

UNIFEOB

Centro Universitario Octaviano Bastos

PI – Projeto Integrado

Estudo da Cinética de Endurecimento e da Química da Hidratação do Cimento

Curso: Engenharia Civil – EAD

Unidade de Estudo: Projeto Integrado Exatas Aplicadas

Professores: Dra. Daniele Tonon e José Augusto Rabelo

Grupo: Wildiney Alves da Silva **RA:** 24001689

Kaio Natam de Souza França **RA:** 24000492

Ingrid Batista da Costa **RA:** 24000475

Data: 20/05/2025

Sumário

1. Introdução.....	3
2. Revisão Bibliográfica.....	3
2.1 Reações Químicas da Hidratação do Cimento.....	4
3. Experimento 1: Cinética de Endurecimento.....	7
3.1 Objetivo.....	7
3.2 Materiais e Equipamentos.....	8
3.3 Procedimento Experimental.....	9
3.4 Resultados.....	9
3.5 Discussão.....	11
4. Experimento 2: Química da Hidratação.....	12
4.1 Objetivo.....	12
4.2 Materiais e Equipamentos.....	12
4.3 Procedimento Experimental.....	13
4.4 Resultados.....	14
5. Conclusão.....	18
6. Referências.....	18

Estudo da Cinética de Endurecimento e da Química da Hidratação do Cimento

1. Introdução

O cimento Portland é o principal aglomerante hidráulico utilizado na construção civil, sendo essencial para a produção de concreto e argamassas. Sua relevância reside na capacidade de reagir quimicamente com a água, por meio do processo de hidratação, resultando no endurecimento e no desenvolvimento de resistência mecânica. Composto majoritariamente por silicatos de cálcio, aluminatos e ferroaluminatos, o cimento Portland apresenta uma química complexa que influencia diretamente as propriedades do material hidratado. Compreender a cinética de hidratação e os mecanismos químicos envolvidos é fundamental para otimizar o desempenho e a durabilidade das estruturas de concreto, além de mitigar problemas como retração e suscetibilidade a ataques químicos (Mehta & Monteiro, 2014). Este estudo também considera o potencial de inovações, como cimentos compostos, que buscam reduzir o impacto ambiental sem comprometer a eficiência estrutural.

2. Revisão Bibliográfica

O cimento Portland é composto principalmente por clínquer e gesso. O clínquer contém quatro fases principais, que são elas:

- Silicato tricálcico (C_3S), responsável pela resistência inicial;
- Silicato dicálcico (C_2S), que contribui para a resistência a longo prazo;
- Aluminato tricálcico (C_3A), que reage rapidamente e pode causar pega instantânea se não houver gesso; e
- Ferroaluminato tetracálcico (C_4AF), que influencia a cor e contribui moderadamente para a resistência.

Durante a hidratação do cimento, formam-se produtos como o gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), portlandita (Ca(OH)_2) e sulfoaluminatos (etringita), sendo o C-S-H, o principal responsável pela resistência e coesão do material.

A relação água/cimento (a/c) é o fator mais crítico para a resistência e durabilidade: menores relações a/c resultam em matrizes mais densas e resistentes, enquanto o excesso de água aumenta a porosidade e reduz o desempenho. Esse endurecimento não é apenas uma questão de secagem, mas sim o resultado de reações químicas que criam novos compostos responsáveis pela resistência do material (Mehta & Monteiro, 2014).

2.1 Reações Químicas da Hidratação do Cimento

Antes de entrar nas reações, é importante entender a notação abreviada usada nas equações químicas. Essa notação é comum na química do cimento para simplificar a escrita dos compostos, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Notação Abreviada de Compostos do Cimento Portland

SIGLA	PRODUTO	NOME USUAL
C	CaO	óxido de cálcio ou cal
S	SiO ₂	dióxido de silício ou sílica
H	H ₂ O	água

Fonte: Propria adaptada da referência (Mehta & Monteiro, 2014).

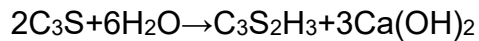
Assim, C₃S significa 3CaO·SiO₂ (silicato tricálcico), C₂S significa 2CaO·SiO₂ (silicato dicálcico), e C₃S₂H₃ representa um composto hidratado de silicato de cálcio, conhecido como gel C-S-H, que será detalhado adiante.

2.1.1 As principais reações de hidratação

Vamos analisar as duas reações principais que ocorrem durante a hidratação do cimento Portland, explicando o que acontece em cada uma delas.

a) Hidratação do silicato tricálcico (C₃S)

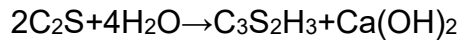
O silicato tricálcico, ou C₃S, é o componente mais abundante no cimento Portland (geralmente representa cerca de 50-70% do clínquer) e é o principal responsável pela resistência inicial do concreto. A reação de hidratação do C₃S com a água pode ser representada pela seguinte equação:



Quando o C₃S entra em contato com a água, ele se dissolve parcialmente e reage para formar dois produtos principais: o gel de silicato de cálcio hidratado, conhecido como C-S-H (representado como C₃S₂H₃), e o hidróxido de cálcio, ou Ca(OH)₂, também chamado de portlandita. O gel C-S-H é o componente mais importante, pois forma uma matriz densa e interligada que confere resistência e coesão ao cimento endurecido. Já o hidróxido de cálcio contribui para o ambiente alcalino do concreto, o que ajuda a proteger o aço de reforço contra corrosão, mas tem um papel secundário na resistência. Essa reação é relativamente rápida, o que significa que o C₃S é responsável pelo ganho de resistência nas primeiras horas e dias após a mistura do cimento com a água.

b) Hidratação do silicato dicálcico (C₂S)

O silicato dicálcico, ou C₂S, é o segundo componente mais importante no cimento Portland (geralmente representa 20-30% do clínquer). Ele também reage com a água, mas de forma mais lenta que o C₃S. A reação de hidratação do C₂S é representada pela equação:



Assim como no caso do C_3S , a reação do C_2S com a água produz o gel C-S-H e hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). A diferença principal está na velocidade da reação: o C_2S reage mais lentamente, contribuindo para o ganho de resistência a longo prazo, ou seja, após semanas ou meses. Além disso, essa reação libera menos hidróxido de cálcio em comparação com a hidratação do C_3S , influenciando na alcalinidade do material.

2.1.2 Produtos da hidratação e suas funções

Para entender o papel de cada um no cimento endurecido, detalham-se abaixo os dois produtos principais formados:

- **Gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H):** Representado como $\text{C}_3\text{S}_2\text{H}_3$, o C-S-H é o principal responsável pela resistência mecânica do cimento. Ele forma uma estrutura microscópica de partículas muito pequenas que se interligam, criando uma matriz sólida e coesa. Essa matriz é o que permite que o concreto suporte cargas e resista a deformações. O C-S-H é um material amorfo (sem estrutura cristalina definida), o que contribui para sua capacidade de preencher espaços e formar uma rede densa.
- **Hidróxido de cálcio ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ou portlandita:** Esse composto é um subproduto das reações de hidratação e aparece na forma de cristais. Embora não contribua significativamente para a resistência do cimento, ele desempenha um papel importante ao manter o pH do concreto elevado (em torno de 12 a 13). Essa alta alcalinidade cria um ambiente que protege as barras de aço usadas em concreto armado contra a corrosão, já que o aço tende a se corroer em ambientes menos alcalinos ou ácidos.

2.1.3 Importância do processo de hidratação

O processo de hidratação é fundamental para que o cimento Portland atinja suas propriedades finais. Ele não apenas transforma a pasta de cimento em um material sólido, mas também determina características como a velocidade de endurecimento, a resistência final e a durabilidade do concreto. A hidratação é um processo contínuo que pode durar semanas ou até meses, dependendo de fatores como a composição do cimento, a quantidade de água, a temperatura e a umidade do ambiente. Por exemplo, o C_3S garante um endurecimento rápido, o que é essencial em obras que precisam de desforma rápida, enquanto o C_2S contribui para a resistência a longo prazo, importante para a durabilidade de estruturas como pontes e edifícios. Além disso, a liberação de calor durante a hidratação (reação exotérmica) pode ser um fator a considerar em grandes concretagens, pois o calor excessivo pode causar fissuras.

Embora as equações apresentadas sejam simplificadas, elas representam bem o que acontece durante a hidratação do cimento Portland. Na realidade, o processo é mais complexo, envolvendo outros componentes do clínquer, como aluminatos de cálcio, que também reagem com a água e influenciam o tempo de pega (início do endurecimento). Além disso, a proporção de água e cimento na mistura, conhecida como relação água/cimento, afeta diretamente a qualidade do concreto: muita água pode enfraquecer a estrutura, enquanto pouca água pode dificultar a hidratação completa. Por isso, a elaboração de um experimento sobre a cinética do endurecimento do concreto, aplicando na prática a teoria da química envolvida e a comprovação dos resultados, é uma grande oportunidade de conhecimento sobre o impacto que podemos sofrer ao alterar a concentração de água nos traços realizados.

3. Experimento 1: Cinética de Endurecimento

3.1 Objetivo

Avaliar a influência da relação água/cimento (a/c) na cinética de endurecimento e no ganho de resistência mecânica de concretos preparados com cimento Portland CP II 32, um cimento composto com resistência característica de 32 MPa aos 28 dias.

Antes de continuar valos entender o que é MPa:

O MPa significa megapascal, uma unidade de pressão equivalente a 1 milhão de pascals, ou seja, $1 \text{ MPa} = 1.000.000 \text{ N/m}^2$.

Esse valor é usado como referência para garantir a segurança e o desempenho das estruturas de concreto, servindo de base para cálculos de dimensionamento em projetos de engenharia civil. Na prática, ela representa o valor de resistência à compressão que, estatisticamente, pelo menos 95% dos corpos de prova de concreto devem atingir ou superar após 28 dias de cura, sob condições padronizadas de ensaio.

Em outras palavras, se você fizer vários ensaios de compressão em amostras desse concreto, apenas 5% delas podem apresentar resistência menor que 32 MPa; o restante deve ser igual ou superior a esse valor.

3.2 Materiais e Equipamentos

Cimento Portland (CP II 32), Areia média lavada, Água potável, Moldes para cura do cimento, Balança de precisão, Recipientes para mistura, Máquina de ensaio de compressão.

3.2.1 Traços Utilizados

Foram utilizados três traços de argamassa, mantendo a proporção areia/cimento constante (3:1 em massa) e variando a relação água/cimento (a/c):

Tabela 1 – Tabela de Traços utilizados no experimentos.

Traço	Relação a/c	Cimento (g)	Areia (g)
A (baixa a/c)	0,40	500	1500
B (média a/c)	0,50	500	1500
C (alta a/c)	0,60	500	1500

Fonte: Propria

A quantidade de água utilizada em cada traço foi, respectivamente: 200 g (A), 250 g (B) e 300 g (C).

3.3 Procedimento Experimental¹

Os corpos de prova foram preparados com traços de concreto variando a relação a/c entre 0,45, 0,55 e 0,65, utilizando cimento CP II 32, areia natural e brita. Após a moldagem, os corpos de prova foram curados em temperatura ambiente. A resistência à compressão foi determinada aos 3, 7 e 10 dias, utilizando uma prensa hidráulica conforme a NBR 5739 (ABNT, 2018).

Nota: A literatura indica a resistência em 28 dias. No entanto, para os testes desenvolvidos, utilizamos 10 dias de tempo de cura para obter dados comparativos no período proposto.

3.4 Resultados

Os valores de resistência à compressão esperados para os diferentes traços estão apresentados na **Tabela 2**, baseados em dados típicos para cimento CP II 32 (Mehta & Monteiro, 2014).

Os valores são aproximados e podem variar conforme o tipo de cimento, a qualidade dos materiais e as condições de cura. O padrão observado é que a

¹ A cura total do cimento se dá após 28 dias, contudo o experimento descrito, não contou com esse tempo, disponível para realizar os testes. Sendo assim para efeito didático, encerramos o projeto com 10 dias de cura.

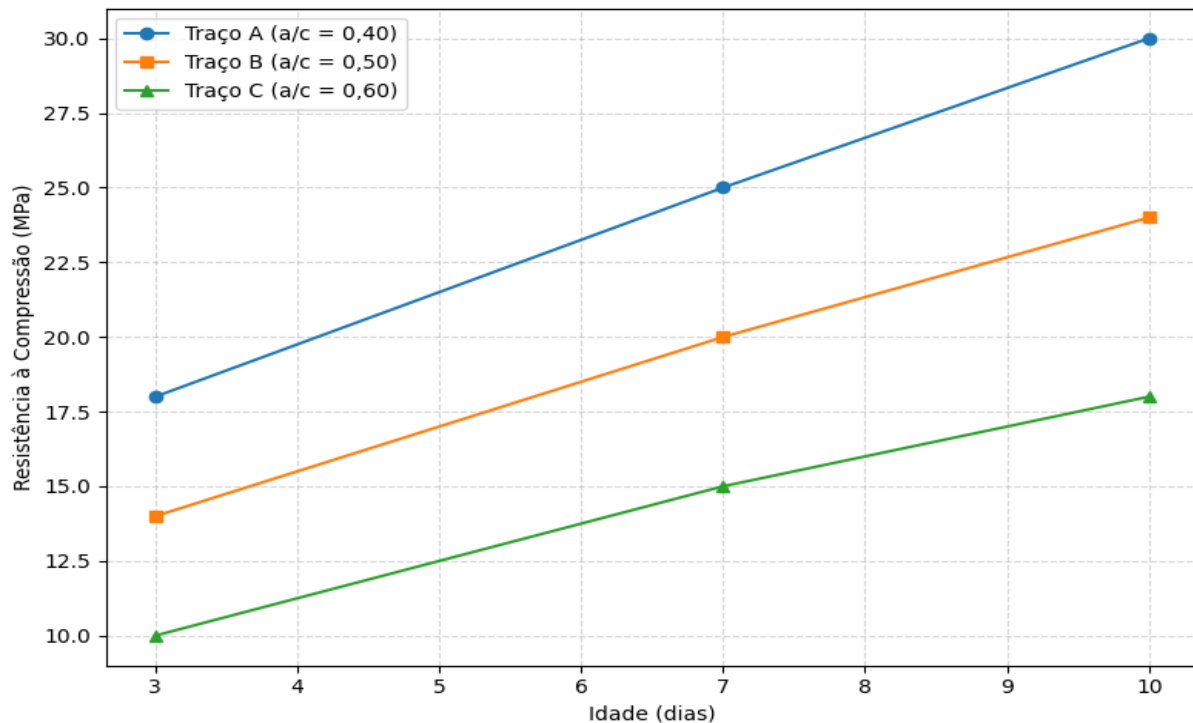
resistência cresce rapidamente nos primeiros dias e tende a estabilizar somente após 28 dias, sendo sempre maior para menores relações água/cimento.

Tabela 2 – Tabela de resistência esperada nos experimentos.

Idade (dias)	Traço A (a/c = 0,40)	Traço B (a/c = 0,50)	Traço C (a/c = 0,60)
3	18	14	10
7	25	20	15
10	30	24	18

Fonte: Própria

Gráfico 1. Evolução da Resistência do cimento



Fonte: Própria

Seguem abaixo as imagens dos corpos de provas realizados para o experimento.

Figura 1 - Imagem dos tarugos de concreto com diferentes proporções de água.



Fonte: Própria

3.5 Discussão

OS traços com menor relação a/c apresentem maior resistência mecânica devido à menor porosidade da matriz de cimento hidratado. No entanto, fatores como a qualidade dos agregados e variações nas condições de cura podem influenciar os resultados. Em aplicações práticas, a escolha da relação a/c deve considerar o tipo de estrutura, as condições ambientais e os requisitos de trabalhabilidade no canteiro de obra.

3.5.1 Cálculo da Cinética de Endurecimento

A evolução da resistência à compressão do concreto pode ser estimada por uma equação empírica, que relaciona a resistência ao tempo de cura:

$$f_c(t) = f_{c,28} \cdot \left(\frac{t}{a + b \cdot t} \right)$$

onde $f_c(t)$ é a resistência à compressão no tempo t (em dias), $f_{c,28}$ é a resistência característica aos 28 dias, e a e b são constantes empíricas (tipicamente, $a=4$ e $b=0,85$).

Por exemplo, para o traço A ($a/c = 0,40$) aos 7 dias:

$$f_c(7) = 32 \cdot \left(\frac{7}{4 + 0,85 \cdot 7} \right) \approx 22,5 \text{ MPa}$$

Esse cálculo permite comparar os resultados experimentais com valores teóricos, auxiliando na análise da cinética de endurecimento do concreto.

4. Experimento 2: Química da Hidratação

4.1 Objetivo

Observar e identificar qualitativamente os principais produtos formados durante a hidratação do cimento e correlacioná-los com as propriedades do material.

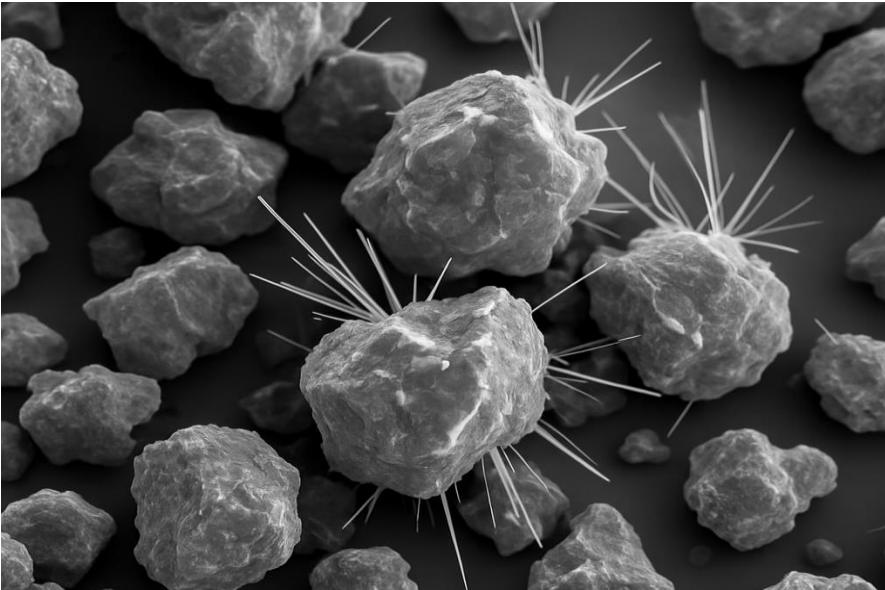
4.2 Materiais e Equipamentos

Os materiais e equipamentos utilizados neste experimento incluem cimento Portland do tipo CII 32, água potável para a preparação da pasta, vidro de relógio ou placa de Petri para manipulação das amostras, microscópio óptico para análise microestrutural, lâminas e lamínulas para montagem das amostras, solução de fenolftaleína como indicador de alcalinidade e recipientes plásticos para armazenamento e testes.

4.3 Procedimento Experimental

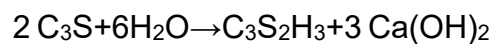
Inicialmente, uma pasta de cimento foi preparada utilizando cimento Portland CII 32 e água, adotando uma relação água/cimento (a/c) de 0,5. Após períodos de cura de 1, 7 e 10 dias, as amostras foram examinadas em um microscópio óptico com ampliação de 100x, visando identificar fases hidratadas características, como agulhas de etringita e cristais hexagonais de portlandita.

Figura 2 – Imagem Ilustrativa de formação de etringita



Fonte: Imagem gerada por AI-GPT4.1

Um teste de fenolftaleína foi realizado aplicando a solução sobre fragmentos de pasta endurecida para avaliar a alcalinidade do material. A coloração rosa ou púrpura resultante indica a presença de hidróxido de cálcio (Ca(OH)_2), um dos produtos da hidratação do cimento. A reação química associada à formação de portlandita pode ser representada pela equação simplificada a seguir:

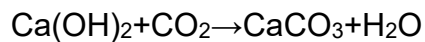


A fenolftaleína, ao reagir em meio alcalino, adquire coloração rosa, confirmando a formação de Ca(OH)_2 durante o processo de hidratação.

4.4 Resultados

4.4.1 Observações Microscópicas e Formação de Produtos de Hidratação

As amostras expostas ao ar apresentem formação de carbonato de cálcio (CaCO_3) devido à reação da portlandita com dióxido de carbono (CO_2) presente na atmosfera. Essa reação pode ser descrita pela equação simplificada:



A visualização do gel de silicato de cálcio hidratado (C-S-H), principal responsável pela resistência mecânica do cimento, pode ser limitada no microscópio óptico devido à sua natureza amorfa. Para uma análise mais precisa, métodos complementares como difração de raios X são recomendados em estudos futuros.

Durante a análise microscópica da pasta de cimento hidratada, espera-se observar diferentes características ao longo do tempo de cura. Nos primeiros minutos, a formação de agulhas finas de etringita, um dos primeiros produtos da hidratação, deve ser visível. Após 24 horas, cristais hexagonais de portlandita (Ca(OH)_2) também devem ser identificados. Essas observações corroboram a formação dos principais produtos da hidratação do cimento, como etringita, portlandita e gel C-S-H, sendo este último de difícil visualização direta ao microscópio óptico, mas essencial para a resistência do material.

4.4.2 Teste de Fenolftaleína e Avaliação da Alcalinidade

No teste de fenolftaleína, ao aplicar a solução sobre fragmentos recém-fraturados da pasta endurecida, a coloração rosa ou púrpura confirma a presença de um meio fortemente alcalino devido à formação de Ca(OH)_2 . Para quantificar essa alcalinidade, pode-se estimar o pH da solução dos poros da pasta de cimento com base em uma concentração típica de Ca(OH)_2 de aproximadamente 0,02 mol/L. Como cada molécula de Ca(OH)_2 libera dois íons OH^- , a concentração de OH^- é cerca de 0,04 mol/L, resultando em um pOH de 1,40 (calculado como $-\log(0,04)$). Utilizando a relação $\text{pH} + \text{pOH} = 14$ a 25°C, obtém-se um pH de 12,60. Esse valor confirma a alta alcalinidade do meio, consistente com a mudança de cor da fenolftaleína, que ocorre acima de pH 8,2.

Figura 3 – Imagem ilustrativa do cimento com coloração vermelha indicando pH básico



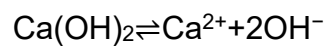
Fonte: Própria

Figura 4 -Imagem ilustrativa do Tarugo de cimento com coloração vermelha indicando pH básico



Fonte: Própria

Ca(OH)_2 é uma base que se dissocia na água da seguinte forma:



Dada uma concentração de 0,02 mol/L para Ca(OH)_2 , a concentração de íons OH^- será o dobro disso, porque cada molécula de Ca(OH)_2 libera dois íons OH^- :

$$[\text{OH}^-] = 2 \times 0.02 = 0.04 \text{ mol/L}$$

Agora, o pOH, que é o logaritmo negativo da concentração de íons hidroxila:

$$\text{pOH} = -\log_{10}[\text{OH}^-] = -\log_{10}(0.04) = 1.40$$

O pH usando a relação entre pH e pOH a 25°C, onde $\text{pH} + \text{pOH} = 14$ temos:

$$\text{pH} = 14 - \text{pOH} = 14 - 1.40 = 12.60$$

Esse valor de pH de aproximadamente 12,6 é consistente com o ambiente altamente alcalino da água dos poros do concreto, explicando a cor rosa/púrpura observada no teste de fenolftaleína (já que a fenolftaleína muda de cor acima de pH 8,2).

Após imersão prolongada em água, a formação de precipitados brancos de carbonato de cálcio pode ser observada, resultante da reação do Ca(OH)_2 lixiviado com o CO_2 do ar. O CO_2 dissolve-se na água formando ácido carbônico (H_2CO_3), um ácido fraco com constantes de dissociação $K_{a1} = 4,45 \times 10^{-7}$ e $K_{a2} = 4,69 \times 10^{-11}$, que reage com o Ca(OH)_2 , reduzindo gradualmente a alcalinidade do material.

4.5 Discussão

A lixiviação de portlandita e sua subsequente conversão em carbonato de cálcio podem levar à redução da alcalinidade do concreto, aumentando o risco de corrosão das armaduras em estruturas reforçadas. Inicialmente, a alta alcalinidade do concreto, com pH em torno de 12,6 devido à presença de Ca(OH)_2 , atua como uma barreira protetora para o aço de reforço. No entanto, a reação de carbonatação, impulsionada pela formação de ácido carbônico (com constantes de dissociação ácida $K_{a1} = 4,45 \times 10^{-7}$ e $K_{a2} = 4,69 \times 10^{-11}$), pode reduzir o pH para valores abaixo de 9 ao longo do tempo, comprometendo essa proteção.

Esse processo evidencia a necessidade de proteger o concreto contra a exposição excessiva a agentes atmosféricos, especialmente em ambientes agressivos como regiões costeiras, onde a presença de sais e umidade pode acelerar a degradação. Medidas preventivas, como o uso de revestimentos protetores ou aditivos específicos, podem ser consideradas para mitigar esses efeitos e prolongar a durabilidade das estruturas.

5. Conclusão

Os experimentos realizados forneceram uma compreensão aprofundada sobre a influência da relação água/cimento na cinética de endurecimento e nos compostos químicos formados durante a hidratação do cimento Portland. Os traços com menor relação *a/c* apresentaram maior resistência mecânica devido à formação de uma matriz cimentícia mais densa. A análise microscópica revelou a presença de fases características como portlandita, etringita e o gel C-S-H, essenciais para a coesão e a resistência do material. Ademais, o teste com fenolftaleína confirmou a elevada alcalinidade do concreto, com pH estimado em aproximadamente 12,6, resultante da formação de hidróxido de cálcio, fator crucial para a proteção de armaduras metálicas contra corrosão. Esses resultados têm aplicação direta na formulação de concretos para diferentes tipos de construção, evidenciando a necessidade de controles rigorosos da relação *a/c*, das condições de cura e da proteção contra agentes atmosféricos nos canteiros de obra, a fim de assegurar a resistência e a durabilidade das estruturas de concreto.

6. Referências

- ABNT. NBR 5738: Concreto - Procedimento para moldagem e cura de corpos de prova. Rio de Janeiro: ABNT, 2015.
- ABNT. NBR 5739: Concreto - Ensaio de compressão de corpos de prova cilíndricos. Rio de Janeiro: ABNT, 2018.
- MEHTA, P. K.; MONTEIRO, P. J. M. *Concreto: Estrutura, Propriedades e Materiais*. 2. ed. São Paulo: IBRACON, 2014.
- NEVILLE, A. M. *Propriedades do Concreto*. 5. ed. São Paulo: Bookman, 2011.