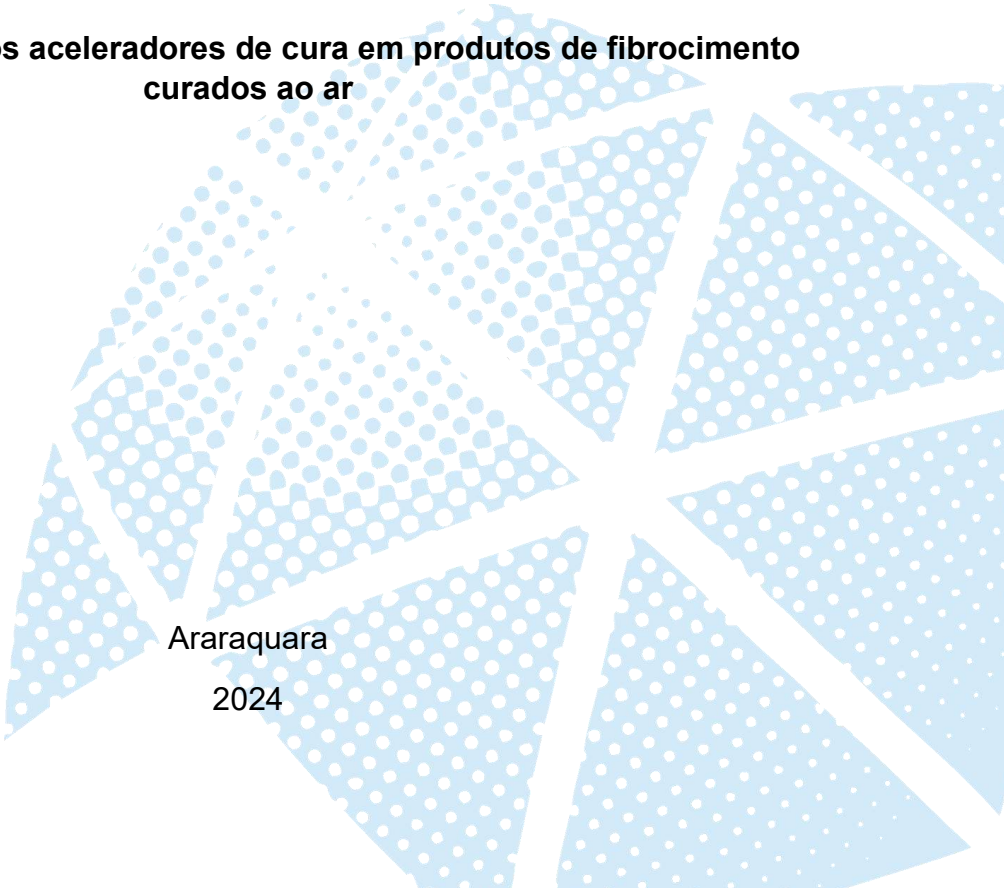


**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP**  
**Instituto de Química - Câmpus de Araraquara**

Eduardo Felipe da Silva

**Utilização de aditivos aceleradores de cura em produtos de fibrocimento  
curados ao ar**

Araraquara  
2024



**Eduardo Felipe da Silva**

**Utilização de aditivos aceleradores de cura em produtos de fibrocimento curados ao ar**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara, para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química.

Orientador: Celso Valentim Santilli

Araraquara

2024

S586u Silva, Eduardo Felipe da  
Utilização de aditivos aceleradores de cura em produtos de fibrocimento curados ao ar / Eduardo Felipe da Silva. -- Araraquara, 2024  
48 p.  
  
Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado - Engenharia Química) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Instituto de Química, Araraquara  
Orientador: Celso Valentim Santilli  
  
1. Fibrocimento. 2. Cimento reforçado com fio sintético. 3. Alcanolaminas. 4. Acelerador de cura. 5. Resistência mecânica. I. Título.

EDUARDO FELIPE DA SILVA

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à Universidade Estadual  
Paulista (UNESP), Instituto de Química,  
Araraquara, para obtenção do título de  
Bacharel em Engenharia Química.

Araraquara, 09 de novembro de 2024.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Celso Valentim Santilli

Instituto de Química – UNESP, Araraquara

---

Profa. Dra. Lorena Oliveira Pires

Instituto de Química – UNESP, Araraquara

---

Profa. Dra. Kelly Johana Dussán Medina

Instituto de Química – UNESP, Araraquara

## RESUMO

Atualmente a tecnologia Cimento Reforçado com Fios Sintéticos (CRFS) tem grande impacto no mercado de construção civil, representando 46% do volume total de vendas. Pelo fato da resistência mecânica da matriz cimentícia depender das reações químicas do clínquer com água nas primeiras idades, após sair da linha de produção ainda existe grande fragilidade no produto de fibrocimento, sendo necessário um período de cura relativamente longo, consequentemente gerando grande volume de estoque, diminuindo o capital de giro. Esse tempo de cura é necessário pois para comercialização é exigido por norma resistência mecânica mínima, de acordo com a ABNT NBR 15210, norma de telhas onduladas de fibrocimento reforçado com fios sintéticos. A fim de diminuir o tempo necessário para atingir essa resistência mínima, foi avaliado o comportamento do fibrocimento utilizando diferentes aditivos do grupo funcional alcanolaminas. Além do ganho de resistência mecânica, foi estudado nesse trabalho outros parâmetros físicos como variação dimensional, densidade da matriz cimentícia e teor de absorção de água. Após avaliação do comportamento do aditivo em bancada, utilizando ensaios como calorimetria e velocidade de propagação do ultrassom, também foi avaliado seu comportamento em dois testes pilotos. Foram avaliados quatro diferentes aditivos de alcanolaminas em laboratório, e o aditivo que foi avaliado nos testes pilotos apresentou ganho de resistência 12,5% com 7 dias, quando comparado com a referência após 14 dias de cura em laboratório. Após avaliar o material na linha de produção, não foram observados grandes ganhos, devido à dificuldade de dosar o aditivo em um ponto que não cause sua diluição e ao mesmo tempo tenha contato de forma homogênea com toda a massa.

**Palavras-chave:** fibrocimento; cimento reforçado com fio sintético; alcanolaminas; acelerador de cura; resistência mecânica; calorimetria; teste piloto.

## **Abstract**

Currently, Synthetic Fiber Reinforced Cement (CRFS) technology has a significant impact on the construction market, representing 46% of the total sales volume. Since the mechanical strength of the cementitious matrix depends on the chemical reactions of clinker with water in the early stages, after leaving the production line there is still great fragility in the fiber cement product, requiring a relatively long curing period. Consequently, this generates a large volume of inventory, decreasing working capital. This curing time is necessary because minimum mechanical strength is required by standards for commercialization, according to ABNT NBR 15210, the standard for corrugated fiber cement sheets reinforced with synthetic fibers. In order to reduce the time required to achieve this minimum strength, the behavior of fiber cement using different additives from the alkanolamines functional group was evaluated. In addition to the gain in mechanical strength, other physical parameters were studied in this work, such as dimensional variation, density of the cementitious matrix, and water absorption rate. After evaluating the behavior of the additive in the bench using tests such as calorimetry and ultrasound propagation speed, its behavior was also evaluated in two pilot tests. Four different alkanolamine additives were evaluated in the laboratory, and the additive that was evaluated in the pilot tests showed a 12.5% gain in strength after 7 days, compared to the reference after 14 days of laboratory curing. After evaluating the material on the production line, no significant gains were observed, due to the difficulty in dosing the additive at a point that does not cause its dilution and at the same time ensures homogeneous contact with the entire mass.

**Keywords:** fiber cement; synthetic fiber reinforced cement; alkanolamines; curing accelerator; mechanical strength; calorimetry; pilot test.

## Lista de Figuras

|                                                                                                                    |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figura 1:</b> Diagrama da taxa de calor da reação de hidratação do clínquer .....                               | 12 |
| <b>Figura 2:</b> Esquema simplificado da produção de cimento .....                                                 | 13 |
| <b>Figura 3:</b> Britador de calcário .....                                                                        | 14 |
| <b>Figura 4:</b> Pilha de pré-Homogeneização .....                                                                 | 14 |
| <b>Figura 5:</b> Esquema ciclone pneumático .....                                                                  | 15 |
| <b>Figura 6:</b> <i>Representação processo Hatscheck</i> .....                                                     | 17 |
| <b>Figura 7:</b> Gráfico de resistência à compressão com diferentes temperaturas durante cura .....                | 19 |
| <b>Figura 8:</b> Calorimetria de pasta com acelerador de cura .....                                                | 21 |
| <b>Figura 9:</b> Ensaio de compressão em argamassa contendo o aditivo .....                                        | 22 |
| <b>Figura 10:</b> Argamassadeira utilizada no preparo de corpos de prova .....                                     | 25 |
| <b>Figura 11:</b> Corpos de prova .....                                                                            | 26 |
| <b>Figura 12:</b> Densidade dos corpos de prova .....                                                              | 30 |
| <b>Figura 13:</b> Absorção de água .....                                                                           | 31 |
| <b>Figura 14:</b> Módulo de ruptura (MOR) em laboratório .....                                                     | 32 |
| <b>Figura 15:</b> Variação dimensional (Retração) após 7 dias de cura ao ar .....                                  | 33 |
| <b>Figura 16:</b> Equipamento utilizado para medir a velocidade do ultrassom na amostra .....                      | 34 |
| <b>Figura 17:</b> Velocidade de propagação do ultrassom .....                                                      | 35 |
| <b>Figura 18:</b> Aceleração da propagação do ultrassom .....                                                      | 35 |
| <b>Figura 19:</b> Reação exotérmica de hidratação do cimento com aditivo acelerador de cura .....                  | 37 |
| <b>Figura 20:</b> Ponto de dosagem do aditivo no Processo Hatscheck .....                                          | 38 |
| <b>Figura 21:</b> Ensaio de resistência mecânica - Primeiro teste piloto .....                                     | 39 |
| <b>Figura 22:</b> Ponto de dosagem pelo spray da prensa .....                                                      | 40 |
| <b>Figura 23:</b> Resistência a flexão comparativa com a resistência da referência com 14 dias de cura ao ar ..... | 41 |

## **Lista de Quadros**

|                                                                                        |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Quadro 1:</b> Classificação de cimento portland de acordo com suas composições..... | 16 |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|

### **Lista de Equações**

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Equação 1:</b> Equação para cálculo da variação dimensional .....          | 27 |
| <b>Equação 2:</b> Equação para cálculo do teor de absorção de água .....      | 27 |
| <b>Equação 3:</b> Equação para determinação do volume do corpo de prova ..... | 28 |
| <b>Equação 4:</b> Determinação da densidade do corpo de prova.....            | 28 |

## Sumário

|                                                     |           |
|-----------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introdução .....</b>                          | <b>9</b>  |
| <b>2. Revisão bibliográfica.....</b>                | <b>11</b> |
| 2.1. Reação de hidratação do cimento.....           | 11        |
| 2.2. Produção do cimento e suas classificações..... | 13        |
| 2.3. Processo Hatscheck.....                        | 17        |
| 2.4. Tempo de pega .....                            | 18        |
| 2.5. Métodos para aceleração de cura.....           | 18        |
| 2.5.1. Tratamento térmico.....                      | 19        |
| 2.5.2. Sais.....                                    | 19        |
| 2.5.3. Alcanolaminas.....                           | 20        |
| <b>3. Objetivos .....</b>                           | <b>23</b> |
| <b>4. Metodologia.....</b>                          | <b>24</b> |
| <b>5. Resultados e discussão .....</b>              | <b>29</b> |
| 5.1. Densidade .....                                | 30        |
| 5.2. Absorção de água .....                         | 30        |
| 5.3. Módulo de ruptura (MOR) .....                  | 31        |
| 5.4. Variação dimensional .....                     | 32        |
| 5.5. Propagação de ultrassom e calorimetria .....   | 33        |
| 5.6. Primeiro teste piloto.....                     | 37        |
| 5.7. Segundo teste piloto.....                      | 40        |
| <b>6. Conclusão .....</b>                           | <b>43</b> |
| <b>7. Referências bibliográficas .....</b>          | <b>45</b> |

## 1. Introdução

O mercado de coberturas é muito expressivo para o setor da construção civil. Por ser um setor que está diretamente ligado com a economia de um país, crises e altas taxas de juros causam elevadas quedas em seu crescimento. Em contrapartida, a necessidade de obras de infraestrutura, habitação, reformas e demais construções são demandas crescentes, com o aumento populacional e desenvolvimento das cidades ao redor do mundo, fortalecendo o mercado da área.

A busca por alternativas de alto desempenho e com um custo-benefício atraente foi um dos principais fatores que impulsionaram o surgimento do fibrocimento. O processo Hatscheck, desenvolvido em 1900 pelo austríaco Ludwig Hatschek, foi inspirado no processo produtivo do papel. (Oliveira, 2010).

O processo Hatschek baseia-se na produção de materiais cimentícios que utilizam primordialmente cimento e fibras em sua composição, inicialmente, mais especificamente no uso de amianto (fibras minerais naturais), um minério encontrado em abundância na natureza com baixo custo de exploração. Tal material era utilizado graças à sua alta resistência mecânica, resistência a temperaturas elevadas, ataque ácido e alcalino e atuante como agente de filtração, sendo perfeito para o processo Hatschek (Castro; Giannasi; Novello, 2003).

Com a descoberta com relação aos danos à saúde causado pelo amianto, sua exploração e utilização no setor de construção civil diminuiu drasticamente, até ser banido definitivamente em praticamente todo o mundo. No Brasil o banimento ocorreu gradativamente ao longo de muitos anos de forma estadual e nacionalmente apenas em 29 de novembro de 2017, quando foi declarado inconstitucional o artigo 2º da Lei Federal 9.055/1995, que permitia a extração, industrialização e comercialização de amianto tipo crisotila.

O amianto, também conhecido como asbesto, é classificado como cancerígeno, e afeta principalmente o pulmão. O contato direto durante a mineração, exposição de longa duração mesmo com contato indireto, como por exemplo durante limpezas, manutenções ou exposições de curta duração com grande concentração de poeira são capazes de acometer os trabalhadores expostos ao material (IARC, 2012).

De forma geral, as principais doenças causadas pelo contato com asbesto são a asbestose, causada pela deposição de fibras nos alvéolos pulmonares, reduzindo a capacidade de trocas gasosas e a elasticidade do órgão, além do câncer de pulmão,

que acomete 50% dos casos de asbestose. Além disso, também é comum o desenvolvimento de Mesotelioma, uma forma rara de tumor maligno que afeta a pleura, peritônio e outras partes do organismo, e se reproduz através de metástase por via linfática em aproximadamente 25% dos casos. (INCA. 2020)

Após a sua proibição, o asbesto foi substituído por fibras vegetais e/ou sintéticas. Na grande maioria, os produtos de fibrocimento são fabricados utilizando fibras de Álcool Polivinílico (PVA), devido à grande compatibilidade mecânica e física do PVA com matrizes cimentícias. Também se utiliza o Polipropileno (PP) como alternativa, material com menor compatibilidade com a matriz cimentícia, tornando-se viável seu uso especialmente devido ao menor custo em relação ao PVA e seu desempenho satisfatório.

Pelo fato de o cimento ser grande parte de sua composição, o fibrocimento passa pela cura antes de ser manuseado e comercializado. Após fabricadas, as telhas de fibrocimento precisam atender a NBR 15210, que dita a resistência à flexão mínima necessária para cada tipo de telha de acordo com sua espessura e formato. (BRASILIT, 2020)

Usualmente, os produtos são mantidos em estoque por 14 dias curando ao ar. Após esse período, a resistência necessária para atender a norma NBR 15210 de ensaios de resistência à flexão geralmente é atingida. Eventualmente, algumas instabilidades com matérias-primas, condições ambientes (baixas temperaturas e/ou umidade relativa) ou com o processo produtivo podem afetar diretamente esse tempo de cura, levando a períodos maiores que 14 dias para atender o mínimo exigido pela norma. Visando reduzir esse tempo, fez-se necessário a busca por alternativas que fossem viáveis e pudessem reduzir esse tempo de cura.

## **2. Revisão bibliográfica**

Para desenvolvimento desse trabalho, as principais bibliografias e pesquisas realizadas estão relacionadas à reação de hidratação do cimento, calorimetria, e principais fases hidratadas do clínquer. Essas fases estão diretamente relacionadas ao ganho de resistência mecânica do cimento, e conseqüentemente do fibrocimento em geral.

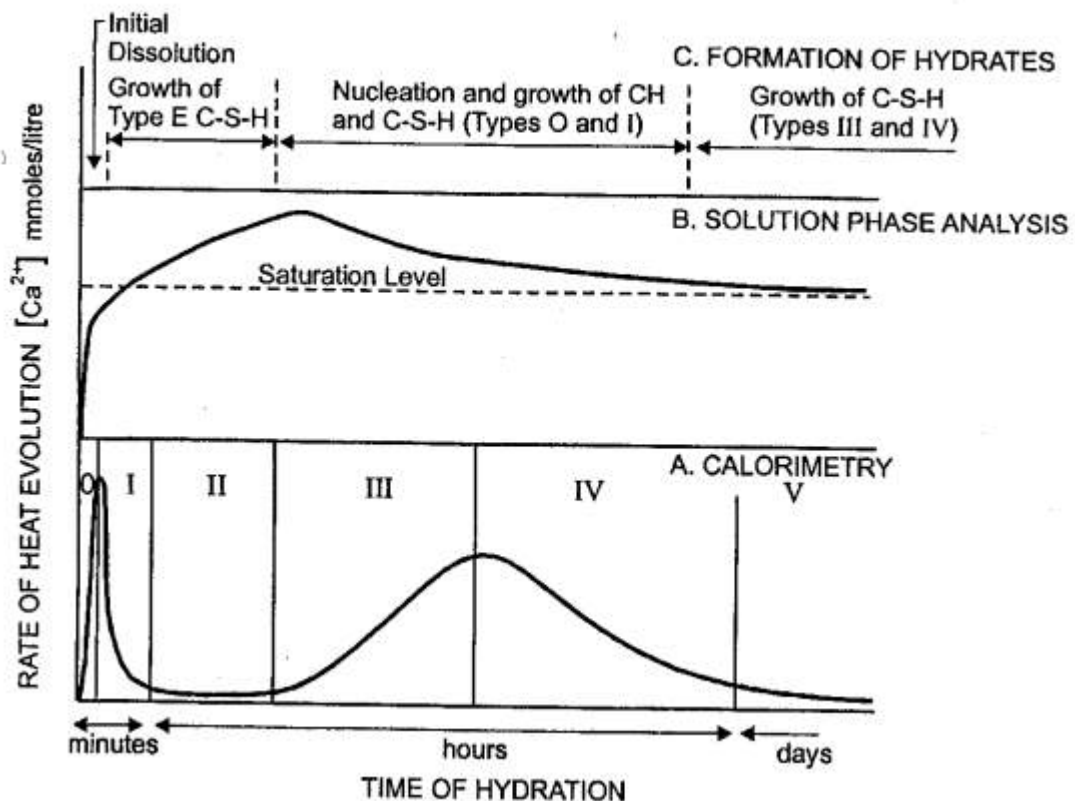
### **2.1. Reação de hidratação do cimento**

A hidratação do cimento é a reação química que ocorre no momento que água e clínquer entram em contato, criando uma suspensão e dissolvendo as partículas constituintes do cimento e precipitando fases hidratadas interconectadas apresentando certa resistência mecânica (início de pega), evoluindo até o período de endurecimento, onde há um ganho acelerado de resistência mecânica no material.

Ao entrar em contato com a água ocorrem reações de trocas iônicas entre os sólidos e a fase líquida, seguida pelo aumento das concentrações de aluminatos, sulfatos e álcalis, provenientes das fases que contém sódio, potássio, magnésio e, principalmente cálcio. Esses íons são provenientes das principais fases constituintes do clínquer, como por exemplo Silicatos de Cálcio, Aluminatos de Cálcio, Sulfato de Cálcio e Sulfatos Alcalinos.

Para acompanhar o grau de hidratação do cimento, a calorimetria é o método mais usual, registrando o calor liberado ao longo do período de cura, que é uma reação exotérmica. De modo geral, o mecanismo de hidratação é dividido em cinco etapas (Taylor,1990).

**Figura 1:** Diagrama da taxa de calor da reação de hidratação do clínquer



Fonte: Taylor, 1990

I - Reação inicial: Inicia-se a partir do momento em que o cimento entra em contato com água, promovendo a dissolução dos álcalis ou sulfato de cálcio e íons, como  $K^+$ ,  $Na^+$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ , formando uma espécie de gel de silicato de cálcio hidratado na superfície dos grãos de cimento, proveniente da dissolução dos aluminatos presentes (Romano *et al.*, 2016)

II - Período de Indução: Nesse estágio, a hidratação ocorre vagarosamente devido à formação dessa película de gel de silicato de cálcio. Quando essa camada é rompida, a difusão iônica é facilitada e a velocidade da reação aumenta drasticamente, iniciando a próxima etapa (Thomas; Jennings, 2006)

III - Período de Aceleração: Devido a saturação iônica da fase aquosa, forma-se rapidamente Silicato de Cálcio e Hidróxido de Cálcio, reduzindo a concentração de íons  $Ca^{2+}$  livres em solução. A formação do silicato e do hidróxido são reações altamente exotérmicas.

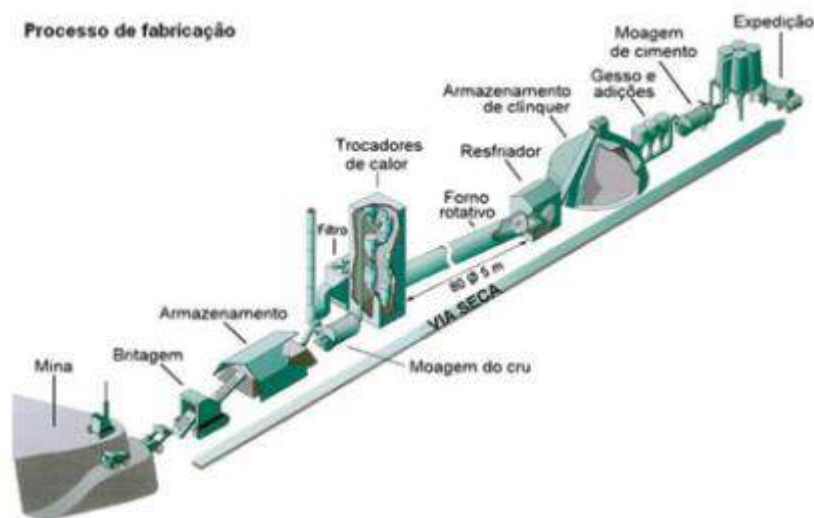
IV - Período de desaceleração: Diminuição progressiva da taxa de reação. Nessa fase, a reação passa a ser controlada pelo mecanismo de difusão iônica. Ocorre a formação de belita (Silicato dicálcico), que possui cinética mais lenta.

V - Etapa final: Densificação do silicato de cálcio. A matriz cimentícia continua hidratando constantemente, porém de forma muito lenta já que sua estrutura se encontra muito menos porosa, dificultando a permeabilidade de água em seu interior, hidratando parte do ligante que ainda não reagiu. (Jawed; Skalny; Young, 1983; Romano *et al.*, 2016; Taylor, 1990)

## 2.2. Produção do cimento e suas classificações

O cimento Portland é produzido através do processo de clínquerização, reação química que converte carbonato de cálcio e sílica em clínquer.

**Figura 2:** Esquema simplificado da produção de cimento



**Fonte:** Confederação Nacional da Indústria, 2012

Inicialmente, extrai-se das minas o calcário em pedra ( $\text{CaCO}_3$ ) e argila, que será a principal fonte de sílica do cimento. Para reduzir o tamanho das partículas, o calcário passa por britadores, onde segue pelo primeiro processo de moagem, e segue para o armazenamento do material britado em pilhas, numa etapa chamada de pré-homogeneização, junto da sílica, para evitar grandes variações na composição química durante o processo.

**Figura 3:** Britador de calcário



**Fonte:** CGEA Ambiental, 2015.

**Figura 4:** Pilha de pré-Homogeneização



**Fonte:** ZKG Cement, 2013

Antes de seguir para o forno de clínquerização, essa mistura de calcário e argila passa por um processo de moagem, onde geralmente são utilizados moinhos de bola para adequação da granulometria do material até o tamanho de partícula desejado (geralmente 50  $\mu\text{m}$ ). Após a etapa de moagem, esse material, comumente chamado



Com um pequeno ângulo de inclinação e rotação de até 4 rpm, a matéria-prima percorre o forno, tornando-se uma pasta incandescente que ao fim dessa etapa deve ser resfriada rapidamente, para estabilizar a estrutura cristalina do clínquer, e evitar que parte do Silicato Tricálcico ( $C_3S$ ) se converta em Silicato Dicálcico ( $C_2S$ ).

Após deixar o resfriador, o clínquer passa novamente por moinhos de bola para adequar a granulometria do material, e em sequência segue para aditivção, onde adiciona-se gesso para controlar tempo de pega, *filler* calcário, escória, cinzas, entre outros. (LIMA, 2011)

A dosagem do aditivo e o teor de clínquer do cimento determinam o tipo de cimento manufaturado e devem seguir a norma ABNT NBR 16697, que dita os requisitos necessários na composição para cada tipo de cimento produzido, conforme tabela abaixo:

**Quadro 1:** Classificação de cimento portland de acordo com suas composições

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

<sup>a</sup> No caso de cimento Portland de alta resistência inicial resistente a sulfatos (CP V-ARI RS), podem ser adicionadas escórias granuladas de alto-forno ou materiais pozzolânicos.

<sup>b</sup> O teor máximo da somatória de adições ( escória granulada de alto –forno e material carbonático) deve ser de 75%.

<sup>c</sup> O teor máximo da somatória de adições ( material pozzolânico e material carbonático) deve ser de 55%.

**Fonte:** Associação Brasileira de Cimento Portland, 2018

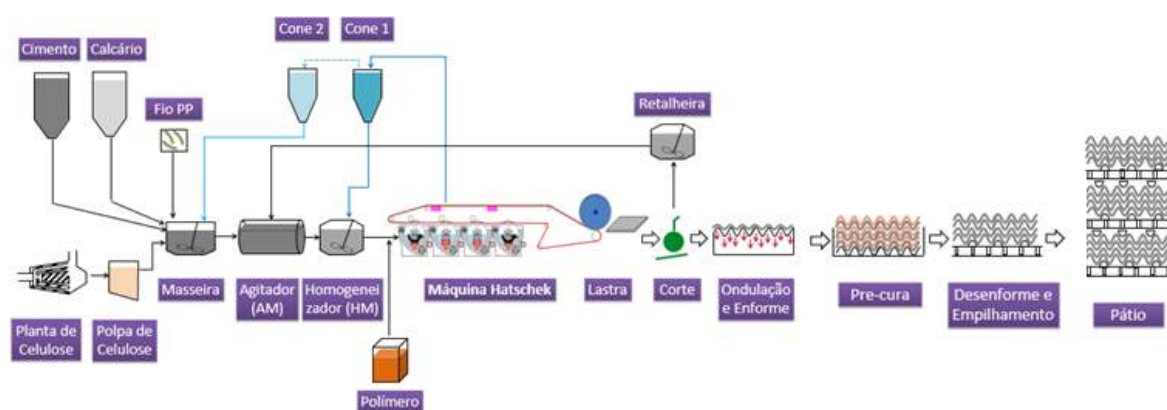
Além da composição, a norma traz também alguns outros fatores que devem ser seguidos, como por exemplo tempo de início de pega, expansibilidade, resistência à compressão a 1, 3, 7 e 28 dias de cura etc. (LIMA, 2011)

### 2.3. Processo Hatscheck

O processo Hatscheck pode ser explicado resumidamente como um processo de filtração, onde uma suspensão contendo cimento, filler e fios sintéticos e/ou polpa de celulose passa por uma tela filtrante (feltro), que tem como função reter os sólidos e remover a água em excesso da suspensão. Esses sólidos retidos passam por um rolo prensa, e dão origem ao que chamamos de monopelícula. O conjunto de monopelículas forma a “lastra”, que após moldagem, origina o produto final. Sua espessura pode ser ajustada de acordo com a pressão exercida no rolo, no número de caixas ativas com a suspensão, na concentração da suspensão ou também no número total de voltas na prensa.

Após produção da lastra, o produto é inserido em uma forma, geralmente metálica, e moldado definindo o formato de suas ondas, comprimento, largura etc. Após enforme, segue para a etapa de pré-cura, onde o produto permanece por aproximadamente 24 horas até adquirir resistência mecânica suficiente para ser movimentado. Passado esse período, o material é desenformado e segue para embalagem, e por fim, levado ao pátio para cura final e aguardar aprovação do lote e expedição para comercialização. (Tonoli; 2009; Dias; Savastano, John, 2010)

**Figura 6:** Representação processo Hatscheck



**Fonte:** BRASILIT, 2024.

## 2.4. Tempo de pega

De acordo com Neville e Brooks, a pega do cimento ocorre devido às reações de hidratação do Silicato Tricálcico ( $C_3S$ ) e do Aluminato Tricálcico ( $C_3A$ ). Por ser uma reação exotérmica, é gerado um aumento de temperatura da pasta. O início de pega se dá pela perda de plasticidade da pasta, quando se inicia a reação exotérmica de hidratação. Já o fim de pega se dá no pico da curva de liberação de calor da reação. Nas palavras do autor:

Genericamente falando, pega se refere à mudança de estado fluido para o rígido. A pega é causada principalmente pela hidratação do  $C_3A$  e  $C_3S$  e é acompanhada pela elevação da temperatura na pasta de cimento. O início de pega corresponde a uma rápida elevação e o fim de pega corresponde ao pico de temperatura (Neville; Brooks, 2013)

Para avaliar o comportamento de pega do cimento, é utilizada a agulha Vicat, que basicamente é um aparelho com um recipiente de volume padronizado, contendo uma agulha.

O tempo de Início de pega corresponde ao intervalo de tempo necessário após adição de água ao cimento para a agulha penetrar até uma distância de  $(4 \pm 1)$  mm da placa base. Já o tempo de fim de pega é o intervalo de tempo necessário desde a adição de água ao cimento para a agulha penetrar 0,5 mm na pasta, de acordo com a norma ABNT NM 65/2003 – ABNT – “Cimento Portland – Determinação dos tempos de pega”.

## 2.5. Métodos para aceleração de cura

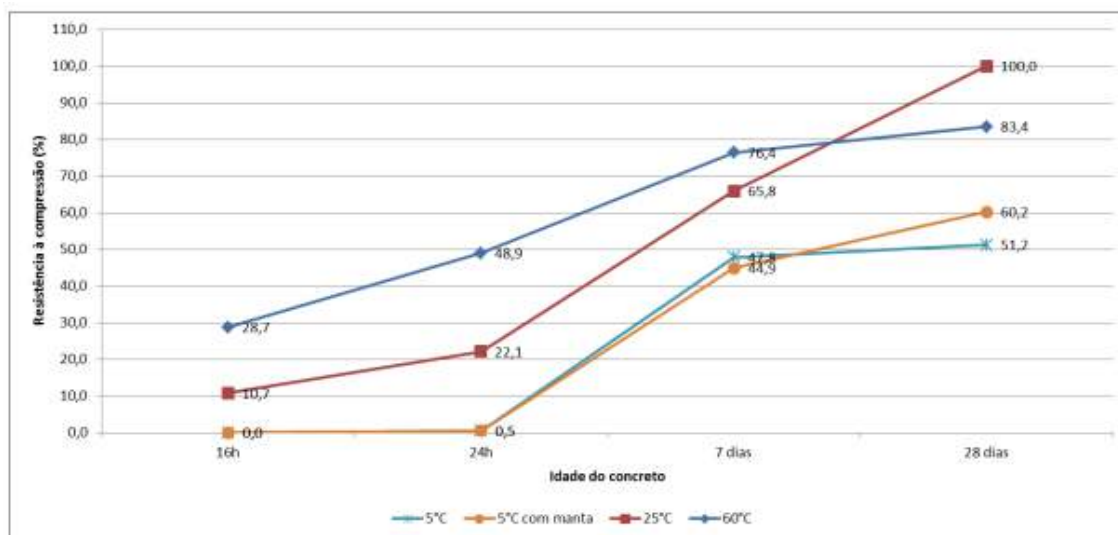
Pelo fato de o cimento ter uma cinética de reação relativamente lenta, é de grande interesse da indústria de fibrocimento, concreto e pré-moldados, por exemplo, a utilização de aditivos que diminuam o tempo de cura do produto até atingir a resistência necessária para ser comercializado. Diminuir o tempo de cura desses produtos significa aumentar o capital de giro, já que o estoque irá permanecer menos tempo aguardando até ser liberado para o mercado, no caso do fibrocimento.

Visando trabalhar nessa questão algumas técnicas são utilizadas a fim de diminuir esse tempo de cura, como por exemplo tratamento térmico, ou utilização de aditivos químicos para acelerar a reação de hidratação do cimento nas idades iniciais.

### 2.5.1. Tratamento térmico

O tratamento térmico em estufas é uma das técnicas utilizadas para diminuir o tempo de cura do cimento, já que temperaturas de até 60 °C favorecem a reação exotérmica de hidratação do cimento, promovendo um ganho de resistência exponencial nas idades iniciais de cura.

**Figura 7:** Gráfico de resistência à compressão com diferentes temperaturas durante cura



Fonte: Lansini, 2016

Analisando a resistência a compressão de um corpo de prova de cimento com teor água/cimento 0,41, observa-se um ganho de resistência muito rápido até 7 dias (60 °C), que cai bruscamente após esse período. (Lansini, 2016)

De acordo com (Neville, 1997), rápida hidratação com elevadas temperaturas causam uma distribuição não uniforme dos produtos da reação de cura no interior da pasta, prejudicando a estrutura e resistência do material. O gradiente de temperatura presente entre a superfície e o interior do material prejudica a difusão de produtos hidratados, formando regiões com maiores cristais o que acaba prejudicando a estrutura do material, criando maiores espaços intersticiais e tensões internas, que por sua vez, irão aumentar a porosidade e prejudicar a resistência a compressão do cimento.

### 2.5.2. Sais

Alguns sais são capazes de acelerar a cinética da reação de cura do cimento. Os principais mecanismos de hidratação afetam principalmente a fase aluminato tricálcico. Geralmente são álcalis (íons cloreto) que promovem a dissolução da sílica

e da alumina, impactando também a cinética de hidratação da alita, aumentando a quantidade de calor liberada nas idades iniciais de cura.

Exemplos de sais capazes de acelerar a cura do cimento são o cloreto de sódio e o cloreto de cálcio, aditivos aceleradores de cura muito populares devido aos seus baixos custos. O problema do uso desses sais são os íons cloreto em sua composição, que são extremamente corrosivos, provocando danos nos maquinários metálicos das linhas de produção e das ferragens utilizadas na construção civil. (Costa *et al.*, 2018)

### **2.5.3. Alcanolaminas**

Nesse estudo, foram avaliados diferentes aditivos com uma propriedade em comum entre eles, que é a presença de alcanolaminas. Esse grupo funcional possui como principal propriedade catalisar a reação de hidratação do Ferroaluminato Tetracálcico ( $C_4AF$ ), fase mineral também conhecida como ferrita. Catalisando a hidratação da ferrita, há um aumento na dissolução de calcita ( $CaCO_3$ ), aumentando a formação de etringita, que é responsável pelo ganho inicial de resistência do cimento. (Jung, 2023)

As alcanolaminas mais comumente utilizadas em cimento Portland são Trietanolamina (TEA) e triisopropanolamina (TIPA), em adição de dietanolisopropanolamina (DEIPA) e etildiisopropilamina (EDIPA). Estudos mostram que TEA age como um acelerador de pega e aumenta o ganho de resistência nas primeiras idades, devido ao aumento da cinética de hidratação da fase Aluminato Tricálcico ( $C_3A$ ). No entanto, esse aditivo retarda a hidratação da fase Silicato Tricálcico ( $C_3S$ ), principal fase no ganho de resistência do cimento Portland em idades avançadas. (Ramachandran, 1973; Kong *et al.* 2013; Cheung *et al.*, 2011, Tran *et al.*, 2023)

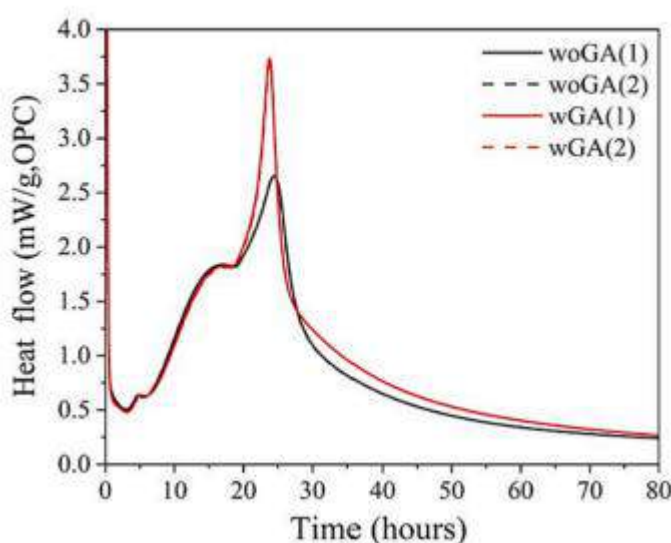
A TIPA age como um acelerador na reatividade do gel Ferroaluminato Tetracálcico ( $C_4AF$ ), formando sais complexos com os íons Ferro. Essa reação ocorre mesmo após o consumo de todo Sulfato disponível durante as fases iniciais de hidratação do cimento Portland.

Além disso, no estudo de Jung, é mostrado que DEIPA e EDIPA são capazes de formar complexos mais fortes com íons Ferro quando comparados com TIPA, o que melhora ainda mais a reatividade do Ferroaluminato Tetracálcico ( $C_4AF$ ), impactando num ganho de resistência mais precoce. Comparando ambos, o etildiisopropilamina (EDIPA) tem maior ganho de resistência final no cimento quando

comparado com o dietanolisopropanolamina (DEIPA). Esse atributo está relacionado à capacidade do aditivo em aumentar o grau de hidratação do Silicato Tricálcico e Dicálcico ( $C_3S$  e  $C_2S$  respectivamente). (Jung, 2023)

De acordo com o artigo de Jung, é possível observar um grande pico de liberação de calor na reação de hidratação do cimento contendo o aditivo a base de alcanolamina.

**Figura 8:** Calorimetria de pasta com acelerador de cura

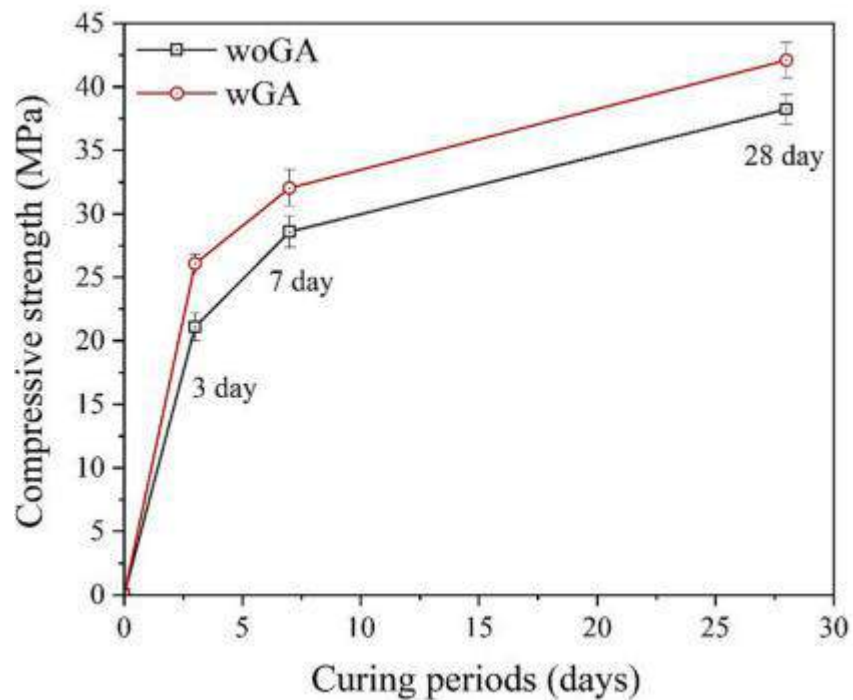


**Fonte:** Jung, 2023

O preparo da pasta foi feito utilizando 10 gramas de cimento Portland e 5 gramas de água, com adição de 0,026% em massa do teor de cimento do aditivo de cura. O aditivo utilizado é uma mistura na razão 3:1 de duas alcanolaminas diferentes, EDIPA e DEIPA, respectivamente.

Em adição, o autor traz também um comparativo entre ensaios de compressão realizados no preparo de argamassa utilizando a mesma mistura de aditivos. O preparo dessa argamassa foi feito utilizando 450 gramas de cimento Portland, 1350 gramas de areia e 225 gramas de água. O teor de aditivo foi o mesmo utilizado para o preparo da pasta cimentícia (0,026% em massa do teor de cimento).

**Figura 9:** Ensaio de compressão em argamassa contendo o aditivo



**Fonte:** Jung, 2023

Avaliando os ensaios realizados no estudo citado espera-se observar um comportamento semelhante na matriz cimentícia. É notável o ganho de resistência à compressão no gráfico acima. O autor cita que o aditivo apresentou propriedades de melhoria na hidratação em idades iniciais e também em idades mais avançadas. A afirmação se confirma pela distância entre a curva vermelha (contendo o aditivo) com a curva preta (sem aditivo), que permanece praticamente constante de 3 até 28 dias.

### **3. Objetivos**

Esse trabalho foi desenvolvido para estudar o comportamento de aditivos aceleradores de cura e buscar soluções que sejam capazes de reduzir o tempo de cura em produtos de cimento reforçado com fio sintético. Além de avaliar em escala laboratorial, também foram avaliados seus desempenhos em testes pilotos na máquina Hatscheck, para avaliar a viabilidade do uso desse novo aditivo.

#### 4. Metodologia

Para avaliar o comportamento da matriz cimentícia com adição dos aceleradores de cura, inicialmente foram realizados testes em escala laboratorial, avaliando o desempenho de corpos de prova em testes de resistência à flexão três pontos, retração (variação dimensional), absorção de água e densidade. Os ensaios foram todos realizados de acordo com as normas ABNT NBR 15498 -Chapas cimentícias reforçadas com fios, fibras, filamentos ou telas – Requisitos e métodos de ensaio. Os aditivos aceleradores de cura foram chamados de aditivo 1, aditivo 2, aditivo 3 e aditivo 4 por questão de sigilo industrial.

Além disso, pelo fato do processo Hatscheck ser um processo de filtração, também se avaliou o impacto causado na formação dos flocos de cimento e *filler*, já que no processo, a lastra verde é originada pelo aglomerado desses flocos. Essa avaliação foi feita através de um ensaio de *Jartest* utilizando as matérias primas do processo em conjunto de um agente floculante (geralmente poliacrilamidas aniônicas), responsável por aglomerar as partículas em suspensão. O objetivo desse ensaio é avaliar se a formação dos flocos é prejudicada em comparação com a suspensão sem o aditivo acelerador de cura.

Caso sejam observados flocos menores ou rápida quebra destes flocos formados, o aditivo impactará diretamente na formação das monopelículas durante a produção, já que os sólidos em suspensão não irão se aglomerar, e passarão pela tela filtrante (feltro), onde deveriam ficar retidos.

Mesmo simulando todas as condições citadas anteriormente, os testes laboratoriais não são fielmente representativos ao processo Hatschek, servindo apenas para nortear e nos promover uma melhor ideia do que pode ocorrer no processo real. Deste modo, para avaliar o comportamento do aditivo fielmente, foram realizados testes industriais nas mesmas dosagens avaliadas em laboratório.

Para avaliar diferentes pontos de dosagem, foram realizados dois testes industriais. O primeiro teste foi feito adicionando o acelerador de cura na masseira, ponto do processo em que há grande vazão de entrada de água, proveniente do cone de decantação e matérias-primas constituintes da receita do produto. Já o segundo teste foi executado inserindo o aditivo através de um sistema de aspersão, onde o *spray* contendo o acelerador teria contato com a superfície das películas da lastra verde.

A fim de avaliar a evolução de resistência do material, os testes normativos foram realizados com 7, 10 e 14 dias de cura ao ar. Os resultados foram compilados, e os produtos acabados cuja resistência não atingiu o valor mínimo exigido por norma retornaram para mais tempo de cura para adquirir maior resistência mecânica e atingir a resistência mínima necessária. Após definida a receita, os sólidos (cimento, *filler* e fio sintético) foram pesados e misturados. Por padrão, o teor de água/sólidos foi definido com 0,45, com isso, é possível definir o total de água que deve ser pesado para cada formulação.

Foram feitos seis corpos de prova de cada formulação, sendo destes 3 usados para ensaio de flexão, e os demais para retração (variação dimensional), absorção e densidade. Cada corpo de prova possui massa de 300 g aproximadamente. Com isso, cada batelada contém 1800 g. A mistura das matérias primas foi feita por uma argamassadeira.

**Figura 10:** Argamassadeira utilizada no preparo de corpos de prova



**Fonte:** *Próprio autor, 2024.*

Após inserir os materiais na cuba, o equipamento foi ligado em rotação constante onde permanece misturando os sólidos com água por 5 minutos. Ao final desse tempo, a massa foi retirada do equipamento e a pasta foi utilizada para preencher os moldes dos corpos de prova.

Nessa etapa, uma prática importante é aplicar alguns golpes com o molde preenchido com a pasta contra a bancada, para adensá-lo, caso contrário o corpo de prova pode ter seu interior preenchido com bolhas de ar, e ter seu desempenho reduzido durante o ensaio mecânico de flexão, ou também uma maior movimentação durante o período de cura, podendo causar grandes desvios entre a mesma amostragem no ensaio de retração (variação dimensional).

**Figura 11:** *Corpos de prova*



**Fonte:** *Próprio autor, 2024.*

Após 24 horas os corpos de prova foram retirados do molde e armazenados em um ambiente com temperatura ( $25 \pm 2$  °C) e umidade ( $70 \pm 5$  %) controladas. Após 7 dias realizou-se o ensaio de resistência à flexão 3 pontos e os corpos de prova de resistência e absorção permaneceram imersos em água por 24 horas para o ensaio de absorção. Este procedimento foi realizado para eliminar a influência do teor de umidade presente em cada corpo de prova, prática esta que também é realizada em ensaios normativos para produtos de fibrocimento.

Passadas as 24 horas de saturação, os corpos de prova foram removidos da água e a água em excesso na superfície foi enxugada com um pano úmido. Em

seguida, foram tomadas as medidas de massa e comprimento do corpo saturado, e também a massa imersa em água com a ajuda de um suporte para sua sustentação para realização do cálculo da densidade aparente.

Realizadas as medições, o corpo de prova seguiu para estufa e permaneceu a uma temperatura de  $105\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 5\text{ }^{\circ}\text{C}$  por 24 horas para secagem, onde foram repetidas as medições do corpo de prova (massa e comprimento). É válido ressaltar que essas medições foram realizadas utilizando um relógio comparador.

Para calcular a variação dimensional, utiliza-se da seguinte expressão:

***Equação 1: Equação para cálculo da variação dimensional***

$$v = \frac{l_i - l_f}{l_f} \cdot 1000$$

***Referência: ABNT NBR 15498, 2021***

$v$  – Variação dimensional, expressa em milímetros por metro (mm/m);

$l_i$  – Comprimento inicial, expresso em milímetros (mm);

$l_f$  – Comprimento final, expresso em milímetros (mm).

Com a massa do corpo de prova após secagem, foi possível calcular o teor de absorção de água através da seguinte expressão:

***Equação 2: Equação para cálculo do teor de absorção de água***

$$\text{abs} = \frac{(m_u - m_s)}{m_s} \cdot 100$$

***Referência: ABNT NBR 15498, 2021***

$\text{abs}$  – absorção de água, expressa em porcentagem (%);

$m_u$  – massa úmida, expressa em gramas (g);

$m_s$  – massa seca, expressa em gramas (g);

Já para determinar a densidade, primeiro determina-se o volume do corpo de prova, e com sua massa seca, foi possível calcular então sua densidade seguindo as expressões abaixo:

***Equação 3: Equação para determinação do volume do corpo de prova***

$$V = m_u - m_i$$

***Referência: ABNT NBR 15498, 2021***

V – Volume, expresso em centímetros cúbico (cm<sup>3</sup>);

m<sub>u</sub> – massa úmida, expressa em gramas (g);

m<sub>i</sub> – massa imersa, expressa em gramas (g).

***Equação 4: Determinação da densidade do corpo de prova***

$$\rho = \frac{m_s}{V}$$

***Referência: ABNT NBR 15498, 2021***

ρ – Densidade, expressa em gramas por centímetro cúbico (g/cm<sup>3</sup>);

m<sub>s</sub> – massa seca, expressa em gramas (g);

V – Volume, expresso em centímetros cúbicos (cm<sup>3</sup>).

## 5. Resultados e discussão

Para avaliar o desempenho dos aditivos, o principal resultado esperado seria o ganho de resistência mecânica. Inicialmente, foi feita uma triagem para avaliar quais seriam os aditivos mais promissores. Visando reduzir o tempo de cura dos produtos de cimento reforçados com fios sintéticos, os aditivos cujos corpos de prova apresentassem maiores resistências mecânicas em menor tempo seriam os escolhidos para seguir com testes escala piloto industrial. Como seriam feitos testes industriais, os aditivos não puderam ser citados devido à sigilo industrial.

De início foram realizados testes de resistência à flexão três pontos, absorção de água, densidade e retração (variação dimensional) para avaliar o comportamento dos diferentes aditivos analisados. Para realização dos ensaios são preparadas pastas de cimento com fio sintético, *filler* calcário e água.

Como o procedimento de preparo dos corpos de prova é feito de forma manual, é esperado que haja desvios entre corpos de prova de mesma formulação, que podem ser causados durante o adensamento da pasta, presença de bolhas de ar no interior da pasta cimentícia, técnicas que podem variar de operador para operador, e diversos outros fenômenos que podem impactar nos resultados dos ensaios que serão realizados posteriormente à essa etapa.

A fim de minimizar esses desvios, todos os ensaios são realizados em triplicata, dessa forma pode-se compreender de melhor forma o comportamento da formulação em estudo, acrescido do desvio padrão da amostragem.

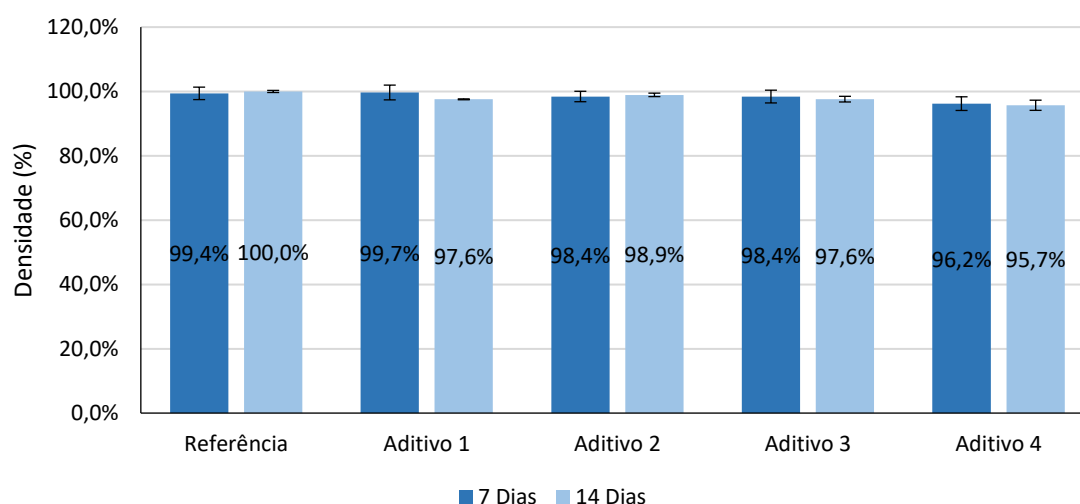
Sendo assim, para realização dos ensaios de resistência a flexão três pontos, são produzidos corpos de prova de dimensões 17,7 x 5,0 x 1,5 centímetros (comprimento x largura x espessura). Já os ensaios de retração (variação dimensional), absorção de água e densidade são feitos com corpos de prova de dimensões diferentes, com 20,0 x 11,0 x 0,5 centímetros (comprimento x largura x espessura).

Buscando avaliar fenômenos que possam ocorrer no processo Hatscheck, os corpos de prova são produzidos com uma receita próxima da receita real do produto. Dessa forma, caso seja observado uma tendência de aumento na retração (variação dimensional) ou queda de resistência a flexão em uma formulação, espera-se que o comportamento se repita no processo. Com os resultados obtidos em laboratório é possível decidir se a implementação da inovação é promissora ou não.

### 5.1. Densidade

Após 7 e 14 dias, foram realizados os ensaios de densidade dos corpos de prova. Os resultados obtidos estão expressos na figura 12, e são relativos à referência com 14 dias de cura:

**Figura 12:** Densidade dos corpos de prova



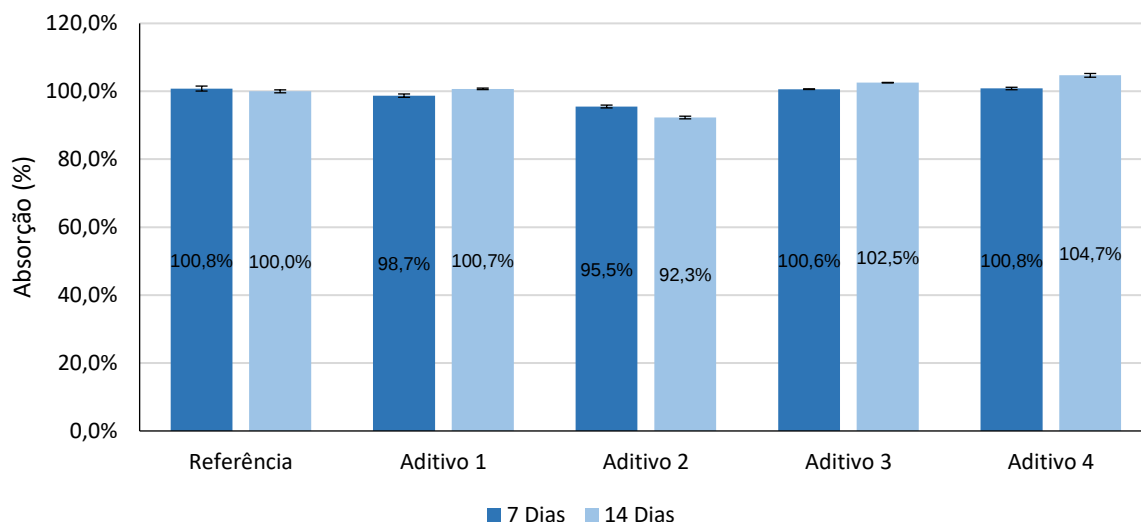
**Fonte:** Próprio Autor, 2024.

Interpretando os resultados, é possível observar uma tendência de diminuição na densidade dos corpos de prova de cimento reforçado com fio sintético. Apesar disso, as variações observadas estão entre 1,1% e 4,3% abaixo da densidade da referência aos 14 dias de cura. Valores dessa magnitude não são considerados significativos para o produto. Dessa forma, é possível afirmar que a queda de densidade não é um fator impactante, mas está relacionada a outros fatores, como sua microestrutura, já que uma menor densidade, indicam uma matriz cimentícia com maior número de porosidade intersticial.

### 5.2. Absorção de água

A absorção de água é uma informação que pode servir como indicativo para a densidade do material. Materiais mais porosos tendem a absorver mais água, já que na matriz cimentícia há mais espaço livre que pode ser acessado por água. Por consequência dessa porosidade, toda água absorvida é evaporada durante a etapa de secagem. Por isso, geralmente são gráficos opostos, ou seja, ao aumentar a densidade, há diminuição da absorção, e vice-versa.

Os resultados obtidos estão apresentados na figura 13, e são relativos à referência com 14 dias de cura:

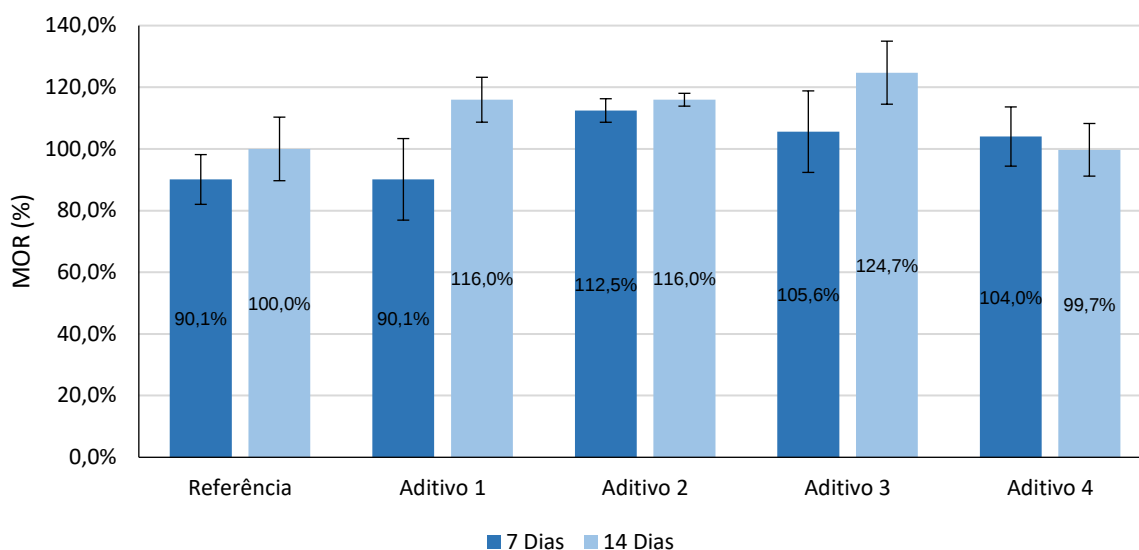
**Figura 13: Absorção de água**

Fonte: Próprio autor, 2024.

### 5.3. Módulo de ruptura (MOR)

Como discutido anteriormente, o módulo de ruptura é o principal motivador desse trabalho. Uma das principais dores da indústria de fibrocimento é o tempo de cura necessário até o atingimento da resistência mecânica mínima exigida por norma. Geralmente, o tempo necessário para liberação dos produtos para comercialização no mercado é de 14 dias após fabricação e cura ao ar. Atingindo a resistência mecânica necessária em menor tempo impacta em um ganho de capital de giro, já que o tempo entre a entrada de matéria prima e a venda do produto final diminui.

Os resultados de módulo de ruptura (MOR) dos corpos de prova determinados através do ensaio de resistência a flexão três pontos obtidos estão indicados na figura 14, e são relativos à referência com 14 dias de cura:

**Figura 14:** Módulo de ruptura (MOR) em laboratório

**Fonte:** Próprio autor, 2024.

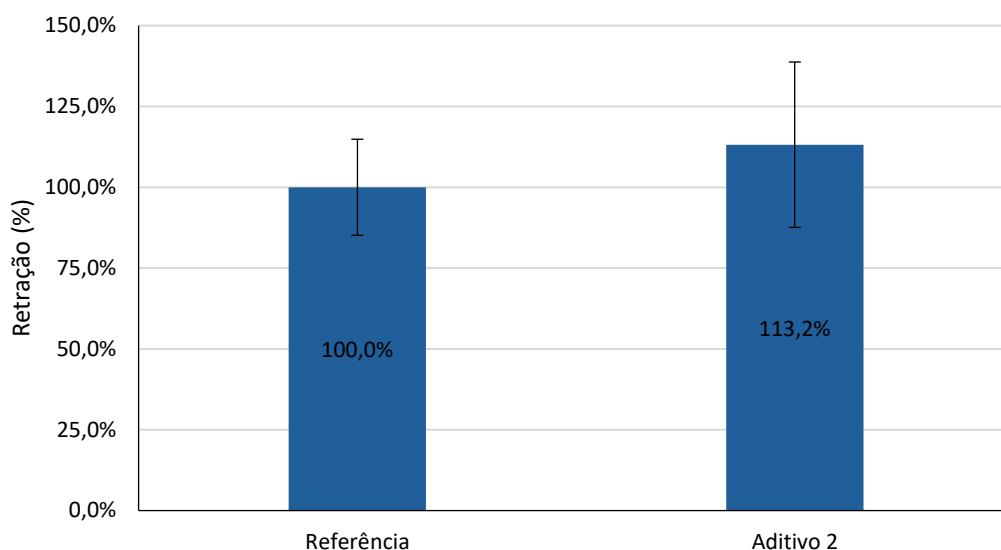
É possível observar que todos os aditivos foram capazes de aumentar a resistência mecânica da matriz cimentícia com 14 dias de cura ao ar, com exceção do aditivo 4. Como o principal objetivo desse trabalho é encontrar um acelerador de cura capaz de aumentar a resistência mecânica de produtos desenvolvidos através da tecnologia CRFS, os melhores resultados são os maiores módulos de resistência com 7 dias de cura ao ar.

Dessa forma, os aditivos mais interessantes são os aditivos 2 e 3, porém, pelo fato do segundo aditivo apresentar um ganho de resistência muito mais expressivo que o terceiro aditivo, para avaliação da variação dimensional, propagação de ultrassom e calorimetria, foi avaliado apenas o desempenho do segundo aditivo.

#### 5.4. Variação dimensional

Os dados de variação dimensional obtidos estão expostos na figura 15, e são relativos à referência com 14 dias de cura:

**Figura 15:** *Variação dimensional (Retração) após 7 dias de cura ao ar*



**Fonte:** Próprio autor, 2024.

Como é possível observar, o uso do acelerador de cura mostra uma tendência de aumento na retração. Esse fenômeno pode ser observado devido ao seu mecanismo de reação. Acelerar a reação de hidratação nas idades iniciais é aumentar também a retração química na matriz. O principal ponto de atenção é justamente as trincas que podem surgir devido a uma movimentação nas primeiras idades de cura do cimento.

Durante as idades iniciais, pequenas forças de tração ou a própria retração química que ocorre na reação de hidratação do cimento podem provocar fissuras. A retração química ocorre devido à própria reação de hidratação, que formam hidratos cuja densidade é menor que a pasta de cimento, ou seja, após a hidratação do cimento, o corpo de prova diminui de tamanho. Intensificando esse fenômeno, é preciso observar atentamente o aparecimento de trincas (Huang, 2021). [25]

### 5.5. Propagação de ultrassom e calorimetria

Outro ensaio realizado para avaliar a reação de cura do cimento foi a propagação de ultrassom pelo corpo de prova. Esse ensaio é realizado preparando uma pasta contendo cimento e *filler* calcário, nas proporções de 75% cimento e 25% *filler*, comparando a evolução da velocidade de propagação do ultrassom ao longo do tempo.

Pelo fato de o ultrassom ser uma onda mecânica, faz-se necessário um meio para sua propagação. Sabendo que a ordem de velocidade do ultrassom decresce na

ordem de estado físico sólido, líquido e gasoso respectivamente, maiores velocidades de propagação indicam um enrijecimento mais veloz da pasta. Com isso, é possível observar o conjunto de fatores que influencia na cura do cimento, tanto reações químicas quanto fenômenos físicos.

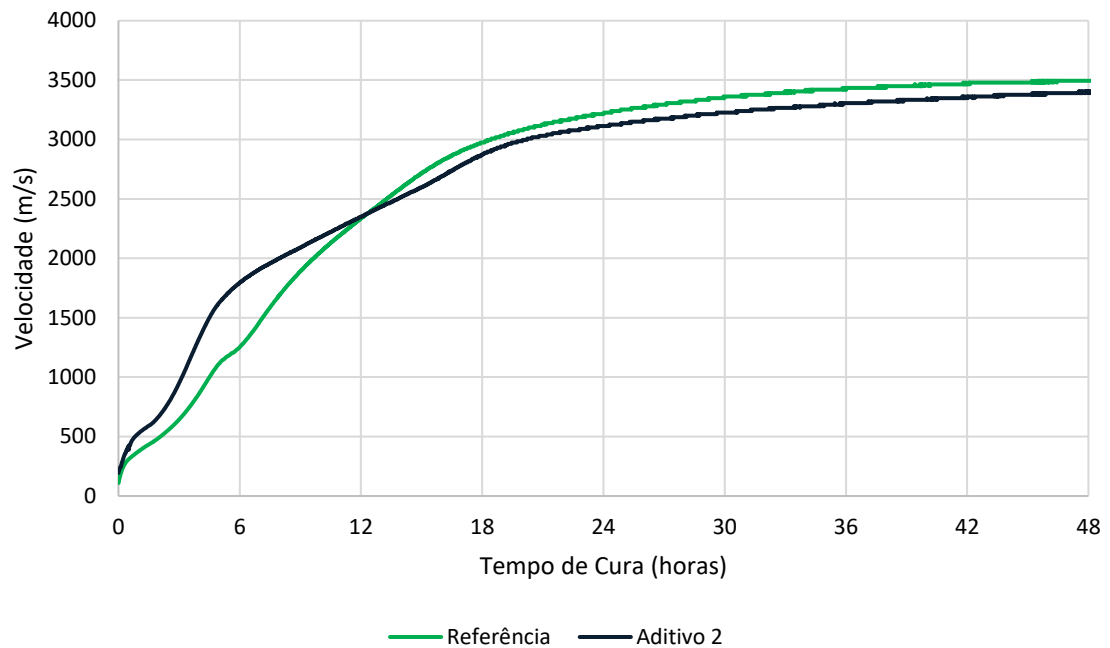
O equipamento utilizado é capaz de ler o tempo necessário para o ultrassom percorrer a amostra. Com o tempo e a distância entre sensores, é capaz de medir a velocidade do ultrassom e sua aceleração.

**Figura 16:** *Equipamento utilizado para medir a velocidade do ultrassom na amostra*

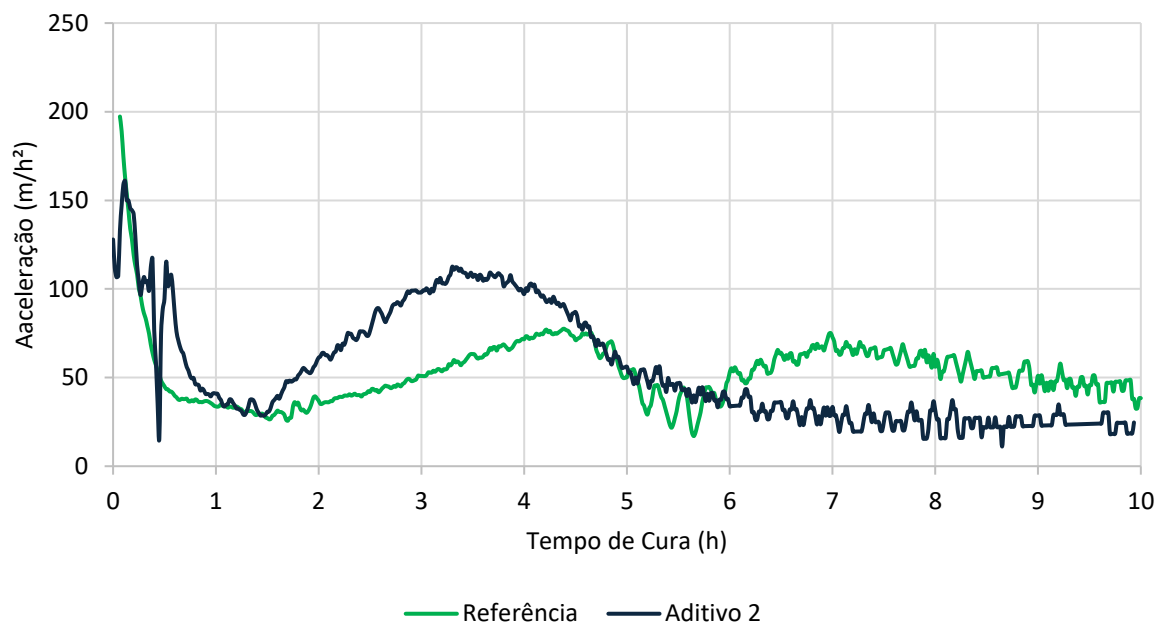


**Fonte:** Próprio autor, 2024.

Os gráficos de velocidade e aceleração na propagação do ultrassom estão representados na figura 17 e 18:

**Figura 17:** Velocidade de propagação do ultrassom

Fonte: Próprio autor, 2024.

**Figura 18:** Aceleração da propagação do ultrassom

Fonte: Próprio autor, 2024.

Nas horas iniciais, é possível observar um grande pico na aceleração do ultrassom no corpo de prova contendo o aditivo 2, aproximadamente as 2 horas após início do ensaio. Observando o gráfico de velocidade do pulso ultrassônico, observa-

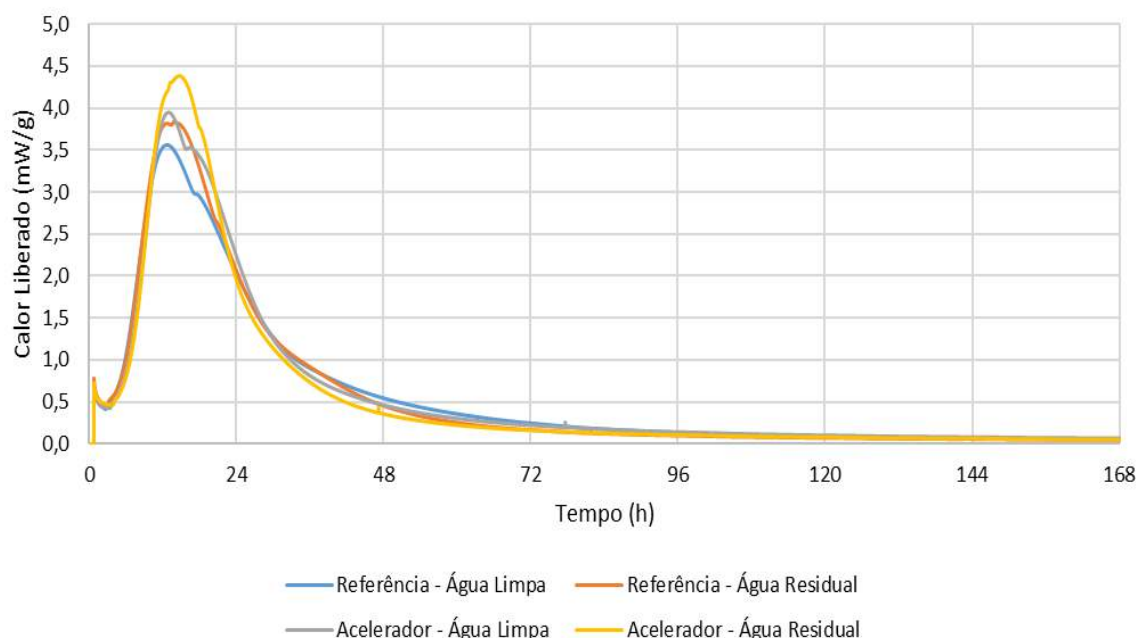
se também um grande aumento na velocidade do mesmo corpo de prova. Nessa faixa de tempo está ocorrendo o início da reação de nucleação, que é a formação dos primeiros cristais de hidrato de silicato de cálcio.

O aumento do pulso ultrassônico nesse momento específico (entre duas e quatro horas) indica que provavelmente esse acelerador tem papel como agente nucleante, ou seja, forma os primeiros núcleos, onde posteriormente ocorrerá toda formação da estrutura cristalina dos hidratos. Essa teoria pode ser fundamentada na afirmação que as alcanolaminas são utilizadas para precipitação mais veloz de etringita, que atuará como agente nucleante nessa etapa inicial, acelerando o ganho de resistência (Jawed; Skalny; Young, 1983; Romano *et al.*, 2016; Taylor, 1990).

Na calorimetria, é possível observar um grande pico de liberação de calor aproximadamente após 14h em todos os casos, sendo mais acentuados para as amostras contendo os aceleradores de cura, tanto em água filtrada como em água residual, quanto na amostra de referência de água residual, sem adição de acelerador de cura.

Esse ensaio foi avaliado utilizando água residual pois se trata de uma prática comum na indústria de fibrocimento que é a reutilização de água. Como o processo possui circuito fechado, sendo grande parte da alimentação de água do processo proveniente dos cones de decantação, é importante avaliar o efeito do aditivo na água residual, já que ao implementá-lo no processo, terá contato direto com essa água altamente alcalina. A alcalinidade está relacionada com o alto teor de sais dissolvidos, principalmente de cálcio, caracterizando o pH próximo de 14 dessa água residual.

**Figura 19:** Reação exotérmica de hidratação do cimento com aditivo acelerador de cura



**Fonte:** Próprio autor, 2024.

Observando a figura 19, é possível notar um aumento na liberação de calor para as amostras contendo acelerador de cura e água residual em relação à referência com água limpa. Esse fato pode ser explicado pela dissolução de aluminato tricálcico ( $C_3A$ ) e precipitação de etringita, que ocorrem justamente no período de máxima liberação de calor. Como citado anteriormente, o mecanismo do aditivo utilizado é potencializar a precipitação de etringita. Por isso, os resultados obtidos estão condizentes com o esperado.

O aumento expressivo no calor liberado com água residual deve-se à grande concentração de íons cálcio livres na solução. Durante a hidratação, o excesso de íons cálcio promove a formação de portlandita ( $Ca(OH)_2$ ), responsável pelo ganho de resistência mais precocemente (Nath, Sarker, 2015).

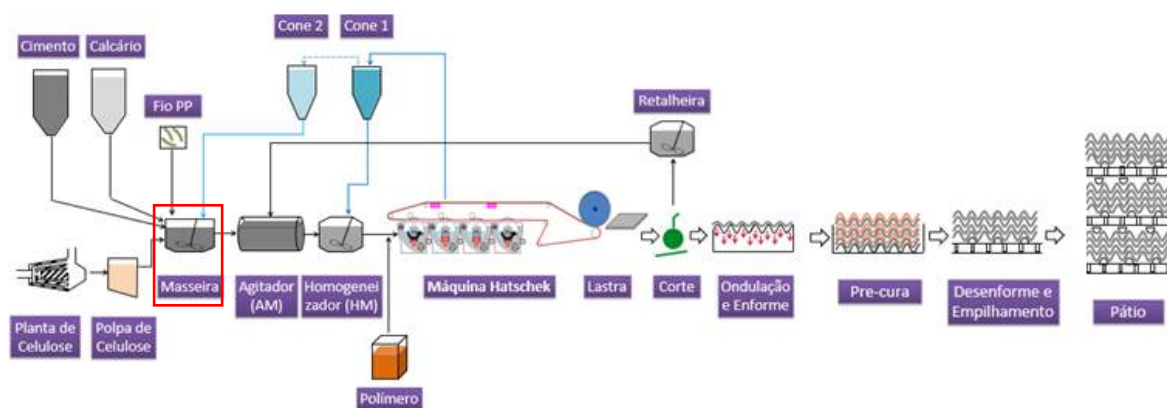
## 5.6. Primeiro teste piloto

Com os resultados positivos obtidos em laboratório, o experimento seguiu para ser avaliado em escala piloto industrial, para verificar o comportamento do processo e do produto com esse novo material.

Para realização do teste, foram avaliadas duas dosagens diferentes do acelerador de cura. A primeira dosagem foi a estudada em laboratório (Teste B), e a segunda, metade da dosagem inicial (Teste C), para avaliar se haveria ganho, e se sim, o quanto isso representaria. Além disso, foram separadas amostras controle, para avaliar o comportamento do produto sem dosagem do aditivo (Teste A)

A dosagem do aditivo foi realizada na masseira (destacada em vermelho na figura 20), ponto de mistura de todas as matérias-primas com a água proveniente dos cones de decantação, que possui como principal característica a alta concentração de sólidos dissolvidos e alcalinidade muito elevada (pH próximo de 14).

**Figura 20:** Ponto de dosagem do aditivo no Processo Hatscheck



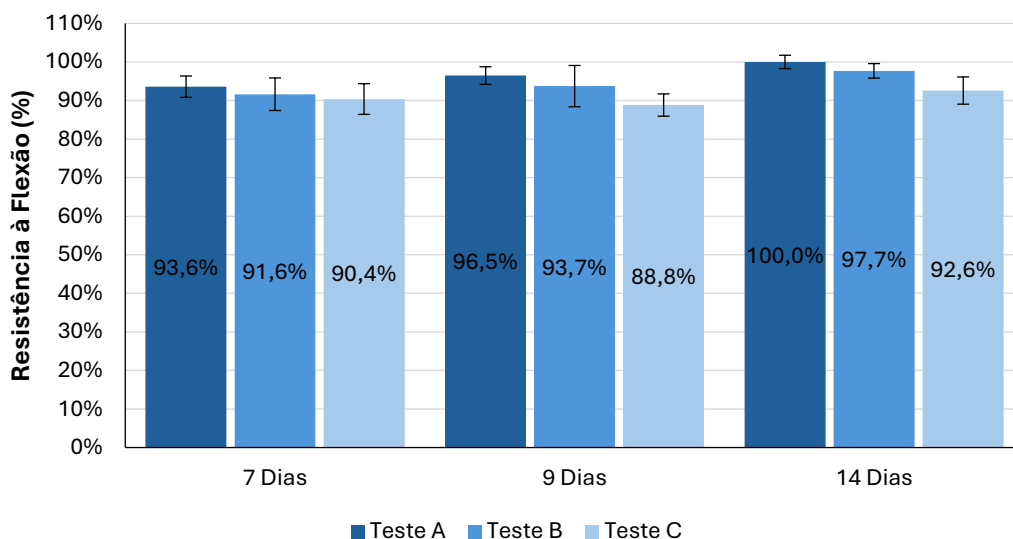
**Fonte:** BRASILIT, 2024.

A fim de avaliar o comportamento do processo com a utilização do aditivo, o teste piloto teve duração relativamente longa, de aproximadamente 6 horas. O objetivo foi saturar a linha com o aditivo, já que o processo tem um ponto de reciclo, onde parte da água retorna pelos cones de decantação. Sabendo disso, é necessário que a dosagem do aditivo seja feita por um longo período até que a concentração do mesmo atinja o equilíbrio, determinado pelas vazões mássicas de saída do aditivo na massa e no reciclo para os cones.

Com o intuito de avaliar o resultado do produto com período de cura menor que o habitual (14 dias), os ensaios de resistência à flexão foram realizados em três datas distintas: sete, nove e quatorze dias. O resultado esperado seria um perfil de resistência decrescente na seguinte ordem: Teste B, Teste C e Teste A, isso pois o Teste B representa a dosagem estudada em bancada, o teste C, metade da concentração do teste B, e o teste A seria a amostra controle, sem o aditivo acelerador.

Os resultados estão indicados na figura 21, considerando o valor de resistência do teste A aos 14 dias como 100%.

**Figura 21:** *Ensaio de resistência mecânica - Primeiro teste piloto*



**Fonte:** Próprio autor, 2024.

Avaliando os resultados foi possível observar que em todas as datas ensaiadas, as amostras do teste A (controle) apresentaram média de resistência maior que ambos os testes contendo o aditivo acelerador de cura, comportamento completamente oposto ao esperado. Os resultados estão expressos considerando a resistência mecânica do teste A (controle) após 14 dias de cura ao ar como referência.

O principal ponto de atenção observado foi a grande queda de resistência mecânica para o teste C, que continha metade da dosagem de acelerador testada em laboratório sendo que o esperado era uma resistência mecânica levemente maior que a referência, seguida do melhor cenário, que seria o teste B, com concentração de aditivo semelhante à avaliada em bancada.

Os testes A e B, controle e com a dosagem avaliada em laboratório respectivamente, estão com resistências mecânicas similares, já que a diferença entre as médias está dentro dos desvios padrões das amostras. Com esses resultados há evidências suficientes para afirmar que o aditivo é ineficaz sendo dosado na masseira.

Buscando compreender o motivo do aditivo ter um comportamento tão superior em laboratório, iniciaram-se discussões sobre os motivos que podem ter causado um resultado tão abaixo do esperado. Após discussão, o principal ponto levantado foi que

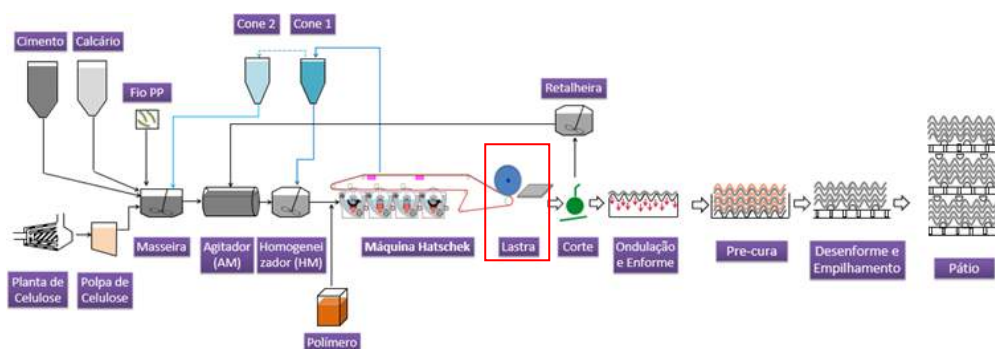
pelo aditivo ser hidrossolúvel, a dosagem na masseira não seria o ponto mais adequado, já que provocaria diluição no grande volume de água presente no processo de formação da massa. Nesta etapa a caixa de tamis é alimentada com uma suspensão com concentração de sólidos extremamente baixa (80 a 150 g/L).

Buscando alternativas para contornar o problema e avaliar formas de dosar o aditivo sem sua diluição no circuito de água, surgiu uma nova ideia de dosar o aditivo em um spray, entre as camadas da lastra. Dessa forma, o aditivo teria contato com maior área possível de massa, e estaria presente entre todas as camadas do produto. A principal problemática desse ponto de dosagem é saber se o aditivo teria eficiência mesmo estando presente apenas nas superfícies das camadas e não na totalidade da massa, em contato íntimo com as partículas de cimento.

### 5.7. Segundo teste piloto

Após verificar uma ineficiência do aditivo quando dosado na masseira, foi definida a estratégia de dosá-lo no *spray* da prensa (detalhe destacado em vermelho na figura 22), em conjunto com um aditivo químico que tem como objetivo a adesão entre películas das camadas do fibrocimento. Esse ponto foi escolhido pelo fato de não haver diluição prévia do aditivo, e sua concentração seria definida diretamente pela vazão. Para calcular a dosagem de aditivo necessária, levou-se em consideração a área de lastra que estava sendo produzida, vazão dos bicos de aspersão e teor de cimento no produto.

**Figura 22:** Ponto de dosagem pelo spray da prensa

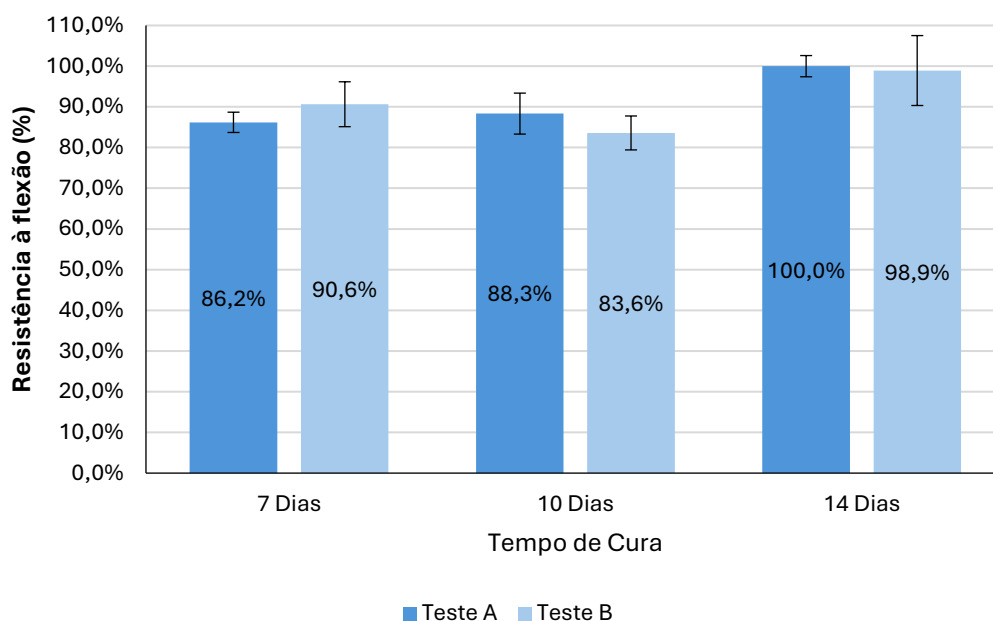


Fonte: BRASILIT, 2024.

Para essa tentativa, foi definida apenas uma concentração de aditivo, que foi a mesma avaliada em laboratório. Neste caso, tivemos apenas o Teste A (controle) e o Teste B (concentração avaliada em bancada).

Avaliando os resultados, foi possível observar novamente uma maior resistência mecânica na referência, comportamento oposto ao esperado. Os valores expressos na figura 23 são relativos à resistência mecânica da referência com 14 dias de cura ao ar.

**Figura 23:** Resistência a flexão comparativa com a resistência da referência com 14 dias de cura ao ar



**Fonte:** Próprio autor, 2024.

Os resultados de resistência à flexão estão bem próximos, mostrando que mais uma vez o aditivo não apresentou o ganho de resistência esperado como nos testes em bancada. Durante o teste piloto, algumas ocorrências podem ter prejudicado o andamento do ensaio, como entupimento dos bicos de aspersão, conforme relatado por alguns operadores. Também é uma possibilidade o acelerador de cura ter reagido com o aditivo de colagem de películas adicionado na aspersão e entupido os bicos, reduzindo sua vazão.

Além disso, a aspersão do *spray* está presente apenas entre as películas do fibrocimento. Este fato pode ser um dos motivos de não ter havido ganho de resistência mecânica no produto. Como a aspersão está presente apenas nas superfícies da camada, é possível e bastante provável que grande parte da massa não tenha entrado em contato com o aditivo, reduzindo seu potencial de influência na cinética de hidratação do cimento.

Mais uma vez, é possível dizer que o teste foi inconclusivo pelo fato das diferenças de resistência estarem bem próximas, sendo distintas pelo desvio padrão da amostragem.

Uma abordagem mais precisa poderia ser feita dosando o aditivo diretamente na massa, sem excesso de água, porém, a realização desse teste piloto é praticamente inviável, já que é uma premissa inerente ao processo Hatscheck trabalhar com uma suspensão de baixa concentração.

Uma sugestão possível para próximos trabalhos seria a avaliação do comportamento do produto dosando o aditivo acelerador de cura diretamente nas caixas de tamis. Neste ponto ocorre a formação das monopelículas, e com a dosagem do aditivo nessa etapa do processo, haveria contato com toda a massa, além de evitar um fator de diluição tão excessivo quanto na masseira.

## 6. Conclusão

Avaliando o potencial de melhoria na hidratação do fibrocimento nas idades iniciais, algumas das alcanolaminas avaliadas nesse trabalho apresentaram melhoria na performance em resistência a flexão mecânica dos corpos de prova produzidos em laboratório.

Alguns ensaios realizados a fim de confirmar a ação desses aditivos foram realizados, como calorimetria e velocidade de propagação de pulsos ultrassônicos. Em ambos, foi possível comprovar a eficiência de algumas dessas misturas. Pelos pulsos ultrassônicos, observa-se aumento na velocidade do ultrassom, evidenciando uma cura acelerada do cimento. Já no calorímetro, utilizando o aditivo acelerador de cura observa-se um pico de liberação de calor expressivamente maior que o cimento por si só, evidenciando maior precipitação de etringita, que é o mecanismo de reação do aditivo avaliado, comprovando sua eficiência.

Com a comprovação e resultados promissores desse aditivo, foram realizados testes piloto na linha de produção de telhas com cimento reforçado com fio sintético, buscando observar comportamento similar em processo real.

No primeiro teste piloto, realizando a dosagem do aditivo pela masseira, local onde ocorre a mistura dos sólidos com a água proveniente dos cones de decantação presentes no processo, não foi observada eficiência no aditivo. De fato, nessa etapa do processo há um grande volume de água presente para hidratação da massa, que pode ter diluído excessivamente o acelerador e diminuído seu efeito.

Buscando outros meios de dosagem que evitassem essa diluição em excesso, foi desenvolvido um segundo teste piloto, com dosagem via spray de aspersão, etapa presente logo após a prensagem da massa, dando origem à lastra. Nessa etapa do processo, a aspersão utiliza de aditivos químicos responsáveis pela adesão de película entre as camadas do fibrocimento.

Durante o teste, operadores reportaram entupimento frequente dos bicos de aspersão. O entupimento dos bicos é algo intrínseco, porém estaria ocorrendo constantemente, o que não é comum. Com isso, suspeita-se que o acelerador de cura possa ter reagido com essa solução de polímero (aditivo químico responsável pela adesão de película), entupindo os bicos. Com isso, menor dosagem de aditivo seria

aspergida na lastra, e conseqüentemente, a melhoria na hidratação do cimento seria menos acentuada.

Outro fato que pode ter forte impacto nos resultados é a presença dessa aspersão apenas entre as películas do fibrocimento, e não em toda a massa. Dessa forma, apenas pontos específicos teriam contato com o acelerador de cura, criando uma espécie de gradiente de concentração do aditivo no produto. Esse gradiente seria mais acentuado na divisão de camadas, e menor em seu núcleo.

Para futuros trabalhos, é possível sugerir a dosagem desse aditivo direto na caixa de tamis, etapa do processo em que a massa já está misturada, e irá formar a lastra após passar pela prensa. Deste modo, evita-se a diluição excessiva do aditivo na masseira, ponto de entrada das matérias primas e água de reuso proveniente dos cones de decantação. Como observado em laboratório, o aditivo apresenta grande potencial, porém sua adequação ao processo produtivo possui grande grau de complexidade.

## 7. Referências bibliográficas

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE CIMENTO PORTLAND. **A nova norma de especificação de cimento ABNT NBR 16697: saiba o que mudou e o que não mudou.** Disponível em: <https://abcp.org.br/a-nova-norma-de-especificacao-de-cimento-abnt-nbr-16697-saiba-o-que-mudou-e-o-que-nao-mudou/>. Acesso em: 3 out. 2024.

BRASILIT. **Guia Técnico Brasilit.** Disponível em: [https://www.brasilit.com.br/sites/brasilit.com.br/files/downloads/1/Guia Técnico Brasilit.pdf](https://www.brasilit.com.br/sites/brasilit.com.br/files/downloads/1/Guia%20Tecnico%20Brasilit.pdf). Acesso em: 23 out. 2024.

CAMPO GRANDE AMBIENTAL. **Quais os processos e vantagens da britagem de entulho?** Disponível em: <https://campograndeambiental.com.br/noticias/quais-os-processos-e-vantagens-da-britagem-de-entulho-28>. Acesso em: 3 out. 2024.

CASTRO, H.; GIANNASI, F.; NOVELLO, C. A luta pelo banimento do amianto nas Américas: uma questão de saúde pública. *Ciência e Saúde Coletiva*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 4, p. 903-911, 2003.

CHEUNG, J.; JEKNAVORIAN, A.; ROBERTS, L.; SILVA, D. **Impact of admixtures on the hydration kinetics of Portland cement.** *Cement and Concrete Research*, v. 41, n. 12, p. 1289-1309, 2011.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA (Brasil). **Manual de normas e procedimentos para elaboração de trabalhos acadêmicos.** Brasília: CNI, 2013. Disponível em: [https://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo\\_18/2013/09/23/4970/20131002162355200901e.pdf](https://arquivos.portaldaindustria.com.br/app/conteudo_18/2013/09/23/4970/20131002162355200901e.pdf). Acesso em: 3 out. 2024.

DUNWEN, H.; PENG, C.; HUI, P.; YIWEI, Y.; QIAOMING, Y.; MIAO, S. **A review and comparison study on drying shrinkage prediction between alkali-activated fly ash/slag and ordinary Portland cement.**

FERNANDES, A. MAPA DA OBRA. NBR 16697: **Requisitos para fabricação de cimento Portland.** Disponível em: <https://www.mapadaobra.com.br/capacitacao/nbr-16697/>. Acesso em: 23 out. 2024.

INSTITUTO NACIONAL DE CÂNCER JOSÉ ALENCAR GOMES DA SILVA. **Diretrizes Brasileiras para Diagnóstico do Mesotelioma Maligno de Pleura.** Rio de Janeiro: INCA, 2020.

INTERNATIONAL AGENCY FOR RESEARCH ON CANCER. **Arsenic, metals, fibres and dusts: review of human carcinogens.** Lyon, France: IARC, 2012. (IARC Monographs on the evaluation of carcinogenic risks, v. 100C).

JAWED, I.; SKALNY, J.; YOUNG, J. F. **Hydratation of Portland Cement.** In: **BARNES, P. (Ed.). Structure and Performance of cement.** 1983. p. 237-318.

JUNG, A.; KANG, H.; KANG, S.; MOON, J. **Alkanolamine-based chemically Enhanced hydration reaction of ordinary Portland cement.** 2023. Disponível

em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0950061823037637>. Acesso em: 3 out. 2024.

KONG, X.-M.; LU, Z.-B.; LIU, H.; WANG, D.-M. **Influence of triethanolamine on the hydration and the strength development of cementitious systems**. Magazine of Concrete Research, v. 65, n. 18, p. 1101-1109, 2013.

LANSINI, B. **Influência da temperatura de cura na resistência à compressão do concreto**. 2016, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/148756/001002134.pdf?sequence=1>. Acesso em: 3 out. 2024.

LIMA, A.B. **Processo produtivo do cimento Portland**. 2013, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6HHC/1/monografia\\_processo\\_produtivo\\_cimento\\_portland.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9C6HHC/1/monografia_processo_produtivo_cimento_portland.pdf). Acesso em: 3 out. 2024.

LIMA, R.M. **Estudo da influência de aditivos químicos na hidratação do cimento Portland**. 2013. Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013. Disponível em: [https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9ACHME/1/disserta\\_\\_o\\_\\_rondinelli\\_nepomuceno\\_lima.pdf](https://repositorio.ufmg.br/bitstream/1843/BUOS-9ACHME/1/disserta__o__rondinelli_nepomuceno_lima.pdf). Acesso em: 23 out. 2024.

LYRA, J. S.; ROMANO, R. C. O.; PILEGGI, R. G.; GOUVÊA, D. **Consolidação de pastas cimentícias contendo policarboxilatos: um estudo calorimétrico e reológico**. Cerâmica, v. 58, p. 137-143, 2012.

MEDIA GROUP. **Fibrocimento: liderança com participação de 32%**. Disponível em: <https://www.mediagroup.com.br/HOST/Eternit/2012/port/24.htm>. Acesso em: 23 out. 2024.

MUNDIM, P.B. **Estudo da modificação superficial das fibras de sisal com ligninas, e sua utilização em matrizes cimentícias**. 2019, Universidade Federal de Uberlândia. Disponível em: <https://repositorio.ufu.br/bitstream/123456789/26273/9/EstudoModificaçãoSuperficial.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2024.

NATH, P.; SARKER, P. K. **Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature**.

NEVILLE, A. M. **Propriedades do concreto**. 2. ed. São Paulo: Pini, 1997.

NEVILLE, A.; BROOKS, J. J. **Tecnologia do concreto**. 2. ed. Porto Alegre: Editora Bookman, 2013.

OLIVEIRA, A. B. **Melhoria do processo Hatscheck, por meio de tratamento de dados históricos, para fabricação de telhas onduladas**. 2010, Universidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/3/3137/tde->

17082010-105831/publico/Dissertacao\_Aline\_Basso\_Oliveira.pdf. Acesso em: 23 out. 2024.

RAMACHANDRAN, V. S. **Action of triethanolamine on the hydration of tricalcium aluminate**. Cement and Concrete Research, v. 3, n. 1, p. 41-54, 1973. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0008884673900604>. Acesso em: 3 out. 2024.

ROMANO, R. C. O.; FUJII, A. L.; SOUZA, R. B.; TAKEASHI, M. S.; PILEGGI, R. G.; CINCOTTO, M. A. **Acompanhamento da hidratação de cimento Portland simples com resíduo de bauxita**. 2016. p. 215-223.

ROMANO, R. C. O.; TAKAHASHI, M. M.; LIBERATO, C. C.; PILEGGI, R. G. **Fresh and hardened characterization of air-entrained cement pastes**. In: XIII ICCI International Congress on the Chemistry of Cement, Madrid, 2011.

TAYLOR, H. F. W. **Cement Chemistry**. London: 1990. 475 p.

THOMAS, J. J.; JENNINGS, H. M. **A colloidal interpretation of chemical aging of the C-S-H gel and its effects on the properties of cement paste**. Cement and Concrete Research, v. 36, p. 30-38, 2006.

TRAN, D. V. P.; SANCHAROEN, P.; KLOMJIT, P.; TANGTERMSIRIKUL, S.; NGUYEN, T. H. Y. **Prediction equations for corrosion rate of reinforcing steel in cement-fly ash concrete**. Journal of Structural Integrity and Maintenance, v. 8, n. 2, p. 91-99, 2023.

ZKG INTERNATIONAL. **The Power of Handling Technology**. Disponível em: [https://www.zkg.de/en/artikel/zkg\\_The\\_power\\_of\\_handling\\_technology-1819471.html](https://www.zkg.de/en/artikel/zkg_The_power_of_handling_technology-1819471.html). Acesso em: 3 out. 2024.