3CaO + SiO_2 \rightarrow 3CaO \cdot SiO_2$                                                                                |

(Fonte: adaptado de RODRIGUES et al., 2013)

Em suma, o processo de fabricação do cimento pode ser descrito pelas etapas apresentadas por Pinheiro; Crivelaro, 2020:



A partir da combinação dos óxidos presentes no clínquer formam-se os principais compostos do cimento Portland, os quais são produtos mais resultantes de reações dos óxidos. Em 1955, R. H. Bogue e outros autores estabeleceram um modelo para o cálculo da composição potencial do cimento Portland, conhecido como “Composição de Bogue”. Suas equações mostram as porcentagens de óxidos na massa total do cimento (termo entre parênteses na equação) e sua relação com os principais compostos do cimento (Metha; Monteiro, 2008).

As equações propostas por Bogue, apresentadas a seguir, relacionam os óxidos constituintes com os compostos principais do cimento Portland (Neville, 2016):

$$C_3S = (4,07) CaO + (7,60) SiO_2 + (6,72) Al_2O_3 + (1,43) Fe_2O_3 + (2,85) SO_3 \quad (1)$$

$$C_2S = (2,87) SiO_2 + (0,75) 3 \cdot CaO \cdot SiO_2 \quad (2)$$

$$C_3A = (2,65) Al_2O_3 + (1,69) Fe_2O_3 \quad (3)$$

$$C_4AF = (3,04) Fe_2O_3 \quad (4)$$

onde: C = CaO; S = SiO<sub>2</sub>; A = Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; F = Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Dessa forma, conforme apresentado na Tabela 2, são indicados os principais compostos do cimento Portland, bem como suas respectivas composições químicas.

**Tabela 2.** Nome e composição dos compostos do cimento

| Abreviatura       | Nome                        | Composição                                                          |
|-------------------|-----------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| C <sub>3</sub> S  | Silicato tricálcico (Alita) | 3CaO.SiO <sub>2</sub>                                               |
| C <sub>2</sub> S  | Silicato dicálcico (Belita) | 2CaO.SiO <sub>2</sub>                                               |
| C <sub>3</sub> A  | Aluminato cálcico           | 3CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                                 |
| C <sub>4</sub> AF | Ferroaluminato tetracálcico | 4CaO.Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> .Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |

(Fonte: Castro, 2021)

Cada um dos compostos do cimento Portland possui características físicas e morfológicas próprias. O silicato tricálcico (C<sub>3</sub>S) apresenta-se como grãos pequenos, incolores e equidimensionais e constitui a fase predominante na composição do cimento Portland. É o principal responsável pelo desenvolvimento da resistência inicial do cimento Portland. Trata-se de um composto estável à temperatura ambiente e decompõe-se em temperaturas abaixo de 1.450°C apenas se o resfriamento for lento o suficiente. (Neville, 2016).

O silicato dicálcico (C<sub>2</sub>S) é o componente com a segunda maior concentração, e é o responsável pelo contínuo endurecimento do cimento em longos períodos de tempo (Anderson et al., 2003). Esse composto apresenta polimorfismo, o qual é determinado a partir da temperatura e da velocidade de resfriamento. A forma  $\alpha$ -C<sub>2</sub>S manifesta-se em altas temperaturas; a  $\beta$ -C<sub>2</sub>S surge do resfriamento da fase  $\alpha$ -C<sub>2</sub>S em temperaturas próximas a 1.450°C; já a forma  $\gamma$ -C<sub>2</sub>S é obtida a partir do resfriamento até 670°C, embora sua formação depende da velocidade do resfriamento (diminuição da temperatura), por isso, não é muito presente nos cimentos comerciais, pois a velocidade de resfriamento neste processo não é adequada para a sua formação (Gosh, 2002).

O aluminato tricálcico (C<sub>3</sub>A) tem estrutura cúbica ou ortorrômbica, sendo demasiadamente reativo com água, e costuma preencher os espaços entre os cristais de ferroaluminato tetracálcico (C<sub>4</sub>AF). A interação entre C<sub>3</sub>A e C<sub>4</sub>AF forma a chamada "matriz do cimento", que desempenha papel essencial na adesão entre os cristais de silicato, sendo fundamental para a microestrutura do material (Castro, 2021).

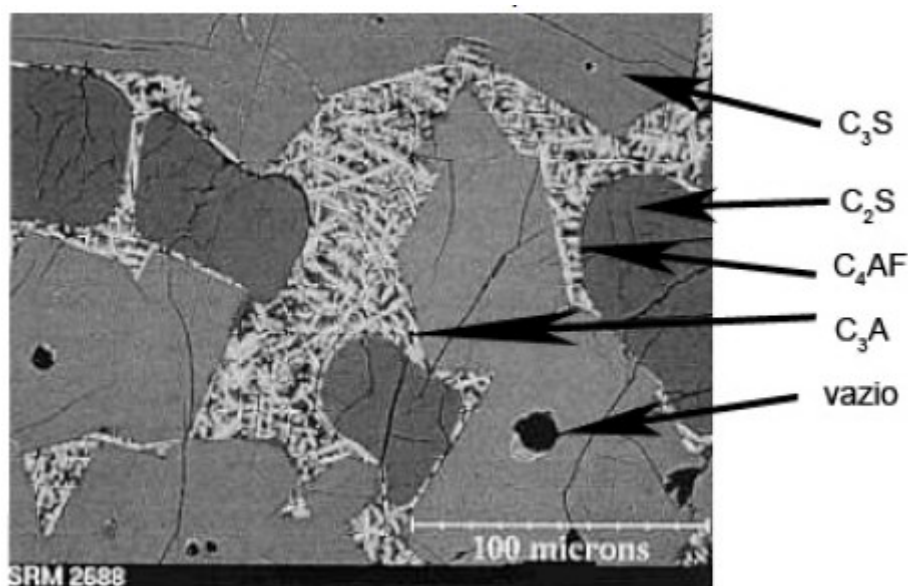
O composto C<sub>4</sub>AF, por sua vez, é o principal responsável pela coloração acinzentada característica do cimento Portland e também contribui para a resistência à corrosão química.

Ressalta-se que o composto possui reatividade hidráulica relativamente baixa (Anderson et al., 2003).

De acordo com Wichterle e Lím (2024), os compostos  $C_3S$  e  $C_2S$  são os principais responsáveis pelo desenvolvimento da resistência mecânica do cimento, enquanto  $C_3A$  e  $C_4AF$  estão mais relacionados à liberação de calor durante o processo de hidratação.

A Figura 5 representa a distribuição e a presença destes compostos na estrutura do clínquer.

**Figura 5.** Micrografia eletrônica, obtida pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, representando as diferentes fases presentes no clínquer



(Fonte: Castro, 2020)

É importante destacar que as variações da composição dos óxidos afetam significativamente o teor de compostos do cimento. Por exemplo, uma redução de 3% de  $CaO$ , com o ajuste proporcional dos demais óxidos, altera consideravelmente a relação entre  $C_3S$  e  $C_2S$  (Neville, 2016).

Consequentemente, é a variação das porcentagens em massa dos elementos que vai determinar o tipo de cimento Portland, assim como suas características. Essas variações devem, contudo, obedecer aos limites estabelecidos pelas normas técnicas vigentes, conforme apresentado na Tabela 3 (NBR 16697, 2018), a seguir.

**Tabela 3.** Limites de composição do cimento Portland (porcentagem em massa)

| Designação normalizada                                        |                | Sigla     | Classe de Resistência | Sufixo   | Clínquer + sulfatos de cálcio | Escória granulada de alto-forno | Material Pozolânico | Material Carbonático |
|---------------------------------------------------------------|----------------|-----------|-----------------------|----------|-------------------------------|---------------------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Cimento Portland Comum</b>                                 |                | CP I      | 25, 32 ou 40          | RS ou BC | 95 a 100                      | 0 a 5                           |                     |                      |
|                                                               |                | CP I - S  |                       |          | 90 a 94                       | 0                               | 0                   | 6 a 10               |
| Cimento Portland composto com escória granulada de alto-forno |                | CP II - E |                       |          | 51 a 94                       | 6 a 34                          | 0                   | 0 a 15               |
| Cimento Portland composto com material pozolânico             |                | CP II - Z |                       |          | 71 a 94                       | 0                               | 6 a 14              | 0 a 15               |
| Cimento Portland composto com material carbonático            |                | CP II - F |                       |          | 75 a 89                       | 0                               | 0                   | 11 a 25              |
| Cimento Portland de alto forno                                |                | CP III    |                       |          | 25 a 65                       | 35 a 75                         | 0                   | 0 a 10               |
| Cimento Portland pozolânico                                   |                | CP IV     |                       |          | 45 a 85                       | 0                               | 15 a 50             | 0 a 10               |
| Cimento Portland de alta resistência inicial                  |                | CP V      | ARI                   |          | 90 a 100                      | 0                               | 0                   | 0 a 10               |
| <b>Cimento Portland branco</b>                                | Estrutural     | CPB       | 25, 32 ou 40          |          | 75 a 100                      | 0                               | 0                   | 0 a 25               |
|                                                               | Não estrutural |           | -                     |          | 50 a 74                       | 0                               | 0                   | 26 a 50              |

(Fonte: NBR 16697:2018)

Dentro dos componentes do cimento, é importante destacar a etringita. Ela é formada por sulfatoaluminato advindo do clínquer, anidrita e pó de alumínio (Desai; Jenne; Muthukumar; Rahman, 2021). Sua fórmula química é  $C_3A.3CaSO_4.32H_2O$  e pode ser encontrada em formato de bastão nos estágios iniciais da reação de hidratação ou como estruturas maciças que preenchem poros ou rachaduras no cimento (Yuan; Liu; Zheng; Ma, 2021). Ela é um dos minerais responsáveis pela formação do C-S-H que atua na resistência mecânica (Claisse, 2016). Há também a formação da etringita tardia, onde os cristais pequenos da mesma, que normalmente são instáveis, tendem a recrystalizar-se em vazios ou rachaduras nas pastas de cimento (Taylor; Famy; Scrivener, 2001). Sua formação é causada pela presença de sulfato advindos de fontes externas, como solos ou águas subterrâneas, ou por excesso de sulfato no próprio concreto, especialmente em concretos históricos. Tal situação não costuma acontecer com os cimentos modernos, exceto em casos de altas temperaturas, acima de 70°C (Nijland; Larbi, 2010).

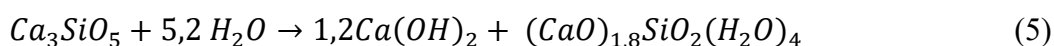
A etringita tardia pode se expandir caso as temperaturas permaneçam maiores que 70°C por período suficiente e, após o resfriamento à temperatura normal, o material seja mantido úmido. Nessa situação, a presença da mesma leva a fissuras. Tais danos foram observados em produtos pré-moldados feitos por curas em alta temperaturas ou concretos em massa, onde o calor de hidratação eleva excessivamente a temperatura (Taylor; Famy; Scrivener, 2001).

## 2.4. Cura do cimento

O cimento é amplamente utilizado em escala global devido às suas propriedades mecânicas, que são significativamente aprimoradas quando combinadas ao aço, na formação do concreto armado. Nesse contexto, o processo de endurecimento dos materiais cimentícios é fundamental para o desenvolvimento das propriedades mecânicas desejadas. A obtenção de elevadas resistências mecânicas depende diretamente da condução adequada desse processo, sobretudo nas idades iniciais. Nessa fase, o controle rigoroso da umidade e da temperatura é essencial, uma vez que variações nesses parâmetros podem comprometer a cinética das reações de hidratação e, conseqüentemente, o desempenho final do material (Santos; Polesello, 2022).

A ocorrência de secagem prematura acarreta perda da resistência mecânica e durabilidade, bem como em instabilidades dimensionais, maior suscetibilidade à abrasão e formação de fissuras, o que compromete a proteção contra agentes químicos agressivos (Santos; Polesello, 2022; NBR 14931, 2023). Para que a hidratação do cimento seja efetiva, todos os poros devem ser preenchidos continuamente com água nas primeiras idades, mantendo o sistema em condição de saturação (NBR 14931, 2023).

Nos primeiros 7 dias, o silicato tricálcico C<sub>3</sub>S desempenha papel predominante na reação de hidratação, resultando na formação de silicato de cálcio hidratado (C-S-H) e hidróxido de cálcio (C-H), conforme apresentado na equação (5) (Cuesta et al., 2018):



A velocidade das reações de hidratação do cimento diminui ao longo do tempo, até cessar completamente. Durante esse processo, formam-se íons hidróxido (OH<sup>-</sup>) e cálcio (Ca<sup>2+</sup>). Após a saturação do sistema, o hidróxido de cálcio ou cal hidratada (C-H) formado começa a cristalizar. Simultaneamente, tem início a formação do silicato de cálcio hidratado (C-S-H), na forma de gel amorfo (Sidhu; Siddique, 2024).

O C-S-H é o principal responsável pelo desenvolvimento da resistência mecânica do cimento, pois une os grãos, conferindo dureza e durabilidade ao material (Metha; Monteiro, 2008).

Em idades mais avançadas, o silicato de cálcio ( $C_2S$ ) passa a reagir com a água, formando C-S-H, como indicado na equação 6, contribuindo, também, para as propriedades mecânicas ao longo do tempo (Sidhu; Siddique, 2024).



Dessa forma, destaca-se a importância de uma hidratação adequada para a formação eficiente da microestrutura do cimento e, conseqüentemente, para o desenvolvimento de suas propriedades mecânicas. Para evitar a evaporação prematura da água necessária às reações de hidratação, adota-se um conjunto de medidas conhecidas como processo de cura. O objetivo principal da cura é manter condições favoráveis de umidade e temperatura, com atenção especial às camadas superficiais do material, que são mais suscetíveis à secagem. Essas condições garantem a continuidade e a eficácia das reações de hidratação do cimento ao longo do tempo (NBR 14931, 2023).

A cura de materiais cimentícios consiste em um processo controlado destinado a garantir o endurecimento adequado da matriz cimentícia. Esse processo tem início imediatamente após o lançamento ou moldagem do material cimentício e seu término ocorre assim que atingida a resistência necessária para a aplicação desejada. O processo de cura evita a perda da umidade e garante a continuidade da hidratação do cimento (NBR 14931, 2023; Santos; Polesello, 2022). Seu desempenho é influenciado por diversos fatores, tais como umidade relativa do ambiente, temperatura, tempo de cura e a presença de aditivos aceleradores ou retardadores (NBR 14931, 2023) (NBR 11768-1, 2019).

A cura pode ser classificada em dois tipos: primária e secundária, cuja diferença está relacionada ao momento em que ocorrem. A cura primária se estende desde o lançamento do material cimentício até o término do tempo de pega, intervalo em que o material passa do estado fluido para um estado rígido. A cura secundária, por sua vez, inicia-se após o fim do tempo de pega e continua durante o período que o material continua desenvolvendo suas propriedades.

Em razão da importância da *cura* nos processos de hidratação do cimento, inúmeras técnicas foram desenvolvidas com o objetivo de atender os mais variados estilos de construções, condições ambientais e necessidades de desempenho. Essas técnicas serão apresentadas no próximo tópico.

### 2.4.1. Tipos de cura

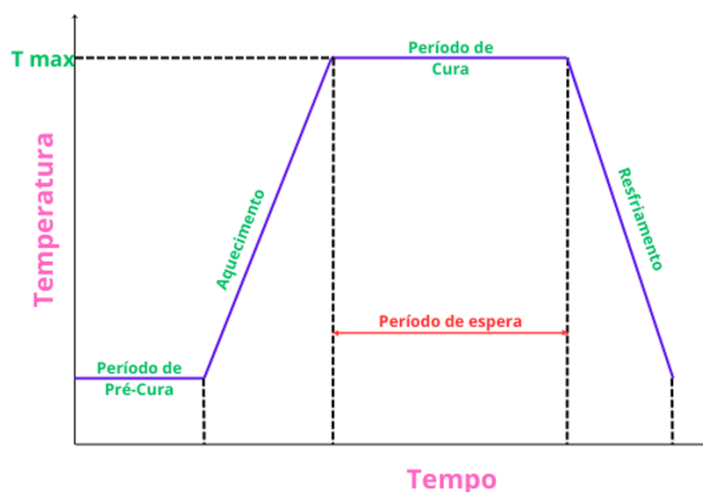
Os tipos de cura de materiais cimentícios são classificados com base no método utilizado para manter a hidratação, bem como em sua adequação a diferentes ambientes e construções. O método de cura mais simples e tradicional, é a *cura ao ar*, onde o material cimentício é exposto diretamente as condições ambientais sem ação extra (Santos; Polesello, 2022). Em algumas situações, utiliza-se a cobertura das superfícies com lonas ou filmes plásticos para reduzir a taxa de evaporação da água (NBR 14931, 2023).

A *cura por aspersão contínua de água* consiste na aplicação constante de água sobre a superfície a ser curada, geralmente realizada com uso de mangueiras (Muhammad et al., 2024). Embora seja amplamente empregada, essa técnica é considerada ambientalmente inadequada devido ao elevado consumo de água.

A *cura por névoa úmida* é realizada por meio de equipamentos que pulverizam finas partículas de água em forma de vapor, com o objetivo de elevar a umidade relativa do ar e, assim, evitar a desidratação precoce da superfície (NBR 14931, 2023). Uma variação dessa técnica ocorre na *cura em câmara úmida*, na qual os corpos de prova são mantidos em ambiente fechado, com umidade superior a 95%, sem contato com as intempéries externas (Santos; Polesello, 2022).

A *cura a vapor* é tecnicamente semelhante à *cura por névoa úmida*, porém com o diferencial do controle de temperatura. Nesse método, aplica-se o vapor d'água em temperatura que variam entre 40 a 100°C por um período previamente determinado. Seu uso é recomendado, principalmente, na fabricação de elementos pré-moldados ou em túnel ou em concretos protendidos. A Figura 6 apresenta o regime térmico típico da cura a vapor, demonstrando a variação da temperatura em função do tempo (Yang et al., 2021).

**Figura 6.** Representação esquemática de um sistema da cura a vapor em relação à temperatura e tempo



(Fonte: adaptado de Sidhu; Siddique, 2024)

Apesar de favorecer o rápido ganho de resistência inicial, este método pode ocasionar um aumento da porosidade da matriz cimentícia. Como consequência, embora a resistência à compressão inicial seja elevada, o ganho de resistência ao longo do tempo tende a ser mais lento, o que compromete o desempenho em idades avançadas (Zeyad et al., 2021; Liu et al., 2020).

A norma NBR 14931:2023 prevê a *cura por redutor de evaporação*, que consiste no uso de aditivos redutores de evaporação adicionados ao concreto fresco com o intuito de diminuir a evaporação superficial da água. Essa técnica contribui para atenuar os riscos de retração hidráulica ou plástica, de modo a garantir maior estabilidade dimensional durante as idades iniciais.

Outra técnica normatizada trata-se da *cura de membrana química*, ou apenas, *cura química* que se baseia na pulverização de produtos químicos, como compostos a base de parafinas, sobre a superfície do concreto fresco. Esses compostos formam uma película impermeável que impede a evaporação da água. No entanto, é importante considerar a aplicação final deste concreto, pois a presença desta barreira pode comprometer a aderência do mesmo. (Santos; Polesello, 2022; NBR 14931, 2023)

A *cura por imersão do concreto*, pode ser realizada tanto em campo quanto em laboratório. No canteiro de obras, é comumente empregada em superfícies planas, como lajes, que possuem alguma contenção nas laterais, a fim de deixar a água parada. Em ambiente

laboratorial, o material é completamente submerso em tanques com água, de modo a garantir as condições ideais para hidratação (NBR 14931, 2023).

A *cura em autoclave* ou *a vapor à pressão de alta pressão* coloca-se o concreto a condições controladas de pressão de vapor, variando entre 6 e 20 atm, e temperaturas entre 160 °C e 250 °C. Tais condições influenciam o processo de hidratação do cimento, mudando o tipo e a microestrutura do produto da hidratação (Yang et al., 2024). Essa técnica é amplamente utilizada na produção de elementos pré-moldados e protendidos, permitindo atingir elevadas resistências à compressão em até 24 horas. Além disso, resulta em uma matriz com poros menores do que a obtida pela cura a vapor convencional (Sidhu; Siddique, 2024).

A *cura em alta temperatura*, geralmente realizada em fornos, também favorece o rápido ganho de resistência mecânica inicial. No entanto, o prolongamento excessivo desse processo pode comprometer a durabilidade do material, em razão da formação de poros decorrente da evaporação da água capilar. Temperaturas superiores a 85 °C podem induzir o surgimento de microfissuras; por isso, recomenda-se que a cura em forno seja conduzida a aproximadamente 60 °C. Fenômenos semelhantes podem ocorrer em grandes volumes de concreto, nos quais o calor de hidratação é suficiente para provocar elevação térmica significativa (Tang et al., 2017).

A *cura em baixa temperatura* é uma condição imposta por condições climáticas frias, nos quais o congelamento da água impede o processo de hidratação. Isso resulta em matriz com rigidez reduzida e anomalias na matriz do cimento. Se a temperatura chegar a -10°C a hidratação é praticamente interrompida, e conseqüentemente, as propriedades mecânicas do concreto são prejudicadas (Nassif; Petrou, 2003). Porém, o próprio calor de hidratação gerado pela moldagem pode compensar ou minimizar tais efeitos (Zhang et al., 2024).

A *cura a vácuo ou de baixa pressão* ocorre em ambientes de alta altitude ou em aplicações espaciais. Nessas condições, a taxa de evaporação da água é aumentada, o que favorece a secagem rápida. Esse método proporciona ao concreto uma menor permeabilidade à água e aos gases, em comparação com os métodos convencionais de cura a vapor (Sidhu; Siddique, 2024).

A *cura por micro-ondas* é uma cura de altas temperaturas. As micro-ondas eletromagnéticas, com frequência entre 300 MHz a 300 GHz, entram em contato com substâncias dielétricas do cimento. Este material absorve as energias das micro-ondas e converte a energia cinética em energia térmica, em especial em uma frequência de 2,4 GHz. O calor acelera as reações de hidratação. A eficiência desse método depende da permissividade dielétrica do concreto, sendo mais eficaz quanto maior essa propriedade. Para aumentar as taxas de conversão de energia, pode-se começar a aplicação das micro-ondas antes da implantação

do concreto (Yang et al., 2024). Embora ainda em fase de pesquisa, essa técnica apresenta grande potencial para uso em peças pré-moldadas, proporcionando elevada resistência inicial, economia de energia e uniformidade no processo de cura (Hamada et al., 2022).

Na *cura elétrica direta*, o concreto é considerado como um material semicondutor, aplicando-se uma corrente elétrica alternada. Com isso, gera-se calor ôhmico uniforme dentro do material, acelerando a hidratação do cimento. Os equipamentos necessários para essa técnica são de construção relativamente simples e podem ser instalados diretamente no canteiro de obras, proporcionando eficiência e homogeneidade no aquecimento. Desta forma, acelera a cura até em climas mais frios, podendo ser usada para descongelar concreto endurecido (Yang et al., 2021).

Todos os métodos descritos acima se referem a uma *cura externa do concreto*, ou seja, à aplicação de técnicas voltadas ao controle das condições ambientais em torno do concreto. Todavia, a cura externa pode vir a ser negligenciada, seja por fatores humanos, seja por fatores climáticos adversos. Neste contexto, surge a necessidade de se adotar para a *cura interna* também conhecida como *autocura* do concreto (Sidhu; Siddique, 2024).

Esse método é mais utilizado em concretos de alto desempenho que necessitam de uma relação água/cimento (a/c) menor. Nesses sistemas, a quantidade reduzida de água disponível pode não ser suficiente para promover a hidratação completa da pasta cimentícia, ocasionando o fenômeno da autodessecação. Esse processo é seguido pela retração autógena, que ocorre após o término do tempo de pega, quando a evaporação da umidade residual acentua o encolhimento volumétrico da matriz (Kovler; Jensen, 2007).

A *cura interna* ocorre com a adição, na mistura do concreto, de um componente que serve como agente de cura. Essa adição pode ser um agregado usual introduzido sob condições específicas, como em estado de saturação, ou ainda um material desenvolvido para essa finalidade. A ação do agente de cura interno pode agir de duas maneiras: como um reservatório de água, ocorrendo a *cura interna por água*, ou como retardador ou impedidor da perda d'água, ocorrendo a *vedação interna* (Kovler; Jensen, 2007).

A eficiência do processo de autocura depende diretamente das características do agente de cura interna e de sua interação com a matriz cimentícia. Para que a hidratação seja promovida de maneira contínua, é fundamental que a taxa de absorção e liberação de água do agente seja adequada, permitindo sua liberação gradual e controlada. Durante o preparo do concreto, deve-se garantir a distribuição homogênea dos agentes de cura, bem como o uso de proporções adequadas à aplicação (Yang; Shi; Liu; Wu, 2021).

Do ponto de vista físico, a presença dos agentes modifica a estrutura dos poros dos materiais cimentícios, alterando a mobilidade da água no interior de sua matriz. Tanto a água armazenada no agente quanto a presente na própria matriz cimentícia devem ser capazes de se deslocar com facilidade para serem utilizadas quando necessário (Zhutovsky; Kovler; Bentur, 2011).

Os parâmetros como tamanho e a geometria dos agentes de cura influenciam diretamente na porosidade e impacta na distribuição da água. Quanto maior o tamanho do agente, maior será a área ao redor dele irrigada. A permeabilidade da matriz cimentícia também interfere na difusão da água, podendo limitar ou favorecer sua distribuição. De maneira geral, os agentes de cura interna melhoram a hidratação e reduzem a formação de fissuras (Sidhu; Siddique, 2024).

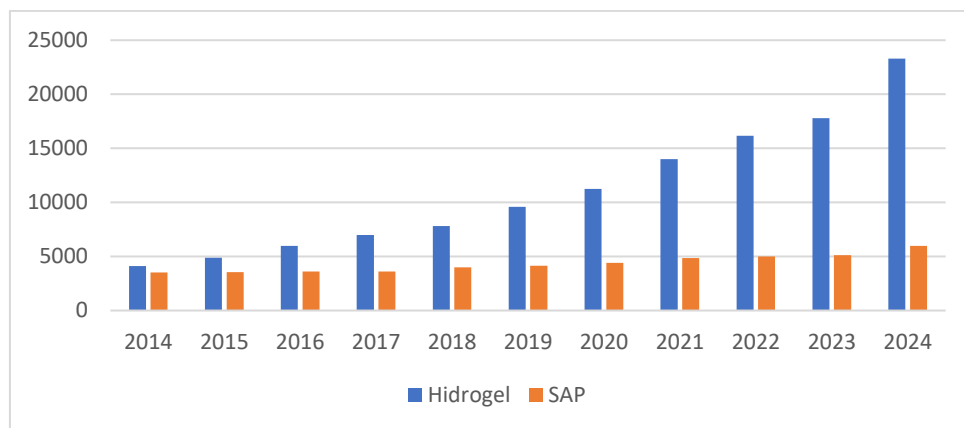
Diversos materiais podem ser empregados como agentes de cura interna, incluindo os agregados leves, polímeros superabsorventes (SAP), hidrogéis, cinza de casca de arroz, entre outros (Wang et al., 2024).

## **2.5. Cura interna e hidrogel**

Os polímeros superabsorventes (SAP) vêm sendo desenvolvidos a mais de 80 anos, com aplicações predominantes nas áreas médicas e agrícola. Entretanto, são importantes na aplicação na cura interna de matriz cimentícias, porém, apenas 4% das aplicações deles são na área da construção civil (Wang et al., 2024).

Contudo, o hidrogel, sendo ou não superabsorvente (Guan; Zhang; Zhaoc, 2024), têm ganhado crescente destaque no campo da construção nas últimas décadas. Esse aumento de interesse é evidenciado pelo crescimento significativo no número de publicações científicas sobre o tema, conforme apresentado na Figura 7 (Wang et al., 2024).

**Figura 7.** Comparação de artigos científicos publicados no Site Science Direct sobre hidrogéis *versus* polímeros superabsorventes (SAP). Pesquisa realizada em 31/12/2024



(Fonte: Própria Autora)

Em 2024, pesquisadores chineses demonstraram a eficácia de um hidrogel anisotrópico biomimético híbrido (AS/AM/HNTs-RDC), composto de alginato, poliacrilamida e nanotubos de haloisita como agente de cura interna de materiais cimentícios. Os resultados indicaram significativo potencial de cicatrização de fissuras. Em um sistema exposto a água, fissuras de 200  $\mu\text{m}$  foram completamente seladas em 14 dias, enquanto em sistemas ricos em  $\text{CO}_2$ , o selamento ocorreu em 7 dias. Em ambos os casos, observou-se aumento na resistência à compressão do material (Liu, M. et al., 2024).

Em 2021, foi realizado um estudo comparativo entre microcápsulas de hidrogel de alginato de cálcio com os polímeros superabsorventes em materiais cimentícios. As microcápsulas demonstraram ser eficazes na redução da retração precoce e, ao atrasar a liberação da água para a hidratação do cimento, produziram uma cura interna mais uniforme, mantendo a resistência à compressão (Jing et al., 2022).

Também se destaca o desenvolvimento de um novo hidrogel responsivo a  $\text{CO}_2$ , obtidos a partir da copolimerização de ácido acrílico e dietilaminoetil metacrilato. Esse sistema apresentou elevada eficácia para selar microfissuras, de forma a melhorar a resistência do material cimentício e mitigar os riscos de vazamentos (Xie et al., 2024).

No Estados Unidos, hidrogéis formulados com poliacrilamida e sílica amorfa (sílica ativa ou nanossílica) foram incorporados à pasta de cimento como agentes de cura interna. As análises microestruturais da pasta curada mostraram uma melhora no preenchimento de vazios

e poros, bem como aumento da resistência à compressão e resistividade elétrica em idades posteriores (Bose; Davis; Erk, 2021).

Na Polônia, alguns pesquisadores propuseram um mecanismo de fragmentação do hidrogel que resultou em uma mistura mais homogênea dos SAPs na matriz de cimento, e isso aumentou a eficiência da cura interna (Kalinowski; Moyciechowski; Sokolowska, 2020).

O grupo de compósito e nanocompósitos híbridos (GCNH-FEIS-UNESP) conduziu um estudo experimental para determinar o melhor traço para a utilização de nanocompósitos híbridos de hidrogel e nanoargila, com intuito de estabelecer a melhor relação água e cimento. Os resultados obtidos por Nascimento (2017) e Watanuki Filho (2024) demonstraram que é possível obter uma resistência à compressão adequada em argamassas, corroborando assim com os estudos apresentados por Wichterle; Lím, 2024.

O avanço das pesquisas voltadas a aplicação de hidrogéis como agentes de cura interna está alinhado com os objetivos de redução da pegada de carbono da indústria da construção civil. Essa abordagem não apenas diminui a necessidade de água no processo de cura, como também contribui significativamente para a durabilidade e reparabilidade das estruturas, de forma a garantir maior longevidade e eficiência no uso das edificações.

### **3. Justificativas**

A crescente demanda por soluções sustentáveis e tecnologicamente avançadas na construção civil tem impulsionado o desenvolvimento de novos materiais que contribuam para a melhoria do desempenho das estruturas e para a redução de impactos ambientais.

Apesar do uso de hidrogéis ser amplamente consolidado nas áreas agrárias e biológicas, suas propriedades de retenção e liberação de água controlada demonstram potencial de aplicação para a Construção Civil, especialmente em materiais cimentícios. As pesquisas nessa área, ainda que em desenvolvimento, são reduzidas o que evidencia uma lacuna de conhecimento e permite a abertura de perspectivas promissoras para pesquisa e inovação tecnológica.

A aplicação de hidrogéis em matrizes cimentícias, com a função de agente de cura interna, pode contribuir para uma melhoria no processo de hidratação do cimento, aumento da durabilidade, redução da permeabilidade e redução do aparecimento precoce de fissuras. Além disso, essa abordagem permite uma utilização mais eficiente da água no processo construtivo, colaborando com práticas mais sustentáveis e de menor impacto ambiental.

## 4. Objetivos

Os principais objetivos desta dissertação consistem em:

- Desenvolver hidrogéis nanocompósitos contendo nanoargila cloisita- $\text{Na}^+$ , a partir de reação de polimerização via radical livre;
- Produzir os compósitos de pasta de cimento ARI CPV com o hidrogel obtido e avaliar suas propriedades tanto no estado fresco, utilizando estudos de determinação de índice de consistência, densidade no estado fresco, teor de ar incorporado e exsudação, quanto no estado endurecido, por meio de ensaios de resistência à compressão axial, absorção de água, densidade aparente e retração, análise termogravimétrica, microscopia eletrônica de varredura e espectroscopia de dispersão de energia.
- Investigar a evolução, em função do tempo de cura, das propriedades no estado endurecido destas pastas cimentícias contendo hidrogel.

## 5. Materiais e Métodos

O procedimento experimental utilizado abrange a síntese do hidrogel, sua secagem, intumescimento, preparação de pasta de cimento, moldagem dos corpos de provas e posterior realização da caracterização tanto no estado fresco, quanto endurecido, destes corpos obtidos.

A seguir serão apresentadas descrições detalhadas dos materiais, estratégias e técnicas empregadas, de forma a garantir a confiabilidade e reprodutividade dos dados.

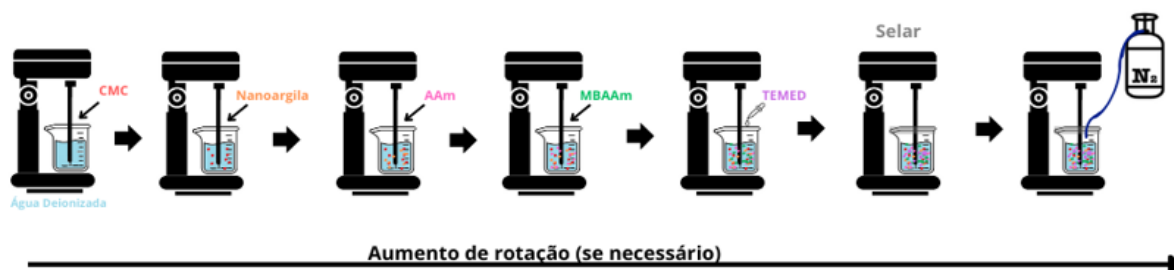
### 5.1. Síntese do hidrogel

Os procedimentos para a síntese do hidrogel composto por poliacrilamida (PAAm), carboximetilcelulose (CMC) e nanoargila do tipo cloisita- $\text{Na}^+$  são baseados nos estudos descritos por Nascimento et al. (2017) e Watanuki Filho et al. (2024), cuja aplicabilidade foi previamente avaliada na tese de doutorado desde último, em argamassas com cimento CP II.

Os reagentes, e as respectivas concentrações, utilizados foram: 6,0% (m/v) de acrilamida (AAm) (Sigma-Aldrich 99%); 1,0% (m/v) de carboximetilcelulose (CMC) (Synth P.A, MM = 114.000 g/mol); 20% (porcentagem em massa em relação a massa de AAm + CMC) de nanoargila cloisita- $\text{Na}^+$  (Southern Clay Products); 2,0% (mol em relação ao monômero AAm) de agente de reticulação N'-N'-metilenobisacrilamida (MBAAm) (Sigma-Aldrich 99%); 6,67mmol/L de catalisador N,N,N',N'-tetrametiletenodiamina (TEMED) (Sigma-Aldrich

99%); 3,5mmol/L de iniciador persulfato de sódio (Sigma-Aldrich > 98%). Após a completa solubilização dos reagentes, a solução principal, ainda sem a adição do iniciador, foi mantida sob atmosfera de nitrogênio gasoso por um período de 30 minutos, com o objetivo de promover a inertização do meio reacional e evitar a presença de oxigênio, que poderia interferir no processo de polimerização. Simultaneamente, uma segunda solução contendo o iniciador foi submetida ao mesmo procedimento com nitrogênio gasoso por 10 minutos, de forma a garantir condições análogas de atmosfera inerte. O procedimento experimental adotado durante a etapa de síntese está demonstrado esquematicamente na Figura 8.

**Figura 8.** Esquema ilustrativo das etapas da síntese do hidrogel



(Fonte: Própria Autora)

Após esse período, o hidrogel foi retirado do molde de síntese, e foi dialisado por no mínimo 5 dias com intuito de retirar os componentes que não sofreram polimerização ou reticulação durante o processo.

Posteriormente, o material ainda úmido foi triturado e submetido à secagem em estufa a 40 °C, por um período de 48 a 72 horas, até que fosse atingida a massa constante, definida como a variação inferior a  $\pm 0,50\%$  entre pesagens consecutivas.

Após o processo de secagem, o material foi novamente triturado manualmente, tornando-se adequado para pesagem e utilização nas dosagens destinadas à moldagem dos corpos de prova. Ressalta-se que o hidrogel foi inicialmente pesado em seu estado seco, contudo, sua aplicação na pasta de cimento ocorreu na forma intumescida. Para isso, o processo de intumescimento foi realizado com água deionizada por um período mínimo de 24 horas, a fim de garantir a absorção adequada antes da incorporação ao compósito cimentício.

### ***5.1.1. Características do hidrogel e fundamentação técnica para a escolha dos seus principais componentes***

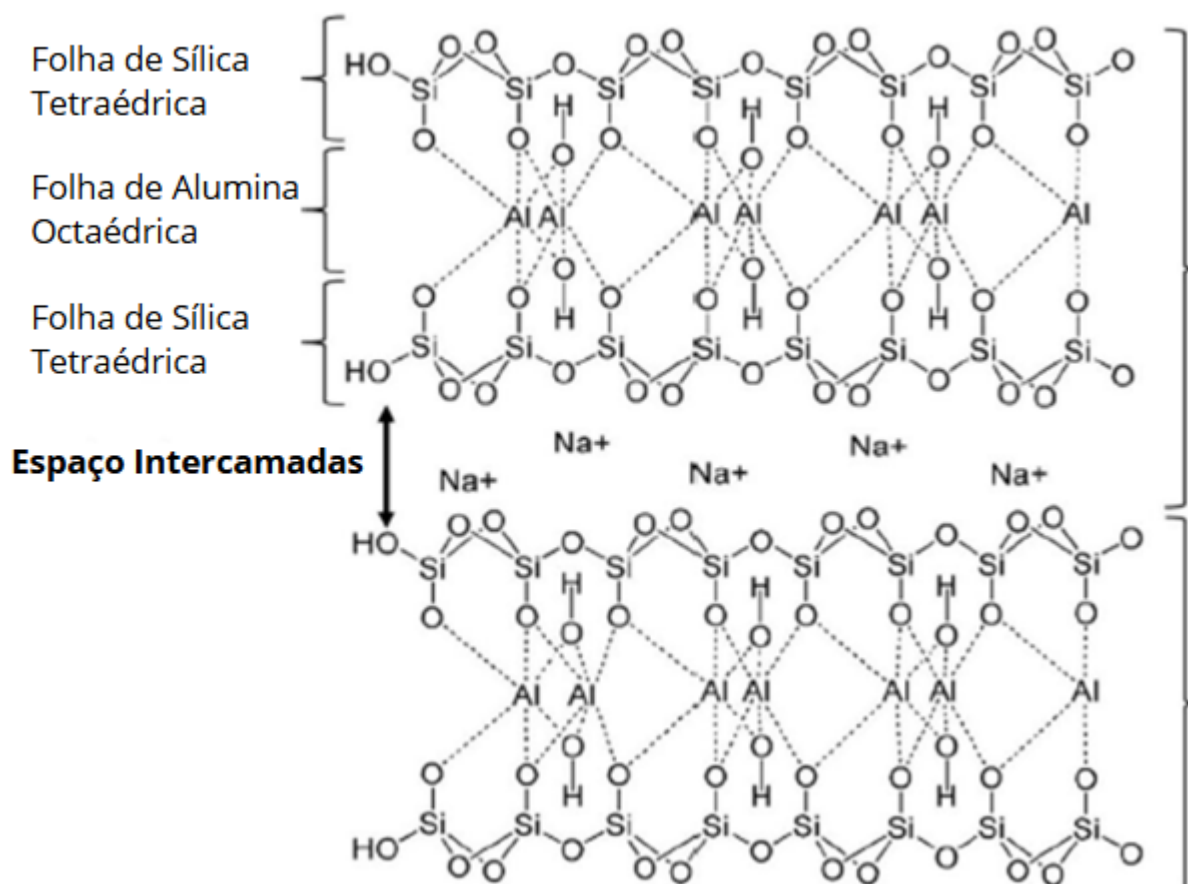
A escolha dos reagentes utilizados na síntese do hidrogel proposto foi baseada nas funções específicas desempenhadas por cada componente dentro da matriz polimérica, com ênfase em propriedades como capacidade de absorção de água, estabilidade mecânica e biodegradabilidade. Desta forma, torna-se fundamental compreender a função individual de cada componente, de modo a embasar sob uma perspectiva técnica-científica, a composição adotada no desenvolvimento do hidrogel.

Dentre os componentes da matriz polimérica, destaca-se a carboximetilcelulose (CMC), um polissacarídeo derivado da celulose, biodegradável, não-tóxico e com propriedades hidrofílicas. Trata-se de um polímero de estrutura linear com grupos hidroxila e carboxila presentes em sua cadeia macromolecular, o que permite sua funcionalidade independentemente do pH, além de promoverem significativa capacidade de retenção hídrica. Sua natureza aniônica e hidrofílica permite a formação de soluções coloidais estáveis em meio aquoso, o que contribui para a síntese de hidrogéis com alta capacidade de absorção de água e potencial de liberação controlada. Em virtude dessas características, hidrogéis à base de CMC têm sido amplamente utilizados nas áreas de agricultura e biomedicina (Esmaeili; Mohtarami; Pirsá, 2025).

Para melhorar a estabilidade mecânica de hidrogéis contendo CMC, é comum formulá-los com reagentes de origem sintética e adicionar argilas como agente de reforço. Neste sentido, a adição de nanoargila do tipo cloisita- $\text{Na}^+$  à formulação contribui para melhoria das propriedades mecânicas do hidrogel e controlar a taxa de liberação de água ao longo do tempo (Watanuki Filho et al., 2024).

A morfologia da nanoargila do tipo cloisita- $\text{Na}^+$  consiste em duas camadas tetraédricas de silício e uma octaédrica de óxido de alumínio com estrutura 2:1. Essa configuração, como mostrado na Figura 9, confere à nanoargila uma elevada área superficial, elevada reatividade e grande potencial de intercalação, o que torna eficiente a utilização da nanoargila em questão nos nanocompósitos poliméricos. A facilidade com que moléculas de água penetram em sua estrutura promove a expansão da rede e o aumento da distância interlamelar, favorecendo a difusão de cadeias poliméricas entre as camadas (Da Silva Neto et al., 2024).

**Figura 9.** Estrutura representativa da nanoargila cloisita- $\text{Na}^+$



(Fonte: Watanuki, 2021)

A presença da poliacrilamida (PAAm) em hidrogéis, obtida a partir da polimerização do monômero acrilamida (AAm), tem se mostrado altamente vantajosa devido às suas propriedades mecânicas ajustáveis, estabilidade química e elevado grau de intumescimento. Desta maneira, estudos prévios demonstram que o uso de agentes de cura interna a base de PAAm melhoram o intumescimento do hidrogel, que ao liberar água de forma controlada contribui para a formação de hidróxido de cálcio (C-H) durante o processo de hidratação da pasta de cimento, sem alterar a resistência mecânica do compósito (Davis et al., 2020).

Watanuki Filho (2021), ao combinar os componentes nas proporções descritas no item anterior, reproduziu um hidrogel cujas propriedades foram detalhadas em sua tese de doutorado e desenvolvidas inicialmente pelo estudo de Nascimento et al., (2017), publicado pelo Grupo de Compósitos e Nanocompósitos Híbridos (GCNH). O material apresenta como principais características, grau de intumescimento de 23,71 g/g em água destilada e massa específica de

2.140 kg/m<sup>3</sup>, o que evidenciou uma boa capacidade de absorção e densidade compatível com aplicações em compósitos cimentícios.

Ressalta-se que a incorporação de nanoargila na estrutura do hidrogel resulta em uma redução da capacidade máxima de absorção de água, devido à maior densificação da matriz polimérica e ao preenchimento parcial dos espaços disponíveis para absorção de água. No entanto, essa modificação estrutural promoveu comportamento mais controlado nos processos de retenção e liberação de água ao longo do tempo, conforme evidenciado pelos resultados de taxa de exsudação apresentados no estudo de Watanuki et. al., (2023).

## 5.2. Pasta de Cimento

O procedimento adotado para a preparação das pastas de cimento seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR NM 43:2003, como apresentado na Figura 10. Para a composição das misturas, foi utilizado cimento Portland de alta resistência inicial (CP V- ARI), da marca Cauê® e relação água deionizada/cimento (a/c) de 0,35.

Foram definidas apenas duas dosagens com relação a/c fixa de 0,35, valor selecionado com base nos resultados obtidos por CILLI et al. (2019), cujos resultados experimentais demonstraram desempenho mecânico e microestrutural satisfatório em compósitos cimentícios com essa proporção. As dosagens utilizadas para este estudo são apresentadas na Tabela 4.

A escolha dessa relação a/c visa garantir um equilíbrio adequado entre trabalhabilidade, compacidade da matriz e resistência mecânica, o que favorece também o controle da porosidade capilar e o desempenho durável do material, aspectos fundamentais na avaliação do efeito da incorporação de hidrogéis.

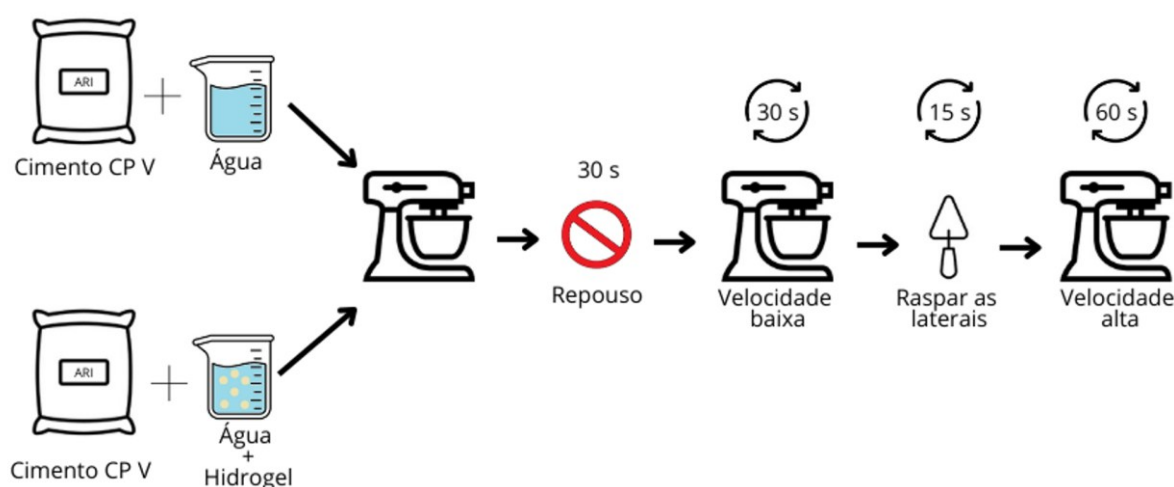
**Tabela 4.** Dosagens estimadas para 1m<sup>3</sup> de pastas de cimento com e sem hidrogel

| Descrição          | Cimento CPV-ARI      | Água (l/m <sup>3</sup> ) |          |       | Relação a/c |             | Hidrogel (%) |       |
|--------------------|----------------------|--------------------------|----------|-------|-------------|-------------|--------------|-------|
|                    | (kg/m <sup>3</sup> ) | Dosagem                  | Hidrogel | Total | a/c total   | a/c efetivo | Intumescido  | Seco  |
| Pasta Controle (C) | 3400                 | 1190                     | -        | 1190  | 0,350       | -           | -            | -     |
| Pasta Hidrogel (H) | 3400                 | 1173,72                  | 16,28    | 1190  | 0,350       | 0,345       | 0,50         | 0,021 |

(Fonte: Própria Autora)

A homogeneização dos materiais foi realizada por meio da argamassadeira BP 12 G. PANIZ<sup>®</sup>. A determinação do traço adotado para a pasta cimentícia fundamenta-se nos resultados experimentais publicados por Watanuki Filho (2021), cujos dados demonstraram desempenho satisfatório em termos de propriedades mecânicas e compatibilidade com aditivos poliméricos.

**Figura 10.** Esquema simplificado do processo de produção de pasta de cimento para o composto e o compósito contendo o hidrogel



(Fonte: Própria Autora)

Em relação aos compósitos, a proporção do hidrogel intumescido utilizado foi 0,5% em relação a massa do cimento. A quantidade de água absorvida pelo hidrogel durante o processo de intumescimento foi subtraída da água total de amassamento da mistura, a fim de manter a razão a/c constante. Essa correção foi realizada com base na taxa de intumescimento do material (g de água por g de hidrogel seco), previamente determinada em ensaios de caracterização, de forma a garantir maior precisão no controle da composição dos compósitos e na avaliação de seu desempenho reológico e mecânico. A taxa de intumescimento do hidrogel corresponde à quantidade de água absorvida por grama de material seco, sendo um parâmetro fundamental para sua aplicação em compósitos cimentícios. O hidrogel utilizado neste estudo apresentou boa capacidade de absorção hídrica e desempenho superior em propriedades relevantes de argamassas, como retenção de água, controle da exsudação e comportamento mecânico, evidenciando sua potencialidade de aplicação como aditivo funcional em sistemas cimentícios.

No preparo da pasta de cimento, inicialmente é adicionada à cuba da argamassadeira a água deionizada, pura, no caso das amostras de referência, ou com hidrogel, no caso dos compósitos, seguida da adição do cimento, ambos devidamente pesados. A utilização da água deionizada deve-se ao fato de minimizar a presença de íons de cloretos ou outras substâncias, presentes na água de abastecimento público, que poderiam interferir no comportamento do hidrogel.

Após a adição dos materiais, a pasta é mantida em repouso por 30 segundos, de modo a permitir a absorção de água inicial. Em seguida, a argamassadeira é acionada por 30 segundos em baixa rotação. Interrompe-se então o processo por 15 segundos, para que as laterais da cuba sejam raspadas com auxílio de uma espátula, de forma a garantir a homogeneidade. Por fim, a mistura é processada por mais 1 minuto em rotação máxima, de forma a completar o ciclo de mistura, conforme apresentado na Figura 11.

**Figura 11.** Fotografia digital da argamassadeira utilizada [1] e da pasta de cimento após o preparo [2]



(Fonte: Própria Autora)

### 5.3. Caracterização da pasta contendo nanocompósitos em estado fresco

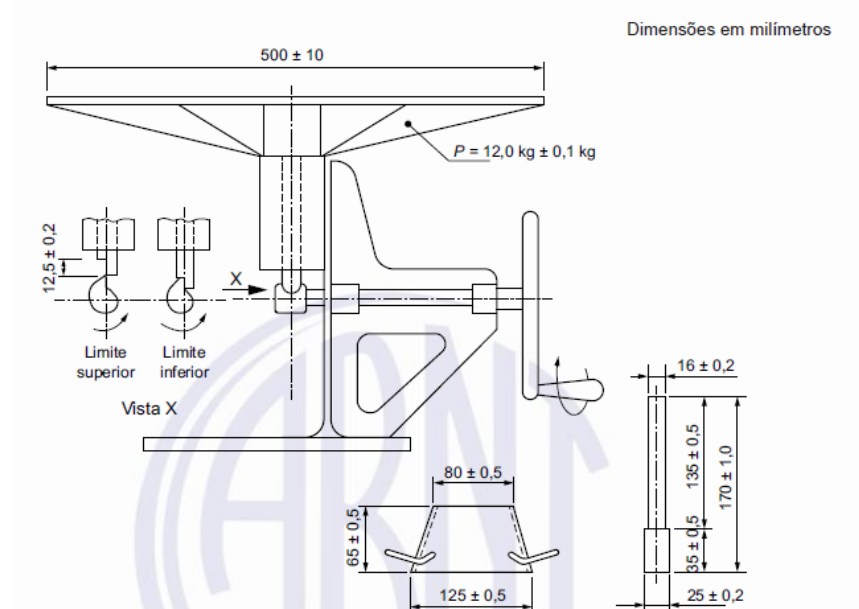
#### 5.3.1. Índice de Consistência

O ensaio foi realizado conforme as diretrizes estabelecidas pela norma ABNT NBR 7215:2019. O índice de consistência é um parâmetro experimental utilizado para avaliar a trabalhabilidade da pasta de cimento. Uma consistência inadequada pode comprometer etapas fundamentais do processo construtivo, como a moldagem, o transporte, o lançamento e o adensamento do material (Maciel; Coelho; Pereira, 2020).

Para a execução do teste, utilizou-se um molde troncocônico com 8 cm de diâmetro na base superior, 12,5 cm na base inferior e 6,5 cm de altura. A montagem foi realizada sobre uma mesa de índice de consistência, com 50 cm de diâmetro, equipada com uma haste central e uma manivela lateral. Ao acionar a manivela, a mesa realiza um movimento vertical ascendente de 1,25 cm, sendo então liberada para queda livre, promovendo a deformação da pasta. Adicionalmente, utilizou-se um soquete metálico com 2,5 cm de diâmetro na base maior, 1,6 cm na base menor e 17 cm de altura.

Para cada traço analisado, foram realizadas seis medições, com o objetivo de garantir a representatividade e a confiabilidade estatística dos resultados.

**Figura 12.** Detalhes do equipamento para a determinação do índice de consistência



(Fonte: NBR 7215:2019)

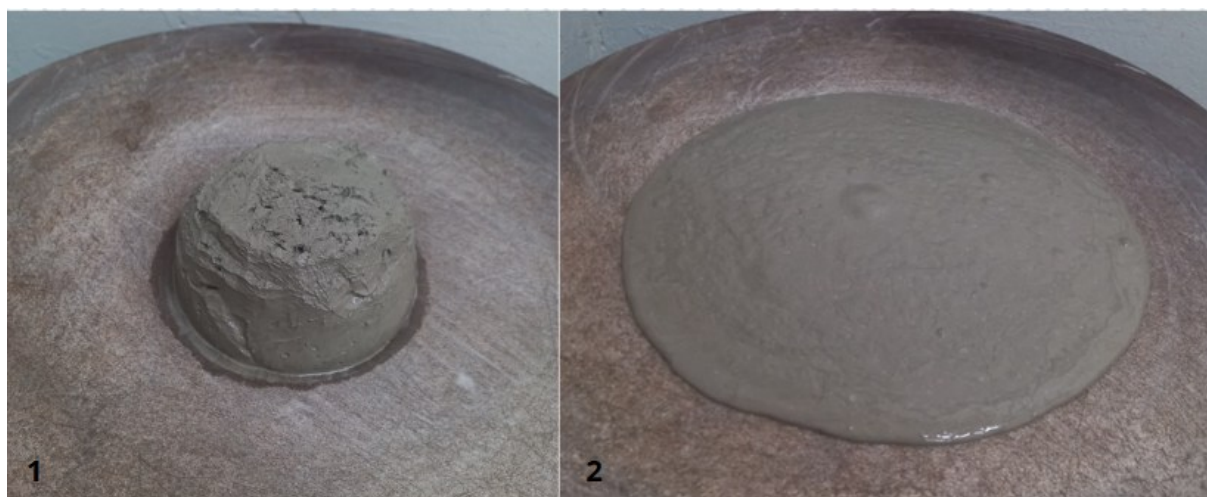
A moldagem do corpo de prova troncocônico foi realizada imediatamente após a preparação da pasta de cimento. Para isso, o molde foi posicionado no centro da mesa de consistência previamente limpa, com a base maior voltada para baixo.

A pasta foi colocada no molde em três camadas de alturas equivalentes. A cada camada, foram aplicados golpes com o soquete metálico, seguindo a seguinte sequência: 15 golpes na primeira camada, 10 golpes na segunda e 5 golpes na terceira, todos distribuídos de forma uniforme e homogênea. Em seguida, a superfície superior foi nivelada com o auxílio de uma espátula, para dar o acabamento plano do topo do corpo de prova.

Após o preenchimento e nivelamento, o molde foi retirado verticalmente, com cuidado para não deformar a amostra. Em seguida, procedeu-se ao ensaio de abatimento, acionando-se a manivela da mesa de consistência de modo a realizar 30 quedas verticais em 30 segundos, utilizando-se um cronômetro para controle do tempo.

Ao término do ensaio, o diâmetro final da pasta foi medido com o auxílio de régua ou paquímetro, para posterior análise. A Figura 13 apresenta a aparência da amostra após o ensaio de abatimento.

**Figura 13.** Fotografia digital da pasta de cimento antes [1] e depois [2] do abatimento do corpo de prova



(Fonte: Própria Autora)

### 5.3.2. Exsudação

Os hidrogéis possuem como característica principal a liberação controlada de água, desta forma, determinar a exsudação da matriz cimentícia é uma adequada maneira de observar este fenômeno, visto que a retenção de água pelo polímero pode ser um indicativo de que a liberação de água está sendo realizado de forma controlada. O método utilizado segue as diretrizes da recomendação RILEM MR-6.

Além dos materiais para a preparação das pastas de cimento, foram utilizados 4 béqueres com capacidade mínima de 500 mL, uma espátula, uma pipeta e duas provetas graduadas, sendo uma com capacidade mínima de 500 mL e outra de 10 mL.

Inicialmente, realizou-se a calibração dos béqueres com o auxílio da proveta maior. Para isso, foram transferidos 500 mL de água deionizada na proveta para cada béquer, marcando-se o nível do menisco da água em cada recipiente.

Imediatamente após o preparo das pastas cimentícias, tanto da dosagem controle quanto da contendo hidrogel (compósito), estas foram vertidas nos béqueres até atingir a marca previamente definida. Ressalta-se que foram utilizadas quatro amostras para cada formulação.

Em seguida, realizaram-se riscos aleatórios na superfície da pasta com a espátula, com o intuito de evitar a formação de película superficial que pudesse interferir na exsudação. Aos 15, 30, 60, 120 e 240 minutos após o preparo, procedeu-se à retirada do volume de água exsudada da superfície com o auxílio de uma pipeta, realizando-se a mensuração com a proveta de 10 mL. Esse procedimento permitiu quantificar a exsudação ao longo do tempo. A taxa de exsudação foi calculada pela relação entre o volume de água exsudada e a área da superfície livre de cada béquer.

A Figura 14 apresenta o procedimental experimental executado.

**Figura 14.** Fotografia digital da pasta de cimento em processo de medição da exsudação



(Fonte: Própria Autora)

### 5.3.3. Densidade e teor de ar incorporado

Este ensaio seguiu as diretrizes estabelecidas pela norma NBR 13278:2005. Inicialmente, os béqueres utilizados foram calibrados de acordo com o método descrito no item anterior e, em seguida, pesados em sua condição seca, obtendo-se a massa vazia ( $m_v$ ). Para o ensaio, foram utilizados quatro béqueres com capacidade de 300 mL.

Imediatamente, após o preparo da pasta de cimento, com o auxílio de uma espátula, deposita-se a pasta em 3 camadas de igual volume no béquer, utilizando-se uma espátula para o adensamento. Cada camada recebeu 20 golpes verticais aplicados com a espátula, com intuito de obter uma compactação uniforme. Concluída esta etapa, realizaram-se três quedas verticais a uma altura de 3 cm, com o objetivo de eliminar bolhas de ar retidas.

A superfície da amostra foi nivelada com o auxílio da espátula, e quaisquer resíduos de material foram removidos da parte externa do recipiente. Em seguida, procedeu-se à pesagem da amostra contendo a pasta, obtendo-se a massa com conteúdo ( $m_c$ ). A densidade de massa no estado fresco é dada pela equação 7.

$$d = \frac{m_c - m_v}{V_r} \times 1000 \quad (7)$$

onde  $V_r$  é o volume do recipiente cilíndrico ( $\text{cm}^3$ ).

O teor de ar incorporado ( $A$ , obtido em %) é dado pela equação 8, sendo necessário utilizar a equação 9:

$$A = 100 \times \left(1 - \frac{d}{d_t}\right) \quad (8)$$

$$d_t = \frac{m_s + m_{\text{água}}}{\frac{m_s}{\gamma_s} + m_{\text{água}}} \quad (9)$$

onde  $d_t$  é densidade de massa teórica da pasta de cimento ( $\text{g}/\text{cm}^3$ ), sem vazios,  $m_s$  é a massa da pasta de cimento (g),  $m_{\text{água}}$  é a massa de água que compõe a pasta de cimento (g), e  $\gamma_s$  é a massa específica da pasta de cimento.

## 5.4. Caracterização das propriedades do sistema pasta-nanocompósito em seu estado endurecido

### 5.4.1. Retração Hidráulica

O processo de cura interna pode ser influenciado pela presença do hidrogel na matriz cimentícia, podendo evitar a retração da pasta cimentícia. Nesse contexto, o método de determinação da retração hidráulica, descrito na norma NM 131:1997, é uma ferramenta adequada para avaliar esse efeito.

Para a realização do ensaio, utilizou-se um relógio comparador mecânico vertical da marca SOLOTEST® (Figura 15), além de fôrmas de corpo de prova de 2,5 x 2,5 x 30 cm equipadas com pinos metálicos, conforme demonstrado na Figura 16. Para cada traço analisado, foram moldados no mínimo 3 corpos de prova.

**Figura 15.** Fotografia digital do aparelho relógio comparador mecânico vertical usado para a medição de retração



(Fonte: Própria Autora)

**Figura 16.** Fotografia digital das fôrmas usadas no teste de retração



(Fonte: Própria Autora)

Após a montagem das fôrmas, estas foram preparadas com vaselina industrial, com exceção da região dos pinos que permanecerá em contato direto com a pasta cimentícia, a fim de evitar o desprendimento prematuro desses elementos durante o ensaio.

Imediatamente após o preparo da pasta, a moldagem foi realizada em duas camadas. Cada camada permaneceu por aproximadamente 30 segundos sobre a mesa vibratória (SOLOTEST®, Brasil), operando a 3600 Hz, para promover a compactação adequada. A última camada foi nivelada com o auxílio de uma espátula. Em seguida, as fôrmas foram vedadas com filme plástico para evitar a evaporação da água.

A cura foi realizada inicialmente à temperatura ambiente durante as primeiras 24 horas. Após o desmolde, os corpos de prova foram transferidos para estufa com temperatura controlada a 35 °C, permanecendo sob essas condições até os respectivos períodos de ensaio.

As medições de retração foram realizadas aos 1, 3, 7, 10, 14, 21 e 28 dias. Para que ocorra a padronização dos resultados de acordo com o que é comumente encontrado na literatura, adaptamos o que a norma internacional ASTM C490/C490M 2017, para que as retrações sejam em porcentagem, Equação 10.

$$L = \frac{(L_i - L_x) \times 100}{L_i} \quad (10)$$

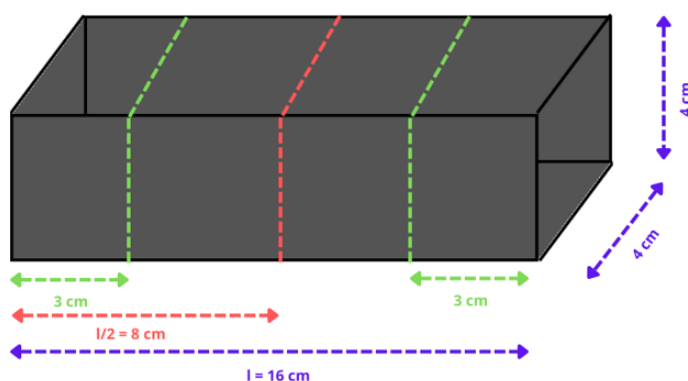
onde L é a retração longitudinal (%),  $L_i$  é o comprimento da forma (mm) e  $L_x$  é comprimento medido nos dias de cura (mm).

### 5.4.2. Compressão Axial

A resistência à compressão é uma das propriedades mais significativas do cimento, sendo fundamental avaliar o impacto da incorporação de hidrogel na matriz cimentícia. Para essa análise comparativa, utilizou-se a máquina de ensaio Emic® DL30000N, seguindo as diretrizes estabelecidas na norma NBR 13279:2005.

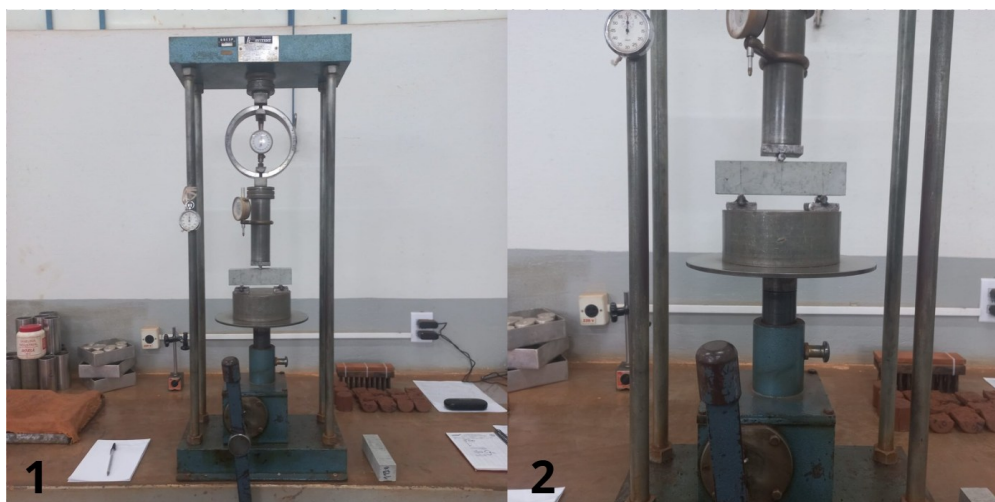
Os corpos de prova, com dimensões de  $4 \times 4 \times 16$  cm, foram inicialmente divididos usando a prensa de SBR (Pavitest®) (Figura 17), de acordo com as marcações da norma NBR 13279:2005 (Figura 18), sendo suas metades usadas para o ensaio de compressão. Para cada traço e tempo de cura, foram utilizados, no mínimo, seis corpos de prova.

**Figura 17.** Marcações e dimensões do corpo de prova



(Fonte: adaptada da norma NBR 13279:2005)

**Figura 18.** Fotografia digital do equipamento Prensa de SBR prestes a realizar a divisão dos corpos de prova [1] e detalhes sobre a posição das marcações no corpo de prova nos apoios [2].



(Fonte: Autora)

Para a moldagem, as fôrmas foram previamente preparadas com desmoldante e, em seguida, as pastas de cimento foram preparadas conforme descrito na Seção 5.2. A moldagem foi realizada em três camadas, cada uma submetida à vibração por 30 segundos na mesa vibratória (SOLOTESTE®, Brasil), operando a 3600 Hz. Após a última camada, a superfície foi nivelada com uma régua, e as fôrmas foram vedadas com filme plástico, conforme ilustrado na Figura 19.

As primeiras 24h de cura foram realizadas em temperatura ambiente. Após esse período, os corpos de provas desmoldados e transferidos para estufa com temperatura controlada de 35°C. As idades de rupturas foram 1, 3, 7, 28, 56 e 112 dias.

O ensaio de compressão foi realizado utilizando as metades previamente divididas dos corpos de prova. Essas metades foram posicionadas no equipamento de compressão de modo que a face de  $4 \times 4$  cm estivesse orientada para receber a carga aplicada, conforme apresentado na Figura 20.

**Figura 19.** Fotografia digital das fôrmas lubrificadas [1] e corpos de prova em processo de cura [2].



(Fonte: Própria Autora)

**Figura 20.** Fotografia digital do equipamento Emic® DL30000N realizando o ensaio de compressão.



(Fonte: Própria Autora)

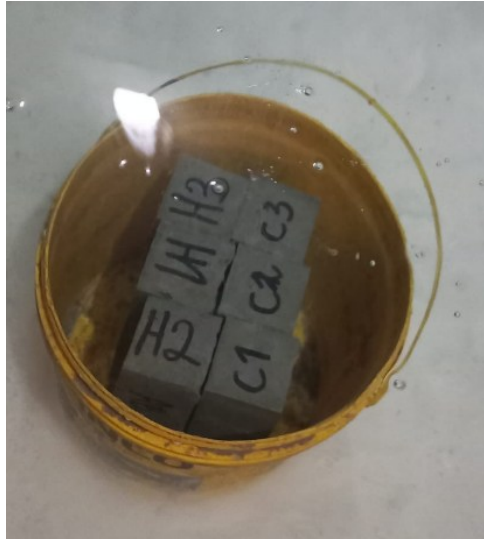
#### **5.4.3. Absorção de Água**

A absorção de água por imersão é necessária para avaliar a porosidade do material após a liberação da água aprisionada no hidrogel. Assim, a água é conduzida e tende a ocupar os poros da estrutura. Para este método, usou-se como base a norma NBR 9778:2009. Foram utilizados 3 corpos de prova de 4 x 4 x 16 cm para cada traço.

Após 24 horas de cura, conforme descrito na Seção 5.4 (resistência à compressão axial), os corpos de prova, com volume mínimo de 150 cm<sup>3</sup> — requisito atendido pelas fôrmas utilizadas — foram submetidos à secagem em estufa a 105 °C por um período de 72 horas. Ao final desse período, as amostras foram pesadas para determinação da massa seca ( $m_s$ ), considerando-se como critério de estabilidade a variação inferior a 0,50% entre duas pesagens consecutivas.

Na sequência, os corpos de prova foram submersos em água e mantidos em câmara úmida por 72 horas adicionais, a fim de garantir sua completa saturação, conforme apresentado na Figura 21.

**Figura 21.** Fotografia digital das amostras submersas na câmara úmida



(Fonte: Própria Autora)

Após esse período de saturação, as amostras foram novamente pesadas, obtendo-se a massa saturada ( $m_{sat}$ ). A absorção de água por imersão foi então calculada conforme a equação (11).

$$\%AB = \frac{m_{sat} - m_s}{m_s} \times 100 \quad (11)$$

#### **5.4.4. Densidade Aparente**

A determinação da densidade aparente seguiu a norma NBR 13280:2005. Com a ajuda de um paquímetro ou uma régua, mede-se as dimensões dos corpos de provas (dimensões da forma: 4 x 4 x 16 cm) momentos antes da ruptura para determinação do volume ( $volume_{cp}$ ), bem como sua massa. Foram utilizados 3 corpos de prova para cada traço e idade de cura. Depois, utilizando a equação 12, determina-se a densidade aparente. Tais medidas foram feitas para rupturas em 1, 28, 56 e 112 dias.

$$\rho_{aparente} = \frac{massa}{volume_{cp}} \quad (12)$$

#### ***5.4.5. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)***

No campo da Ciência dos Materiais, a caracterização estrutural e a identificação de defeitos em compósitos são etapas fundamentais, uma vez que tais aspectos influenciam diretamente propriedades essenciais como resistência mecânica, porosidade e durabilidade. Contudo, esses elementos estruturais encontram-se, em sua maioria, na escala microscópica, com dimensões da ordem de  $10^{-6}$  metros. Nesse contexto, a Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) configura-se como uma técnica adequada para esse tipo de análise (Callister; Rethwisch, 2021).

Para a obtenção das imagens, utilizou-se o microscópio eletrônico Zeiss Evo LS15, operando com voltagem de aceleração de 10 kV. Após os ensaios de ruptura realizados aos 1, 28 e 56 dias, fragmentos representativos dos corpos de prova foram selecionados e fixados em porta-amstras adequados. Em seguida, procedeu-se à metalização das amostras com a deposição de uma fina camada de ouro, a fim de garantir a condutividade elétrica necessária à análise por MEV.

#### ***5.4.6. Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS)***

A análise por Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS) tem como objetivo identificar, de forma semiquantitativa, a composição química dos compósitos cimentícios estudados, por meio da identificação e da variação nas proporções elementares presentes na matriz (Li; Ding; Cai, 2025).

#### ***5.4.7. Análise Termogravimétrica***

A análise termogravimétrica (TG) tem como finalidade avaliar a variação de massa de um material em função da temperatura, sob atmosfera controlada, permitindo o estudo de sua composição térmica (Oliveira et al., 2021).

A preparação das amostras foi realizada imediatamente após os ensaios de ruptura, correspondentes às idades de 28, 56 e 112 dias de cura. Inicialmente, os fragmentos dos corpos de prova foram triturados até a obtenção de um pó fino e homogêneo. Em seguida, foram pesados aproximadamente 10 mg da amostra para serem acondicionados em cadinhos de platina.

As análises foram realizadas em equipamento da marca TA Instruments, sob atmosfera de nitrogênio com fluxo de 100 mL/min, taxa de aquecimento de 10°C/min, de temperatura ambiente até 1200 °C.

#### **5.4.8. Grau de Hidratação e Porcentagem de Água Livre e Estrutural**

A partir dos dados da análise termogravimétrica, usando o método descrito em Wang et al. (2025) foi possível verificar a hidratação da amostra, através da aplicação das Equações 13 e 14:

$$W_B = Ldh + Ldx + 0,41 \times Ldc \quad (13)$$

$$DH = \frac{W_B}{0,24} \quad (14)$$

onde:

$W_B$ : água quimicamente ligada (%)

$Ldh$ : porcentagem de perda de peso da desidratação (%);

$Ldx$ : porcentagem de perda de peso da desidroxilação (%);

$Ldc$ : porcentagem de perda de peso da decarbonatação (%);

$DH$ : grau de hidratação (%)

O mesmo estudo sugere que a água livre presente nas amostras evapora completamente a partir de 105 °C. Dessa forma, a porcentagem de água livre pode ser estimada pela diferença entre a massa inicial e a massa remanescente a 105 °C. De modo análogo, é possível estimar a quantidade de água estrutural, associada à hidratação das fases do cimento, subtraindo-se a perda de massa até 105 °C da perda total de massa observada durante o processo de desidratação. Este procedimento permite, portanto, uma avaliação indireta das diferentes formas de água presentes na matriz cimentícia. Os resultados deste procedimento se encontram na Tabela 8, na sessão 6.2.7.

#### **5.4.9. Análise Estatística**

Para a análise estatística dos dados experimentais, foi utilizado o software SISVAR®, por meio da aplicação da análise de variância (ANOVA), seguida do teste de comparação de

médias de Tukey, com nível de significância de 5%. A comparação foi realizada entre os resultados obtidos para os traços controle e compósito.

Ressalta-se que para algumas propriedades no estado endurecido, o teste de Tukey também foi aplicado entre os diferentes tempos de cura, com o mesmo nível de significância, a fim de identificar possíveis tendências de comportamento ao longo do tempo.

## 6. Resultados e Discussão

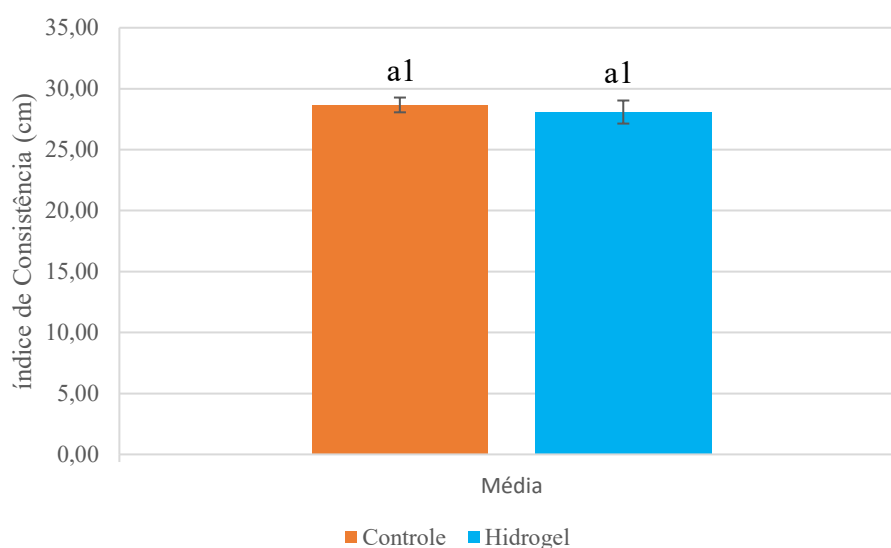
### 6.1. Estado Fresco

#### 6.1.1. Índice de Consistência

O índice de consistência é um parâmetro que pode ser relacionado com a trabalhabilidade da pasta de cimento, sendo relevante para as etapas de moldagem, lançamento e transporte (Maciel; Coelho; Pereira, 2020).

A Figura 22 apresenta os valores obtidos para o índice de consistência da pasta de cimento de referência (controle) e da pasta modificada com hidrogel. Observa-se que a média do diâmetro para o abatimento da pasta (*slump flow*) contendo hidrogel é ligeiramente inferior ao ser comparada com o controle, com uma diferença de 0,59 cm. Isto não comprometeu a trabalhabilidade das pastas contendo hidrogel. Embora tenha sido observada uma leve redução no índice de consistência nas pastas contendo hidrogel, a análise estatística pelo teste de Tukey indicou que as amostras são estatisticamente equivalentes. O valor médio de abatimento para o traço controle foi de  $28,67 \pm 0,61$  cm, enquanto para a pasta contendo hidrogel foi de  $28,08 \pm 0,95$  cm. Essa discreta redução pode ser atribuída à capacidade do hidrogel de reter parte da água de amassamento, tornando-a temporariamente indisponível para a matriz cimentícia (Patil et al., 2023).

**Figura 22.** Valores do índice de consistência obtidos para o controle e com hidrogel



(Fonte: Própria Autora)

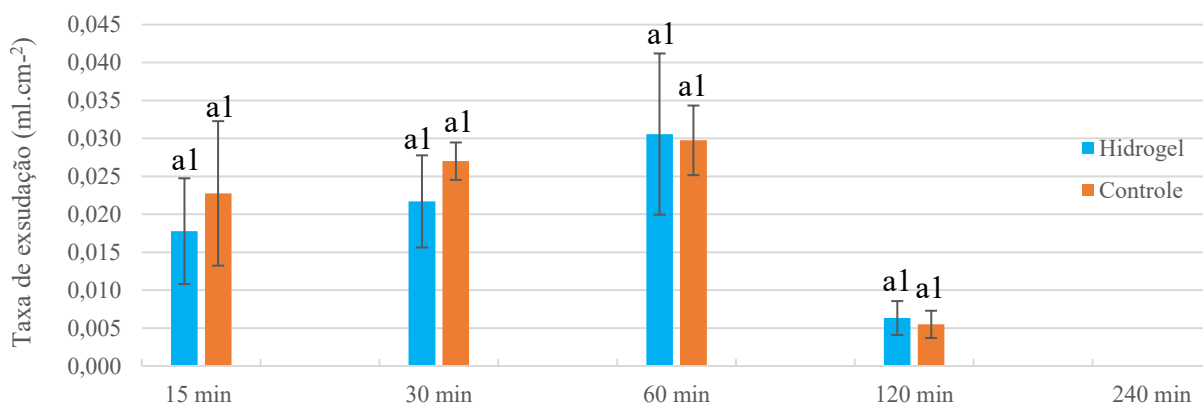
Calesco et al. (2022) demonstraram que, em argamassas com baixas relações de água/cimento, a indisponibilidade de água compromete a trabalhabilidade do material, o que resulta em um aumento da tensão de escoamento e da viscosidade na matriz cimentícia. No referido estudo, argamassas com a/c de 0,4, contendo 0,5% de hidrogel apresentaram uma redução no índice de consistência de aproximadamente 10%.

De modo semelhante, os resultados obtidos nesta dissertação para a pasta com adição de hidrogel indicaram uma diminuição de 2,05% no índice de consistência, em comparação ao traço de referência. Essa redução está associada à retenção parcial da água de amassamento pelo polímero, corroborando com Calesco et al. (2022). Resultados similares foram reportados por Gupta et al. (2018), que destacaram que a presença de polímeros superabsorventes tende a reduzir a fluidez das pastas, dependendo da composição e da dosagem utilizada.

### 6.1.2. Exsudação

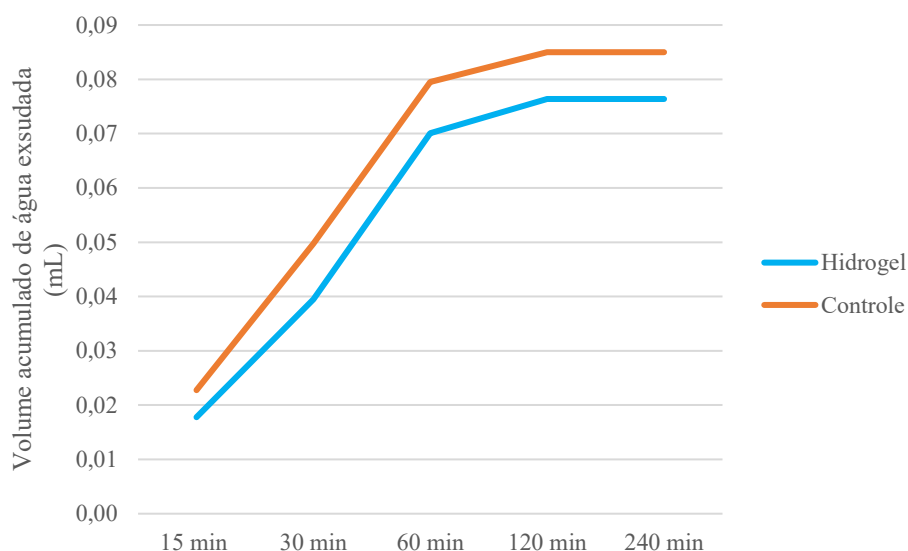
A análise da taxa de exsudação ao longo do tempo fornece informações relevantes sobre a dinâmica de liberação de água em pastas cimentícias tanto na condição de referência (controle) quanto naquelas modificadas com a adição de hidrogel. A partir das Figuras 23 e 24, observa-se o comportamento de exsudação em ambas as matrizes, permitindo uma avaliação comparativa da influência do hidrogel na retenção e liberação de água ao longo do tempo.

**Figura 23.** Taxa de exsudação de pastas cimentícias com e sem hidrogel



(Fonte: Própria Autora)

**Figura 24.** Volume total de exsudação em mL obtido para as pastas controle e contendo hidrogel



(Fonte: Própria Autora)

A partir da Figura 23, observa-se que, nos primeiros 60 minutos, ambas as dosagens apresentaram um comportamento crescente da taxa de exsudação, indicando a liberação inicial de parte da água livre para a superfície das amostras. Esse padrão é característico do estágio inicial das reações de hidratação do cimento, em que a água excedente tende a migrar para a superfície. Tal comportamento está em conformidade com os resultados obtidos por Watanuki Filho et al. (2021), onde também evidenciou um aumento progressivo da exsudação durante as primeiras etapas do processo de hidratação em pastas cimentícias.

Ambas as amostras apresentaram o pico de exsudação aos 60 minutos, conforme ilustrado na Figura 23. Nesse tempo, a taxa de exsudação foi de  $0,0306 \pm 0,0106 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2}$  para a amostra contendo hidrogel e de  $0,0297 \pm 0,0046 \text{ mL} \cdot \text{cm}^{-2}$  para o traço controle. Em ambas as formulações, não se observou exsudação aos 240 minutos. Destaca-se que os valores obtidos não diferem estatisticamente, indicando comportamento equivalente entre as amostras quanto ao parâmetro analisado.

No entanto, conforme apresentado na Figura 24, observa-se uma tendência mais acentuada de exsudação nas amostras controle ao longo do tempo. Essa diferença sugere que o hidrogel atua como agente absorvente de parte da água disponível na matriz cimentícia, resultando em uma menor exsudação superficial. Tal comportamento está em consonância com estudos anteriores, como os de Watanuki Filho et al. (2021) e Cilli et al. (2019), que também

identificaram a capacidade dos hidrogéis de mitigar a exsudação inicial em sistemas cimentícios.

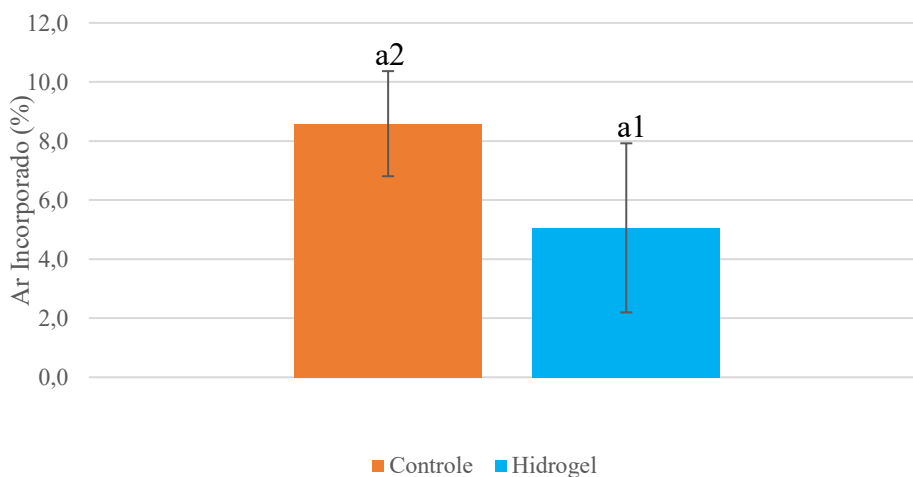
Ressalta-se ainda que a menor exsudação na amostra com hidrogel é um indicativo da capacidade do polímero em reter água, atuando como um reservatório interno. Esse comportamento é coerente com o mecanismo de agentes de cura interna, pois a água retida pode ser liberada posteriormente para manter a hidratação da matriz cimentícia.

### 6.1.3. Teor de ar incorporado

Conforme apresentado na Figura 25, observa-se uma diferença significativa na porcentagem de ar incorporado entre a pasta de cimento de referência (sem adição de hidrogel), com  $8,59 \pm 1,78$  %, e a formulação contendo hidrogel, com  $5,06 \pm 2,86$ %. Essa redução representa uma diminuição aproximada de 40% no volume de vazios incorporados.

A análise estatística, realizada por meio do teste de Tukey com nível de significância de 5%, confirmou que esta redução é estatisticamente significativa, o que é evidenciada pela atribuição de letras distintas (a1 e a2) aos respectivos grupos. Esses dados sugerem que a presença do hidrogel contribui para uma matriz cimentícia mais densa, possivelmente devido à sua ação de retenção de água e alteração na dinâmica de incorporação de ar durante o preparo da pasta.

**Figura 25.** Porcentagem de ar incorporado nas amostras de pastas de controle e com hidrogel



(Fonte: Própria Autora)

A presença de ar nas misturas contendo cimento está, na maioria das vezes, associada à formação de vazios entre os grãos durante o processo de mistura, especialmente quando há elevada variação na distribuição granulométrica dos materiais empregados. Segundo Fiorito et al. (2009), materiais com maior heterogeneidade de partículas, como as argamassas, tendem a apresentar volumes de ar aprisionado superiores aos observados em pastas de cimento.

Diante disso, os resultados obtidos indicam que o hidrogel foi adequadamente disperso na matriz cimentícia, sendo capaz de preencher seus vazios. Tal comportamento pode ser atribuído à sua característica física gelatinosa e elevada capacidade de retenção hídrica, o que pode favorecer sua adaptação à microestrutura porosa e contribuir para a redução de vazios.

Neste sentido, a presença do hidrogel pode proporcionar uma matriz mais compacta durante o preparo da pasta. Este efeito está associado à capacidade do hidrogel de absorver parte da água disponível, de forma a contribuir para uma redistribuição da fase líquida e, consequentemente, reduzir a formação de vazios de ar durante a mistura. Com menos ar aprisionado, espera-se uma melhor densificação da pasta e, potencialmente, maior resistência mecânica em idades posteriores, desde que a hidratação não seja prejudicada. No entanto, o comportamento também dependerá do momento e da taxa de liberação da água absorvida pelo hidrogel.

Além disso, a presença de nanoargila na composição do hidrogel promove maior entrelaçamento físico entre as cadeias poliméricas e suas lamelas, o que potencializa a retenção de água no interior da estrutura do hidrogel (Calesco; Watanuki; Moura; Aouada, 2022). A menor disponibilidade de água livre interfere diretamente nas reações de hidratação do cimento, sobretudo nas fases iniciais, o que reduz o volume de produto de hidratação formado. Tal comportamento, conforme discutido por Santos et al. (2016), está intimamente relacionado à diminuição da porosidade da matriz cimentícia.

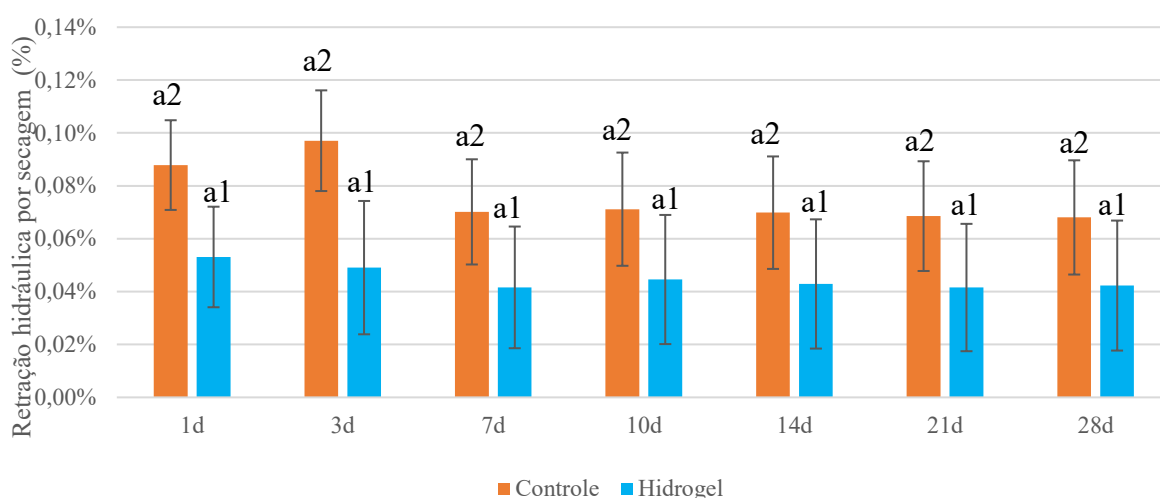
Portanto, mesmo em baixa quantidade, o hidrogel demonstrou ser capaz de reduzir significativamente a formação de poros, característica essencial para a melhoria do desempenho do compósito. A redução da porosidade contribui para menor permeabilidade e favorece o processo de cura interna, demonstrando um desenvolvimento mais uniforme e durável da resistência mecânica ao longo do tempo.

## 6.2. Estado Endurecido

### 6.2.1. Retração Hidráulica

A retração hidráulica por secagem ocorre em função da evaporação da água presente na matriz cimentícia para o meio externo, ocasionando uma redução de volume do material (Wichterle; Lím, 2024). Esse fenômeno manifesta-se como uma variação dimensional ao longo do comprimento dos corpos de prova, sendo aferido por meio de medições longitudinais. Os resultados obtidos para essa propriedade estão apresentados na Figura 26.

**Figura 26.** Variação de retração hidráulica por secagem de pastas cimentícias de controle e produzidas com hidrogéis



(fonte: Própria Autora)

Os resultados demonstram, de maneira consistente, que as amostras contendo hidrogel apresentaram valores de retração inferiores aos da amostra controle, em todas as idades avaliadas. Ao comparar os resultados, observa-se uma significativa variação entre a deformação da pasta de controle com a pasta contendo o hidrogel. A adição de uma pequena quantidade de hidrogel foi suficiente para reduzir a retração hidráulica em aproximadamente 50%. Essa redução confirmada como estatisticamente diferente pelo teste de Tukey, conforme indicado pela simbologia diferente (a1 e a2). Tal resultado reforça a função do hidrogel como agente eficaz de cura, que atua na liberação controlada de água e mitiga os efeitos da perda hídrica precoce na matriz cimentícia.

As pastas de cimento CPV-ARI apresentam um comportamento típico de estabilização da retração entre o sétimo e o décimo dia de cura, como descrito por Melo Neto (2002), o que pode ser observado nas amostras controle. No entanto, nas dosagens das pastas contendo o hidrogel, a estabilidade da retração foi observada já no primeiro dia de cura. Observa-se que, já nas primeiras 24 horas, o valor médio de retração para a amostra controle ultrapassa 0,09%, enquanto para o compósito com hidrogel esse valor é inferior a 0,05%. Essa tendência se mantém ao longo de todo o período analisado, com reduções médias próximas a 50%, o que confirma o efeito benéfico da incorporação do hidrogel sobre o controle da retração.

A análise estatística por meio do teste Tukey, aplicada aos dados do grupo de amostras produzidas com hidrogel em idades diferentes, não apresentou diferenças estatisticamente significativas.

Nos primeiros 7 dias, a retração por secagem está relacionada à evaporação da água presente nos poros capilares da matriz cimentícia (Fiorito, 2009). A menor retração observada nas pastas com hidrogel pode ser atribuída, em parte, à retenção de água de intumescimento no interior da estrutura do polímero, que tem evaporação lenta e, em parte, à ocupação física dos vazios que o polímero possivelmente está ocupando. Esse preenchimento pode atuar como barreira à movimentação das partículas de água para a superfície da matriz cimentícia, o que pode reduzir a perda de umidade e, conseqüentemente, a retração.

Fiorito (2009) também destaca que pastas de cimento tendem a apresentar retração até duas vezes maior que argamassas, em função do maior volume de vazios. Assim, a hipótese de que o hidrogel atue como um material de preenchimento físico dos espaços intergranulares corrobora com a literatura e reforça a explicação para a menor deformação observada. Esse comportamento corrobora com os resultados dos menores teores de ar incorporado das pastas produzidas com hidrogéis, previamente discutidos, o que indica que a menor retração está associada a uma possível redução de poros da matriz cimentícia, conforme observado.

De forma integrada, os resultados indicam que a redução significativa do teor de ar incorporado nas pastas contendo hidrogel está diretamente associada à diminuição da porosidade inicial da matriz cimentícia, o que, por sua vez, contribui para a menor retração observada. A presença de vazios, especialmente aqueles conectados à rede capilar, favorece a evaporação precoce da água, o que intensifica a retração por secagem nas primeiras idades. Assim, ao atuar como um agente de preenchimento físico e retenção hídrica, o hidrogel não apenas limita a incorporação de ar durante a mistura, como também restringe a mobilidade e a perda de água para o meio externo.

Essa interação entre microestrutura mais densa e controle da umidade interna justifica a estabilização precoce da retração nas pastas com hidrogel e a redução de aproximadamente 40% em comparação ao controle. Portanto, a relação entre teor de ar incorporado e retração não é apenas de correlação, mas de causalidade física: a menor quantidade de vazios disponíveis para perda hídrica reduz o potencial de deformação volumétrica, resultando em uma matriz cimentícia mais estável dimensionalmente e menos suscetível à fissuração precoce.

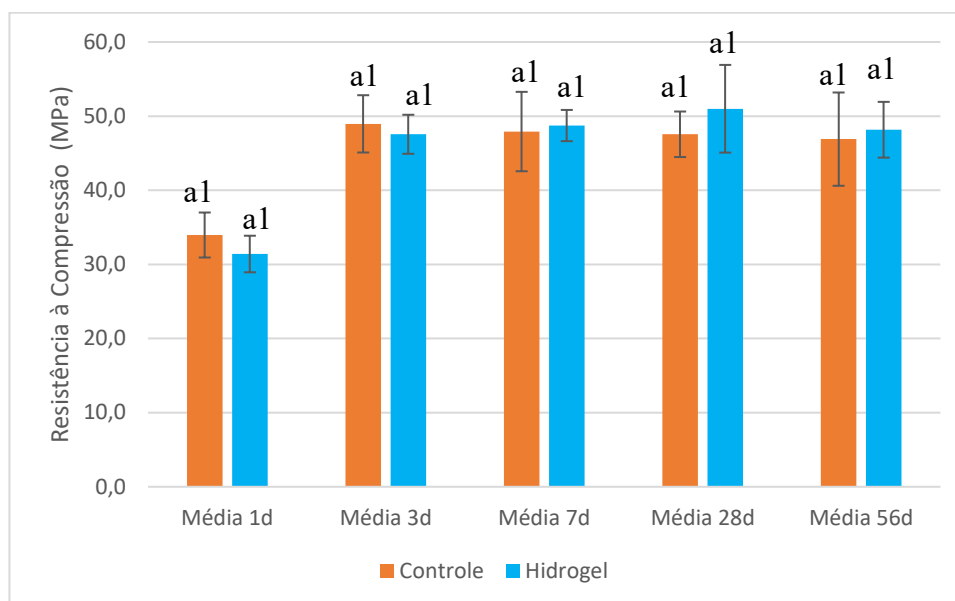
De forma geral, a incorporação do hidrogel como aditivo promoveu uma redução de aproximadamente 40% na retração por secagem, além de estabilizar a deformação já no primeiro dia de cura. Trata-se de um comportamento relevante, pois contribui para mitigar a formação de fissuras precoces, especialmente em condições de exposição ambiental agressiva. Tal comportamento pode ser atribuído ao mecanismo de liberação controlada de água pelo hidrogel, que mantém a umidade interna suficiente para reduzir o processo de retração plástica e favorecer uma cura interna mais eficaz (Watanuki Filho, 2021).

### ***6.2.2. Compressão Axial***

A resistência à compressão é a propriedade mais importante e relevante para a avaliação do desempenho mecânico de materiais cimentícios. De acordo com a NBR 16697:2018, os cimentos de alta resistência inicial CPV devem apresentar valores mínimos de 14 MPa em 24 horas, 24 MPa aos 3 dias e 34 MPa aos 7 dias de cura.

Os resultados apresentados na Figura 27 indicam que todos os valores obtidos estão dentro dos estabelecidos pela norma. A análise estatística, realizada por meio do teste de Tukey, cujos resultados também estão descritos na Figura 27, permitiu comparações mais específicas. A partir dos resultados pode-se observar que, em nenhuma das idades analisadas, foram observadas diferenças estatisticamente significativas entre os valores da resistência à compressão da pasta controle e da pasta contendo hidrogel. Esses resultados indicam que a adição do hidrogel, nas proporções utilizadas, não comprometeu o desempenho mecânico do compósito. Este resultado é relevante, pois demonstra que a adição do hidrogel, embora influencie em outras propriedades, como exsudação e retração por secagem, sua presença na matriz cimentícia não prejudica a resistência à compressão, que se mantém acima dos parâmetros estabelecidos pelas normas técnicas.

**Figura 27.** Resultados de compressão para a pasta de controle e para a pasta com o hidrogel



(fonte: Própria Autora)

A pequena redução nos valores médios de resistência à compressão, observada nas amostras com hidrogel, nas idades iniciais, pode estar relacionada à menor disponibilidade de água na matriz cimentícia. Esse efeito ocorre pelo fato de parte da água de amassamento ser absorvida pelo hidrogel, tornando-se inicialmente indisponível para as reações de hidratação. Como resultado, pode ocorrer menor formação de compostos de hidratação como o C-S-H (Silicato de Cálcio Hidratado) e a etringita, o que pode ser uma das causas para a perda de resistência inicial.

A partir de 3 dias de cura, também não foram observadas diferenças estatísticas significativas entre os traços utilizados, com ambos os sistemas atingindo aproximadamente 48-49 MPa. O mesmo comportamento é observado aos 7 dias, quando as resistências permanecem próximas, com tendência de aumento para o compósito com hidrogel. Essa equivalência, confirmada pelas análises estatísticas, sugere que a liberação gradual de água pelo hidrogel promove uma hidratação suplementar nas idades intermediárias, o que favorece a continuidade das reações e compensa a menor resistência inicial.

Outro aspecto a ser considerado refere-se às propriedades mecânicas do próprio hidrogel utilizado. Por se tratar de um material com baixa resistência e elevada porosidade, como descrito por Nascimento (2017), sua presença na matriz poderia comprometer o desempenho mecânico das pastas cimentícias. Entretanto, os resultados obtidos sugerem que sua quantidade

e distribuição foram suficientemente equilibradas para não afetar significativamente a resistência das amostras produzidas com o polímero.

Ao considerar apenas os valores médios, observa-se que a partir dos 7 dias de cura, a pasta produzida com hidrogel apresenta desempenho mecânico superior a pasta de controle. Esse resultado sugere que o hidrogel, além de controlar o período de cura, pode ter favorecido uma hidratação mais eficiente ao longo do tempo, possivelmente devido à liberação gradual de água, característico do mecanismo de cura interna.

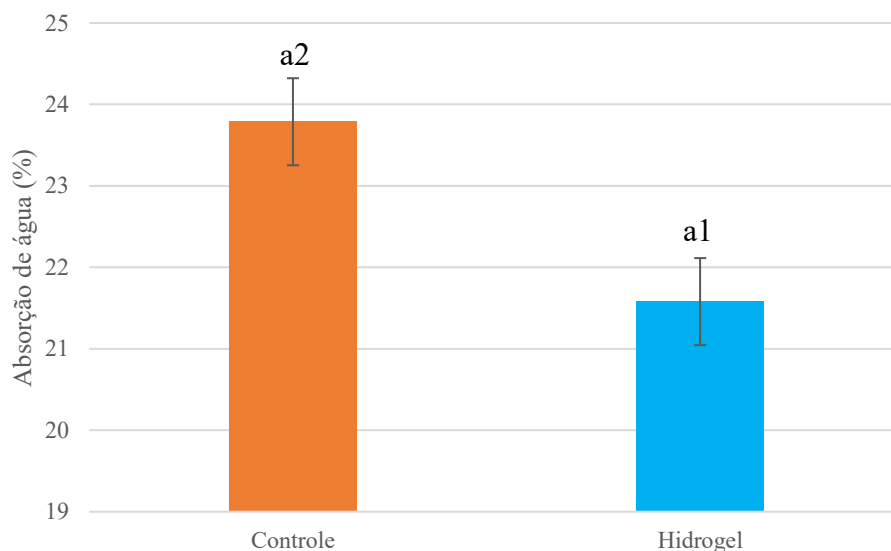
Esse comportamento está alinhado aos resultados obtidos para o teor de ar incorporado, os quais indicam que o hidrogel contribui para a redução de poros na matriz cimentícia. A menor porosidade favorece a densificação do material, o que tende a refletir no aumento da resistência mecânica destes materiais cimentícios. Além disso, as micrografias eletrônicas obtidas pela técnica de microscopia eletrônica de varredura (discutidas posteriormente) podem confirmar essa característica de matriz mais densas e com ausência de microfissuras internas, que podem influenciar diretamente na resistência.

### ***6.2.3. Absorção de Água***

A capacidade de absorção de água em matrizes cimentícias é um parâmetro que está diretamente relacionado à durabilidade das construções (Wichterle; Lím, 2024). O excesso de umidade pode comprometer a integridade estrutural das edificações. Por esse motivo, a avaliação desse parâmetro é relevante na análise do desempenho de materiais cimentícios.

De acordo com os resultados apresentados na Figura 28, a média de absorção de água do compósito contendo hidrogel foi 9,3% inferior à amostra controle. A absorção da pasta de cimento controle foi de  $23,78 \pm 0,53\%$ , enquanto o compósito com hidrogel apresentou valor de  $21,58 \pm 0,81\%$ . A análise estatística, realizada por meio do teste de Tukey, confirmou que a diferença entre os grupos é estatisticamente significativa, o que demonstra que a aplicação de hidrogel contribuiu para a redução da absorção hídrica da matriz cimentícia.

**Figura 28.** Absorção de água em massa em relação a massa seca da pasta de cimento e do controle



(fonte: Própria Autora)

A menor absorção de água observada no compósito contendo hidrogel pode ser atribuída a presença do polímero intumescido durante o preparo da pasta, o que resultou no preenchimento de poros capilares na matriz cimentícia. Essa ocupação física dos vazios reduziu o volume disponível para a penetração de água por ação capilar. Além disso, a evaporação da água retida no interior do hidrogel é dificultada pela matriz cimentícia, o que inibe a formação de micro vazios adicionais, e contribui para a diminuição da absorção subsequente.

Esse comportamento está em consonância com os resultados obtidos para o teor de ar incorporado, em que se observou uma menor presença de vazios na matriz com hidrogel. A redução simultânea do teor de ar incorporado e da absorção de água sugere uma matriz mais densa e menos porosa, o que implica em menor permeabilidade e maior resistência mecânica.

Portanto, a incorporação do hidrogel demonstrou-se eficaz na mitigação da absorção de água, um fator essencial para o aumento da durabilidade do compósito. A menor porosidade observada, associada à retenção hídrica interna promovida pelo hidrogel, indica um comportamento potencialmente benéfico em ambientes sujeitos a ciclos de umidade, o que contribui para a conservação das propriedades mecânicas e a integridade estrutural ao longo do tempo.

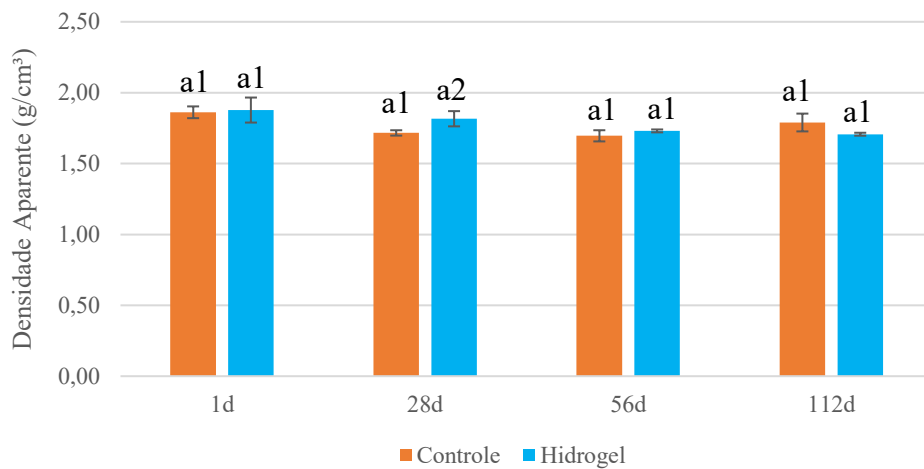
Ressalta-se ainda que a retenção de água pelo polímero, indicada pela baixa absorção de água, também reflete no comportamento de redução da retração hidráulica por secagem,

confirmando que o hidrogel é uma alternativa satisfatória para fins de cura interna dos materiais cimentícios.

#### 6.2.4. Densidade Aparente

A Figura 29 demonstra que a adição do hidrogel à pasta de cimento não ocasionou alterações significativas na densidade aparente da matriz. Esse resultado corrobora com os resultados apresentados por Watanuki Filho (2024). A pequena influência observada pode ser atribuída à reduzida quantidade de hidrogel incorporado no compósito, o que limita seu efeito sobre a massa específica do material.

**Figura 29.** Valores de densidade aparente em função do tempo de cura para as diferentes matrizes estudadas



(fonte: Própria Autora)

As amostras foram submetidas à secagem em estufa a 35 °C, em ambiente com umidade relativa do ar variável, de modo a reproduzir condições ambientais mais próximas daquelas encontradas em aplicações práticas. Essa abordagem buscou simular cenários mais representativos da aplicação em campo.

Os resultados indicam que, mesmo em ambientes com umidade reduzida, a presença do hidrogel, ainda que preenchido de água de intumescimento, não alterou de forma significativa a densidade aparente das amostras. Esse comportamento sugere que a água retida no interior do

hidrogel não contribui diretamente para o aumento de volume ou massa do compósito após a secagem.

A análise estatística realizada por meio do teste de Tukey confirmou a equivalência entre os grupos de amostras (controle e compósito) em todas as idades de cura analisadas, com exceção dos 28 dias. Nessa idade específica, observou-se um aumento pontual na densidade do compósito em relação à amostra controle, com valores médios de  $1,72 \pm 0,02 \text{ g/cm}^3$  e  $1,82 \pm 0,50 \text{ g/cm}^3$ , respectivamente. No entanto, acredita-se que isso seja um *outlier* (ponto discrepante). Pois em tempos maiores de cura não foi observada diferença estatística entre o controle e compósito.

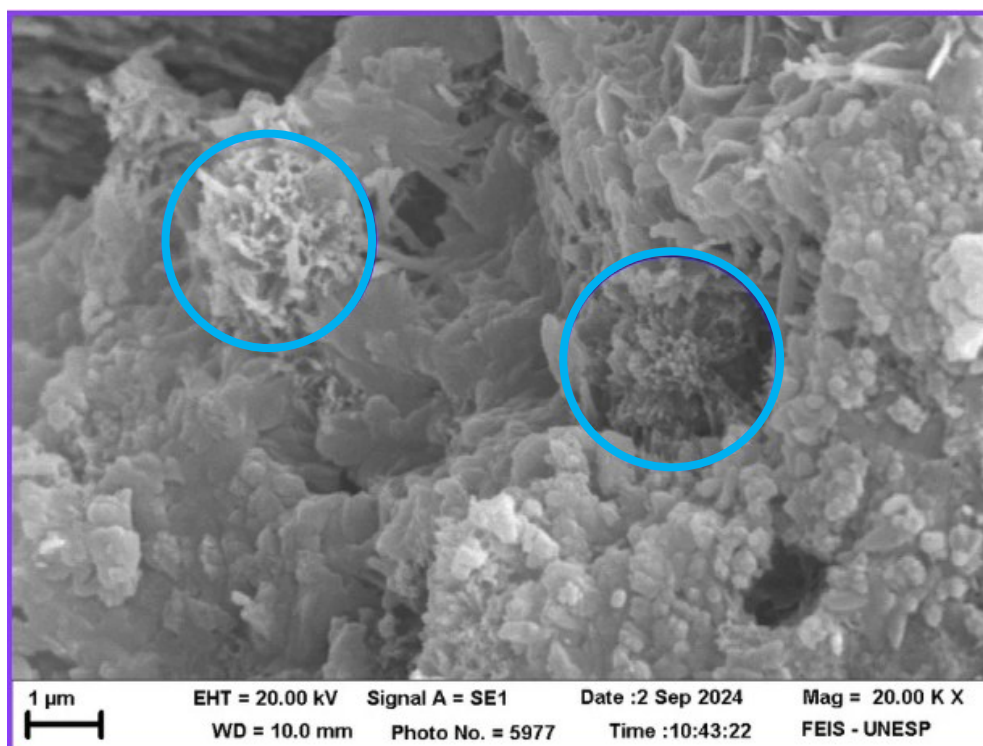
A estabilidade dessa propriedade pode ser relacionada à formação de uma microestrutura mais densa e menos porosa, conforme observado nas análises de teor de ar incorporado e absorção de água. O hidrogel, ao preencher fisicamente parte dos vazios capilares e reter água em sua estrutura, contribui para a redução da porosidade sem provocar variações relevantes na massa específica do compósito. Essa característica é relevante para garantir que melhorias em durabilidade e controle de retração, associadas ao uso do hidrogel, não sejam acompanhadas de efeitos adversos sobre a densidade e, conseqüentemente, sobre o desempenho mecânico e estrutural do material.

Portanto, de maneira geral, pode-se afirmar que a adição de hidrogel não compromete nem altera substancialmente a densidade aparente da matriz cimentícia, o que reforça sua viabilidade como aditivo para controle de umidade.

#### **6.2.5. Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV**

As análises das micrografias, obtidas pela técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura, permitiram observar, em diferentes idades de cura, a morfologia da microestrutura presente no composto e no compósito, conforme mostrado nas Figuras 30 a 34. Esses resultados são fundamentais para compreender, se e como, a presença do hidrogel influencia a microestrutura da matriz cimentícia.

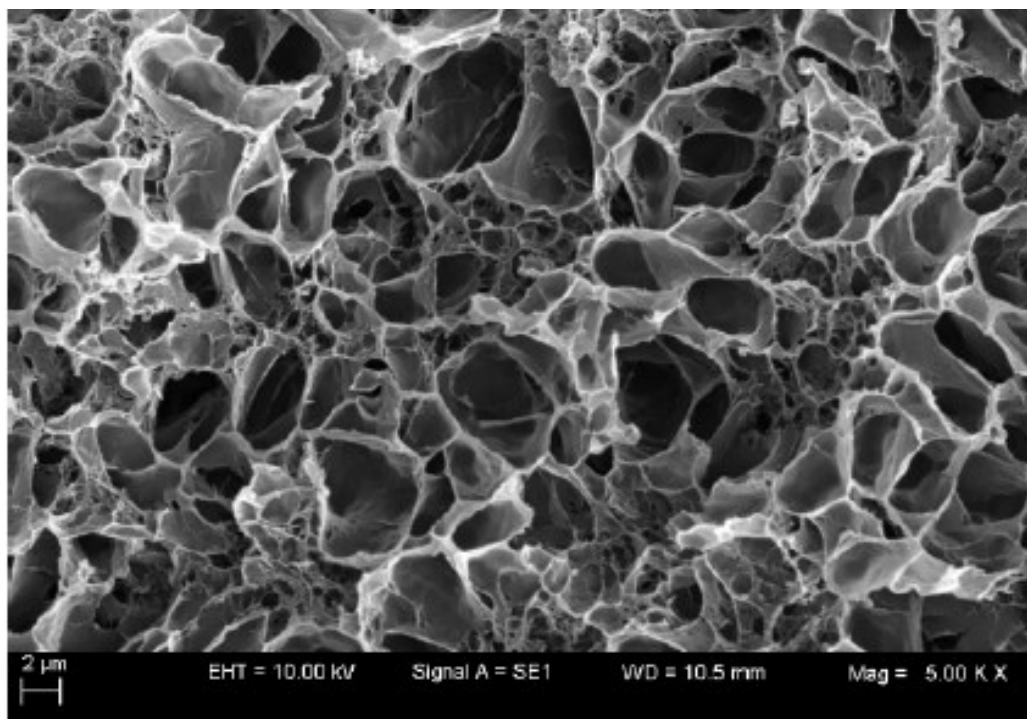
**Figura 30.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra contendo hidrogel após 24h de cura. O círculo azul mostra indícios da presença do hidrogel.



(fonte: Própria Autora)

Na idade de cura de 24h foram identificadas estruturas porosas e alveolares (representadas pelo círculo azul) que podem representar a presença de hidrogel. Watanuki Filho (2021) reporta a estrutura porosa destes mesmos hidrogéis estudados nesta dissertação, Figura 31. No entanto, estruturas de silicato de cálcio hidratado possuem morfologia similar. Logo, não se pode afirmar que essas estruturas são provenientes exclusivamente da presença do hidrogel. Essa morfologia foi observada apenas nesse estágio inicial. Destaca-se que, mesmo após a ação mecânica da argamassadeira durante o preparo da mistura, a estrutura arredondada do hidrogel foi preservada, sugerindo resistência à dispersão e manutenção de sua integridade morfológica dentro da matriz.

**Figura 31.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra de hidrogel estudada nesta dissertação.

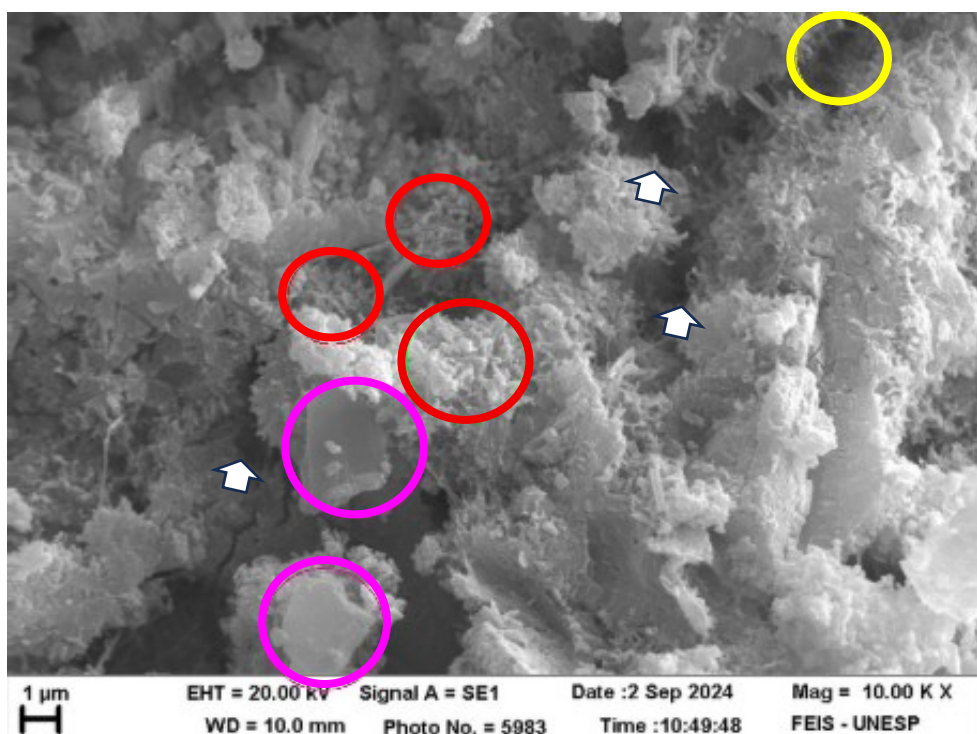


(Fonte: Watanuki Filho, 2021)

Nas Figuras 32 e 33, que correspondem às amostras com 28 dias de cura para o controle e o compósito, respectivamente, observa-se a presença dos mesmos compostos hidratados e estruturas cristalinas em ambas as amostras. Para a idade de cura de 28 dias observa-se a presença dos mesmos elementos, tanto no controle quanto no compósito, assim como morfologia semelhante dessas mesmas estruturas. Foram identificadas a etringita, com sua morfologia agulhada, o C-S-H com aspecto fibroso e esponjoso, e a portlandita (C-H) com sua típica estrutura hexagonal. Estas mesmas estruturas foram descritas por Hojo e Martins (2015).

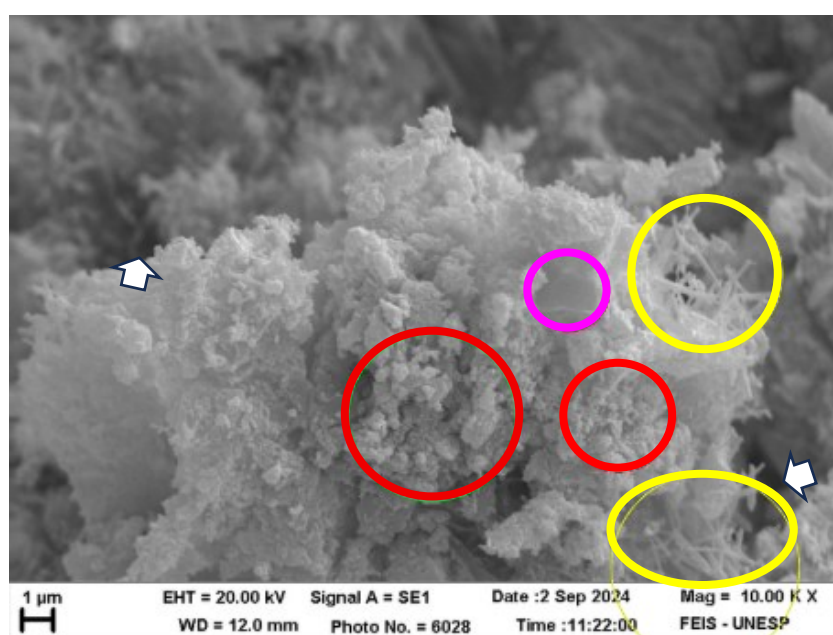
Aos 56 dias de cura (Figuras 34 e 35), o material cimentício está em um estágio de maturação, com ganho de resistência mais lento. Embora, a velocidade de hidratação diminua, ainda ocorrem reações provenientes dela, como o  $C_2S$  formando C-S-H e C-H (Yang et al., 2024). Nota-se a presença de C-H em ambas as amostras. Contudo, a análise comparativa das imagens sugere indícios nas diferenças no grau e na distribuição dos produtos de hidratação entre o controle e o compósito, possivelmente associadas à ação do hidrogel no fornecimento gradual de água para a hidratação ao longo do tempo.

**Figura 32.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra controle observando a presença de C-S-H (círculo vermelho), etringita (círculo amarelo), C-H (círculo rosa) e vazios (flecha), com 28 dias de cura



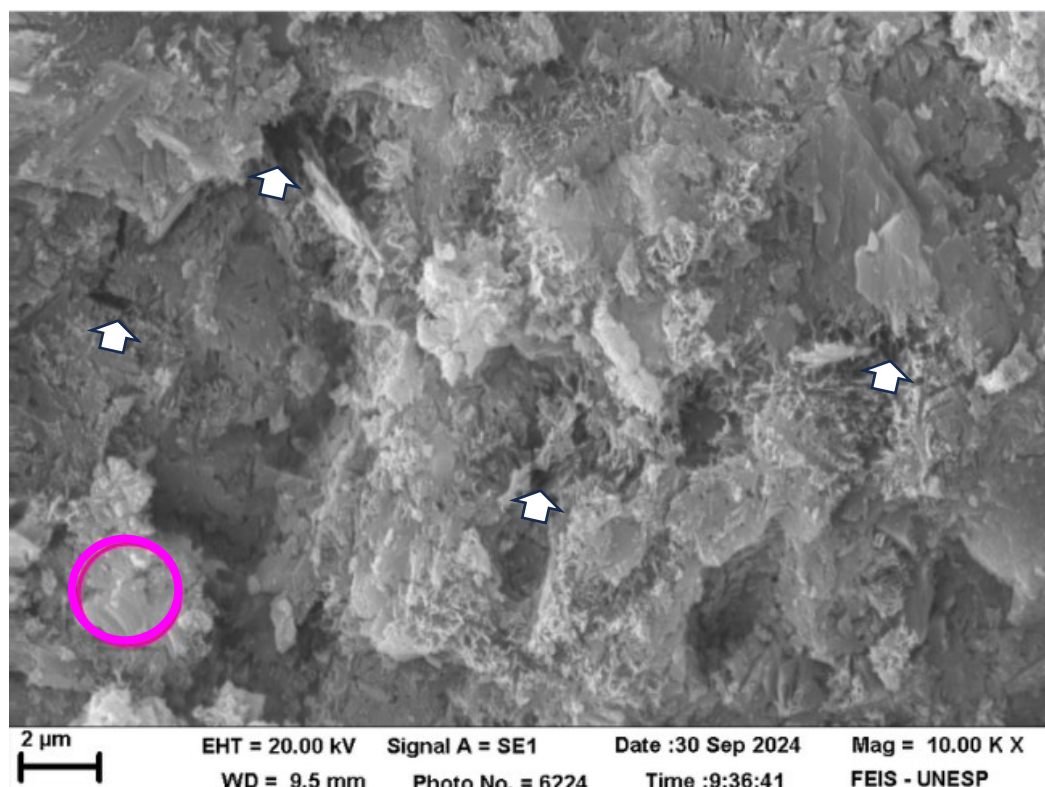
(fonte: Própria Autora)

**Figura 33.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, do compósito observando a presença de C-S-H (círculo vermelho), etringita (círculo amarelo), C-H (círculo rosa) e vazios (flecha), com 28 dias de cura.



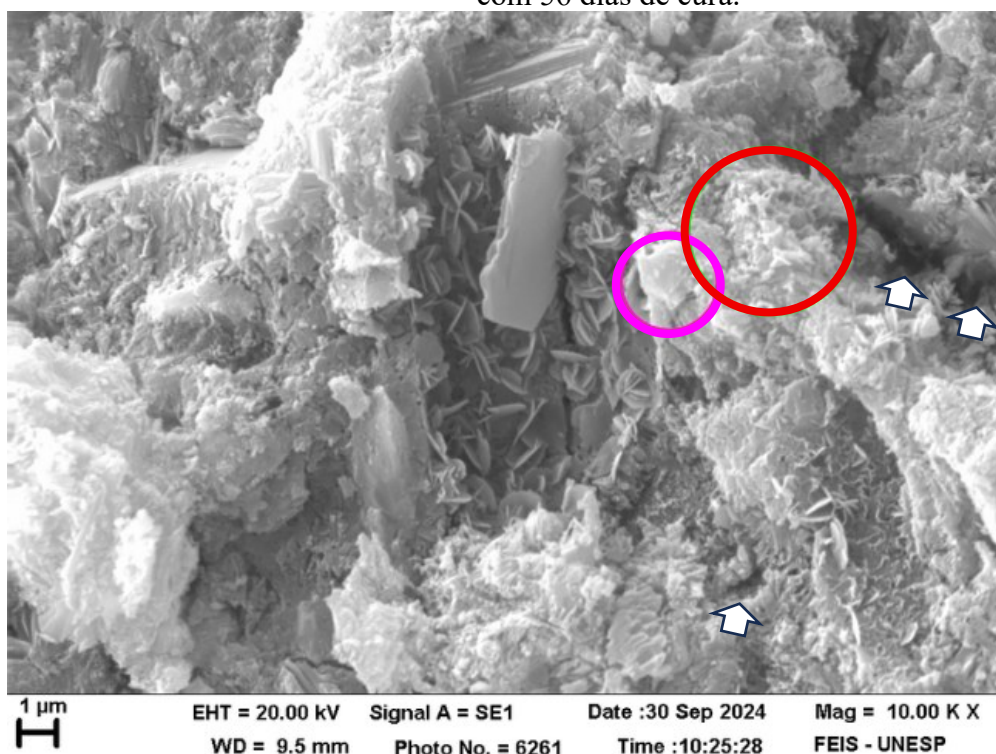
(fonte: Própria Autora)

**Figura 34.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, do Controle observando a presença de vazios (flechas) e C-H (circulo rosa), com 56 dias de cura



(Fonte: Própria Autora)

**Figura 35.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da pasta com hidrogel observando a presença de vazios (flechas), C-H (circulo rosa) e C-S-H (círculo vermelho), com 56 dias de cura.



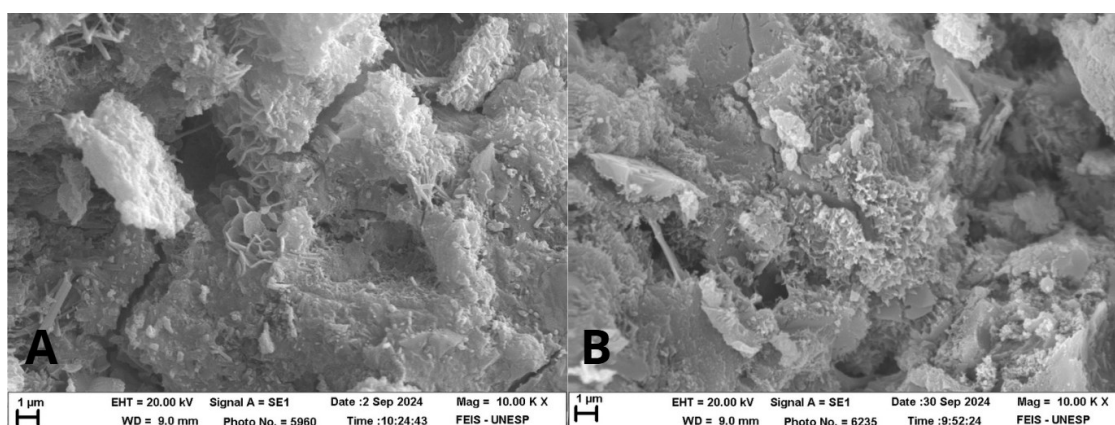
(Fonte: Própria Autora)

Ao comparar a estrutura das amostras em diferentes idades de cura (Figuras 36 e 37), observa-se que a mesma aparenta estar mais compacta na amostra de 56 dias de cura, o que pode ser justificado pela perda de água no processo de cura. Entretanto, essa retração é observada nas amostras contendo o hidrogel. Tal observação reforça a capacidade do hidrogel de armazenar e disponibilizar água em estágios posteriores, favorecendo a manutenção de um ambiente localmente saturado e contínuo para as reações de hidratação.

Esse comportamento corrobora com a possibilidade do hidrogel estar agindo como agente de cura interna, contribuindo para um ambiente contínuo de hidratação nas regiões adjacentes, em especial, obstruindo a movimentação da água. Isso pode ser associado a formação de produtos de hidratação que aumentam a resistência da amostra na compressão e a diminuição do número de vazios, assim como a diminuição e fissuras, corroborando com os resultados de estabilidade e menor quantidade de retração da amostra contendo hidrogel na retração hidráulica.

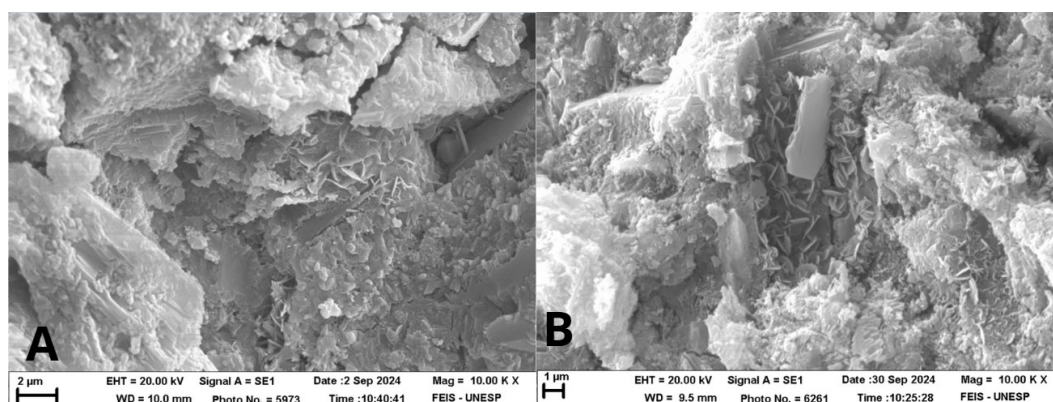
Por fim, em todas as idades analisadas observa-se que não há diferenciação de fases na matriz cimentícia, nem no controle e nem no compósito, o que mostra que a presença do aditivo polimérico não comprometeu a homogeneidade da pasta de cimento, corroborando com os resultados obtidos por Watanuki Filho et al. (2021).

**Figura 36.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra controle com 24h (A) e 56 dias de cura (B)



(Fonte: Própria Autora)

**Figura 37.** Micrografia eletrônica, obtida por MEV, da amostra do compósito com 24h (A) e 56 dias de cura (B)



(Fonte: Própria Autora)

#### 6.2.6. Espectroscopia de Dispersão de Energia de Raios X (EDS)

Neville (2016) descreve a composição do clínquer, que pode ser resumida na Tabela 5, assim como a origem de cada um dos componentes citados. De acordo com a norma NBR 16697:2018, o cimento CPV ARI possui de 95 a 100% do clínquer, e assim, tais componentes também se aplicam a ele.

**Tabela 5.** Elementos constituintes do clínquer e suas origens e fases associadas

| Elemento | Origem                                                                           |
|----------|----------------------------------------------------------------------------------|
| Cálcio   | C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S e produtos de hidratação (portlandita, C-S-H) |
| Silício  | C <sub>3</sub> S, C <sub>2</sub> S e C-S-H                                       |
| Alumínio | C <sub>3</sub> A, etringita, monosulfoaluminato e aluminatos hidratados          |
| Ferro    | C <sub>4</sub> AF e possíveis impurezas                                          |
| Enxofre  | Gesso (CaSO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O), etringita e monosulfoaluminato     |
| Magnésio | Impurezas do clínquer                                                            |
| Sódio    | Impurezas alcalinas                                                              |
| Potássio |                                                                                  |
| Oxigênio | Todos os óxidos                                                                  |

(Fonte: adaptado de Neville, 2016)

Nascimento et al. (2017), utilizando a técnica de EDS, identificou os elementos carbono, nitrogênio, oxigênio, sódio, magnésio, alumínio, ferro e silício no sistema composto por hidrogel e nanoargila Cloisite-Na<sup>+</sup>. Com exceção do nitrogênio, todos os outros elementos foram identificados na pasta contendo hidrogel, conforme demonstrado na Tabela 6.

A análise de EDS é uma análise qualitativa. Desta forma, o objetivo desta análise é apenas identificar os elementos nas amostras e não comparar se há alteração na percentagem destes ao longo do tempo, e nem se houve diferenciação entre os componentes da amostra de controle com a amostra contendo hidrogel. A presença do carbono, pela sua alta percentagem, não indica que sua origem é apenas do hidrogel, mas sim, provavelmente da fita de carbono usada (ou alguma impureza) nos porta-amostras. Tendo em vista a não identificação do nitrogênio (provavelmente por estar sobreposto a energia de outro elemento), impossibilitou a identificação do hidrogel nas pastas de cimento contendo hidrogel. Provavelmente, isto ocorreu devido a pequenas quantidades de hidrogel utilizadas.

**Tabela 6.** Resultados da análise de EDS para a pasta de controle e a pasta contendo hidrogel para as curas de 1, 28 e 56 dias.

|             | Componentes (wt%) |       |      |      |      |      |      |      |       |      |
|-------------|-------------------|-------|------|------|------|------|------|------|-------|------|
| Ruptura 24h | C                 | O     | Na   | Mg   | Al   | Si   | S    | K    | Ca    | Fe   |
| Controle    | 12,01             | 52,16 | 1,86 | 0,68 | 0,90 | 3,97 | 2,33 | 5,14 | 20,36 | 0,58 |
| Hidrogel    | 12,76             | 51,64 | 1,56 | 0,70 | 0,92 | 4,01 | 1,88 | 4,11 | 21,79 | 0,63 |
| Ruptura 28d | C                 | O     | Na   | Mg   | Al   | Si   | S    | K    | Ca    | Fe   |
| Controle    | 7,31              | 55,13 | 0,38 | 1,00 | 1,44 | 5,41 | 1,42 | 0,89 | 26,16 | 0,85 |
| Hidrogel    | 7,60              | 55,64 | 0,46 | 0,95 | 1,38 | 5,37 | 1,27 | 1,04 | 25,58 | 0,71 |
| Ruptura 56d | C                 | O     | Na   | Mg   | Al   | Si   | S    | K    | Ca    | Fe   |
| Controle    | 8,74              | 53,94 | 0,34 | 1,00 | 1,50 | 5,41 | 1,40 | 0,78 | 26,04 | 0,85 |
| Hidrogel    | 5,66              | 54,95 | 0,37 | 1,01 | 1,52 | 5,76 | 1,44 | 0,84 | 27,54 | 0,90 |

(Fonte: Própria Autora)

### 6.2.7. Análise Termogravimétrica

A análise termogravimétrica (TG) das pastas de cimento de controle e aquelas contendo hidrogel mostraram resultados distintos e relevantes referentes as etapas de desidratação, desidroxilação e decarbonatação, ao longo de 28, 56 e 112 dias de cura.

Em todas as idades e em todos os traços, as curvas de TG apresentaram processos de decomposição em múltiplos estágios, com intermediários relativamente estáveis. As temperaturas correspondentes às velocidades máximas de reações foram identificadas pelos picos existentes nas curvas de DTG, que também indicam uma etapa de perda de massa (Brown, 2011).

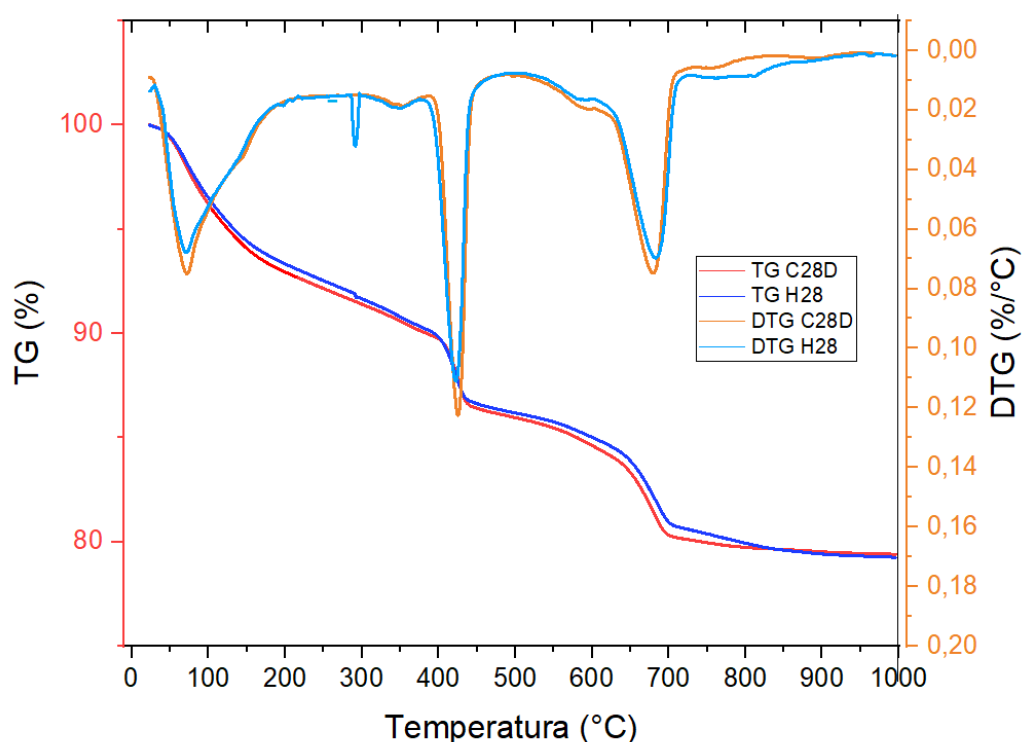
O primeiro estágio de decomposição é a *desidratação*, nela ocorre a perda de água livre da matriz cimentícia e da água estrutural associada ao C-S-H e à etringita. A quantidade de água livre reduz com o avanço do tempo de cura, enquanto a redução da água estrutural depende da formação do C-S-H e da etringita, que ocorrem em detrimento à continuidade do processo de hidratação (Llorens et al., 2023).

O segundo estágio é a *desidroxilação*, nela a perda de massa se dá pela decomposição térmica da portlandita (C-H), por meio da quebra das ligações de hidroxila e a liberação de água, formando o óxido de cálcio (CaO). Esta etapa apresenta maior intensidade em idades de curas médias (Scrivener; Kirkpatrick, 2008).

Por fim, ocorre a *descarbonatação*, um processo térmico em que o carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) se decompõe, formando óxido de cálcio (CaO) e liberando dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). A presença do carbonato de cálcio é resultado da reação natural entre o óxido de cálcio presente no cimento com o dióxido de carbono presente no ar (Sauber; Platret; Vincent, 2016).

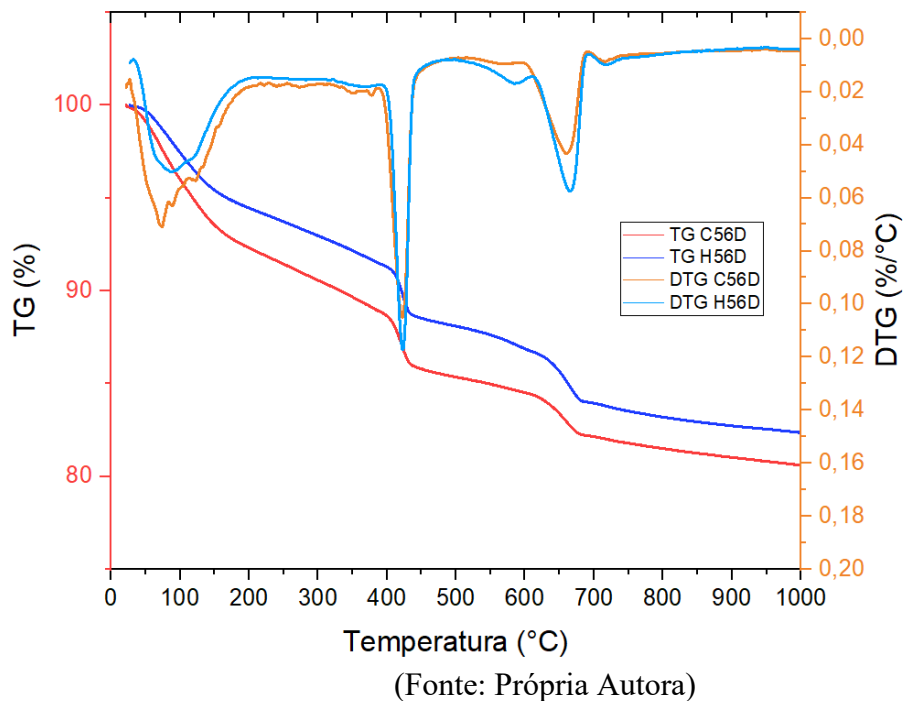
Nas Figuras 38-42 e nas Tabelas 7 e 8 são apresentadas, respectivamente, as curvas obtidas e os valores correspondentes às perdas de massa em cada etapa.

**Figura 38.** Curvas TG/DTG para pastas de cimento de controle e pastas de cimento contendo hidrogel com cura de 28 dias.

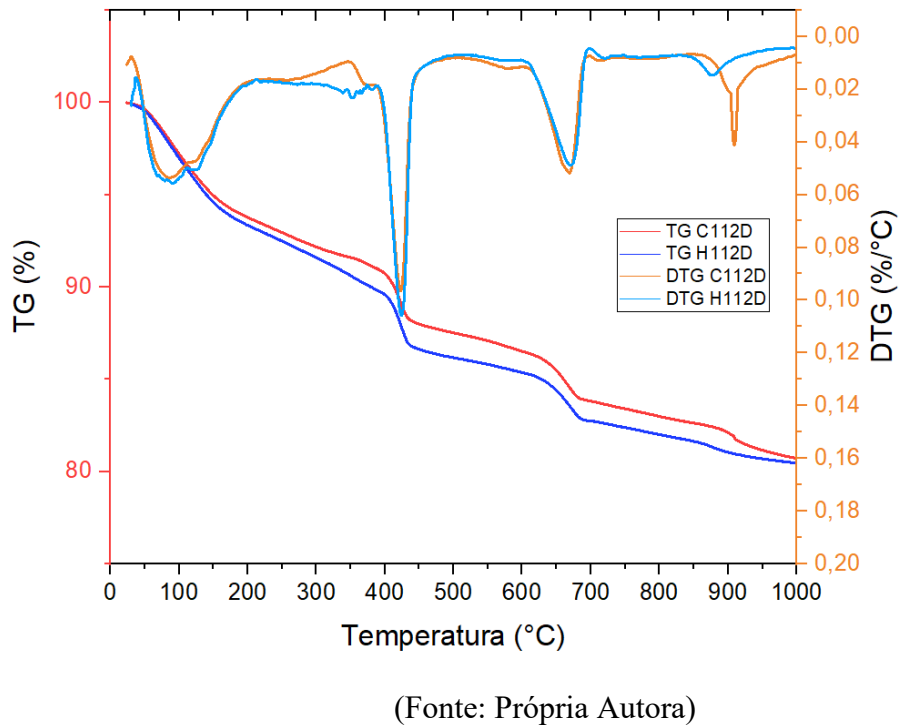


(Fonte: Própria Autora)

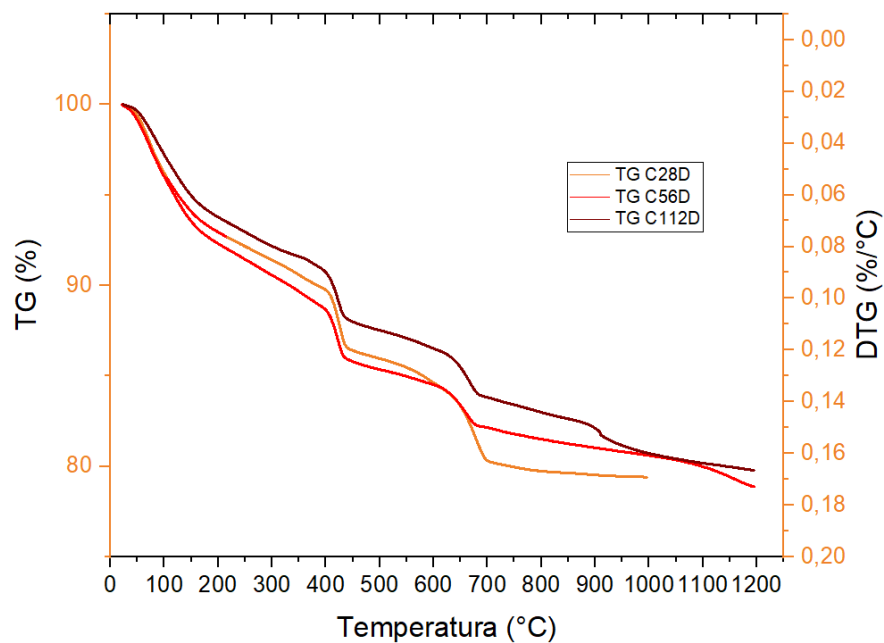
**Figura 39.** Curvas TG/DTG para pastas de cimento de controle e pastas de cimento contendo hidrogel com cura de 56 dias.



**Figura 40.** Curvas TG/DTG para pastas de cimento de controle e pastas de cimento contendo hidrogel com cura de 112 dias.

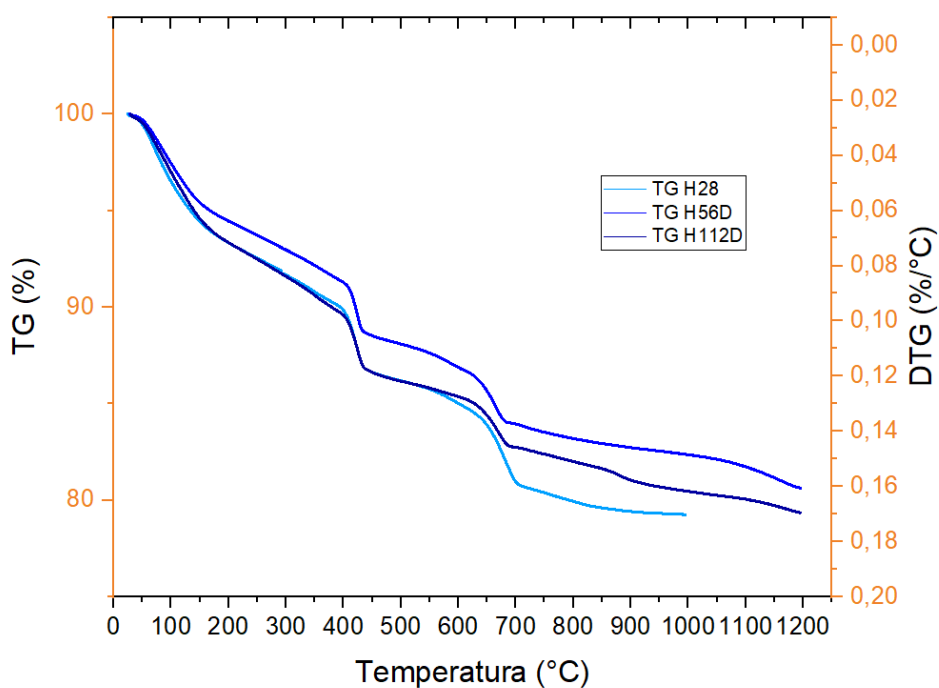


**Figura 41.** Comparação entre as curvas TG/DTG para as idades de 28, 56 e 112 dias para as pastas de controle



(Fonte: Própria Autora)

**Figura 42.** Comparação entre as curvas TG/DTG para as idades de 28, 56 e 112 dias para as pastas de cimento contendo hidrogel



(Fonte: Própria Autora)



**Tabela 8.** Grau de hidratação, porcentagem de massa da amostra até 105°C, de massa de água livre e de água estrutural para os traços de controle e hidrogel nos dias de 28, 56 e 112 de cura

|                 | <b>Grau de Hidratação (%)</b> | <b>% 105°C</b> | <b>Água Estrutural perdida (%)</b> | <b>Água Livre perdida (%)</b> |
|-----------------|-------------------------------|----------------|------------------------------------|-------------------------------|
| <b>28 dias</b>  |                               |                |                                    |                               |
| <b>Controle</b> | 69,55                         | 95,94          | 5,99                               | 4,06                          |
| <b>Hidrogel</b> | 68,41                         | 96,25          | 5,91                               | 3,75                          |
| <b>56 dias</b>  |                               |                |                                    |                               |
| <b>Controle</b> | 69,05                         | 95,72          | 6,76                               | 4,28                          |
| <b>Hidrogel</b> | 56,79                         | 97,20          | 5,56                               | 2,80                          |
| <b>112 dias</b> |                               |                |                                    |                               |
| <b>Controle</b> | 70,44                         | 96,96          | 5,35                               | 3,04                          |
| <b>Hidrogel</b> | 73,27                         | 96,72          | 6,87                               | 3,28                          |

(Fonte: Própria Autora)

A partir das análises das curvas de TG e dos dados apresentados nas tabelas, verifica-se que, na etapa de desidratação, as amostras controles apresentaram uma redução ao longo do tempo (cura de 28 e cura de 112 dias), enquanto para as amostras com hidrogel evidenciam aumento dessa etapa. Esse comportamento sugere menor disponibilidade de água livre nas amostras de controle e da liberação gradual de água nas amostras contendo o hidrogel, como se pode observar também na Tabela 8.

Na etapa de desidroxilação, as amostras de controle exibem um comportamento estável ao longo do tempo de cura (28 dias e de 112 dias). Em contrapartida, nas amostras contendo hidrogel observa-se redução da perda de massa, o que pode indicar menor formação de portlandita ou maior consumo deste composto em processos de carbonatação.

Quanto à descarbonatação, ambas as formulações apresentaram diminuição da perda de massa entre 28 e 112 dias de cura, com proporções similares, indicando que a presença de hidrogel não exerce influência significativa sobre o grau de contato da matriz cimentícia com o CO<sub>2</sub> atmosférico. Essa redução pode ser atribuída ao processo de cura em estufa, que limita a difusão de CO<sub>2</sub> no interior da pasta.

Um aspecto relevante é para a curva de 56 dias de cura. Nesta idade, tanto o controle quanto a pasta com hidrogel apresentam tendências distintas em relação às demais idades avaliadas. Para a desidratação, observa-se maior perda de massa na amostra de controle,

sugerindo formação tardia de C-S-H e etringita devido à continuidade do processo de hidratação, com liberação de água estrutural. Esse fenômeno não é observado na amostra com hidrogel, indicando que, nesta idade, o aditivo ainda não liberou integralmente sua água interna e, adicionalmente, restringiu a mobilidade da água livre, dificultando sua incorporação na formação de água estrutural. A Tabela 8 apresenta as proporções relativas de água livre e água estrutural, reforçando a interpretação dos resultados descritos.

A análise do processo de desidratação, considerando as curvas de TG nas três idades de cura avaliadas, indica que, aos 28 dias, a presença do hidrogel não exerceu influência significativa sobre essa etapa. Entretanto, aos 56 dias, observa-se que o hidrogel restringe a migração da água livre para a superfície, limitando sua evaporação. Esse comportamento pode estar associado à obstrução parcial dos poros causada pelo intumescimento do próprio polímero, resultando em menor perda total de água.

Já aos 112 dias, verifica-se maior quantidade de água livre na pasta contendo hidrogel, sugerindo a liberação da água previamente retida no interior do polímero. A redução volumétrica do hidrogel após essa liberação possibilita tanto a desobstrução dos poros quanto a formação de água estrutural, além de favorecer a migração da água livre para evaporação.

As etapas de desidroxilação e descarbonatação, particularmente na idade de cura de 56 dias, devem ser analisadas de forma integrada. A menor perda de massa por desidroxilação nas amostras com hidrogel, associada à maior perda por descarbonatação, sugere que parte da portlandita sofreu carbonatação. Em ambientes úmidos, o hidróxido de cálcio tende a se converter em carbonato de cálcio (Galan; Glasser; Baza; Andrade, 2015), de modo que a diminuição na desidroxilação corresponde a um aumento na descarbonatação (Scrivener; Kirkpatrick, 2008; Sauber; Platret; Vincent, 2016).

Destaca-se também o fenômeno da *descarbonatação tardia*, característico de idades de cura superiores a 90 dias. Nessas condições, há formação de carbonatos mais densos e estáveis, cuja decomposição não ocorre na faixa de temperatura típica da descarbonatação convencional. As espécies  $\text{Ca(OH)}_2$  e C-S-H, ao reagirem lentamente com o  $\text{CO}_2$  atmosférico, originam carbonatos mais cristalinos, estáveis e com temperaturas de degradação mais elevadas (Vogler; Drabetzki; Lendemann; Kühne, 2022). Esse fenômeno foi identificado em ambos os traços analisados.

Por último, aos 112 dias, as pastas contendo hidrogel apresentam maior grau de hidratação, assim como maiores teores de água estrutural e de água livre, indicando que, entre 56 e 112 dias, ocorreu uma possível liberação da água interna do hidrogel e a consequente desobstrução dos poros em decorrência de sua retração volumétrica.

## 7. Conclusões

Foi possível obter e caracterizar com sucesso pastas cimentícias baseadas em cimento CPV ARI e hidrogel nanocompósito contendo nanoargila cloisita- $\text{Na}^+$ . Através dos resultados obtidos, conclui-se que o polímero apresentado tem grande potencial de aplicação como um aditivo cimentício, afinal, a adição de 0,5% mostrou-se capaz de influenciar positivamente algumas propriedades estudadas.

Analisando as propriedades em estado fresco, o hidrogel não afetou a trabalhabilidade da pasta cimentícia, apesar da sua propriedade de absorção de água. Quanto a exsudação, não houve modificação significativa, porém, observou-se uma liberação de água maior na pasta de controle. Esses dados nos mostram que o hidrogel reduziu o processo de liberação da água.

A quantidade de ar incorporado no estado fresco, e consequentemente o número de vazios, apresentou uma diminuição de aproximadamente 40%, revelando que a pequena adição do hidrogel modifica significativamente o número de espaços vazios, e contribuindo consequentemente para uma menor absorção de água. Entretanto, apesar dessa diminuição, não foi observada influência estatística nas propriedades mecânicas, entre as amostras do controle e do compósito.

Para as propriedades no estado endurecido, os resultados de retração hidráulica foram promissores, pois, além do compósito ter menor retração, ele ainda se estabilizou logo no primeiro dia de cura, abrindo um precedente para explorar essas características. Em relação a densidade aparente não houve diferença significativa entre as pastas controle e contendo aditivo. Isto é um resultado promissor, o que demonstra que a homogeneidade da pasta não foi influenciada pela presença do hidrogel.

Para as propriedades de resistência à compressão, não houve diferença estatística entre as amostras de controle e as contendo hidrogel, contudo, a partir de 7 dias de cura, a média de resistência a compressão da pasta contendo hidrogel é ligeiramente maior que a de controle.

Em relação a caracterização morfológica, realizada pela técnica de microscopia eletrônica de varredura, observou-se um indício da presença do hidrogel após 24h de cura, e que sua presença alterou o processo de hidratação das pastas ocasionado pelo processo de liberação gradual de água pelo hidrogel. Quanto a presença dos elementos, a análise de EDS não mostrou diferença entre as pastas de controle e contendo hidrogel na composição dos elementos em nenhuma das idades de cura analisadas, ressaltando que a pequena quantidade de hidrogel adicionada não altera as fases da pasta de cimento.

A análise de TG indica que entre as idades de cura de 56 e 112 dias há uma possível liberação da água de intumescimento contida no hidrogel, com um discreto aumento do grau de hidratação para a cura de 112 dias.

Em síntese, o presente estudo concluiu que a quantidade de 0,5% de hidrogel na massa cimentícia causa uma modificação positiva em relação à absorção de água, número de vazios e retração, além da hidratação interna, sem afetar as propriedades físicas, químicas e mecânicas, assim como a trabalhabilidade das pastas.

## 8. Referências Bibliográficas

AHMARUZZAMAN, M. et al. (2023). **Polymeric hydrogels-based materials for wastewater treatment.** Chemosphere, v. 331, p. 138743. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.138743>.

AHMED, E. M. (2015). **Hydrogel: Preparation, characterization, and applications: A review.** Journal of Advanced Research, v. 6, p. 105. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jare.2013.07.006>.

ALI, S. W., & ZAIDI, S. A. R. (2005). **Synthesis of copolymeric acrylamide/potassium acrylate hydrogels blended with poly(vinyl alcohol): Effect of crosslinking and the amount of poly(vinyl alcohol) on swelling behavior.** Journal of Applied Polymer Science, v. 98, p. 1927. DOI : <https://doi.org/10.1002/app.22354>.

AMERICAN CHEMICAL SOCIETY, CHEMISTRY FOR LIFE (Estados Unidos da América). **Leo Hendrick Baekeland and the Invention of Bakelite: National Historic Chemical Landmark.** [S. l.], 1993. Disponível em: <https://www.acs.org/education/whatischemistry/landmarks/bakelite.html>. Acesso em: 21 out. 2024.

ANDERSON, J. C.; LEAVER, K. D.; LEEVERS, P.; RAWLINGS, R. D. **Materials Science for Engineers.** 5. ed. United Kingdom: Nelson Thornes Ltd, 2003. 663 p. v. 1.

ASKELAND, Donald R.; PHULÉ, Pradeep P. **Ciência e Engenharia dos Materiais.** 1. ed. São Paulo: Cengage Learning, 2011. 594 p.

ASPIOTIS, K; SOTIRIADIS, K; NTASKA, A; MÁCOVÁ, P; BADOGIANNIS, E; TSIVILIS, S. (2021). **Durability assessment of self-healing in ordinary Portland cement concrete containing chemical additives.** Construction and Building Materials, [s. l.], v. 305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124754>.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 11768-1:2019.** Aditivos químicos para concreto de cimento Portland Parte 1: Requisitos, [S. l.], 25 out. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 13279:2005.** Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos — Determinação da resistência à tração na flexão e à compressão, [S. l.], 04 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 13280:2005**. Argamassa para assentamento e revestimento de paredes e tetos - Determinação da densidade de massa aparente no estado endurecido, [S. l.], 04 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 14931:2023**. Execução de estruturas de concreto armado, protendido e com fibras - Requisitos, [S. l.].

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 16697:2018**. Cimento Portland – Requisitos, [S. l.], 05 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 6118:2023**. Projeto de Estruturas de Concreto, [S. l.], 05 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 7212:2021**. Concreto dosado em central - Preparo, fornecimento e controle, [S. l.], 27 set. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 7215:2019**. Cimento Portland – Determinação da resistência à compressão de corpos de prova cilíndricos, [S. l.], 20 jun. 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR 9778:2009**. Argamassa e concreto endurecidos – Determinação de absorção de água, índice de vazios e massa específica, [S. l.], 04 jan. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (Brasil). **ABNT NBR NM 43:2003**. Cimento Portland – Determinação da pasta de consistência normal, [S. l.], 05 jan. 2025.

ASTM INTERNATIONAL. **ASTM C490/C490M-17**: Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2017.

BLANCO, M. D., REGO, J., & HUGLIN, M. B. (1994). **Drug release with simultaneous dimensional changes from a new copolymeric hydrogel**. *Polymer*, v. 35, n. 16, p. 3487. DOI: [https://doi.org/10.1016/0032-3861\(94\)90913-x](https://doi.org/10.1016/0032-3861(94)90913-x).

BOSE, B.; DAVIS, C. R.; ERK, K. A. (2021) **Microstructural refinement of cement paste internally cured by polyacrylamide composite hydrogel particles containing silica fume and nanosilica**. *Cement and concrete research*, v. 143, n. 106400, p. 106400.

BOWER, David I. **An Introduction to Polymer Physics**. 1. ed. Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press, 2002. 444 p. v. 1. ISBN 0 521 63721 X.

BROWN, M. E. **Introduction to Thermal Analysis: Techniques and Applications**. Springer Netherlands, 2011.

CALESCO, M. A. F., WATANUKI FILHO, A., MOURA, M. R. de, & AOUADA, F. A. (2022). **Efeitos da adição de nanocompósito híbrido baseado em hidrogel de polissacarídeo e nanoargila nas propriedades nos estados fresco e endurecido de argamassas cimentícias**. *Cerâmica*, v. 68, n. 385, p. 97. DOI: <https://doi.org/10.1590/0366-69132022683853161>

CALLISTER, William D., Jr.; RETHWISCH, D. G. **Ciências e Engenharia dos Materiais: Uma introdução**. 10. ed. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2021. 801 p. v. 1.

CANEVAROLO JR., Sebastião V. **Ciência dos Polímeros: Um texto básico para tecnólogos e engenheiros**. 2. ed. rev. e aum. São Paulo - SP: Artliber, 2006. 282 p.

CASTRO, V. G. **Cimento Portland**. In: *Compósitos madeira-cimento: um produto sustentável para o Futuro*. [s.l.] EdUFERSA, 2021. p. 13–21.

CHEN, M.; CAI, P.; PAN, Y. (2023). **Dual-responsive bagasse cellulose/PVA hydrogels for sustained release of plant growth regulator**. *Industrial crops and products*, v. 195, n. 116432, p. 116432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2023.116432>.

CILLI, S. L., SILVA, H. C., WATANUKI FILHO, A., DE MOURA AOUADA, M. R., & AOUADA, F. A. (2019). **Otimização de metodologia de obtenção de pastas cimentícias contendo hidrogéis**. *Journal of Experimental Techniques and Instrumentation*, v. 2, n. 1. DOI: <https://doi.org/10.30609/jeti.v2i1.7474>.

CLAISSE, P. A. (2016a). **Durability of concrete structures**. In *Civil Engineering Materials*, p. 259–274. Elsevier. DOI : <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100275-9.00025-5>.

CUESTA, A., ZEA-GARCIA, J. D., LONDONO-ZULUAGA, D., DE LA TORRE, A. G., SANTACRUZ, I., VALLCORBA, O., DAPIAGGI, M., SANFÉLIX, S. G., & ARANDA, M. A. G. (2018). **Multiscale understanding of tricalcium silicate hydration reactions**. *Scientific Reports*, v. 8, n. 1, p. 8544. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-018-26943-y>.

DA SILVA NETO, L. D., MAGED, A., GABRIEL, R., LINS, P. V. S., HANEKLAUS, N. H., HLAWITSCHKA, M. W., MEILI, L. (2024). **Nanoclays in water treatment: Core concepts, modifications, and application insights**. Journal of Water Process Engineering, v. 67, n. 106180, p. 106180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106180>.

DAVIS, C. R., BOSE, B., ALCARAZ, A. M., MARTINEZ, C. J., & ERK, K. A. (2020). **Altering the crosslinking density of polyacrylamide hydrogels to increase swelling capacity and promote calcium hydroxide growth in cement voids**. In 3rd International Conference on the Application of Superabsorbent Polymers (SAP) and Other New Admixtures Towards Smart Concrete, p. 20–28. Springer International Publishing.

DESAI, F., SUNKU PRASAD, J., MUTHUKUMAR, P., & RAHMAN, M. M. (2021). **Thermochemical energy storage system for cooling and process heating applications: A review**. Energy Conversion and Management, v. 229, n. 113617, p. 113617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113617>.

DI LISA, L., REA, M., NUVOLI, D., FOCARETE, M. L., ALBONETTI, C., & MARIANI, A. (2024). **Frontal polymerization of acrylamide/GelMA/gelatin hydrogels with controlled mechanical properties and inherent self-recovery**. European Polymer Journal, v. 221, n. 113551, p. 113551. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2024.113551>.

DICIONÁRIO ONLINE PORTUGUÊS. **Cimento: Significado de Cimento**. In: DICIO. [S. l.], 2013. Disponível em: <https://www.dicio.com.br/cimento/#:~:text=Significado%20de%20Cimento,%2Dlos%3A%20cimento%20de%20ourives>. Acesso em: 6 dez. 2024.

DODDA, J., M.; DESHMUKH, K.; BEZUIDENHOUT, D.; YEH, Y. (2023). **Hydrogels: Definition, History, Classifications, Formation, Constitutive Characteristics, and Applications**. Separata de: DODDA, Jagan Mohan; DESHMUKH, Kalim; BEZUIDENHOUT, Deon. Multicomponent **Hydrogels: Smart Materials for Biomedical Applications**. [S. l.]: Royal Society of Chemistry. cap. 1, p. 1-25. ISBN 978-1-83767-005-5. DOI: <https://doi.org/10.1039/BK9781837670055-00001>.

EMMANUEL, A. C., KRISHNAN, S., & BISHNOI, S. (2022). **Influence of curing temperature on hydration and microstructural development of ordinary Portland cement**. Construction and Building Materials, v. 329, n. 127070, p. 127070. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127070>.

ESMAEILI, O., MOHTARAMI, F., & PIRSA, S. (2025). **Development of aqueous and emulsion hydrogel (bigel) formulations based on soy protein isolate, tragacanth gum, carboxymethyl cellulose, and corn oil as potential oil fat mimics in food products: A biopolymer-based approach.** *Results in Engineering*, v. 26, n. 105395, p. 105395. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.105395>.

FAN, X., DONG, X., LIU, Y., ZHAO, B., SONG, C., QIU, C., XU, Y. (2025). **Functionalized inorganic hydrogel-based membrane for synergistic oil/water separation and catalytic degradation.** *Water Research*, v. 281, n. 123617, p. 123617. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.watres.2025.123617>.

FERREIRA JUNIOR, C. R. et al. (2020). **On the preparation and physicochemical properties of pH-responsive hydrogel nanocomposite based on poly(acid methacrylic)/laponite RDS.** *Materials today. Communications*, v. 23, n. 100936, p. 100936. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2020.100936>.

FIORITO, A. J. S. **I. Manual de Argamassas e Revestimentos: Estudos e Procedimentos de Execução.** 2. ed. São Paulo: Pini Ltda, 2009. 236 p. ISBN 978-85-7266-189-8.

FUSCO, P. B.; ONISHI, M. **Introdução à engenharia de estruturas de concreto.** São Paulo - SP: Cengage, 2017. 264 p.

GALAN, I., GLASSER, F. P., BAZA, D., & ANDRADE, C. (2015). **Assessment of the protective effect of carbonation on portlandite crystals.** *Cement and Concrete Research*, v. 74, p. 68. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2015.04.001>.

GANJI, F.; VASHEGHANI-FARAHANI, S.; VASHEGHANI-FARAHANI, E. (2010). **Theoretical Description of Hydrogel Swelling: A Review.** *Iranian Polymer Journal*, [S. l.], n. 19, p. 375. Disponível em: <http://journal.ippi.ac.ir>. Acesso em: 23 abr. 2025.

GHOSH, S. N. **Advances in Cement Technology:: Chemistry, Manufacture and Testing.** 2. ed. India: TBI, 2002. 804 p.

GUAN, X., ZHANG, J., ZHAOC, S. (2024). **Design, synthesis and characterization of a starch-based superabsorbent polymer and its impact on autogenous shrinkage of cement paste.** *Construction and Building Materials*, v. 415, n. 134986, p. 134986. DOI : <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.134986>.

GUO, H. et al. (2021) **Ultra-stable anti-washout cement grout achieved by super water absorbing villus-like nanocomposite hydrogel**. Construction and building materials, v. 301, n. 124035, p. 124035. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.124035>

GUPTA, S. (2018). **Effect of presoaked superabsorbent polymer on strength and permeability of cement mortar**. Mag. Concr. Res. 70, v. 9, p. 473.

HAMADA, H., ALATTAR, A., TAYEH, B., YAHAYA, F., & ALMESHAL, I. (2022). **Influence of different curing methods on the compressive strength of ultra-high-performance concrete: A comprehensive review**. Case Studies in Construction Materials, v. 17, n. e01390, p. e01390. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2022.e01390>.

HASSI, S. et al. (2025). **Effect of super absorbent polymers on the self-healing capability of macrocracked ultra-high performance concrete under highly aggressive environments**. Colloids and surfaces. A, Physicochemical and engineering aspects, v. 705, n. 135540, p. 135540. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2024.135540>.

HE, P. et al. (2024). **Crack-healing and rheological properties of high content fly ash/slag/silica fume green and sustainable cement-based materials incorporating crystalline admixture and calcium alginate biomass hydrogel**. Case studies in construction materials, v. 21, n. e03598, p. e03598. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e03598>.

HOFFMAN, A. S. (2012). **Hydrogels for biomedical applications**. Advanced drug delivery reviews, v. 64, p. 18, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.addr.2012.09.010>.

HOJO, L. Y. C. P.; MARTINS, C. H. (2015) **Utilização da substituição parcial do cimento por cinza leve do bagaço de cana-de-açúcar em concretos**. Mix Sustentável, [S. l.], v. 1, p. 127, 10 set.

INTERNATIONAL UNION OF TESTING AND RESEARCH LABORATORIES FOR MATERIALS AND STRUCTURES – **RILEM. MR – 6**. Tendency of water to separe-te from mortars (bleeding). 1 st. Ed. France, 1982. 110p.

JANG, C. H.; KOO, Y.; KIM, G. (2020). **ASC/chondrocyte-laden alginate hydrogel/PCL hybrid scaffold fabricated using 3D printing for auricle regeneration**. Carbohydrate polymers, v. 248, n. 116776, p. 116776.

JIANG, Z.; LI, W.; YUAN, Z. (2015). **Influence of mineral additives and environmental conditions on the self-healing capabilities of cementitious materials**. Cement and Concrete Composites, [s. l.], v. 57, p. 116. DOI

<https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2014.11.014>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0958946514002303?via%3Dihub>. Acesso em: 17 jul. 2024.

JING, W. et al. (2022). **Effect of hydrogel microcapsule on shrinkage and mechanical properties of cement mortars**. Magazine of concrete research, v. 74, n. 16, p. 810.

KALINOWSKI, M.; WOYCIECHOWSKI, P.; SOKOŁOWSKA, J. (2020). **Effect of mechanically-induced fragmentation of polyacrylic superabsorbent polymer (SAP) hydrogel on the properties of cement composites**. Construction and building materials, v. 263, n. 120135, p. 120135.

KOVLER, K., e JENSEN, O. M. **Internal Curing of Concrete**: State of the Art Report of RILEM Technical Committee TC 196-ICC Internal Curing of Concrete. RILEM publications, 2007. ISBN: 978-2-35158-009-7.

LI, B., YANG, Y., WU, N., ZHAO, S., JIN, H., WANG, G., LI, X., LIU, W., LIU, J., & ZENG, Z. (2022). **Bicontinuous, high-strength, and multifunctional chemical-cross-linked MXene/superaligned carbon nanotube film**. ACS Nano, v. 16, n. 11, p. 19293. DOI: <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c08678>.

LI, L., DING, S., & CAI, Y. (2025). **Phase-Glue: An interpretable and efficient backscattered electron-energy dispersive X-ray spectroscopy (BSE-EDS) mapping analysis approach to dissect the phase assemblage of cementitious material systems**. Expert Systems with Applications, v. 283, n. 127923, p. 127923. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2025.127923>.

LIU, B., SHI, J., ZHOU, F., SHEN, S., DING, Y., & QIN, J. (2020). **Effects of steam curing regimes on the capillary water absorption of concrete: Prediction using multivariable regression models**. Construction and Building Materials, v. 256, n. 119426, p. 119426. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.119426>.

LIU, M. et al. (2024). **Biomimetic anisotropic hydrogel as a smart self-healing agent of sustainable cement-based infrastructure**. Cement & concrete composites, v. 154, n. 105763, p. 105763.

LIU, N.; QIU, J. (2022). **Effect of the freezing temperature and near-vacuum air pressure of Mars on the mechanical properties and microstructure of hydrogel-based**

**concrete (HBC).** Extreme mechanics letters, v. 56, n. 101864, p. 101864. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eml.2022.101864>.

LIU, Y. et al. (2024) **Tunicate cellulose nanocrystal reinforced multifunctional hydrogel with super flexible, fatigue resistant, antifouling and self-adhesive capability for effective wound healing.** International journal of biological macromolecules, v. 277, n. 134337, p. 134337. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.134337>.

LLORENS, J., JULIÁN, F., GIFRA, E., ESPINACH, F. X., SOLER, J., & CHAMORRO, M. À. (2023). **An approach to understanding the hydration of cement-based composites reinforced with untreated natural fibers.** Sustainability, v. 15, n. 12, p. 9388. DOI: <https://doi.org/10.3390/su15129388>.

LUO, Q. et al. (2021). **A 3D porous fluorescent hydrogel based on amino-modified carbon dots with excellent sorption and sensing abilities for environmentally hazardous Cr(VI).** Journal of hazardous materials, v. 401, n. 123432, p. 123432. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.123432>.

MA, X.; WEN, G. (2020). **Development history and synthesis of super-absorbent polymers: a review.** Journal of polymer research, v. 27, n. 6. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10965-020-02097-2>.

MACHADO, R. L., GOMES, A. C., & MARQUES, E. F. (2024). **Hydrogels as versatile colloidal platforms to combat skin cancer – Physicochemical features, strategies and advances.** Journal of Molecular Liquids, v. 416, n. 126453, p. 126453. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2024.126453>.

MACIEL, L. D.; COELHO, A. R.; PEREIRA, H. R. S. **Estudo das propriedades do concreto convencional com aditivo ou adição de água para correção de consistência.** Matéria (Rio de Janeiro), v. 25, n. 4, 2020.

MANO, E. B.; MENDES, L. C. **Introdução à polímeros.** 2. ed. rev. e aum. São Paulo - SP: Blucher, 1999. 209 p.

MECHTCHERINE, V., SECRIERU, E., SCHRÖFL, C. (2015). **Effect of superabsorbent polymers (SAPs) on rheological properties of fresh cement-based mortars—Development of yield stress and plastic viscosity over time.** Cem. Concr. Res. v. 67, n. 1, p. 52.

MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. **Concreto: Microestrutura, propriedades e materiais**. 3. ed. São Paulo: Ibracon, 2008. 674 p.

MELO NETO, Antonio Acacio de; CINCOTTO, Maria Alba; REPETTE, Wellington Longuini. **INFLUÊNCIA DO TEOR DE ATIVADOR E DA IDADE DE EXPOSIÇÃO NA RETRAÇÃO POR SECAGEM DE ARGAMASSAS COM CIMENTOS DE ESCÓRIA ATIVADA COM SILICATO DE SÓDIO**. Boletim Técnico da Escola Politécnica da USP, São Paulo, 2002.

MUHAMMAD, SHASHIVENDRA, ABHISHEK, UMAR, SALIHU, IDRIS, & IBRAHIM. (2024). A review on the curing of concrete using different methods. *International Journal of Mechanical and Civil Engineering*, v. 7, n. 2, p. 15. DOI: <https://doi.org/10.52589/ijmce-4envmzox>.

NAÇÕES UNIDAS (Brasil). Como as Nações Unidas apoiam os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil: Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. In: NAÇÕES UNIDAS (Brasil). Nações Unidas. Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil. [S. l.], 2024. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 23 dez. 2024.

NASCIMENTO, D. W. S., DE MOURA, M. R., MATTOSO, L. H. C., & AOUADA, F. A. (2017). **Hybrid biodegradable hydrogels obtained from nanoclay and carboxymethylcellulose polysaccharide: Hydrophilic, kinetic, spectroscopic and morphological properties**. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*, v. 17, n. 1, p. 821. DOI : <https://doi.org/10.1166/jnn.2017.12664>.

NASSAJ-BOKHARAEI, S. et al. (2021). **Effect of hydrogel composite reinforced with natural char nanoparticles on improvement of soil biological properties and the growth of water deficit-stressed tomato plant**. *Ecotoxicology and environmental safety*, v. 223, n. 112576, p. 112576. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2021.112576>.

NASSIF, A. Y., & PETROU, M. F. (2013). **Influence of cold weather during casting and curing on the stiffness and strength of concrete**. *Construction and Building Materials*, v. 44, p. 161. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.016>.

NEVILLE, A M. **Propriedades do Concreto**. 5ª. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016. 912 p.

Nijland, T. G., & Larbi, J. A. (2010). **Microscopic examination of deteriorated concrete**. In *Non-Destructive Evaluation of Reinforced Concrete Structures*, p. 137. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-100275-9.00025-5>.

NUNES, E. de C. D.; LOPES, F. R. S. **Polímeros: Conceitos, Estrutura Molecular, Classificação e Propriedades**. 1. ed. São Paulo - SP: Érica, 2014. 121 p.

OLIVEIRA NETO, E. D. et al. (2024). **Hydrogel application alters physical and chemical properties of soil, reducing fertirrigation needs in tomato crop**. *Scientia horticulturae*, v. 334, n. 113305, p. 113305. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2024.113305>.

OLIVEIRA, F. DAS C. et al. (2021). **Caracterização de Materiais: A Termodinâmica e suas aplicações no estudo da análise térmica de argilas**. *Research, Society and Development*, v. 10, n. 2, p. e6510212284. DOI: <https://doi.org/10.33448/rsd-v10i2.12284>.

ONANUGA, B. Y.; BIERNACKI, J. J. (2023). **Assessing the robustness of cement-hydrogel-based binders as 3D printing materials**. *Materials today: proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.02.360>.

PANDOLFO, M. T., ROVER, G., BORTOLUZZI, E. A., TEIXEIRA, C. da S., ROSSETTO, H. L., FERNADES, P. C. D. S. V., CÔRTE-REAL, I. S. G., CARVALHO, S. M. F., & GARCIA, L. DA F. R. (2021). **Fracture resistance of simulated immature teeth reinforced with different mineral aggregate-based materials**. *Brazilian Dental Journal*, v. 32, n. 3, p. 21. DOI : <https://doi.org/10.1590/0103-6440202104236>.

PATEL, H. H., BLAND, C. H., & POOLE, A. B. (1995). **The microstructure of concrete cured at elevated temperatures**. *Cement and Concrete Research*, v. 25, n. 3, p. 485. DOI: [https://doi.org/10.1016/0008-8846\(95\)00036-c](https://doi.org/10.1016/0008-8846(95)00036-c).

PATIL, A. D. et al. (2023). **Effect of superabsorbent polymer and Slag Cement on concrete properties**. *Materials today: proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.037>.

PEPPAS, N. A., HILT, J. Z., KHADEMHOSEINI, A., & LANGER, R. (2006). **Hydrogels in biology and medicine: From molecular principles to bionanotechnology**. *Advanced Materials (Deerfield Beach, Fla.)*, v. 18, n. 11, p. 1345. DOI :<https://doi.org/10.1002/adma.200501612>.

PEPPAS, N. A.; KHARE, A. R. (1993). **Preparation, structure and diffusional behavior of hydrogels in controlled release**. *Advanced drug delivery reviews*, v. 11, n. 1–2, p. 1. DOI [https://doi.org/10.1016/0169-409X\(93\)90025-Y](https://doi.org/10.1016/0169-409X(93)90025-Y).

PFEIFER, M. et al. (2023). **Hydrotalcite loading boosts the potentially toxic element's retention in hydrogel nanocomposites for environmental treatment**. *Applied clay science*, v. 240, n. 106976, p. 106976. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.clay.2023.106976>.

PINHEIRO, A. C. da F. B.; CRIVELARO, M. **Materiais de Construção**. 3. ed. São Paulo: Érica, 2020. 184 p. ISBN 978-85-365-3276-9.

RAMACHANDRAN, V. S. **Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology** (Building Materials Science Series). 2. ed. [S. l.]: William Andrew, 1997. 1184 p. ISBN 0815513739.

REIS, A. V. **Aplicações da goma arábica modificada no desenvolvimento de hidrogéis para o uso como dispositivos de liberação modificada de fármaco**. 2007. 145 p. Tese (Doutorado em Química) - Universidade Estadual de Maringá, Maringá-SP, 2007.

RODRIGUES, D. C. Q. et al. (2013). **Modelagem matemática de um forno rotativo empregado na produção de clínquer**. *Cerâmica*, v. 59, n. 350, p. 302.

SABEUR, H., PLATRET, G., & VINCENT, J. (2016). **Composition and microstructural changes in an aged cement pastes upon two heating–cooling regimes, as studied by thermal analysis and X-ray diffraction**. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry*, v. 126, n. 3, p. 1023. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-016-5639-8>.

SANTOS, J. C. dos; TASHIMA, M. M., MOURA, M. R., AOUADA, F. A. (2016). **Obtenção de compósitos híbridos baseados em hidrogéis e cimento Portland**. *Química Nova*, 39, p.124.

SANTOS, R. V.; POLESELLO, E. (2022) **Estudo das propriedades do concreto quando submetido a diferentes tipos de cura**. *Conjecturas*, v. 22, n. 15, p. 487. DOI: <https://doi.org/10.53660/CONJ-1888-2P20>.

SARAVANAKUMAR, R. et al. (2023). **Effect of super absorbent polymers in properties of self-curing concrete – A state of art of review**. *Materials today: proceedings*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.117>.

SCRIVENER, K. L., & KIRKPATRICK, R. J. (2008). **Innovation in use and research on cementitious material**. Cement and Concrete Research, v. 38, n. 2, p. 128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2007.09.025>.

SHACKELFORD, J. F. **Ciências dos Materiais**. 6. ed. São Paulo: Pearson Pretince Hall, 2011. 559 p. ISBN 978-85-7605-160-2.

SIDHU, A. S.; SIDDIQUE, R. (2024). **Review on effect of curing methods on high strength concrete**. Construction and building materials, v. 438, n. 136858, p. 136858. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136858>.

SINGHAL, R., & GUPTA, K. (2016). **A review: Tailor-made hydrogel structures (classifications and synthesis parameters)**. Polymer-Plastics Technology and Engineering, v. 55, n. 1, p. 54. DOI: <https://doi.org/10.1080/03602559.2015.1050520>.

SUN, Z. et al. (2022). **Transparent, photothermal and stretchable alginate-based hydrogels for remote actuation and human motion sensing**. Carbohydrate polymers, v. 293, n. 119727, p. 119727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2022.119727>.

TANAKA, F. C. et al. (2024). **Development of magnetic nanocomposite hydrogels for removal of pesticide from water**. Nano-structures & nano-objects, v. 39, n. 101232, p. 101232. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2023.100880>.

TANG, Y., SU, H., HUANG, S., QU, C., & YANG, J. (2017). **Effect of curing temperature on the durability of concrete under highly geothermal environment**. Advances in Materials Science and Engineering, 2017, p. 1. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/7587853>.

TAYLOR, H. F. W., FAMY, C., & SCRIVENER, K. L. (2001). **Delayed ettringite formation**. Cement and Concrete Research, v. 31, n. 5, p. 683. DOI: [https://doi.org/10.1016/s0008-8846\(01\)00466-5](https://doi.org/10.1016/s0008-8846(01)00466-5).

THAKUR, S.; THAKUR, V. K.; AROTIBA, O. A. (2018). **History, classification, properties and application of hydrogels: An overview**. Em: Gels Horizons: From Science to Smart Materials. Singapore: Springer Singapore, p. 29–50. DOI [https://doi.org/10.1007/978-981-10-6077-9\\_2](https://doi.org/10.1007/978-981-10-6077-9_2).

VIEZZER, C. et al. (2020). **A new waterborne chitosan-based polyurethane hydrogel as a vehicle to transplant bone marrow mesenchymal cells improved wound**

**healing of ulcers in a diabetic rat model.** Carbohydrate polymers, v. 231, n. 115734, p. 115734. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2019.115734>.

VOGLER, N., DRABETZKI, P., LINDEMANN, M., & KÜHNE, H.-C. (2022). **Description of the concrete carbonation process with adjusted depth-resolved thermogravimetric analysis.** Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, v. 147, n. 11, 6167. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10973-021-10966-1>.

WANG, K. et al. (2024). **Absorption and Release mechanism of superabsorbent polymers and its impact on shrinkage and durability of internally cured concrete – A review.** Case studies in construction materials, v. 21, n. e03909, p. e03909.

WANG, M., LI, B., WANG, Z., & WANG, L. (2025). **Analysis of the pore-forming mechanism of SAP and its influence mechanism on cement paste performance based on fluorescence impregnation method.** Construction and Building Materials, v. 472, p. 140804. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2025.140804>.

WATANUKI FILHO, A. W., DE MOURA, M. R., AOUADA, F. A. (2024) **Performance of cementitious mortars containing hydrogel–nanoclay hybrid nanocomposite.** Journal of sol-gel science and technology.

WATANUKI FILHO, Adhemar. **Physical and mechanical characterization of cement-mortars internally cured with hybrid nanocomposites based on Hydrogel and Nanoclay.** Orientador: Prof. Dr. Fauze Ahmad Aouada. 2021. Tese (Doutorado em Engenharia e Ciências dos Materiais) - Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" UNESP Faculdade de Engenharia Campus de Ilha Solteira, [S. l.], 2021.

WICHTERLE, O; LÍM, D. (2024). **Hydrophilic Gels for Biological Use.** Nature, [s. l.], p. 117. DOI: <https://doi.org/10.1038/185117a0>. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/185117a0#citeas>. Acesso em: 25 out. 2024.

WU, Y., LI, Y., & ZHANG, X. (2025). **A review on recent progress in polysaccharide/protein hydrogels in winter sports: Classification, synthesis routes, and application.** International Journal of Biological Macromolecules, v. 302, n. 140732, p. 140732. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2025.140732>.

XIE, T. et al. (2024). **Study on the effect of CO<sub>2</sub>-responsive hydrogel prepared by free radical polymerization on the self-healing of cement paste fractures: application in**

**CCUS cementing.** Construction and building materials, v. 435, n. 136651, p. 136651. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2024.136651>.

YANG, H. et al. (2024) **Mechanical properties and microstructure of cement-based materials by different high-temperature curing methods: A review.** Journal of building engineering, v. 96, n. 110464, p. 110464. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2024.110464>.

YANG, J. et al. (2022) **Superabsorbent hydrogel as a formulation to promote mineralization and accelerate degradation of acetochlor in soils.** Journal of hazardous materials, v. 440, n. 129777, p. 129777. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.129777>.

YANG, L., SHI, C., LIU, J, WU, Z. (2021) **Factors affecting the effectiveness of internal curing: a review.** Construction And Building Materials, [S.L.], v. 267, p. 121017. Elsevier BV. DOI : <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.121017>.

YANG, Z., XIE, Y., HE, J., WANG, F., ZENG, X., MA, K., & LONG, G. (2021). **A comparative study on the mechanical properties and microstructure of cement-based materials by direct electric curing and steam curing.** Materials, v. 14, n. 23, p. 7407. DOI: <https://doi.org/10.3390/ma14237407>.

YOUNG, R. J., LOVELL, P. A. **Introduction to polymers.** 3rd ed, CRC Press, 2011.

YUAN, Q., LIU, Z., ZHENG, K., & MA, C. (2021). **Inorganic cementing materials.** In Civil Engineering Materials, p. 17. Elsevier. DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-822865-4.00002-7>Get rights and content.

YUI, N., organizador. **Supramolecular Design for Biological Applications.** 1 ed, CRC Press, 2002. DOI.org (Crossref), DOI: <https://doi.org/10.1201/9781420041187>.

ZEYAD, A. M., JOHARI, M. A. M., ALHARBI, Y. R., ABADEL, A. A., AMRAN, Y. H. M., TAYEH, B. A., & ABUTALEB, A. (2021). **Influence of steam curing regimes on the properties of ultrafine POFA-based high-strength green concrete.** Journal of Building Engineering, v. 38, n. 102204, 102204. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.102204> .

ZHANG, R., LONG, Z., LONG, G., GUO, H., ZHANG, F., & ZHANG, X. (2024). **Investigating concrete performance: Compressive strength and pore-structure evolution in simulated permafrost conditions of the Qinghai–Tibet plateau zone.** Journal of Materials in Civil Engineering, v. 36, n. 5. DOI: <https://doi.org/10.1061/jmcee7.mteng-16783>.

ZHAO, X. et al. (2021) **Soft materials by design: Unconventional polymer networks give extreme properties.** Chemical reviews, v. 121, n. 8, p. 4309. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.0c01088>.

ZHUTOVSKY, S., KOVLER, K., & BENTUR, A. (2011). **Revisiting the protected paste volume concept for internal curing of high-strength concretes.** Cement and Concrete Research, v. 41, n. 9, p. 981. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.05.007>.