



CREA
Conselho Regional de
Engenharia e Agronomia



AVALIAÇÃO DA MATURIDADE EQUIVALENTE DO CONCRETO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE GRADUAÇÃO DA UNIVERSIDADE SÃO FRANCISCO

INACIO, Renan F. S.¹
BUENO, Sthéphany M. A.²
BAPTISTA, Cândida M. C.³
MORITA, Eugênio⁴
Universidade São Francisco
sthephany.bueno@mail.usf.edu.br
renan.f.s.i@hotmail.com

¹Renan Fernando Silva Inacio, Aluno do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista - SP;

²Sthéphany Mayara Aparecida Bueno, Aluna do Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista - SP;

³Cândida Maria Costa Baptista, Professora e Orientadora Teórica, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista - SP;

⁴Eugênio Morita, Professor e Orientador Temático, Curso de Engenharia Civil, Universidade São Francisco; Campus Bragança Paulista - SP.

Resumo

Este artigo objetiva apurar através de dados técnicos, equações e testes em laboratório, informações para embasamento de gráficos com dados experimentais que relacionam a temperatura do concreto com a idade e a resistência através do método de maturidade do concreto. Os pesquisadores desenvolveram um dispositivo de medição remota, que realiza a transmissão de dados de leitura em tempo real, para a coleta e posterior tratamento estatístico, realização de gráficos e tabelas com base nas amostras testadas.

Palavras-chave: maturidade do concreto, energia de ativação e temperatura.

Introdução

A proposta deste artigo é desenvolver um estudo sobre o método de maturidade do concreto. A investigação terá o intuito de verificar se o método de maturidade do concreto é eficaz no Brasil, observando a relação entre temperatura, tempo de cura e a resistência do concreto. Este método é especialmente útil em projetos de construção civil, onde é necessário controlar o tempo de liberação de formas, remoção de escoramentos, aplicação de cargas, entre outros. O método é extremamente veloz, devido à fácil obtenção dos dados, seu dinamismo e

visualização gráfica. Este estudo foi baseado na norma técnica internacional C 1074 (ASTM ¹, 2019), amplamente usada na América do Norte e foram realizadas pesquisas para o referencial teórico fundamentadas em artigos científicos e materiais a respeito do tema, através de meios físicos e digitais. Durante os ensaios fez-se uso de ferramentas para movimentação e moldagem do concreto, bem como, para auxiliar na captação de dados, foi desenvolvido um aparelho de medição de temperatura com transmissão remota.

Contexto histórico

Segundo Nicholas J. Carino e HS Lew (2001), a princípio, no ano de 1973 em 02 de março, um edifício de numerosos andares, no condado de Fairfax, Virgínia, sofreu um desmoronamento e a consequência desta tragédia foi além de prejuízos financeiros, ocasionando a morte de quatorze trabalhadores e trinta e quatro feridos. A investigação que se desenrolou após o desmoronamento presidida pelo *National Bureau of Standards (NBS – Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia)* constatou que a causa do desmoronamento estava relacionada à remoção prematura das formas de concreto, resultando em tensões que excederam a capacidade do concreto jovem. Este incidente gerou incertezas, a principal hesitação foi se o método usual de determinação da resistência seguiria sendo uma alternativa prudente.

Por conta disso, o método de maturidade foi introduzido como uma segunda abordagem. Em suma, trata-se de utilizar dados de temperatura para calcular a resistência do concreto com base nas condições de cura. O índice de maturidade é uma medida importante para prever a resistência do concreto e permite que engenheiros e construtores monitorem o processo de cura e tomem decisões com mais propriedade sobre quando remover as formas, aplicar cargas sobre os elementos estruturais ou outras decisões que precisem ser tomadas com base na resistência do concreto (CARINO E LEW, 2001).

A pesquisa subsequente da NBS explorou a aplicação do método de maturidade em condições de campo simuladas, usando várias misturas de concreto para fabricar corpos de prova de lajes em moldes cilíndricos. Os resultados destacaram a complexidade das relações entre o índice de maturidade e a resistência do concreto, especialmente quando se trata de diferenças entre condições de campo e laboratório (CARINO E LEW, 2001).

¹ ASTM *International - American Society for Testing and Materials* - (Sociedade Americana de Testes e Materiais)

Uma importante descoberta do estudo foi a influência das condições ambientais, como temperatura e umidade, nas propriedades do concreto. Amostras curadas ao ar livre experimentaram temperaturas iniciais diferentes das amostras curadas em laboratório, o que afetou suas propriedades, incluindo resistência (CARINO E LEW, 2001).

Além disso, o estudo indicou que amostras com temperaturas iniciais altas retornaram resistências mais altas nas primeiras idades, porém resistências baixas a longo prazo. Essa descoberta ressalta a importância de ser considerada para fins de cálculo tanto a resistência inicial quanto a resistência final (CARINO E LEW, 2001).

O estudo demonstra que a relação entre maturidade e resistência do concreto é complexa e pode variar dependendo das condições específicas de cura e ambientais. Portanto, é crucial levar em consideração esses fatores ao projetar e construir estruturas de concreto para garantir sua segurança e desempenho a longo prazo (CARINO E LEW, 2001).

Reação Química

Nas reações químicas é possível observar dois processos de reação diferentes, os endotérmicos e os exotérmicos: os endotérmicos são processos nos quais os reagentes estão recebendo calor e para identificar um processo endotérmico você pode observar, se a energia é somada aos reagentes na equação química ou se ela está sendo subtraída dos produtos. A variação de entalpia (ΔH) para reações endotérmicas é positiva, o que significa que a energia dos produtos é maior do que a energia dos reagentes (BRASIL ESCOLA, 2017).

Já para processos exotérmicos, será diferente, ao invés de absorver o calor, o material liberará calor. Dessa forma, pode-se identificar a reação exotérmica observando, se a energia é somada aos produtos na equação química ou se está sendo subtraída dos reagentes. A variação de entalpia (ΔH) para reações exotérmicas é negativa, o que significa que a energia dos produtos é menor do que a energia dos reagentes (BRASIL ESCOLA, 2017).

Segundo White (2005), a cinética química é o estudo da velocidade das reações químicas e dos fatores que a afetam. A velocidade de uma reação química, é a taxa na qual os reagentes são convertidos em produtos, e para que seja determinada essa velocidade existem 4 fatores que vão influenciar, sendo eles o estado, a concentração dos reagentes, a temperatura com que a reação ocorre e o catalisador. Para que se possa medir a velocidade dessas reações

existem duas formas, pela velocidade de consumo dos reagentes, ou pela velocidade de criação do produto.

A velocidade média de reação é descrita conforme equação (1):

$$A = -\frac{\Delta[A]}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

A é a concentração dos reagentes [mol/l];

t é o tempo [segundos].

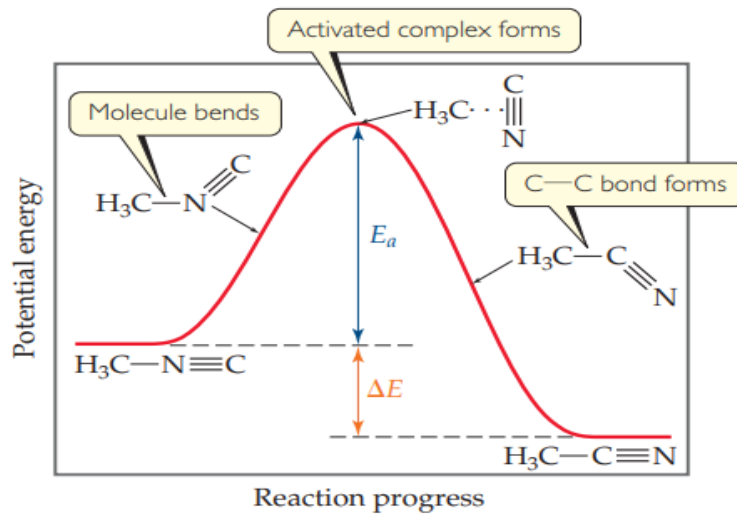
Para a variação da concentração no tempo, pode-se levar em consideração que a velocidade média é dada com base no desaparecimento dos reagentes e a unidade de medida adotada para o cálculo da velocidade, será em mol/L*s. A velocidade média irá diminuir com o passar do tempo, e os dados obtidos poderão ser representados por meio de gráficos, também pode-se dizer que a velocidade no tempo é igual a tangente da inclinação da curva da função de uma reta (WHITE, 2005).

Além da concentração dos reagentes, outro fator muito importante para a velocidade da reação é o modelo de colisão, que deve estar relacionado à concentração dos reagentes. Essas colisões precisam estar em um modelo de colisão e um arranjo de moléculas que facilite com que as reações químicas aconteçam mais rapidamente (WHITE, 2005).

Energia de Ativação

Segundo Brown e LeMay (2012), outro ponto importante para determinar a velocidade de uma reação química é a energia de ativação, trata-se da energia mínima necessária para que uma reação química ocorra. As moléculas dos reagentes precisam receber uma energia que faça com que a barreira de transformação das moléculas seja rompida e dessa forma, permitir que novas ligações aconteçam. A energia de ativação é representada como a diferença entre a energia dos reagentes e o ponto mais alto da parábola (complexo ativado), como se pode observar na representação gráfica de uma reação exemplo, conforme a figura 1:

Imagem 1 - Complexo ativado



Fonte: *Science Chemistry The Central Science*, 12th.

O complexo ativado, também chamado de estado de transição, é o ponto mais alto na parábola que representa a energia da reação. Neste estado, as moléculas dos reagentes estão em uma configuração instável, onde ligações antigas estão rompidas, mas as novas ligações ainda não estão completamente formadas (WHITE, 2005).

Brown e LeMay explicam que em sistemas moleculares as partículas estão em movimento e a energia é transferida entre elas quando elas colidem. A medida que o número de colisões aumenta, algumas moléculas adquirem energia suficiente para desencadear novas colisões. A partir daí a taxa de reações aumenta e, por consequência, a temperatura aumenta. (BROWN e LEMAY, 1988 apud Santos Beatriz, Aguilar Maria, Chahud Eduardo, 2021, p 312, acesso em 02/09/2023).

Na aplicação da energia de ativação para o método de maturidade é importante lembrar que os experimentos executados por *Arrhenius*, foram feitos em misturas cuja composição era simples, compostas por reagentes, nas quais as reações químicas ocorriam em uma única fase, já o concreto é obtido por diferentes reações químicas, a partir de reações químicas anteriores que geraram os insumos que irão ser utilizados para a composição do mesmo, por isso o nome que é dado a energia de ativação do concreto é energia de ativação aparente (LIMA, 2015).

A energia de ativação é uma constante para uma reação química específica. No entanto, a energia de ativação aparente pode variar, conforme algumas condições, como temperatura, grau de hidratação, maturidade do concreto, entre outras. Isso significa que a taxa de hidratação

do cimento pode ser influenciada pela temperatura e pelo grau de maturidade do concreto, e a energia de ativação aparente é usada para modelar essa variação (LIMA, 2015).

A ideia de “energia de ativação” foi proposta por Svante Arrhenius em 1888 para explicar por que as reações químicas não ocorrem instantaneamente quando os reagentes são reunidos, mesmo embora os produtos da reação estejam em um estado de energia mais baixo. (BROWN e LEMAY, 1988 apud N.J. Carino and H.S. Lew, 2001, p 312, acesso em: 11/09/2023).

A obtenção da energia de ativação aparente do concreto é realizada por meio do método experimental. Para a execução do método é necessária a preparação de misturas de pasta de cimento de diferentes traços em temperaturas diferentes. Com o monitoramento da resistência à compressão realizada por meio de ensaios. Essas informações são dispostas graficamente por meio de um logaritmo natural de taxa constante versus o inverso da temperatura de cura (LIMA, 2015).

Segundo a norma internacional C 1074 (ASTM, 2019), os ensaios para a determinação da energia de ativação por meio do método experimental podem ser realizados por meio de provetes de ensaio com as argamassas a serem testadas. Esses provetes devem ser submetidos a três temperaturas diferentes dentro da água, sendo entre elas a temperatura máxima e a temperatura mínima esperadas para o local e a terceira temperatura deve estar em uma média entre as duas temperaturas, para assim obter uma relação entre resistência, idade e temperatura do concreto. A argamassa deve ser preparada usando uma proporção de agregado miúdo semelhante a que seria usada de agregado graúdo no concreto a ser investigado.

Através da análise dos dados citados, pode-se determinar a energia de ativação, permitindo obter uma variável que poderá ser aplicada posteriormente na fórmula do método de maturidade. Com base na equação de *Arrhenius* reformulada pode-se determinar a energia de ativação, onde **E_a** é a Energia de ativação [J/mol], **R** é a constante dos gases [J/K*^omol], **A** é o fator de frequência que é uma probabilidade de colisões favoráveis [adimensional] e **T** é a temperatura em escala absoluta [K], fazendo com que ela se torne a equação de uma reta, ela irá fornecer dados sobre o início e fim das reações químicas (WHITE, 2005).

A imagem 2 apresenta a equação de Arrhenius reformulada.

Imagem 2 – Equação de Arrhenius reformulada

$\ln k = \ln A - \frac{Ea}{R} \left(\frac{1}{T} \right)$	←----- Equação de Arrhenius
↓ ↓ ↓ ↓	
$y = a + b \cdot x$	←----- Equação de uma reta

Fonte: www.cienciaemacao.com.br

Materiais e métodos

Instrumentação

Segundo a norma internacional C 1074 (ASTM, 2019), a incorporação de sensores de temperatura e o monitoramento contínuo da temperatura do concreto é importante para que o método de maturidade seja efetivo e proporciona ao usuário, um maior dinamismo com as informações. Este procedimento desempenha um papel fundamental na segurança e na garantia de qualidade em projetos de construção, auxilia na tomada de decisões sobre o momento adequado para operações como, a remoção de formas ou o pós-tensionamento.

Para monitorar e registrar temperatura em função do tempo, é essencial fazer o uso de dispositivos adequados que atendam aos requisitos de precisão e qualidade que a norma impõe. Dentre esses dispositivos estão termopares, termistores e registradores de dados digitais (ASTM, 2019, C 1074).

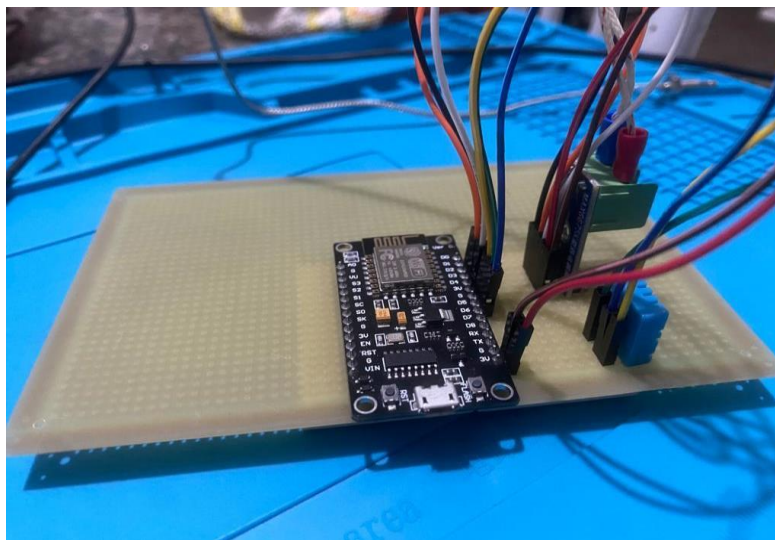
Esses equipamentos são essenciais para o registro contínuo de dados de temperatura ao longo do tempo. Eles podem ser programados para registrar leituras em intervalos específicos, o que facilita a análise dos dados. Além disso, muitos registradores de dados digitais permitem a transferência rápida e fácil dos dados para análise posterior (ASTM, 2019, C 1074).

A precisão do dispositivo de registro de temperatura é fundamental, uma vez que pequenas variações na temperatura podem afetar significativamente a maturidade do concreto e, por consequência, a estimativa da resistência, a escolha do dispositivo deve considerar a durabilidade e a resistência às condições do ambiente da construção civil. Em algumas situações, os dispositivos podem ficar sujeitos a umidade, poeira ou vibrações, portanto, é necessário que eles sejam resistentes a muitas dessas interferências. O dispositivo que foi usado

para esse estudo foi desenvolvido pelos pesquisadores, levando em consideração a necessidade da interação do objeto de estudo com o banco de dado remoto (ASTM, 2019, C 1074).

Os equipamentos utilizados para o desenvolvimento do dispositivo tratam-se de um micro controlador ESP8266 que possui interação via *wi-fi* com a *internet*, o que possibilita a coleta de dados de forma remota instantaneamente. Também foram usados para o desenvolvimento desse dispositivo o sensor de temperatura e umidade DHT11. Os dados apresentam que este sensor é essencial para que o estudo se mantenha seguindo as diretrizes da norma internacional C 511 (ASTM, 2021), que aborda a necessidade de manutenção de uma temperatura que não ultrapasse 24 °C com a tolerância de 4 °C para mais ou para menos. Para medição das temperaturas do concreto foi utilizado o módulo MAX6675 que faz o gerenciamento e a *interface* do termopar com o microcontrolador. O termopar escolhido é do tipo K ele apresenta uma acuracidade de 1,5 % e pode medir temperaturas de 0 °C a 400 °C, as ligações foram feitas através de jumpers e o microcontrolador foi interligado a um *display LCD* com uma placa controladora do tipo I2C para exibir os dados da medição em tempo real. Toda a programação do dispositivo foi criada através de bibliotecas da IDE (*Integrated development environment* - Ambiente de desenvolvimento integrado) do Arduino. Por fim, o sistema de equipamentos foi colocado dentro de um compartimento para evitar impregnação de poeira, umidade e outras interferências, deixando apenas orifícios para passagem de ar, alimentação 5V e a saída do termopar. A imagem 3 exibe o dispositivo antes de ser alocado no compartimento para proteção.

Imagem 3 – Dispositivo sem compartimento



Fonte: De autoria própria.

Procedimento para desenvolver a relação força-maturidade

O método de Nurse-Saul é uma ferramenta imprescindível para a avaliação e o controle da qualidade do concreto em projetos de construção civil, permitindo estimar a resistência com base na maturidade do concreto. No entanto, é importante seguir rigorosamente os procedimentos e padrões relevantes, considerar suas limitações e caso necessário para projetos específicos, complementá-lo com outros testes (SOUTSOS; KANAVARIS, 2018)

Os testes de resistência são essenciais para determinar a relação entre a maturidade do concreto e sua resistência, devem ser realizados em intervalos específicos, conforme definido no procedimento. Se a faixa de resistência dos corpos de prova exceder 10 % da média, isso pode indicar uma variação significativa na mistura de concreto e o corpo de prova deve ser descartado (ASTM, 2019, C 1074).

É de grande importância garantir que o concreto tenha atingido a resistência desejada antes que a estrutura seja submetida à sobrecarga (ASTM, 2019, C 1074).

Os procedimentos a serem executados neste método começam pelos ensaios experimentais para calibração do método, que é realizada pela moldagem dos corpos de prova segundo norma NBR 5738 (ABNT, 2015) e seu rompimento conforme norma internacional C 1074 (ASTM, 2019). Para a moldagem destes corpos de prova, deve-se preparar a mistura de concreto de acordo com as proporções dos insumos que representam o traço a ser usado *in- loco*², para que o objeto de estudo possa adquirir as mesmas propriedades dele (ASTM, 2019, C 1074).

É necessário produzir no mínimo 15 corpos de prova para os testes que serão realizados nas idades de 1, 3, 7, 14 e 28 dias, sendo 2 corpos de prova para cada idade, nas quais devem ser consideradas as médias das resistências da idade equivalente (ASTM, 2019, C 1074).

Segundo a norma internacional C 1074 (ASTM, 2019), a instalação dos sensores de temperatura deverá assumir a profundidade de aproximadamente 15 mm a partir do centro, mas a localização exata pode depender das exigências do projeto. Os sensores de temperatura devem ser conectados a instrumentos de medição da maturidade ou a dispositivos que registram a temperatura e possuem armazenamento de dados. Esses instrumentos proporcionaram a coleta ininterrupta de dados de temperatura interna do concreto ao longo do tempo. A imagem 4 exhibe o dispositivo (a) alocado no compartimento de proteção e realizando a leitura da temperatura do corpo de prova (b).

² Expressão que indica realizado em campo.

Imagem 4 – Dispositivo realizando leitura das temperaturas do corpo de prova



Fonte: De autoria própria

Segundo a norma internacional C 1074 (ASTM, 2019), o ambiente de cura deve ser adequado para que seja mantida a umidade necessária para o concreto. Isso pode ser feito em uma sala especialmente projetada que atende aos requisitos da especificação da norma internacional C 511 (ASTM, 2019), ou em alguns casos, por meio de banho-maria. Esses registros são importantes para garantir que as condições de cura sejam mantidas de acordo com as especificações. Após realizar os testes de compressão, deve-se verificar se a faixa de resistência não excedeu a 10 % da resistência média dos demais corpos de prova, caso exceda, isto pode indicar uma diferença significativa na moldagem ou na composição da mistura, fazendo com que esse corpo de prova se torne insuficiente para a determinação do valor. Então nesse caso deve ser realizado o teste em um terceiro corpo de prova, e a média deve ser determinada com base nos três corpos de prova, essas verificações devem ser feitas para cada idade ensaiada do concreto.

É necessário determinar o intervalo de tempo (Δt) para que as médias sejam atendidas e mantenham um padrão entre os intervalos. Nas primeiras 48 horas de registro de temperatura a taxa de velocidade da reação química do concreto é mais alta, então deve-se utilizar um intervalo de uma a duas horas ou menos para obter uma precisão maior da temperatura. Deve-se obter os registros de índice médio de maturidade correspondente a cada idade de teste (ASTM, 2019, C 1074).

Segundo Soutsosa e Kanavarisb (2018), o histórico de temperatura durante o período de cura, pode ser empregado para calcular uma variável que indicará uma somatória dessas temperaturas que serão relacionadas ao período da medição. Saul intitulou essa variável como “maturidade”, fazendo assim com que maturidade passasse a ser conhecida como uma característica do concreto que leva em consideração tanto a temperatura quanto o tempo de cura, que será usada para fornecer uma estimativa da resistência do concreto, essa maturidade pode ser expressa pela equação de Nurse-Saul expressa pela equação (2):

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (2)$$

Onde

M é a maturidade [K*horas];

T é a temperatura média durante o intervalo de tempo Δt [horas];

T_0 é a temperatura de referência [K].

Para que a função de Nurse-Saul seja efetiva alguns dados precisam ser imputados a ela, um desses dados é a temperatura que pode ser obtida através de um histórico de temperatura no tempo para a idade de cura equivalente que pode ser expressa pela equação (3):

$$t_e = \frac{\sum(T - T_0)}{(T_r - T_0)} \Delta t \quad (3)$$

Onde:

t_e é a idade equivalente na temperatura de referência [horas];

t_r é a temperatura de referência [K].

Essa fórmula é particularmente útil para comparar o desenvolvimento da resistência em diferentes condições de temperatura e para tomar decisões sobre a qualidade da estrutura.

A regra de maturidade de Saul ou "princípio da maturidade" afirma que o concreto da mesma mistura e na mesma maturidade, contada em termos de temperatura-tempo, tem aproximadamente a mesma resistência, independentemente da combinação de temperatura e tempo usada para atingir essa maturidade (ASTM, 2019, C 1074).

Deve-se associar os dados adquiridos através da função de Nurse-Saul e os períodos médios dos registros de temperatura, depois deve ser criado um gráfico que expressará esses valores, cada par de dados deve ser representado como um ponto no gráfico (ASTM, 2019, C 1074).

O gráfico final representa a relação entre a resistência à compressão do corpo de prova versus a maturidade do concreto. Esse gráfico pode ser usado para prever a resistência do concreto onde as características de traço e a faixa de maturidade sejam a mesma. Se a curva fornecer previsões precisas, ela pode ser considerada confiável (ASTM, 2019, C 1074).

Após toda a calibração, as medições e execução do método *in-loco*³ estará pronta para ser executada, os dados deverão ser tratados por meio da estatística e da geração de gráficos para o melhor ajuste dos dados (ASTM, 2019, C 1074). Será necessário adotar um modelo de regressão, para o melhor ajuste dos dados, esse modelo explicará o quão distante as amostras estarão da linha de regressão.

Duas medidas fundamentais para entender o ajuste de uma regressão são o R² e os erros padrões. O R² varia entre 0 e 1 e mede qual a fração da variância de Y é explicada por X. Já o erro padrão de uma regressão mede o quão distante a variável dependente Y está do seu valor predito. (CHEIN, p 24, acesso em: 06/11/2023).

Resultados e Discussões

Ao seguir os procedimentos referenciados nos tópicos anteriores, as seguintes informações foram obtidas a respeito do estudo do método de maturidade com a idade equivalente de 1 dia, intervalos de média de temperatura de 1 hora e com monitoramento de temperatura registrados a cada minuto.

A imagem 5 apresenta uma tabela com os valores médios de temperatura registrados pelo equipamento de medição em intervalos de 1 hora. E esses intervalos foram obtidos através da média aritmética dos registros coletados pelo dispositivo a cada minuto para os corpos de prova de calibração.

³ Expressão que indica realizado em campo.

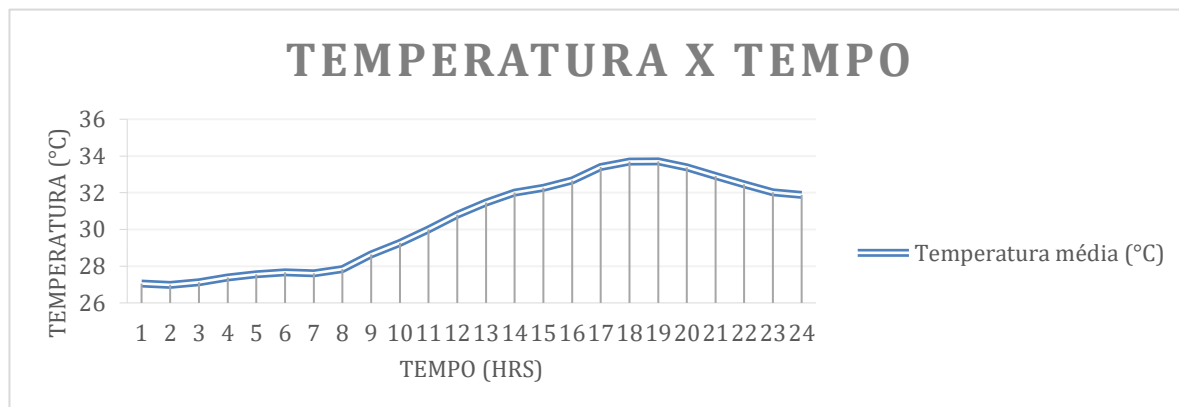
Imagem 5 – Tabela de média da temperatura no tempo (calibração)

Qt. Hora	Temperatura média (°C)	Soma das Temperatura (°C)	Maturidade (°C - Horas)
1	27,1	27,1	27
2	27,0	54,0	54
3	27,1	81,2	81
4	27,4	108,5	109
5	27,6	136,1	136
6	27,7	163,8	164
7	27,6	191,4	191
8	27,8	219,2	219
9	28,6	247,9	248
10	29,3	277,1	277
11	30,0	307,2	307
12	30,8	338,0	338
13	31,5	369,4	369
14	32,0	401,4	401
15	32,3	433,7	434
16	32,7	466,3	466
17	33,4	499,8	500
18	33,7	533,4	533
19	33,7	567,2	567
20	33,4	600,5	601
21	32,9	633,5	633
22	32,5	666,0	666
23	32,0	698,0	698
24	31,9	729,8	730

Fonte: De autoria própria

Os dados obtidos através da tabela apresentada pela imagem 5, são expressos de forma gráfica conforme imagem 6, observa-se que com 19 horas de monitoramento atingiu-se o pico de temperatura.

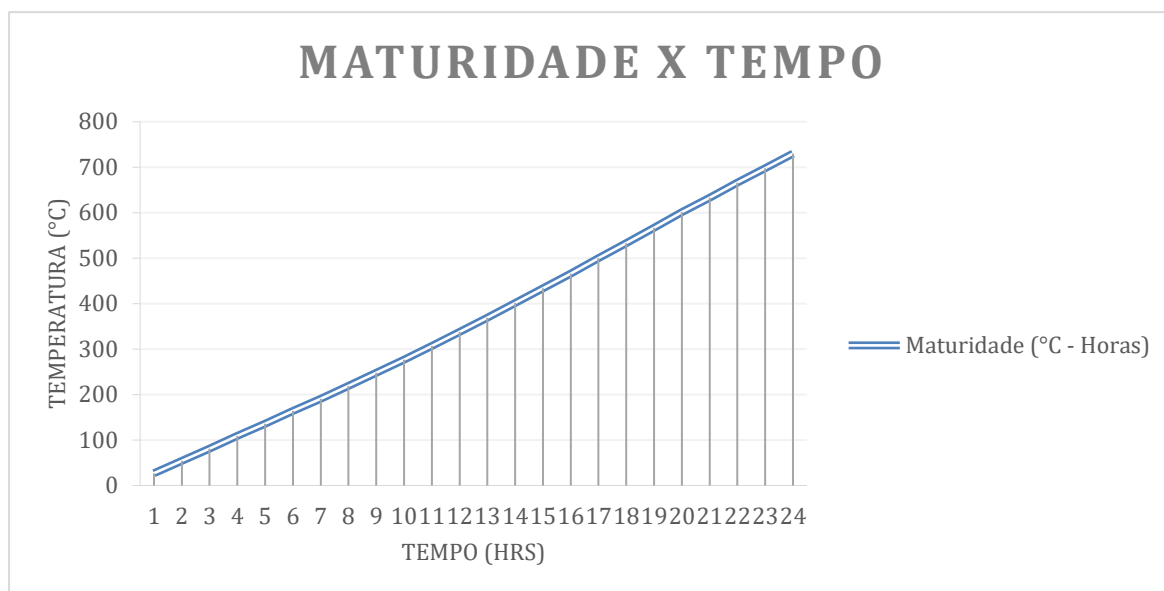
Imagem 6 – Gráfico de média da temperatura no tempo (calibração)



Fonte: De autoria própria

A tabela da imagem 5 também inclui a relação entre tempo e maturidade, calculada pela fórmula de Nurse-Saul expressa graficamente na imagem 7, a imagem apresenta um crescente linear, pois é composta da soma das temperaturas em sua equação, conforme Equação (2).

Imagem 7 – Maturidade no tempo (calibração)



Fonte: De autoria própria

A imagem 8 apresenta uma tabela com os valores médios de temperatura registrados pelo equipamento de medição em intervalos de 1 hora. E esses intervalos foram obtidos através da média aritmética dos registros coletados pelo dispositivo a cada minuto para os corpos de prova a serem analisados no estudo.

Imagem 8 – Tabela de média da temperatura no tempo (estudo)

Qt. Hora	Temperatura média (°C)	Soma das Temperatura (°C)	Maturidade (°C - Horas)
1	24,9	24,9	25
2	24,8	49,7	50
3	24,7	74,4	74
4	24,9	99,3	99
5	24,8	124,2	124
6	25,0	149,2	149
7	25,3	174,4	174
8	25,6	200,0	200
9	25,9	226,0	226

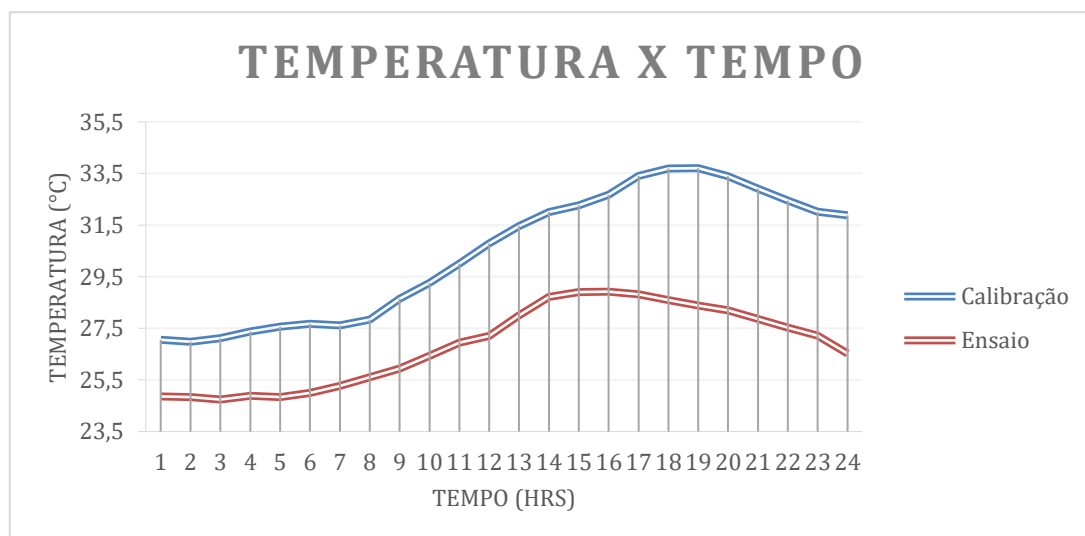


10	26,4	252,4	252
11	26,9	279,3	279
12	27,2	306,5	307
13	28,0	334,5	335
14	28,7	363,3	363
15	28,9	392,2	392
16	28,9	421,1	421
17	28,8	449,9	450
18	28,6	478,5	478
19	28,4	506,9	507
20	28,2	535,1	535
21	27,9	562,9	563
22	27,5	590,5	590
23	27,2	617,7	618
24	26,5	644,2	644

Fonte: De autoria própria

O gráfico exibido na imagem 9 demonstra a relação da temperatura no tempo, entre a curva de calibração com os dados da tabela da imagem 5 e a curva dos corpos de prova escolhidos para o estudo conforme dados da tabela da imagem 8, apesar da temperatura da curva de calibração ser maior, há uma similaridade visível no formato da curva.

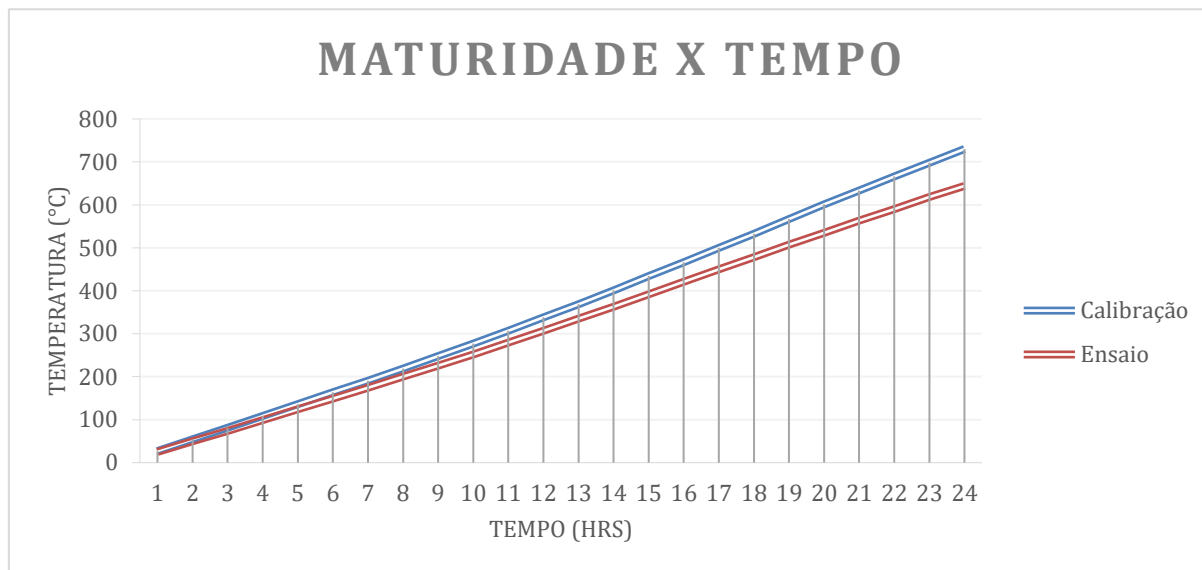
Imagem 9 – Gráfico de média da temperatura no tempo (calibração X estudo)



Fonte: De autoria própria

O gráfico exibido pela imagem 10 apresenta a relação da maturidade no tempo entre nos corpos de prova de calibração conforme dados da tabela da imagem 5 e os corpos de prova de estudo. De acordo com os dados da tabela da imagem 8, pode-se observar que a maturidade gera resultados crescentes, mudando apenas a inclinação de acordo com a elevação das temperaturas.

Imagem 10 – Maturidade no tempo (calibração X estudo)



Fonte: De autoria própria

A imagem 11 exibe a tabela de compressão dos corpos de prova ensaiados para a calibração do método e sua maturidade encontrada na tabela da imagem 5.

Imagem 11 – Tabela de resistência dos ensaios de compressão (calibração)

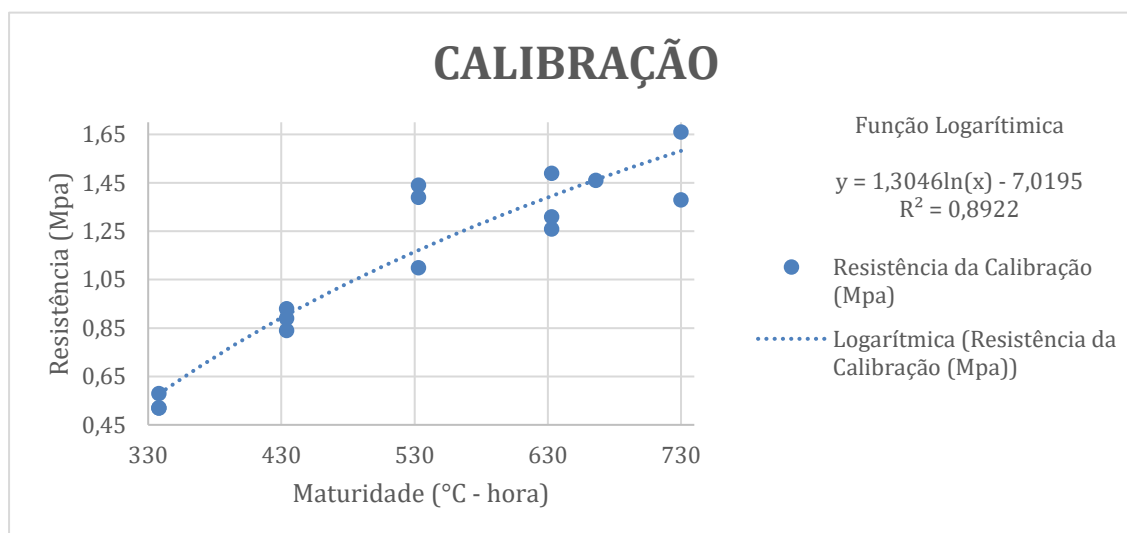
Corpo de prova	Média (°C)	Maturidade (°C - Horas)	Resistência da calibração (Mpa)
1	30,795	338	0,58
2	30,795	338	0,52
3	30,795	338	0,52
4	32,26	434	0,89
5	32,26	434	0,93
6	32,26	434	0,84
7	33,69	533	1,39
8	33,69	533	1,44
9	33,69	533	1,1
10	32,91	633	1,26
11	32,91	633	1,31
12	32,91	633	1,49
13	32,45	666	1,46

14	31,88	730	1,38
15	31,88	730	1,66

Fonte: De autoria própria

A representação gráfica da tabela inserida na imagem 11 apresenta a relação entre a maturidade e a resistência da curva de calibração. E pode ser expressa através de um gráfico de dispersão de controle estatístico e pode ser utilizada uma linha de tendência de função logarítmica das resistências conforme indicação da norma.

Imagem 12 – Ensaio de resistência (calibração)



Fonte: De autoria própria

A imagem 13 expõe a tabela de compressão dos corpos de prova ensaiados para a calibração do método e sua maturidade encontrada na tabela da imagem 8, observa-se que o corpo de prova com a maior temperatura chegou a uma menor resistência.

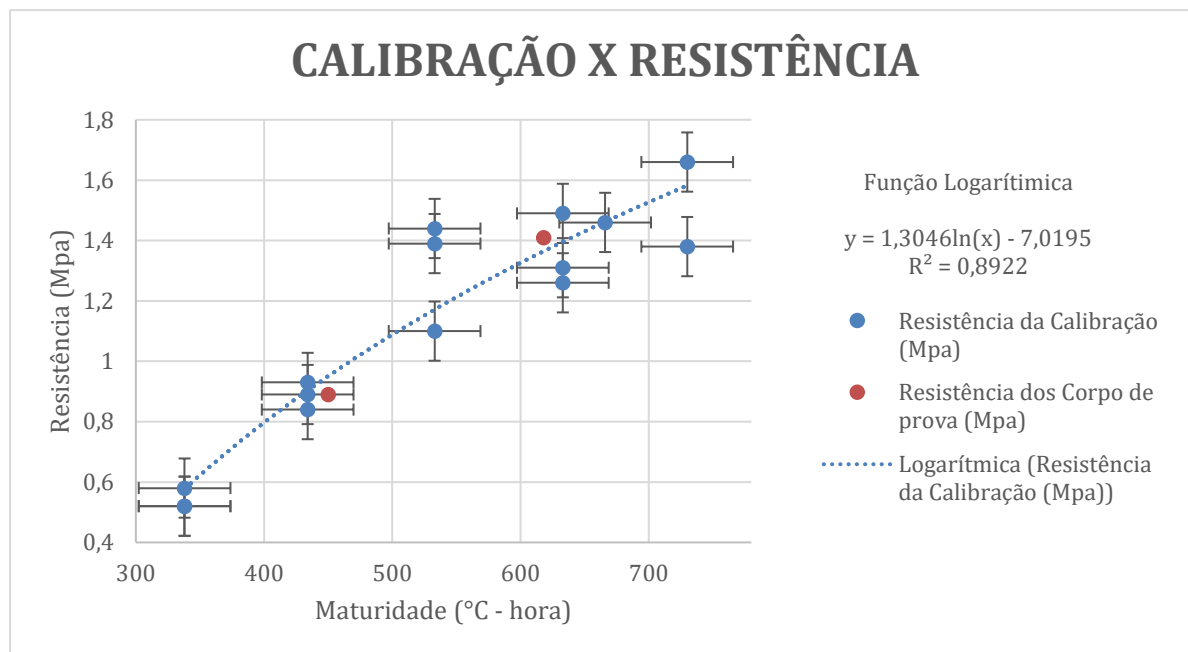
Imagem 13 – Tabela dos ensaios de resistência a compressão (estudo)

Corpo de prova	Média (°C)	Maturidade (°C - Horas)	Resistência dos corpos de prova (Mpa)
1	28,82	450	0,89
2	27,22	618	1,41

Fonte: De autoria própria

Após os levantamentos anteriores é possível cruzar as informações de resistências obtidas através das tabelas da imagem 13 e 14 e criar um gráfico de dispersão, traçando uma curva da função logarítmica das resistências dos corpos de prova de calibração e expressar seus erros padrões, observando assim onde os corpos de prova do estudo se relacionam na curva de resistência pela maturidade.

Imagem 14 – Ensaio de calibração x ensaio de resistência. (calibração X estudo)



Fonte: De autoria própria

Conclusão

Devido à falta de materiais referenciados sobre o tema, surgiram muitas adversidades durante o processo de desenvolvimento e calibração do estudo, sendo necessário refazer cálculos e ensaios constantemente até que fosse possível chegar a um resultado aceitável e próximo ao que a norma exige.

Foi constatado também que a falta de material a respeito de algumas etapas do método, relacionadas a outras áreas da matemática, foi um ponto dificultoso para obtenção dos dados corretos, principalmente no que se diz respeito a análise dos dados estatísticos, pois a norma não deixa clara a forma de se tratar esses dados.

A moldagem dos corpos de prova da forma correta, foi um ponto fundamental para o monitoramento correto das temperaturas. Também surgiram contratempos na obtenção de um traço que não tivesse variações na mistura ou na moldagem, pois pequenos desvios no processo

impossibilitaram uma análise correta dos dados, então foi-se necessário refazer os testes a cada desvio.

O estudo atendeu as expectativas esperadas, possibilitando a obtenção de dados confiáveis a respeito da maturidade, nos quais foi possível observar que os corpos de prova estudados ficaram dentro do erro padrão da curva de calibração, apesar dos valores não ficarem exatamente em cima da curva. Compreende-se, dessa forma, que a determinação da curva de calibração foi de extrema importância para determinar a resistência aproximada dos elementos.

Ainda sobre a curva de calibração foi constatado também, que uma função linear, ou de primeiro grau, para o intervalo das amostras no período em questão seria de maior eficiência, devido a ter um R^2 mais elevado quando comparado à uma regressão aproximada para uma função logarítmica, porém como a norma determina para que a curva seja realizada por meio de função logarítmica e a confiabilidade dos dados continuaram em uma porcentagem adequada, optou-se por seguir o indicado pela norma, caso o intervalo das amostras fossem maiores, a função logarítmica se aplicaria melhor quando comparada à função linear.

Durante a análise dos dados gráficos e estatísticos, foi possível perceber uma progressão linear nas imagens 7, 10 e 12, pois a maturidade possui um crescimento linear devido a soma das temperaturas, independentemente das variações que foi possível observar nas imagens 6, 9 e 11.

Foi possível constatar também, que as quantidades de amostras obtidas durante a calibração, influenciam muito na precisão da criação da curva logarítmica, fazendo assim com que quanto maior a quantidade de amostras, maior será a confiabilidade no método.

Sem a observação dos erros padrões, não seria possível entender se a curva de calibração realmente foi efetiva. A utilização de recursos de programas de computadores foi imprescindível para agilizar o processo, pois cálculos de curvas logarítmicas seriam de extrema complexidade se realizadas de forma manual.

Conclui-se que, o método de maturidade do concreto é confiável e que os estudos a respeito do tema são indispensáveis para a construção civil, principalmente para o ramo de pré-moldados, pois se trata de um método não destrutivo de máxima confiabilidade, para a determinação das resistências observadas no intervalo de um dia.

Referências

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **Standard Specification for Mixing Rooms, Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks**

Used in the Testing of Hydraulic Cements and Concretes. West Conshohocken, 22 Dez 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/c0511-21.html>. Acesso em: 05 Jan 2023.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS INTERNATIONAL. **Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method.** West Conshohocken, 07 Jan 2021. Disponível em: <https://www.astm.org/c1074-19e01.html>. Acesso em: 05 Jan 2023.

BROWN, T. L. **Twelfth Edition Chemistry The Central Science.** 12th ed. (2012). Disponível em: <https://ghostwriter144.neocities.org/img/scienceChemistryTheCentralScience12th.pdf>. Acesso em: 30 Set 2023.

CARINO, N. J.; LEW, H. S. **The maturity method: from theory to application.** (2001). Gaithersburg, USA. Disponível em: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=860356. Acesso em: 30 Set 2023.

CHEIN, F. **Introdução aos modelos de regressão linear.** (2019). Disponível em: https://repositorio.enap.gov.br/bitstream/1/4788/1/Livro_Regress%C3%A3o%20Linear.pdf. Acesso em: 06 nov 2023.

LIMA, L. S. **Revista de ciência elementar: Doutorado em química.** (2015). Porto Alegre. Disponível em: https://aeaveiro.pt/biblioteca/view/1088/Revista%20de%20Ciencia%20Elementar_%20v%20-%20Casa%20das%20Ciencias.pdf. Acesso em: 30/09/2023 Acesso em: 30 Set 2023.

PROCESSOS, **Endotérmicos e Exotérmicos. Brasil Escola,** 2017. 1 vídeo (06 minutos e 29 segundos). Publicado pelo canal Brasil Escola. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=OOkcXQsii9I>. Acesso em: 04 Out 2023.

SANTOS B.; AGUILAR M.; CHAHUD E. **O método da maturidade para determinar resistência à compressão em concretos: revisão de literatura.** (2021). Belo Horizonte, MG. Disponível em: <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/56887>. Acesso em: 30 Set 2023.

SILVA, C. R. S. **Aplicação do conceito de maturidade em concreto com adição de cinzas de casca de arroz.** (2004). Ilha Solteira, SP. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/6db6af2b-a622-4190-91bd-e2aeeba23297/content>. Acesso em: 11 Out 2023.

SOUTSOS, M.; KANAVARIS, F. **Case Studies in Construction Materials: The modified nurse-saul (MNS) maturity function for improved strength estimates at elevated curing temperatures.** (2018). London, EUA. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214509518302110?ref=pdf_download&r=RR-2&rr=81d7149078ab21d4. Acesso em: 06 Nov 2023.

WHITE, D. P. **Química, a ciência central: Capítulo 14, cinética química.** 9ª Edição, (2009). Disponível em: https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/fisicaequimica/relacaodocentes973/cinetica_quimica.pdf. Acesso em: 07 Out 2023.