



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA HIDRÁULICA E AMBIENTAL  
CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**JOYCE LOPES ROLIM**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO PARA A  
ÁGUA INDUZIDA PELO EFEITO DO VENTO**

**FORTALEZA  
2022**

JOYCE LOPES ROLIM

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO PARA A  
ÁGUA INDUZIDA PELO EFEITO DO VENTO

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
do  
Ceará, como requisito parcial para  
obtenção do  
título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Iran Eduardo Lima Neto,  
PhD

FORTALEZA

2022

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

R653a Rolim, Joyce Lopes.

Avaliação experimental da transferência de oxigênio para a água induzida pelo efeito do vento / Joyce Lopes Rolim. – 2022.  
66 f. : il. color.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2022.

Orientação: Prof. Dr. Iran Eduardo Lima Neto.

1. Oxigênio dissolvido. 2. Efeito do vento. 3. Autodepuração. I. Título.

CDD 620

---

JOYCE LOPES ROLIM

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA TRANSFERÊNCIA DE OXIGÊNIO PARA A  
ÁGUA INDUZIDA PELO EFEITO DO VENTO

Monografia apresentada ao Curso de  
Engenharia Civil da Universidade Federal  
do  
Ceará, como requisito parcial para  
obtenção do título de Bacharel em  
Engenharia Civil.

Aprovada em: 16/12/2022.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Iran Eduardo Lima Neto, PhD (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Francisco Osny Eneas Da Silva, PHD  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Marianna Correia Aragão Góes  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

## AGRADECIMENTOS

A Universidade Federal do Ceará (UFC) e todas as oportunidades que me foram ofertadas, em especial ao Programa de Iniciação à Docência (PID) e ao Projeto de extensão Escritório de projetos Integrados de Engenharia (EPE), por me ajudarem a crescer de forma acadêmica e profissional.

Ao meu Orientador, o Prof. Iran Eduardo Lima Neto, PhD por todo o apoio, ensinamentos e paciência ao longo dessa jornada do projeto de graduação, pelo seu entusiasmo e preocupação com a pesquisa, você é um exemplo de professor, humano e profissional, meu muito obrigada!

Aos meus familiares em nome dos meus pais Eliomar Bezerra Rolim e Eliza Lopes Rolim, por sonharem com esse momento junto comigo, por toda a preocupação e apoio, amo vocês. A minha irmã Gleyce Lopes Rolim, por sempre me ajudar e estar presente quando preciso. A todos os meus amigos e companheiros de curso que me acompanharam ao longo desse processo, seria impossível citar todos, mas cada um que esteve comigo, tem um lugar guardado no meu coração, em especial a Neyane Brasil Bezerra pelo apoio emocional nesse processo.

A todo o corpo docente da UFC, em especial aos professores do curso de Engenharia Civil, que com seus ensinamentos me ajudaram a chegar até aqui, em nome da professora Cely Martins Santos de Alencar, PhD que me acompanhou ao longo de todo esse processo desde a disciplina de desenho técnico a orientação do estágio obrigatório e como coordenadora do EPE, obrigada pelo apoio e auxílio nesses anos, e a Prof.<sup>ª</sup> Verônica Teixeira Franco Castelo Branco, PhD por seus ensinamentos na disciplina de PG que me ajudaram a fazer o melhor possível nesse projeto.

Ao projeto Primeira Chance, que aos meus 15 anos me deu a oportunidade de sair do interior e vir para a capital estudar em um dos melhores colégios do estado, sem essa chance talvez eu não tivesse chegado até aqui, obrigada por ser um projeto tão lindo, que ajuda jovens como eu a realizar os seus sonhos.

Por fim, a Deus por ser minha força e guia ao longo de todo o processo de graduação e a todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para minha formação humana e profissional.

“A água turva não mostra os peixes ou  
conchas embaixo; o mesmo faz a mente  
nublada.”

(Textos Budistas)

## RESUMO

Os problemas ambientais são questões que merecem a atenção da comunidade científica, uma vez que os recursos naturais são limitados. A poluição de corpos hídricos está diretamente relacionada ao baixo nível de oxigênio dissolvido na água, o qual é um elemento fundamental para a manutenção da vida aquática e redução dos custos com tratamento da água. Tendo em vista as necessidades para a manutenção da qualidade da água, essa pesquisa se fundamentou com o objetivo principal de avaliar, em escala de laboratório, as taxas de transferência de oxigênio para a água provocadas por diferentes condições de velocidade do vento. Para isso ocorrer, foram realizados diversos experimentos no Laboratório de Recursos Hídricos — LRH do Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental — DEHA da UFC. Com base nesses experimentos foi realizada uma análise de dados, por meio da geração de gráficos e correlações com dados já existentes na literatura, visando compreender melhor o processo de autodepuração de corpos hídricos. Diante disso, foi verificado que para uma faixa de variação de velocidade do vento entre 3,8 m/s e 7,4 m/s o coeficiente de aeração ( $k_2$ ) pode ser considerado aproximadamente constante e de valor  $0,016 \text{ min}^{-1}$ . Assim, foi possível quantificar a influência da velocidade do vento no processo de incorporação de oxigênio da água, para a faixa de velocidades estudada.

**Palavras-chave:** Oxigênio dissolvido. Efeito do vento. Autodepuração.

## ABSTRACT

Environmental problems are issues that deserve the attention of the scientific community, since natural resources are limited. Pollution of water bodies is directly related to the low level of dissolved oxygen in water, which is a key element for maintaining aquatic life and reducing water treatment costs. In view of the needs for maintaining water quality, this research was based on the main objective of evaluating, on a laboratory scale, the rates of oxygen transfer to water caused by different conditions of wind speed. For this to happen, several experiments were carried out at the Laboratory of Water Resources — LRH of the Department of Hydraulic and Environmental Engineering — DEHA of UFC. Based on these experiments, a data analysis was carried out, through the generation of graphs and correlations with existing data in the literature, aiming to better understand the process of self-purification of water bodies. Therefore, it was found that for a wind speed variation range between 3.8 m/s and 7.4 m/s, the aeration coefficient ( $k_2$ ) can be considered approximately constant and with a value of  $0.016 \text{ min}^{-1}$ . Thus, it was possible to quantify the influence of wind speed on the process of incorporation of oxygen in the water, for the range of speeds studied.

**Keywords:** Dissolved oxygen. Wind effect. Self-debugging.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>8</b>
<b>2. OBJETIVOS.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1 Objetivo geral.....</b>	<b>10</b>
<b>2.2 Objetivos específicos.....</b>	<b>10</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>11</b>
<b>3.1 O efeito do vento.....</b>	<b>13</b>
<b>3.2 Indicadores de poluição orgânica.....</b>	<b>15</b>
<b>3.3 A Autodepuração dos rios.....</b>	<b>17</b>
<b>3.4 Estado da arte.....</b>	<b>19</b>
<b>4. MATERIAIS E MÉTODO.....</b>	<b>21</b>
<b>4.1 Pesquisa experimental.....</b>	<b>21</b>
<b>4.2 Análise de dados.....</b>	<b>22</b>
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>24</b>
<b>5.1 Evolução temporal da curva de Oxigenação da água.....</b>	<b>24</b>
<b>5.2 Calibração dos coeficientes de oxigênio dissolvido.....</b>	<b>33</b>
<b>5.3 Correlação entre as velocidades de vento e oxigênio dissolvido.....</b>	<b>42</b>
<b>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>45</b>
<b>6.1 Recomendações.....</b>	<b>45</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>53</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A questão ambiental vem ganhando importância nos últimos tempos. Nesse contexto, a poluição dos corpos hídricos merece atenção, uma vez que segundo MERTEN (2002) a água doce representa um recurso natural finito, e sua qualidade está piorando, tanto devido ao aumento populacional, quanto à ausência de políticas públicas voltadas para a sua preservação.

De acordo com BOEHM (2022) segundo dados levantados pela organização não governamental (ONG) SOS Mata Atlântica, mostra que apenas 6,8% dos rios da Mata Atlântica do Brasil apresentam água de boa qualidade. De acordo com essa pesquisa não foi possível identificar corpos d'água com qualidade considerada ótima, do total cerca de 72,6% dos casos foram considerados regulares, enquanto mais de 20% dos pontos de rios analisados foram classificados com qualidade de água ruim ou péssima. Já na região nordeste, devido à escassez hídrica e às baixas coberturas dos serviços de saneamento básico, a grande maioria dos rios e açudes encontra-se atualmente em níveis críticos de poluição (ARAÚJO et al., 2019; FRAGA et al., 2020; MESQUITA et al., 2020; FREIRE et al., 2021; WIEGAND et al., 2021; CARNEIRO et al., 2022; LIMA NETO et al., 2022; RAULINO et al., 2022; ROCHA et al., 2021, 2022).

Dessa forma, é necessário que a comunidade científica se predisponha a buscar mecanismos de minimizar a poluição de corpos hídricos. Tendo em vista que entre os fundamentos apresentados pela Política Nacional de Recursos Hídricos está o de “assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos” (Art. 2º, Cap. II, Tit. I, Lei no 9.433).

Diante disso, conforme a ANA (2022) o monitoramento adequado e a avaliação da qualidade das águas superficiais e subterrâneas são fatores essenciais para a adequada gestão dos recursos hídricos, permitindo, assim, a caracterização e a análise de tendências em bacias hidrográficas, importantes para atividades de gestão, tais como: planejamento, outorga, cobrança e enquadramento dos cursos de água. segundo MENDONÇA (2020) “Dentre as variáveis de qualidade da água em rios e córregos naturais, o oxigênio dissolvido (OD) e a demanda bioquímica de oxigênio (DBO5), são consideradas as mais importantes em estudos de avaliação da poluição por lançamentos de matéria orgânica”.

Nessa perspectiva, Dias (2022) relata que de acordo com dados fornecidos

pelo “Observando o Tietê 2022” a água de boa qualidade do rio Tietê foi reduzida de 124 quilômetros, no ano de 2021, para apenas 60 quilômetros, em 2022, caindo para menos que a metade em apenas um ano. Tal fato é preocupante e exemplifica a importância de encontrar medidas para reverter esse avanço da poluição e aumentar a capacidade dos rios de retornarem ao seu estado natural. Por outro lado, na região nordeste, diversos estudos reportam o problema de elevadas concentrações de DBO e baixas concentrações de OD em rios e açudes (OLIVEIRA FILHO e LIMA NETO, 2017; LIMA et al., 2018; MOURA et al., 2019; CARNEIRO et al., 2023).

Tendo em vista os impactos do baixo nível de oxigênio na água, fundamental para a garantia da vida aquática e para a potabilidade da água para consumo humano, o presente estudo tem o intuito de analisar a influência do vento na transferência de oxigênio para a água.

Desse modo, essa pesquisa foi idealizada a fim de compreender melhor o processo de autodepuração em corpos hídricos, bem como auxiliar no combate à poluição de corpos hídricos e minimizar custos com o tratamento da água.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

A pesquisa proposta tem como objetivo principal avaliar em escala de laboratório as taxas de transferência de oxigênio para a água provocadas por diferentes condições de velocidade do vento.

### 2.2 Objetivos específicos

- Investigar a evolução temporal da curva de oxigenação da água provocada por diferentes perfis de velocidade do vento simulando condições naturais;
- Avaliar as taxas de transferência de oxigênio dissolvido na água provocadas pelo efeito do vento com a calibração dos coeficientes de transferência de oxigênio para a água;
- Discutir a aplicabilidade dos resultados para análise de autodepuração de corpos hídricos.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O aumento vertiginoso da população e da industrialização nas últimas décadas, assim como surgimento de situações de escassez hídrica em regiões densamente povoadas levaram a um cenário no qual grande parte das atividades antrópicas tem levado, invariavelmente, à poluição de águas naturais superficiais e subterrâneas (SODRÉ, 2012). Tal cenário é preocupante, uma vez que a água é essencial para a existência da vida e precisa ser preservada. Diante disso, de acordo Souza (2014), conhecer as características de qualidade da água nos possibilita ampliar o conhecimento ecológico do ecossistema e detectar alterações provenientes da atividade humana, logo, a maneira como a qualidade da água se comporta reflete nas condições ambientais da bacia hidrográfica. Assim, compreender as características naturais dos corpos hídricos se torna elementar para estudar maneiras de reverter os prejuízos gerados pela industrialização.

Neste contexto, considerando o lado líquido, o indicador mais importante da qualidade dos corpos d'água é o teor de oxigênio dissolvido (SCHULZ, 2009). Assim, segundo Lima Neto et al. (2007) é importante para a vida aquática a presença de oxigênio dissolvido suficiente. Uma vez que o oxigênio dissolvido é o principal componente no metabolismo dos microrganismos aeróbio presentes nas águas naturais ou os reatores para tratamento biológico de esgotos (FREITAS, 2018). Desse modo, de acordo com Janzen (2006) quando a concentração de oxigênio dissolvido na água cai para níveis abaixo dos valores aceitáveis isso pode afetar significativamente a saúde do ecossistema aquático e também impedir o uso da água para diferentes fins, como, o abastecimento doméstico. Logo, é necessário encontrar maneiras de manter os níveis de oxigênio da água nos limites aceitáveis tendo em vista a vida aquática e o abastecimento humano.

Pereira (2010) relata como a quantidade de oxigênio dissolvido na água é um parâmetro de grande relevância na legislação de classificação das águas naturais, bem como na composição de índices de qualidade de águas (IQAs). Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA) o Índice de Qualidade das Águas foi criado em 1970, nos Estados Unidos, pela National Sanitation Foundation. Esse índice foi desenvolvido a fim de avaliar a qualidade da água bruta com base em seu uso para o abastecimento público, após tratamento. Nessa perspectiva, os parâmetros

utilizados no cálculo do IQA são em sua maioria indicadores de contaminação causada pelo lançamento de esgotos domésticos. Na Figura 1 é possível observar os parâmetros analisados pelo IQA e seus respectivos pesos (w), fixados em função da sua importância para a conformação global da qualidade da água.

Figura 1 - Parâmetros de Qualidade da Água do IQA e respectivo peso

PARÂMETRO DE QUALIDADE DA ÁGUA	PESO (w)
Oxigênio dissolvido	0,17
Coliformes termotolerantes	0,15
Potencial hidrogeniônico - pH	0,12
Demandra Bioquímica de Oxigênio - DBO5,20	0,10
Temperatura da água	0,10
Nitrogênio total	0,10
Fósforo total	0,10
Turbidez	0,08
Resíduo total	0,08

Fonte: ANA (2022)

Frente a isso, pode se observar que os parâmetros a serem analisados ao longo deste estudo, tais como o Oxigênio dissolvido e a Demanda Bioquímica de Oxigênio, tem um papel fundamental. Tendo em vista que nas águas naturais, o oxigênio é indispensável também para outros seres vivos, especialmente os peixes, onde a maioria das espécies não resiste a concentrações de oxigênio dissolvido na água inferiores a 4,0 mg/L (Pereira, 2010). Boyd & Tucker (1998) desenvolveram propostas de faixas de oxigênio para a gradação do nível de oxigênio, são elas: crítico (0-1,5 mg/L), preocupante (1,5-4 mg/L), e confortável (acima de 4 mg/L).

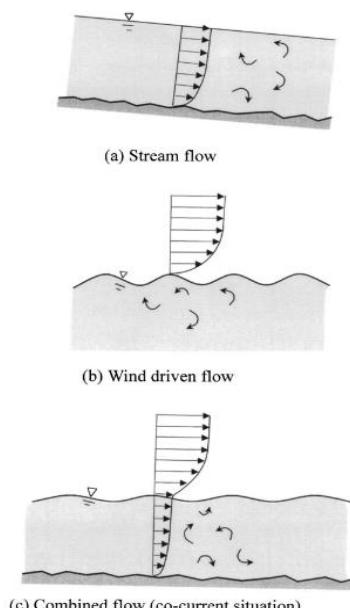
Desse modo, o oxigênio dissolvido garante a presença de formas complexas de vida na água, fornecido principalmente pela atmosfera, atravessando a interface ar-água (SCHULZ, 2009). Assim, enquanto as dimensões horizontais das interfaces ar-água podem ser muito grandes (como a superfície dos oceanos), a dimensão vertical (espessura) costuma ser muito pequena, implicando em dificuldades para descrever sua estrutura e realizar medições em seu interior. (SCHULZ, 2009). Com base nisso, este trabalho explora a influência de diferentes velocidades de vento na quantidade de oxigênio dissolvido na água.

### 3.1 O efeito do vento

Para fluxos puros de canal aberto e fluxos puros movidos pelo vento, respectivamente, os resultados de oxigênio e a medição de transferência pode ser dimensionada pelo simples forçamento de parâmetros como, respectivamente, a velocidade de cisalhamento devido ao vento soprando na superfície da água (GUALTIERI, 2005). De acordo com Bennett e Rathbun (1972) uma previsão confiável da transferência de oxigênio através da inter-relação ar-água é elementar para uma modelagem da qualidade da água em sistemas estuarinos, mas infelizmente, na maioria das análises de engenharia, a aeração em rios é colocada em função dos parâmetros do fluxo da corrente e negligênciando o efeito do vento de superfície. Desse modo, entender como o comportamento do vento pode influenciar nesse processo de aeração dos rios pode ajudar desenvolver maneiras de realizar esse processo naturalmente.

Em primeiro lugar, não há uma orientação clara para a determinação do processo que domina a transferência de gás em tal regime combinado. Em segundo lugar, a falta de informações experimentais confiáveis dificulta o desenvolvimento de um modelo definitivo para o processo de transferência interfacial (CHU; JIRKA, 2003). Desse modo, na Figura 2 o autor mostra as diferentes formas de comportamento da interface água-ar:

Figura 2: Diagrama De Diferentes Condições



Fonte: CHU e JIRKA (2003)

Magnaudet e Calmet (2006) mostram uma revisão de estudos sobre transferência de massa interfacial, e discutem os resultados de suas simulações numéricas, relacionadas elas ao comportamento de perfis obtidos a partir dos campos de concentração e velocidade. Assim, para o desenvolvimento desse trabalho ocorre a necessidade de compreender os perfis de velocidade do vento e seu comportamento na atmosfera. Varejão-Silva (2006), definem o vento como à componente horizontal representada na equação (1). Enquanto, o vetor velocidade do vento é representado pela equação (2).

$$\vec{V} = \vec{ui} + \vec{vj} + \vec{wk} \quad (1)$$

$$\overrightarrow{V_{xy}} = \vec{ui} + \vec{vj} \quad (2)$$

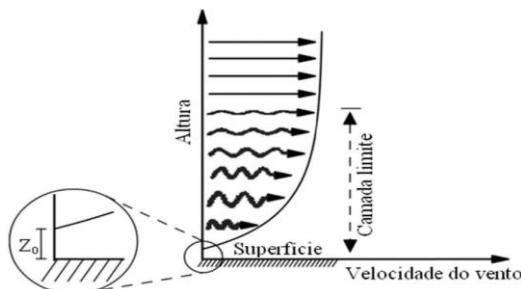
Onde,

$u$ ,  $v$  e  $w$ : componentes do vetor velocidade do vento nas direções x, y e z.

$\vec{i} + \vec{j} + \vec{k}$ : vetores unitários nas direções x, y e z.

De acordo com Silva (2003), a intensidade do vento pode ser maior em algumas áreas que em outras, e tanto pode aumentar por alguns meses do ano, quanto pode aumentar apenas durante algumas horas do dia, e pode, também, parar por longos períodos ininterruptos. Assim, entender o processo natural pode ajudar a compreender em quais épocas do ano o processo de aeração pode ocorrer de maneira natural e em quais épocas pode ser necessário interferência do homem. Para chegar a essa conclusão é necessário determinar a influência que esse fluxo natural de vento terá sobre a quantidade de oxigênio dissolvido na água. Com isso, a transferência de gases através da interface ar-água constitui uma importante etapa dos ciclos biogeoquímicos de numerosas substâncias ao governar a transição entre o estado dissolvido na água e o estado gasoso na atmosfera. A previsão do comportamento desses ciclos é frequentemente necessária para gestores ambientais, pesquisadores e órgãos de fiscalização (Janzen, 2006). Conforme pode ser observado na figura 3 o ponto de interação entre a superfície da água e a atmosfera apresenta um comportamento singular.

Figura 3 - Perfil vertical da velocidade do vento



Fonte: Lira (2017)

### 3.2 Indicadores de poluição orgânica

Nesse contexto, para poder ser verificado a variação de Oxigênio Dissolvido na água pelo efeito do vento é necessário compreender alguns indicadores de poluição orgânica, são esses: o oxigênio dissolvido (OD), a demanda bioquímica de oxigênio (DBO5) e a demanda química de oxigênio (DQO).

De acordo com VALENTE (1997) o oxigênio dissolvido (OD) é o indicador da concentração de oxigênio dissolvido na água em mg L-1. A demanda bioquímica de oxigênio (DBO5) determina indiretamente a concentração de matéria orgânica biodegradável através da demanda de oxigênio exercida por microrganismos através da respiração. Já a demanda química de oxigênio (DQO) determina a matéria orgânica baseada na concentração de oxigênio consumido para oxidar a matéria orgânica, seja ela biodegradável ou não, em meio ácido e condições energéticas por ação de um agente químico oxidante forte.

Diante disso, o modelo de Streeter-Phelps (1925), foi desenvolvido e representado por duas equações diferenciais ordinárias: a equação de demanda bioquímica de oxigênio e a de aeração. Segundo Bezerra (2008) a equação 3 modela a oxidação da parte biodegradável da matéria orgânica e a equação 4 representa o fluxo de oxigênio proveniente da dinâmica da aeração atmosférica. As condições de contorno, no modelo de Streeter Phelps, são fundamentais para a modelagem de um caso real, especificamente, a anaerobiose e a contribuição de múltiplas fontes de efluentes lançados pontualmente num único rio (Chapra,1997). As equações são representadas a seguir.

$$\frac{dL}{dt} = -k1 \times L \quad (3)$$

$$\frac{dD}{dt} = k1 \times L - k2 \times D \quad (4)$$

Nesse contexto, a concentração de oxigênio no tempo é determinada pela expressão:

$$C(t) = C_s - D(t) \quad (5)$$

Com base nessas equações, e nos dados experimentais que serão adquiridos por meio dos experimentos, será possível calibrar os valores de oxigênio da água com base na expressão a seguir:

$$\frac{dC}{dt} = k_2 \times C \quad (6)$$

Onde,

$L$ = Demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)

$D$  = Déficit de oxigênio(mg/L)

$C$  = Oxigênio dissolvido (mg/L)

$C_s$  = Concentração de saturação de OD (mg/L)

$k_1$ = Coeficiente de desoxigenação ( $Dia^{-1}$ )

$k_2$ = Coeficiente de reaeração ( $Dia^{-1}$ )

$t$  = tempo (Dias)

A calibração do modelo de Streeter Phelps depende, essencialmente, da escolha dos coeficientes  $K_1$  e  $K_2$ . Esses coeficientes são, muitas vezes, estimados por fórmulas empíricas e, às vezes, requerem ajustes por parte do especialista que estuda o fenômeno (BEZERRA, 2008).

Outra variável relacionada à qualidade da água é o IET (índice de estado trófico), o qual estabelece níveis de trofia que possibilita a classificação das águas em classes tróficas (LIMA et al., 2007). Tais valores verificam o controle da eutrofização de ambientes aquáticos, a Organization for Economic Cooperation and Development (OECD, 1982) com base em seus estudos desenvolveu os limites para classificação trófica apresentados na Figura 4, onde apresenta uma tabela adaptada por Barreto (2013) :

Figura 4 – Limites para diferentes categorias tróficas

Categorias Tróficas	Média anual de fósforo total ( $\mu g L^{-1}$ )	Média anual de clorofila a ( $\mu g L^{-1}$ )	Máximo anual de clorofila a ( $\mu g L^{-1}$ )	Média anual do disco de Secchi (m)	Mínima anual do disco de Secchi (m)
Ultraoligotrófico	$\leq 4,0$	$\leq 1,0$	$\leq 2,5$	$\geq 12$	$\geq 6,0$
Oligotrófico	$\leq 10,0$	$\leq 2,5$	$\leq 8,0$	$> 6,0$	$> 3,0$
Mesotrófico	10-35	8 - 25	8 - 25	6 - 3	3 - 1,5
Eutrófico	35-100	35 - 75	25 - 75	3 - 1,5	1,5 - 0,7
Hipereutrófico	$\geq 100$	$\geq 2,5$	$\geq 75$	$\leq 1,5$	$\leq 0,7$

Fonte: adaptada por Barreto (2013) de OECD (1982)

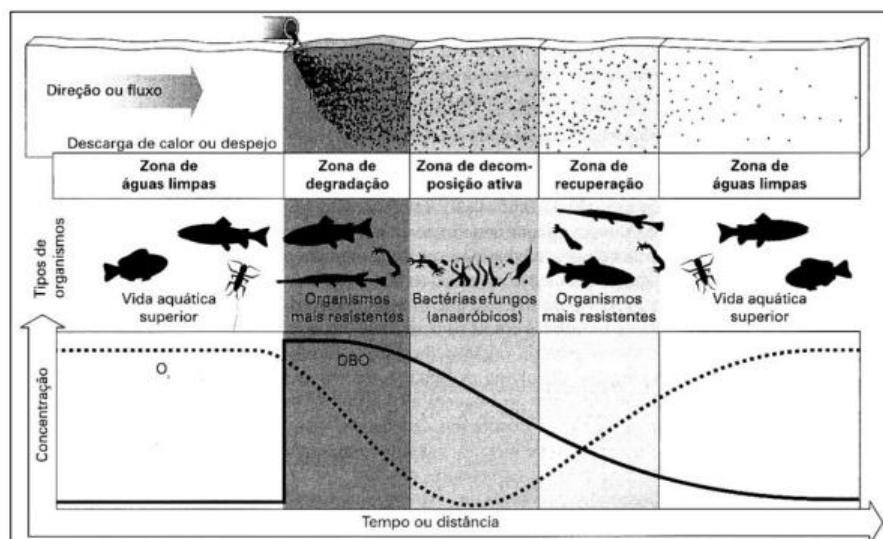
### 3.3 A Autodepuração dos rios

Segundo HESPAÑHOL (2009) é de suma importância conhecer o uso dos cursos de água, dos potenciais de cada trecho dos rios e do seu planejamento racional, para que assim, possa melhor identificar, avaliar e diagnosticar os fatores que afetam a qualidade da água desses corpos hídricos. Frente a isso, é necessário entender o processo de autodepuração em corpos d'água que está vinculado ao restabelecimento do equilíbrio no meio aquático, após as alterações induzidas pelos despejos afluentes. (VON SPERLING, 2005). Vale ressaltar que a autorrecuperação dos corpos d'água é um processo natural, estando tal condição relacionada diretamente com as características hidráulicas do sistema (ALMEIDA, 2021).

De acordo com JOSLIN (2015) inúmeros modelos matemáticos presentes na literatura buscam descrever o fenômeno de autodepuração e avaliar a qualidade da água em rios. Esses modelos podem ser usados no gerenciamento da qualidade da água para estimar focos de poluição, simular situações de interferência, assim como apoiar decisões voltadas ao planejamento ambiental em curto, médio e longo prazo (Moruzzi, 2012).

Braga et al. (2005) separa as zonas de autodepuração que representam os estágios de sucessões ecológicas ao longo do tempo, associados às áreas fisicamente identificáveis de um rio em um perfil longitudinal ao longo dos cursos de água, conforme pode ser observado na figura 5:

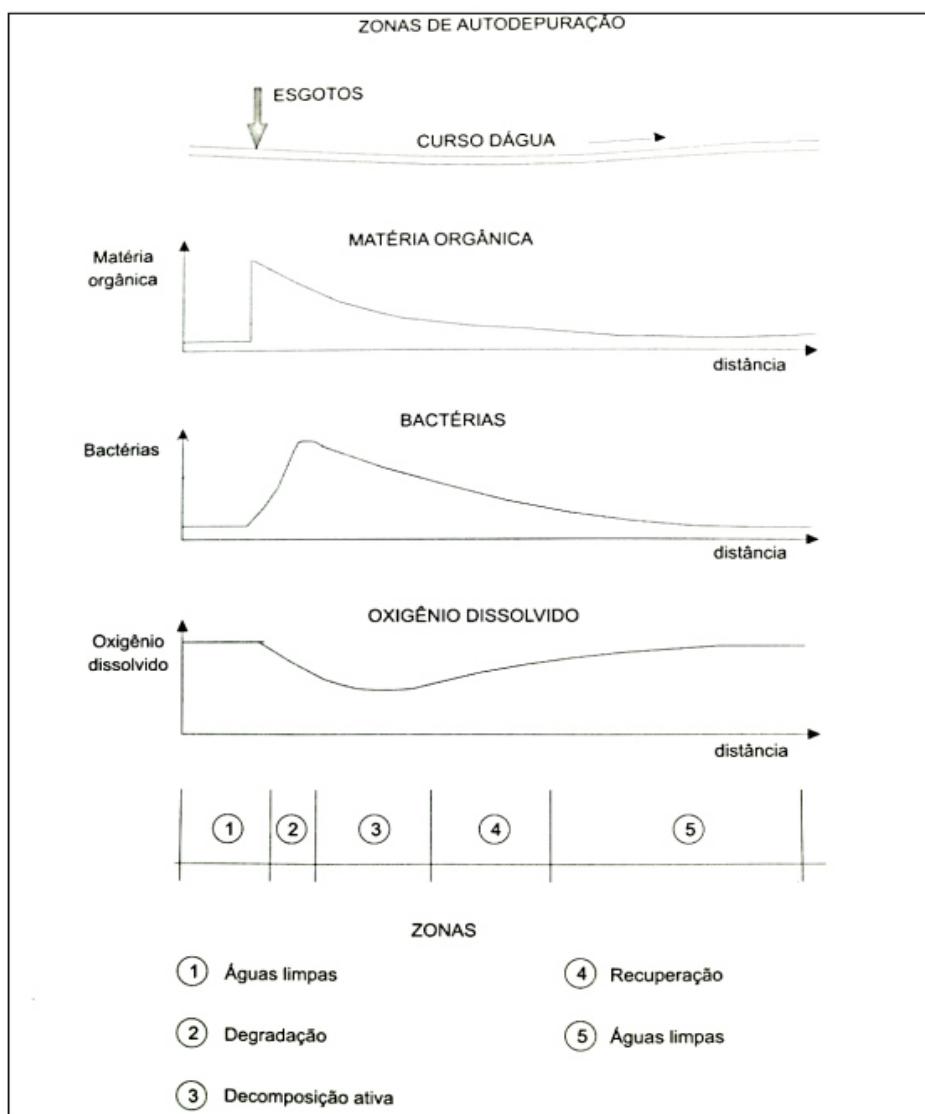
Figura 5 - Zonas de autodepuração



Fonte: Braga (2005)

Nesse contexto, Sperling (2007) também estuda o processo de autodepuração dos rios. Na Figura 6 o autor relaciona as zonas de autodepuração ao longo de um rio após receber uma carga pontual e contínua de esgoto com os gráficos de matéria orgânica, de bactérias e de oxigênio dissolvido.

Figura 6 - Perfil esquemático



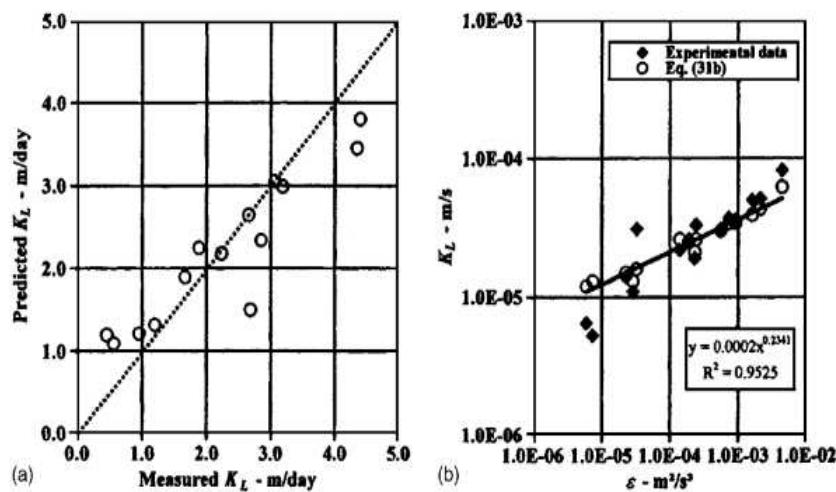
Fonte: Sperling (2007).

Assim, os estudos desenvolvidos no presente trabalho visam compreender melhor esse processo de autodepuração dos corpos hídricos.

### 3.4 Estado da arte

Conforme descrito anteriormente, a relação entre a interface-água ar é de difícil estudo. Alguns autores já propuseram essa temática antes, como o trabalho realizado por Chia e Gerhard (2003), esses autores mostraram os resultados da medição de aeração em um túnel de vento-água de laboratório sob diferentes fluxos combinados de vento e corrente. Nesse caso, foi verificado os fluxos puros de canal aberto e fluxos puros movidos pelo vento, na Figura 7 pode-se verificar, os resultados experimentais encontrados pelos autores.

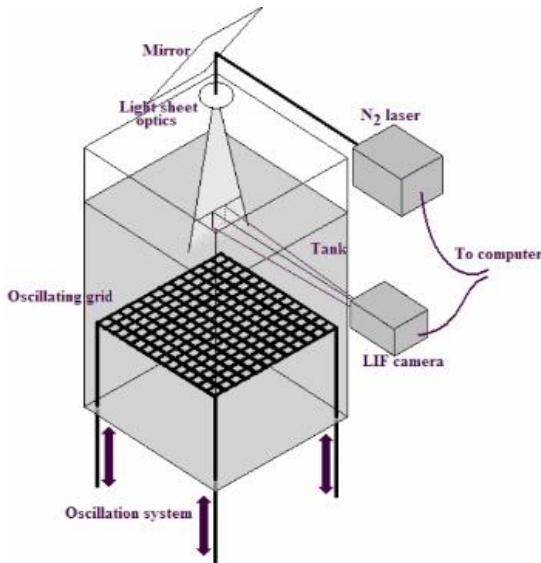
Figura 7 - Resultados experimentais de fluxos combinados de vento e corrente



Fonte: Chu e Jirka (2003)

O estudo de Schulz (2009) verifica a transferência de massa através de uma interface gás-líquido tanto de forma teórica, quanto experimentalmente, usando a transferência de oxigênio para a água como sistema gás-líquido. Na Figura 8 é possível verificar o aparato experimental utilizado. Essa pesquisa forneceu confirmação experimental do aspecto complementar de diferentes perfis, apoiando o uso do pico de concentração de oxigênio como limite entre regiões de influências moleculares e turbulentas, e quantificando a relevância da difusão através da função de coeficiente de redução.

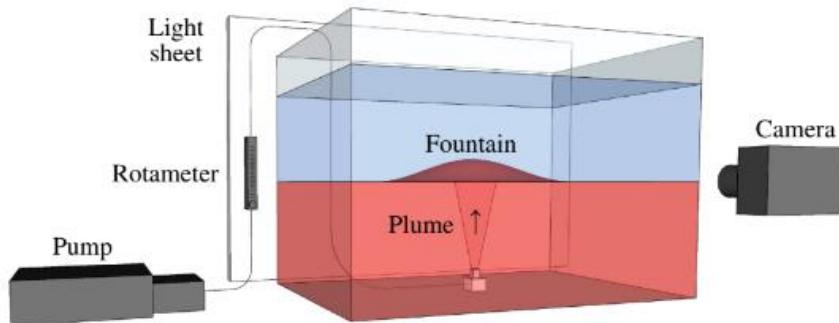
Figura 8 - Tanque de grade oscilante e configuração experimental para os experimentos



Fonte: Schulz (2009)

Outro trabalho que ilustra a relevância dos sistemas de mistura e aeração em reservatórios de água doce, foi realizado por Lima Neto et al. (2016). Com base em experimentos nos quais uma pluma de bolhas é produzida a partir de uma fonte pontual de bolhas e sobe através de um fluido ambiente composto por duas camadas de fluido de diferentes densidades, conforme pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Esquema da configuração experimental



Fonte: Lima Neto et al. (2016)

Diante disso, a metodologia experimental apresentada neste trabalho se difere dos casos apresentados por utilizar uma fonte de ar próxima do natural, proporcionando a possibilidade de entender melhor o processo de ventilação natural e sua influência na concentração de oxigênio da água.

## 4 MATERIAIS E MÉTODO

Essa pesquisa será dividida em duas etapas: a primeira consiste na realização de experimentos laboratoriais, enquanto a segunda é a análise dos dados encontrados e suas aplicações.

### 4.1 Pesquisa experimental

A pesquisa foi desenvolvida no Laboratório de Recursos Hídricos — LRH do DEHA/UFC conforme os recursos disponíveis. A sala é climatizada, assim, todos os experimentos foram realizados a uma temperatura praticamente constante em torno de 25º. Tal estudo foi realizado conforme as etapas descritas a seguir:

- Um ventilador de mesa, com 3 velocidades, é utilizado para simular o efeito do vento naturalmente;
- com o auxílio de um anemômetro digital, do medidor de ambiente multiparâmetros KR 500 (Figura 10). É medido a velocidade dos ventos para diferentes distâncias;

Figura 10 - Anemômetro digital



Fonte: AKROM (2022)

- A água é armazenada em um recipiente de dimensões 20 x 20 x 20 cm, permanecendo em repouso, a uma determinada distância do ventilador;
- Neste recipiente é introduzido um medidor de oxigênio dissolvido Pro 2030 representado na figura 11. Ele é calibrado conforme especificações técnicas do fabricante, e aguardado atingir a estabilidade, que será a concentração inicial no tempo 0 min;

Figura 11 - Medidor de Oxigênio dissolvido



Fonte: YSI (2022)

- A partir do momento que o medidor atinge a estabilidade, o ventilador é ligado e o tempo começa a ser contado. É anotado os valores de concentração para cada 0,5 minutos, até que chegue a 5 minutos, com exceção de alguns casos, onde foi considerado um tempo de até 10 minutos, a fim de ter uma amostra maior.
- O procedimento é repetido diversas vezes, alterando apenas a velocidade do ventilador e a distância do recipiente até ele;

#### 4.2 Análise de dados

Será realizada uma análise dos dados encontrados e anotados em laboratório que serão exportados para uma planilha Excel, com o intuito de avaliar melhor as taxas de transferência de oxigênio para a água e posteriormente compará-los com dados presentes na literatura. Conforme descrito a seguir:

- Verificação das Taxas de transferência de oxigênio para a água:
  - Os dados entram no programa em forma de tabela, onde para cada minuto medido, para uma determinada velocidade será indicado o valor de oxigênio dissolvido;
  - Com base nesses dados será gerado gráficos da incorporação de

- oxigênio em função do tempo para cada velocidade;
- A partir desse momento será analisado qual o impacto da variação de velocidade de vento em cada caso, e o comportamento da curva de oxigenação.
  - Verificação dos coeficientes de transferência de oxigênio para a água:
    - Com base nesses dados eles serão calibrados utilizando a equação (6) que representa o processo de aeração descrito pelo modelo de Streeter-Phelps (1925):

$$\frac{dc}{dt} = k_2 x C \quad (6)$$

Onde,

L= Demanda bioquímica de oxigênio (mg/L)

D = Déficit de oxigênio (mg/L)

C = Oxigênio dissolvido (mg/L)

C<sub>s</sub> = Concentração de saturação de OD (mg/L)

k<sub>1</sub>= Coeficiente de desoxigenação ( $Dia^{-1}$ )

k<sub>2</sub>= Coeficiente de aeração ( $Dia^{-1}$ )

t = tempo (Dias)

- Assim, com a interpolação dos diferentes resultados, utilizando o método do desvio padrão, será possível determinar o valor de K<sub>2</sub> para a incorporação de oxigênio em cada caso;
- Com base nos dados encontrados foi verificada a possibilidade de estabelecer uma correlação entre a variável velocidade de vento e o coeficiente de aeração;
- Por fim, os dados foram comparados com os valores apresentados por Chu e Jirka (2003);
- Discussão sobre a aplicabilidade no processo de autodepuração dos corpos Hídricos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

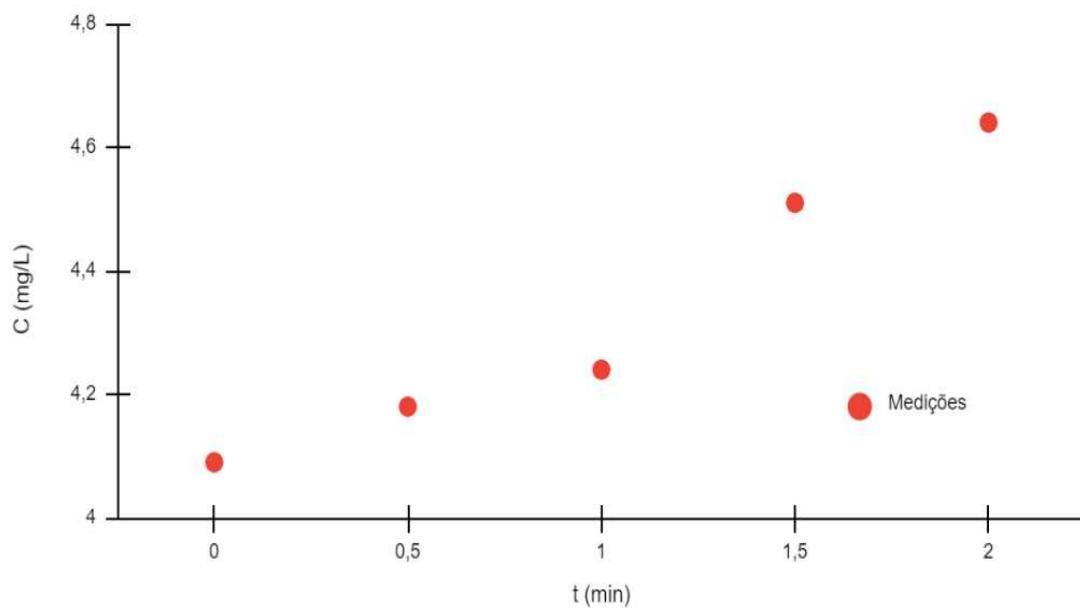
### 5.1 Evolução temporal da curva de Oxigenação da água

Foram realizados diversos experimentos, os 14 principais foram descritos a seguir, com 13 diferentes velocidades de vento. Com base nos resultados encontrados, apresentaram curva de incorporação de oxigenação normalmente positiva.

- Mesma velocidade e diferentes distâncias:
- Velocidade de 3,8 m/s:

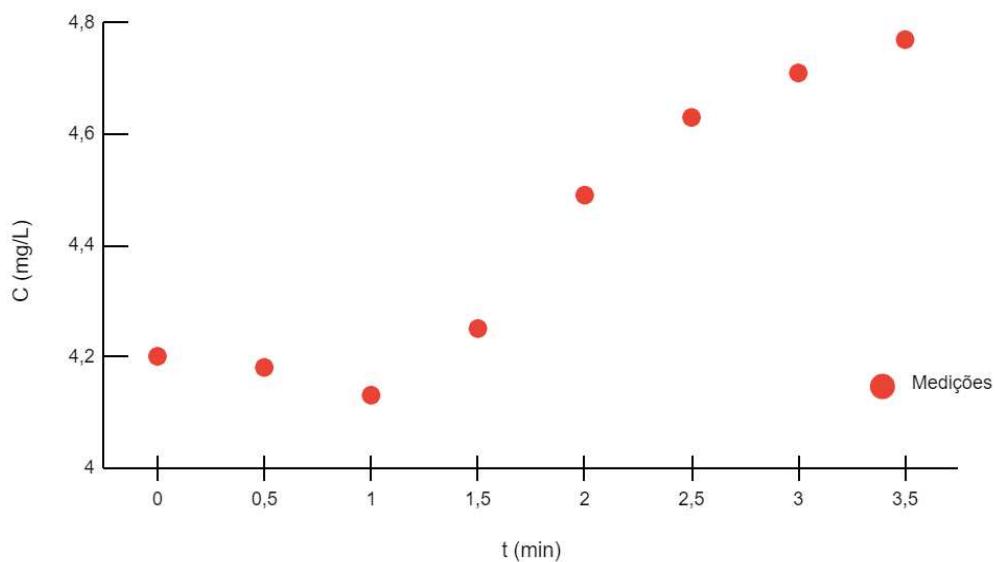
Para essa velocidade foram realizados dois experimentos, com duas distâncias diferentes (50 cm e 95 cm) entre a fonte de vento e o recipiente de armazenamento de água. Ambas apresentaram comportamento semelhante, com relação à incorporação de oxigênio. Para verificação de uma amostragem de dados maior, foram realizadas medições por 10 minutos, a cada 30 segundos. Segue tabela e gráficos com os dados encontrados para cada distância:

Gráfico 1 - Distância de 50 cm para velocidade de 3,8 m/s



Fonte: Autoral (2022)

Gráfico 2 - Distância de 95 cm para velocidade de 3,8 m/s



Fonte: Autoral (2022)

Pode-se perceber que para a distância de 50 cm a curva de oxigenação teve um comportamento crescente, apresentando uma variação de incorporação máxima de 0,65 mg/L. Nesse contexto, a curva a 95 cm de distância apresentou um comportamento de início também crescente até o minuto 3,5. Com incorporação máxima de 0,64 mg/L, bem próxima da distância de 50 cm. O que indica que essa variação na distância mesmo com mudanças no comportamento da curva não afetou a incorporação máxima, sendo bem semelhantes.

As demais velocidades

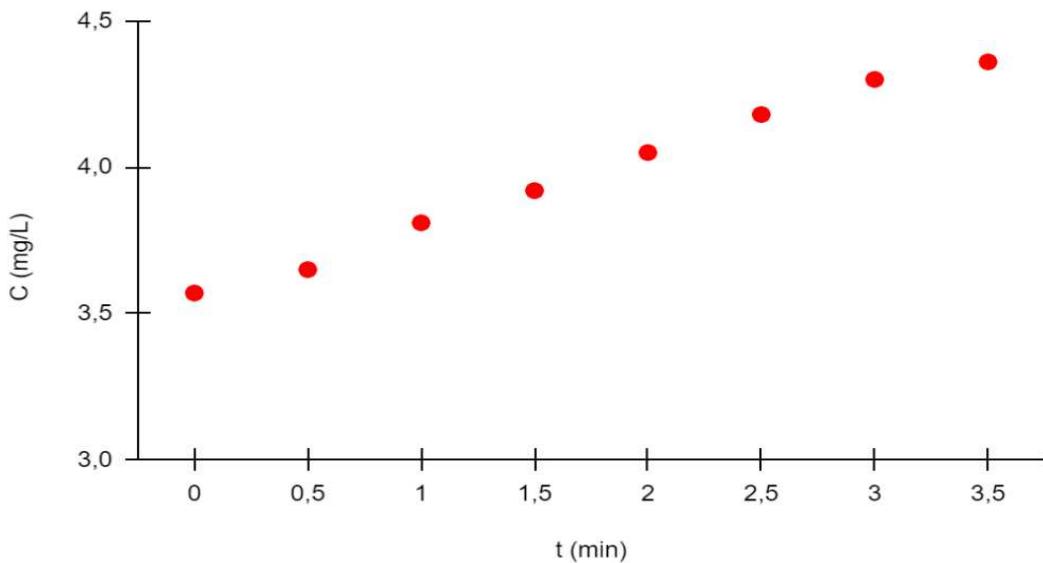
- Comportamento linear:

Algumas velocidades apresentaram curvas com comportamento linear, conforme pode ser observado a seguir, onde será descrito cada uma dessas velocidades.

- Velocidade de 4,4 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 45 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação até alcançar estabilidade próximo ao minuto 3,5. A variação de incorporação máxima encontrada foi de 0,79 mg/L.

Gráfico 3 - Velocidade de 4,4 m/s

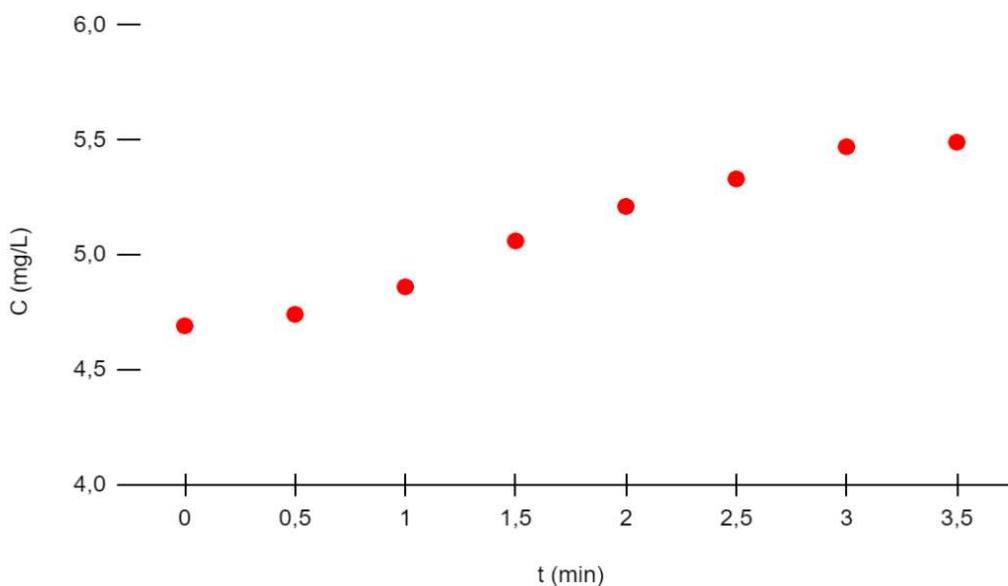


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 4,8 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 50 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação até alcançar estabilidade próximo ao minuto 3,5. A variação de incorporação máxima encontrada foi de 0,80 mg/L.

Gráfico 4 - Velocidade de 4,8 m/s

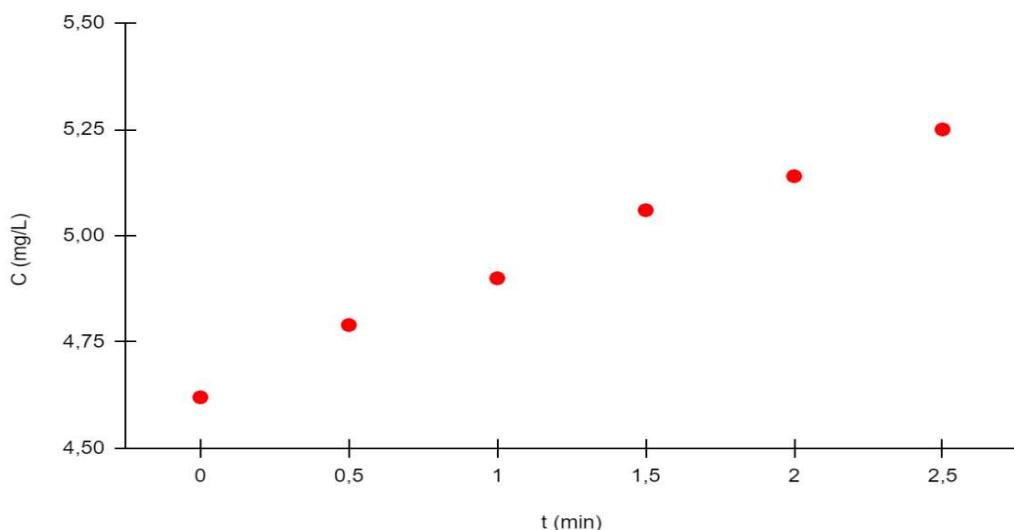


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 5,3 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 50 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação até alcançar a máxima no minuto 2,5. A variação de incorporação máxima encontrada foi de 0,63 mg/L.

Gráfico 5 - Velocidade de 5,3 m/s

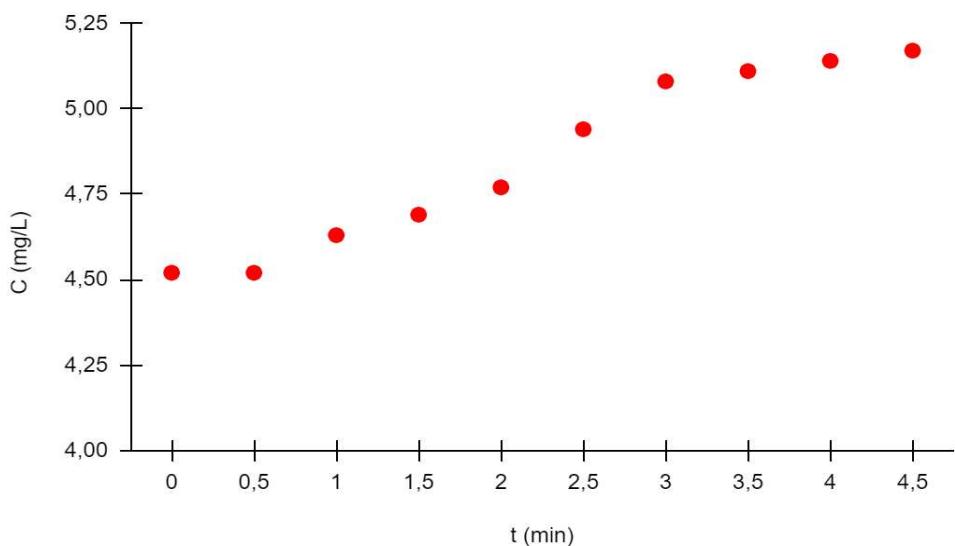


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 5,1 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 30 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação até alcançar estabilidade próximo ao minuto 4,5. A variação de incorporação máxima encontrada foi de 0,65 mg/L.

Gráfico 6 - Velocidade de 5,1 m/s



Fonte: Autoral (2022)

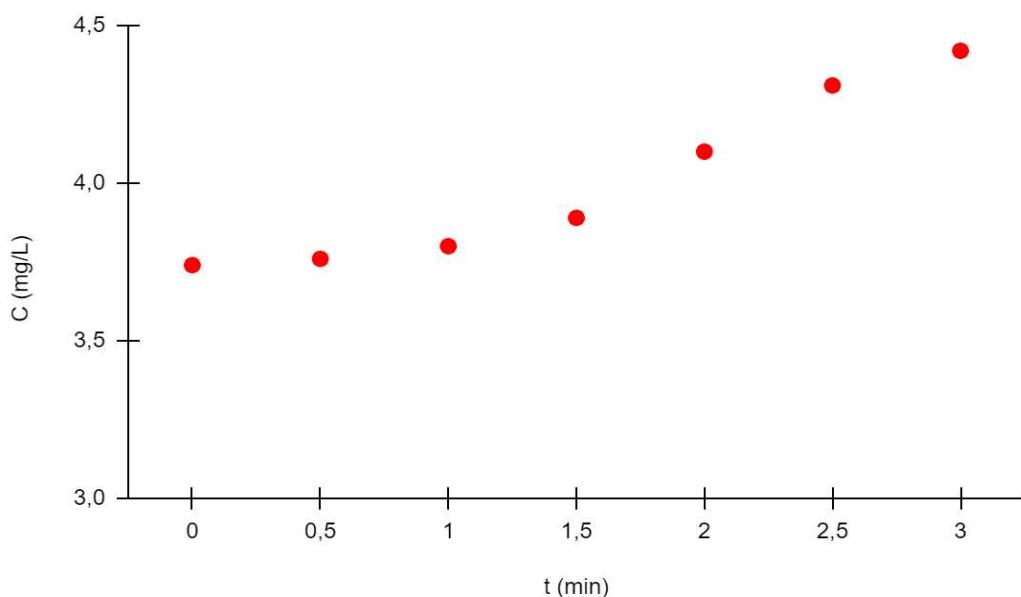
- Estabilidade inicial:

Algumas velocidades apresentaram curvas com uma certa estabilidade inicial para posterior elevação da curva, conforme pode ser observado a seguir, onde será descrito cada uma dessas velocidades.

- Velocidade de 4,9 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 90 cm da fonte, e apresentou uma curva de incorporação em primeiro momento estável com elevação baixa. No entanto, a partir do minuto 1 passou a se elevar mais rápido até atingir a máxima incorporação de 4,59 mg/L. A variação de incorporação máxima encontrada foi de 0,85 mg/L.

Gráfico 7 - Velocidade de 4,9 m/s

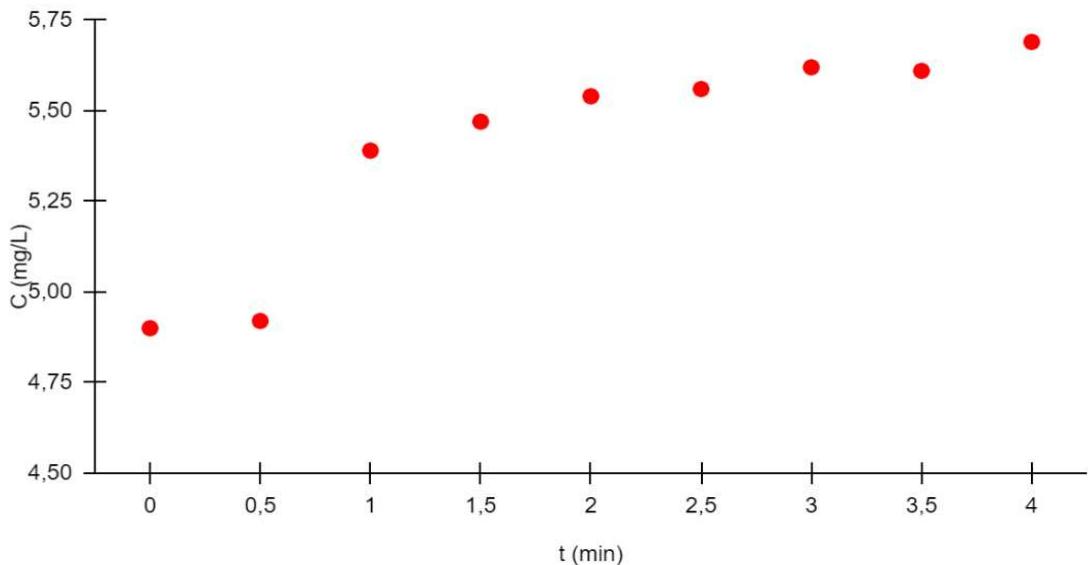


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 5,5 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 10 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação até alcançar estabilidade próximo ao minuto 3,0. A incorporação máxima encontrada foi de 0,79 mg/L.

Gráfico 8 - Velocidade de 5,5 m/s

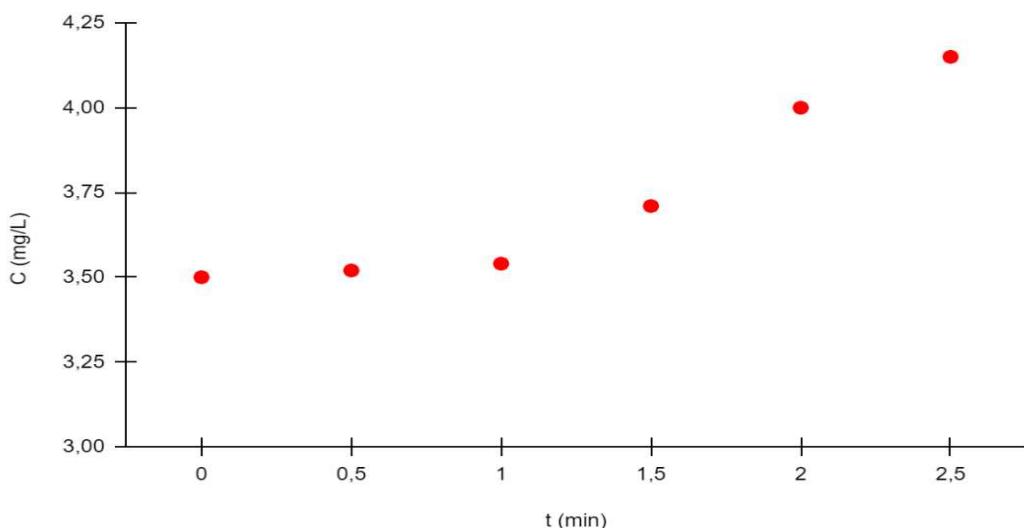


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 5,8 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 40 cm da fonte, e apresentou um comportamento linear no primeiro minuto, onde começou a se elevar até o minuto 2,5. A variação da incorporação máxima encontrada foi de 1,12 mg/L.

Gráfico 9 - Velocidade de 5,8 m/s

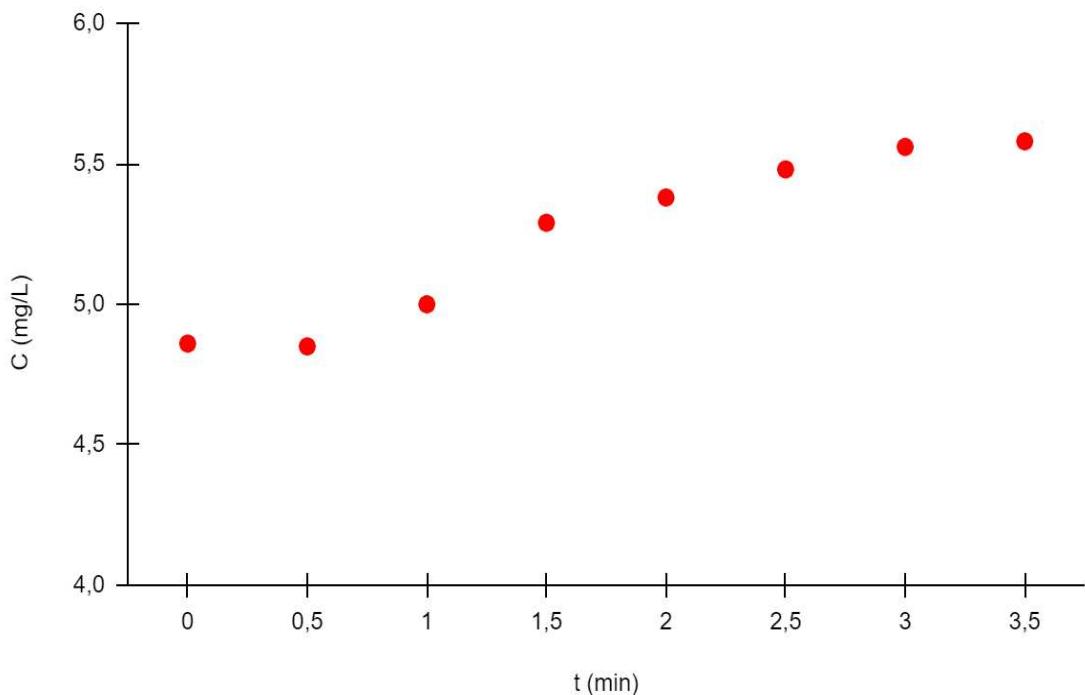


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 6,7 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 30 cm da fonte, e apresentou estabilidade inicial e posterior elevação na curva de incorporação até alcançar a máxima no minuto 3,5. A variação de incorporação máxima encontrada foi de 0,73 mg/L.

Gráfico 10 - Velocidade de 6,7 m/s



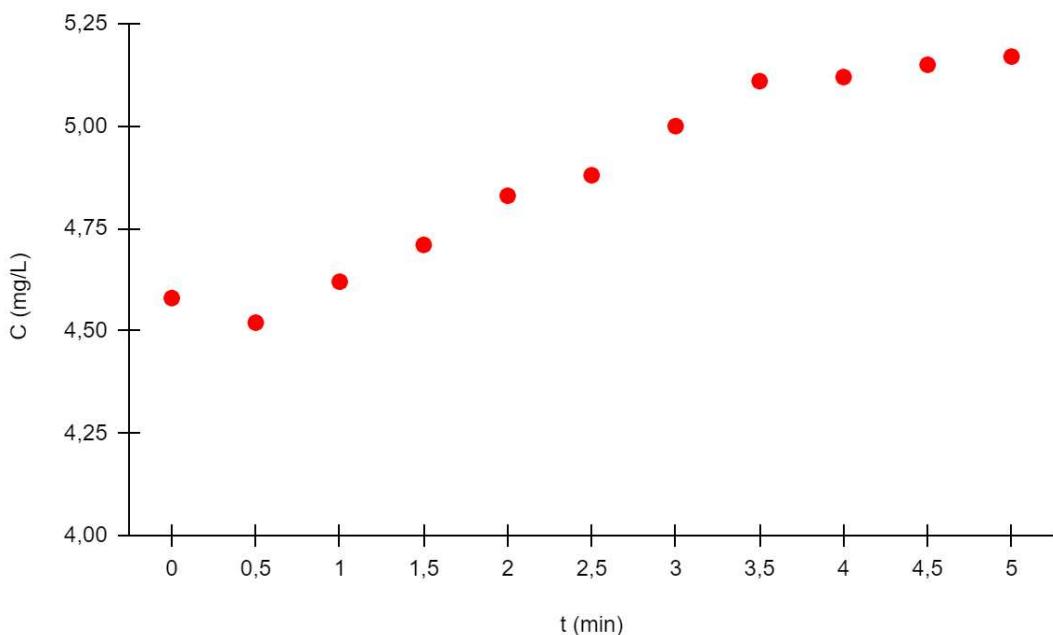
Fonte: Autoral (2022)

- Decaimento inicial:

- Velocidade de 6,0 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 30 cm da fonte, e apresentou uma pequena queda de oxigenação no início, o que pode indicar que o corpo hídrico ainda não atingira a estabilidade quando o experimento iniciou. A partir do minuto 0,5 ocorre elevação na curva de incorporação, aproximadamente linear, até alcançar estabilidade próximo ao minuto 4,5. A incorporação máxima encontrada foi de 0,65 mg/L.

Gráfico 11 - Velocidade de 6,0 m/s

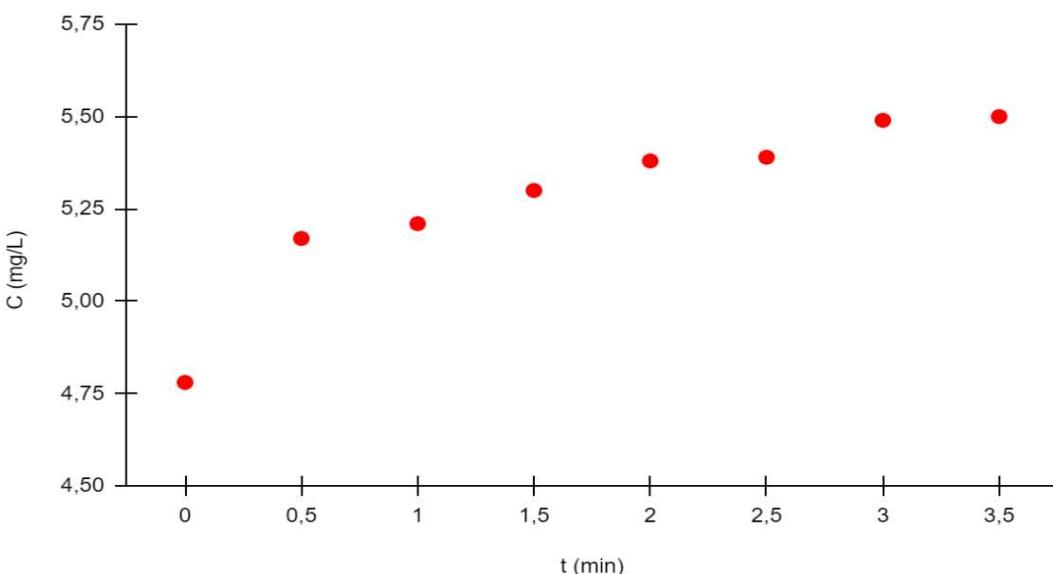


Fonte: Autoral (2022)

- Rápida incorporação:
  - Velocidade de 6,6 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 10 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação muito rápida nos primeiros 30 segundos de 0,39 mg/L, mais da metade da incorporação máxima de 0,72 mg/L. Após esse período a curva continuou se elevando, porém, mais devagar.

Gráfico 12 - Velocidade de 6,6 m/s

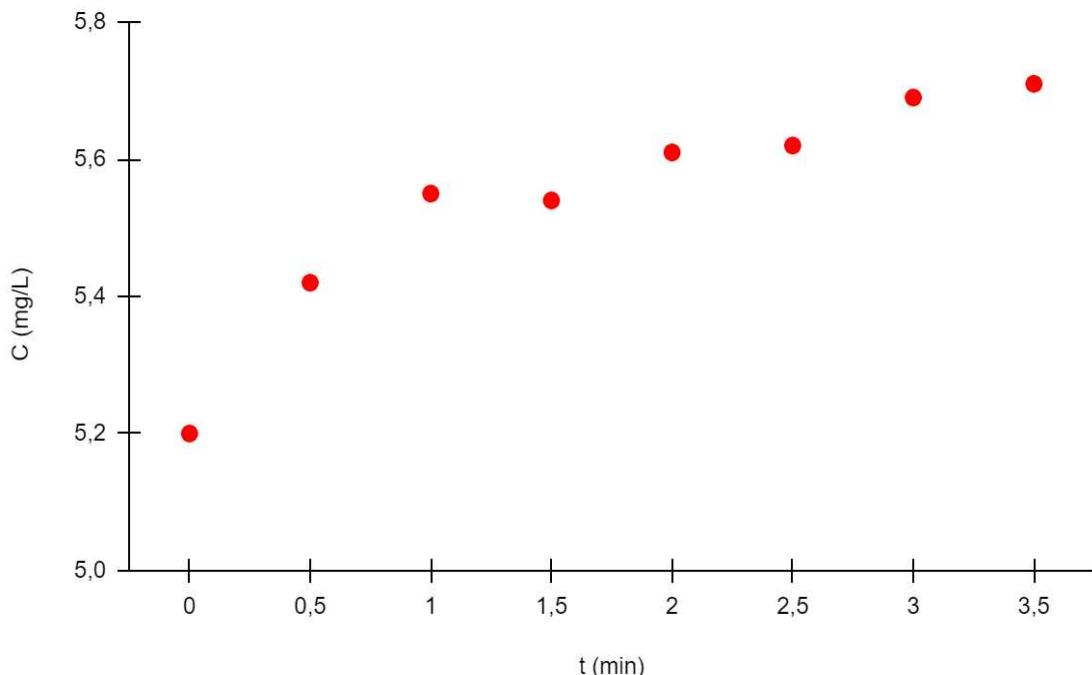


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 7,4 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 10 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação bem rápida no primeiro minuto, ficando mais lenta a partir de então até atingir a máxima no minuto 3,5. A incorporação máxima encontrada foi de 0,51 mg/L.

Gráfico 13 - Velocidade de 7,4 m/s



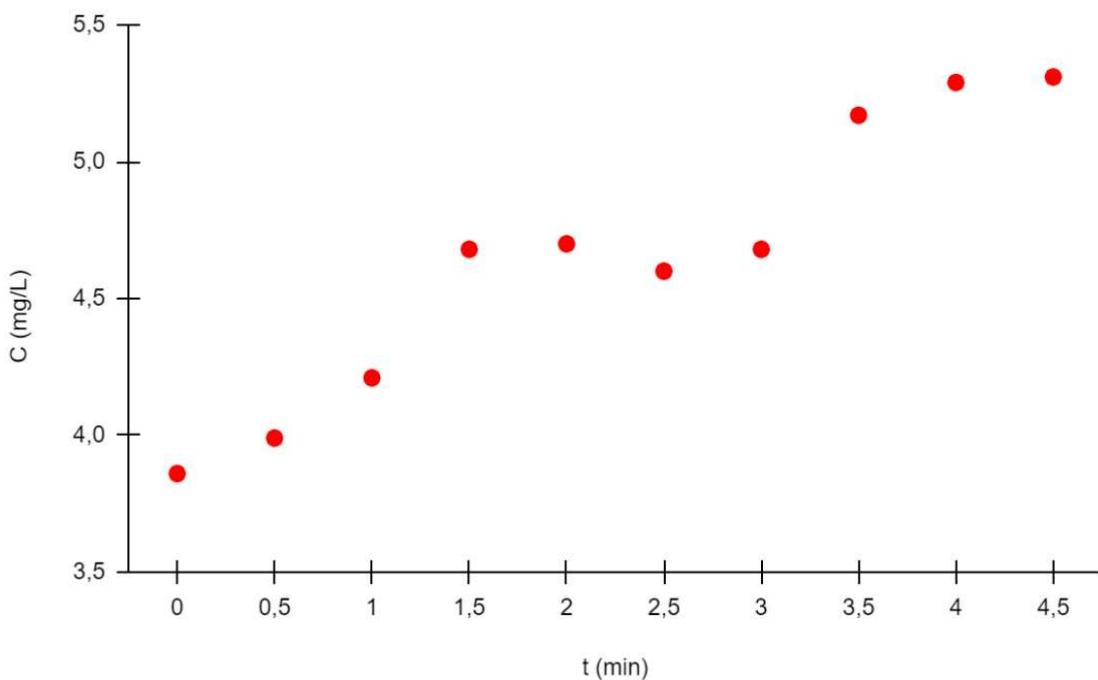
Fonte: Autoral (2022)

- Estabilidade em um intervalo médio:

- Velocidade de 7,0 m/s:

Tal velocidade foi encontrada a uma distância de 15 cm da fonte, e apresentou elevação na curva de incorporação até alcançar estabilidade próximo ao minuto 1,5 e voltar a se elevar no minuto 3,0, a variação de incorporação máxima encontrada foi de 1,45 mg/L, o maior valor encontrado.

Gráfico 14 - Velocidade de 7,0 m/s



Fonte: Autoral (2022)

## 5.2 Calibração dos coeficientes de oxigênio dissolvido

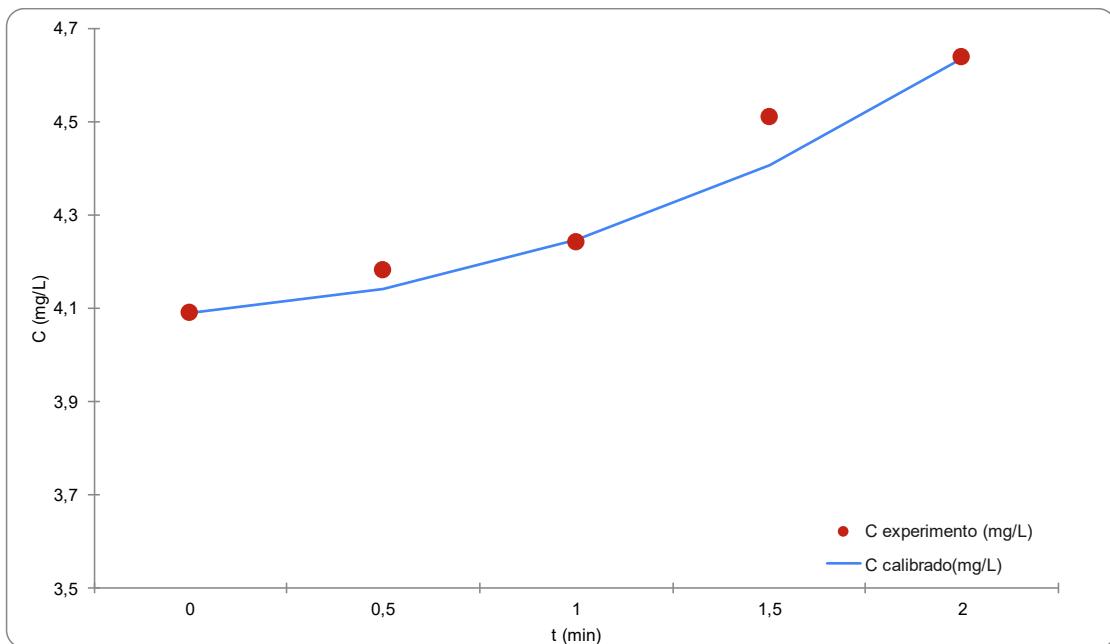
Com base nos dados encontrados, esses valores foram aplicados na equação a seguir, que descreve o comportamento de oxigenação, para determinar os parâmetros K2 de cada velocidade:

$$C = Co \times e^{-K2t} \quad (7)$$

Para determinação do parâmetro K2, os valores foram ajustados utilizando a sessão da curva de oxigenação que representavam a elevação da concentração da curva de oxigênio e o método de minimização do desvio, com base nos dados estimados para diferentes valores de K2. A seguir será descrito os valores de K2 encontrados para cada velocidade:

- Velocidade de 3,8 m/s:

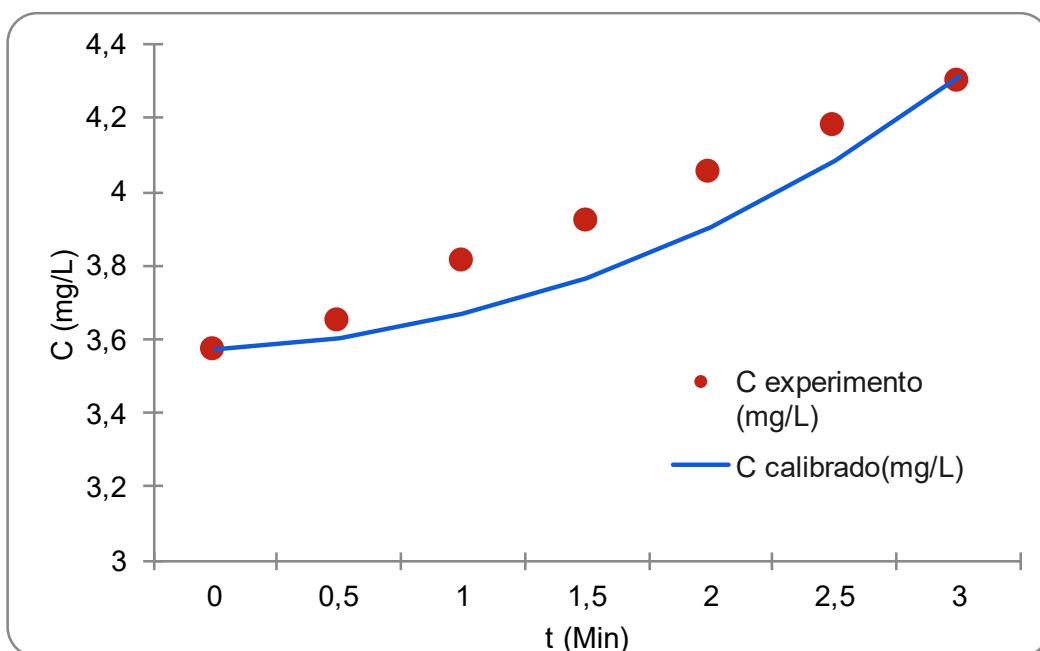
Para a velocidade de 3,8 m/s a uma distância de 50 cm, foi definido o valor de K2:  $0,025 \text{ min}^{-1}$  ou  $36 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,03. Na tabela 16 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio, até onde a curva foi considerada, tendo em vista que a análise é realizada até a curva atingir a estabilidade ou começar a decair, indicando consumo de oxigênio. No gráfico é possível comparar os valores encontrados experimentalmente com os estimados por meio da calibração dos coeficientes, nota-se que os valores apresentaram baixas variações.

Gráfico 15 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 3,8 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de  $4,4 \text{ m/s}$ :

Foi definido o valor de  $K_2: 0,018 \text{ min}^{-1}$  ou  $25,92 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,15. Na tabela 17 (ANEXO), é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 16, é possível reparar que os valores apresentaram uma certa variação, mas ainda baixa.

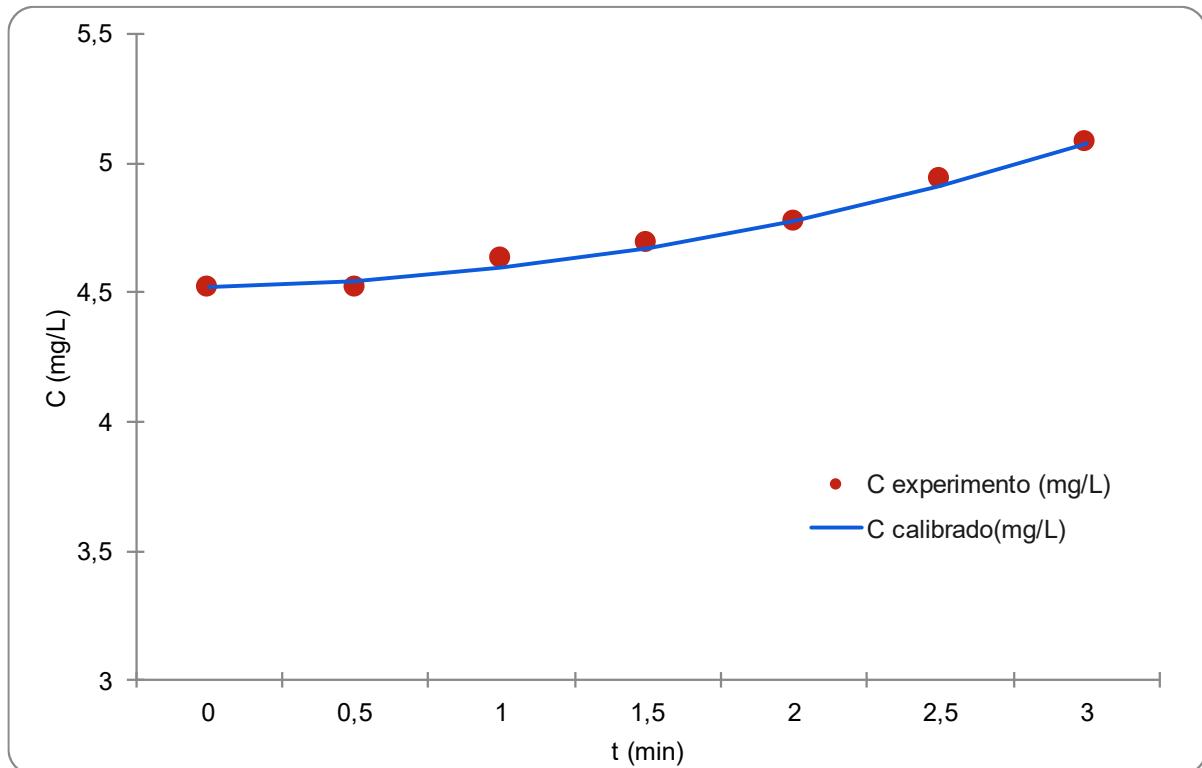
Gráfico 16 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 4,4 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 4,8 m/s:

Foi definido o valor de  $K_2: 0,017 \text{ min}^{-1}$  ou  $24,48 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,08. Na tabela 18 (ANEXO), é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 17 é possível reparar que os valores apresentaram pouca variação, ficando bem próximos da curva estimada.

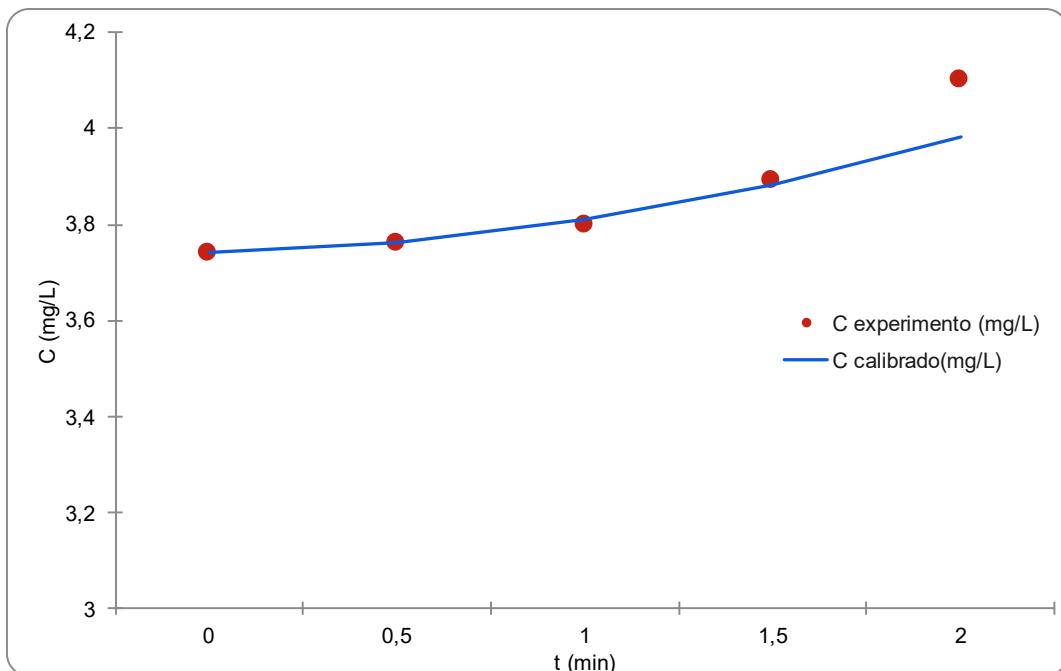
Gráfico 17 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 4,8 \text{ m/s}$ )



Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 4,9 m/s:

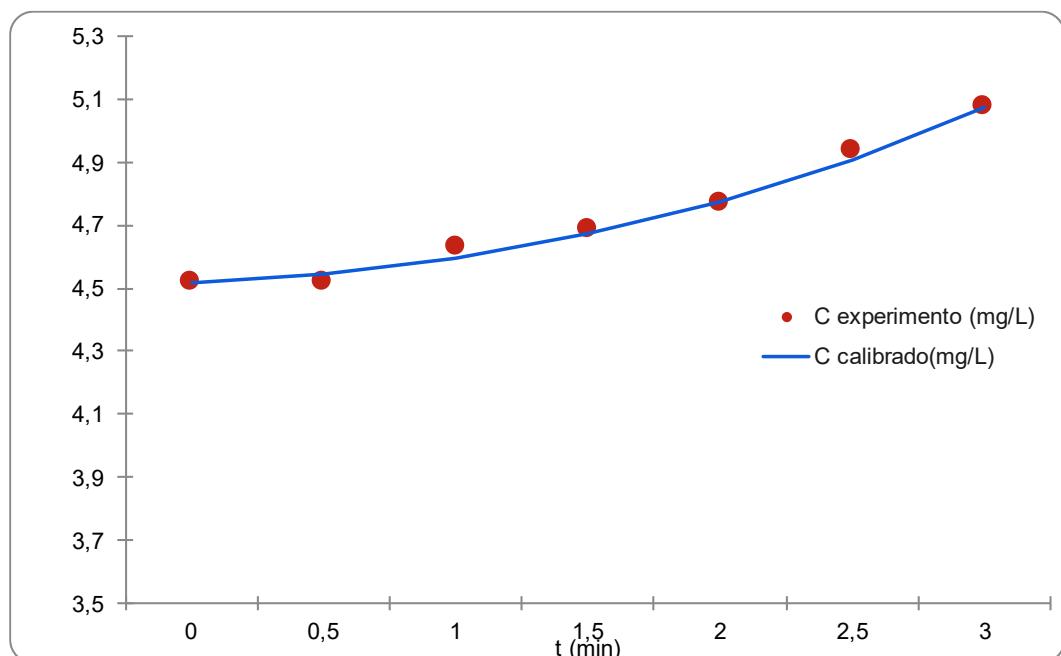
Foi definido o valor de  $K_2: 0,0125 \text{ min}^{-1}$  ou  $18 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,03. Na tabela 19 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 18 é possível reparar que os valores apresentaram uma certa variação nula para as primeiras amostras, com um pequeno desvio na última.

Gráfico 18 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 4,9 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de  $5,1 \text{ m/s}$ :

Foi definido o valor de  $K_2: 0,011 \text{ min}^{-1}$  ou  $15,84 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,03. Na tabela 20 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 19 é possível reparar que os valores apresentaram uma variação bem baixa.

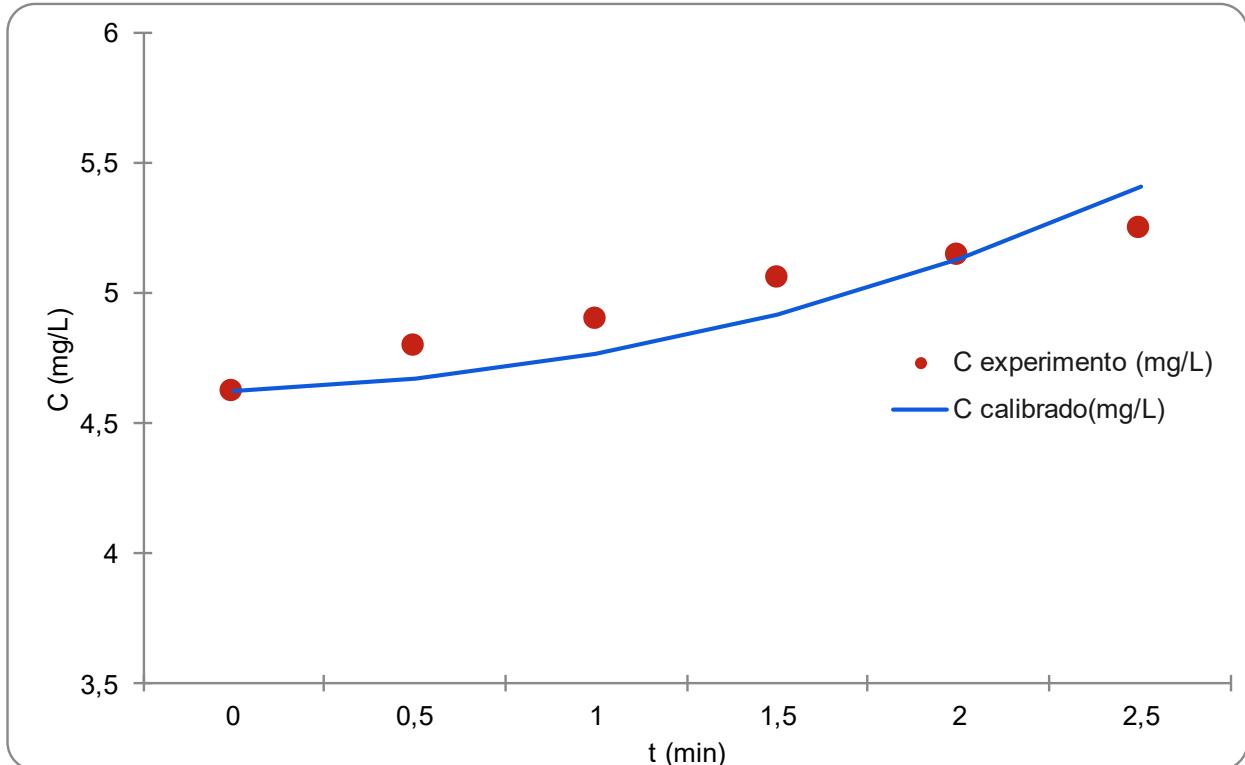
Gráfico 19 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 5,1 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 5,3 m/s:

Foi definido o valor de K2:  $0,021 \text{ min}^{-1}$  ou  $30,24 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,11. Na tabela 21 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 20 é possível reparar que os valores apresentaram uma certa variação, mas ainda baixa.

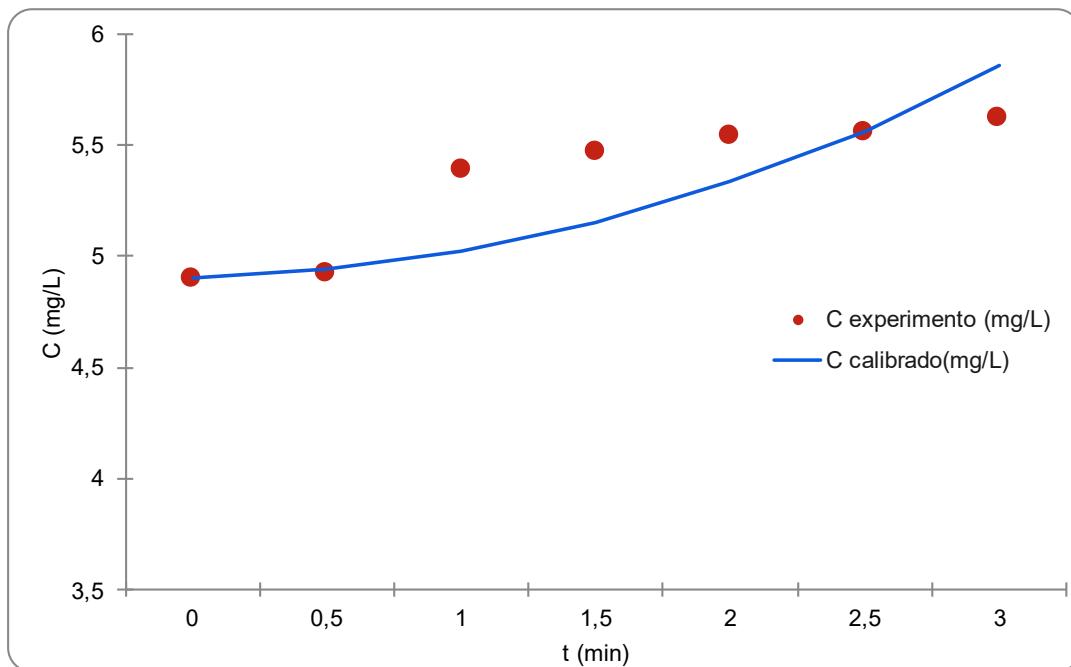
Gráfico 20 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 5,3 \text{ m/s}$ )



Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 5,5 m/s:

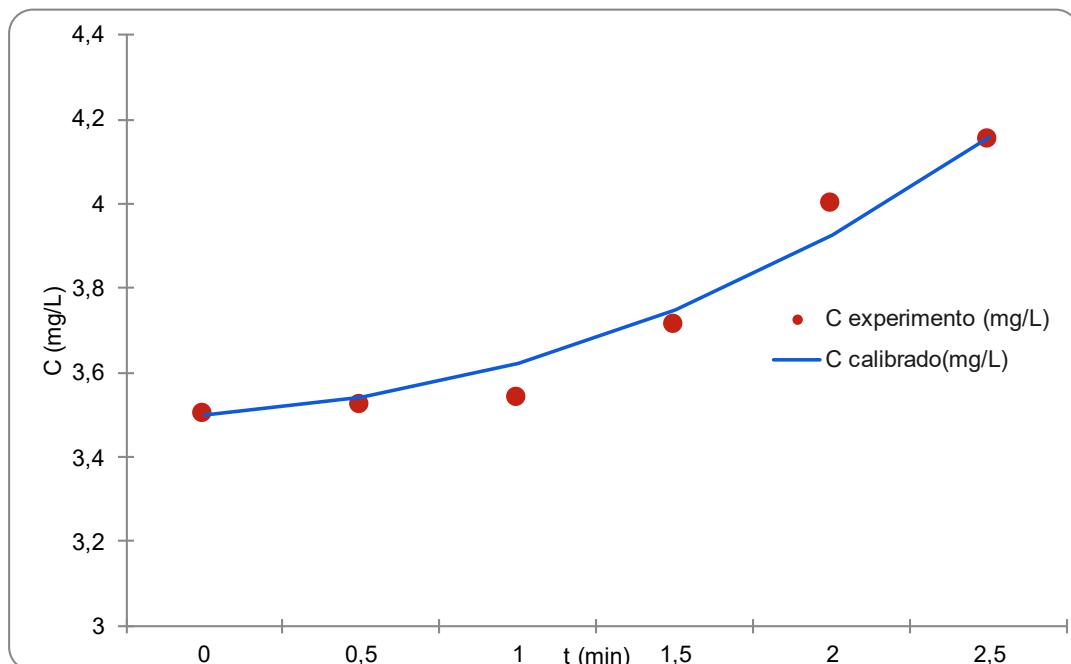
Foi definido o valor de K2:  $0,017 \text{ min}^{-1}$  ou  $24,48 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,21. Na tabela 22 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 21 é possível reparar que os valores apresentaram os maiores desvios vistos até então, com uma certa variação, mas ainda baixa.

Gráfico 21 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 5,5 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 5,8 m/s:

Foi definido o valor de  $K_2: 0,023 \text{ min}^{-1}$  ou  $33,12 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,06. Na tabela 23 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 22 é possível reparar que os valores apresentaram uma certa variação, mas bem baixa.

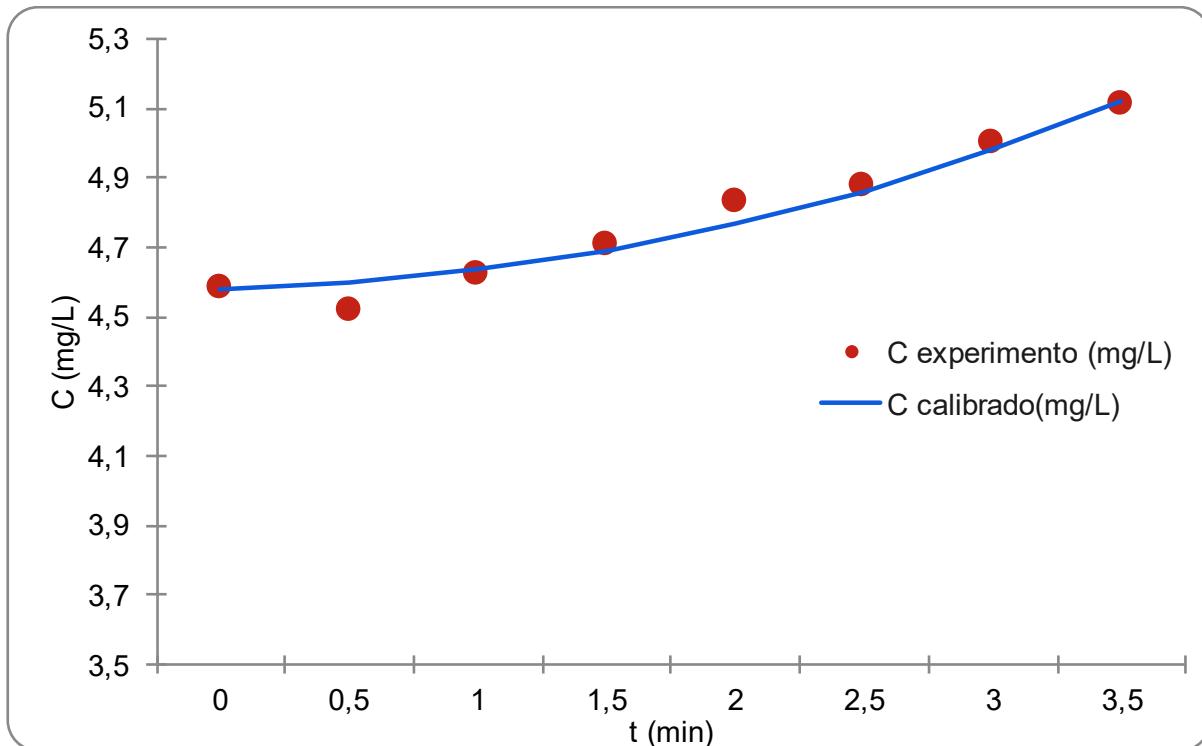
Gráfico 22 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 5,8 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 6,0 m/s:

Foi definido o valor de K2:  $0,008 \text{ min}^{-1}$  ou  $11,52 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,05. Na tabela 24 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 23 é possível reparar que os valores apresentaram pouca variação, sendo bem próximos dos encontrados no laboratório.

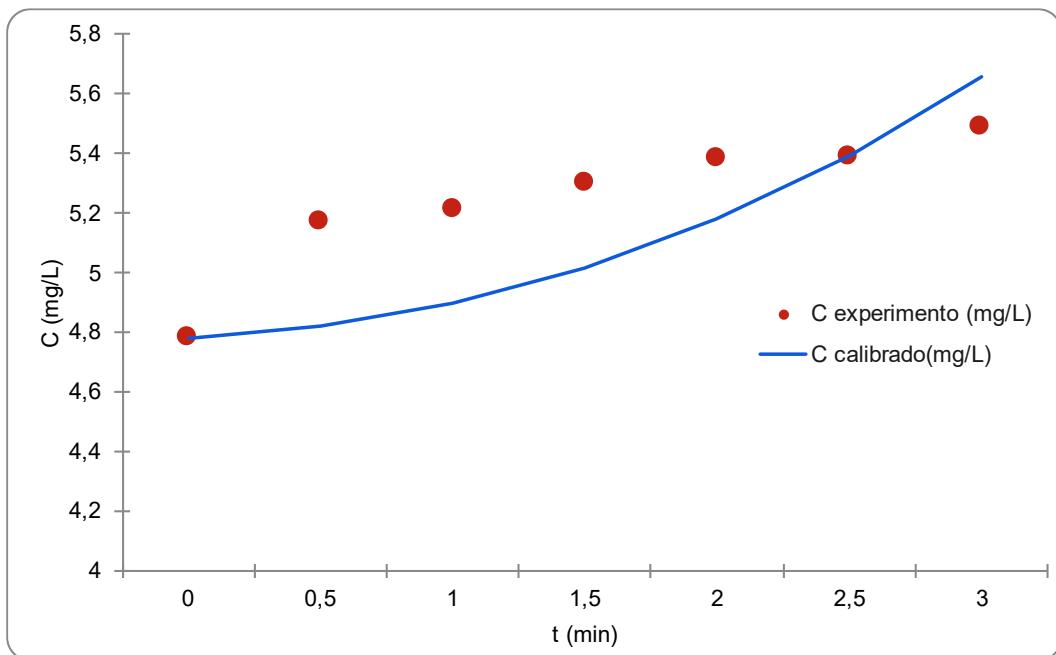
Gráfico 23 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 6,0 \text{ m/s}$ )



Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 6,6 m/s:

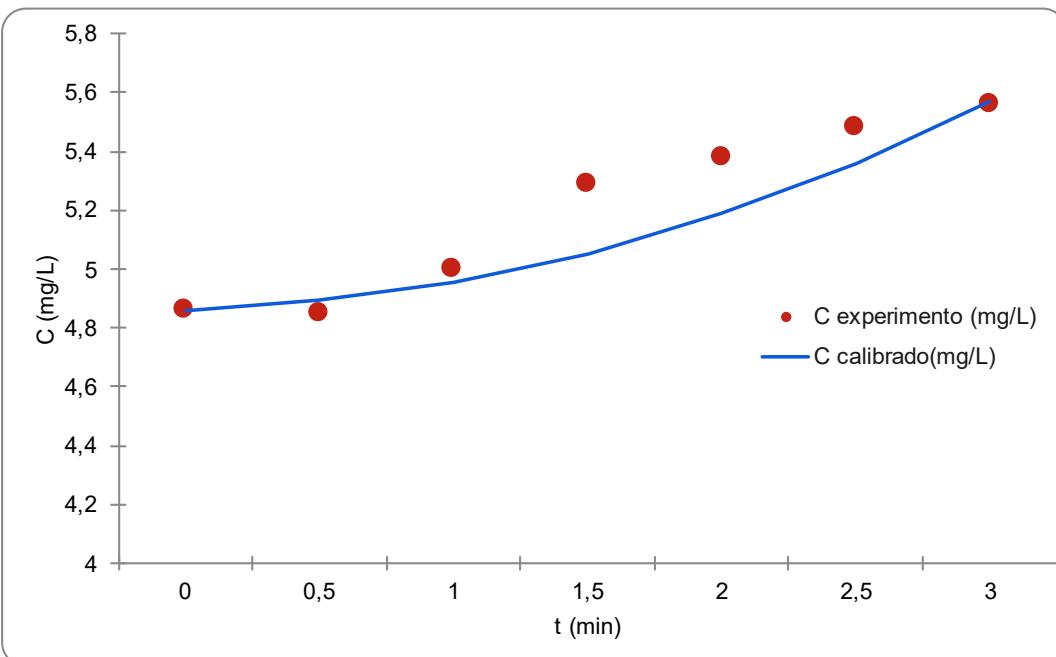
Foi definido o valor de K2:  $0,016 \text{ min}^{-1}$  ou  $23,04 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,25. Na tabela 25 (ANEXO) é apresentado os valores altos de desvio. No gráfico 24 é possível comparar com os resultados do laboratório. Apresentando valores de desvio um pouco mais altos que os dos demais resultados.

Gráfico 24 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 6,6 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 6,7 m/s:

Foi definido o valor de  $K_2: 0,013 \text{ min}^{-1}$  ou  $18,72 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,12. Na tabela 26 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 25 é possível reparar que os valores apresentaram uma certa variação, mas ainda baixa.

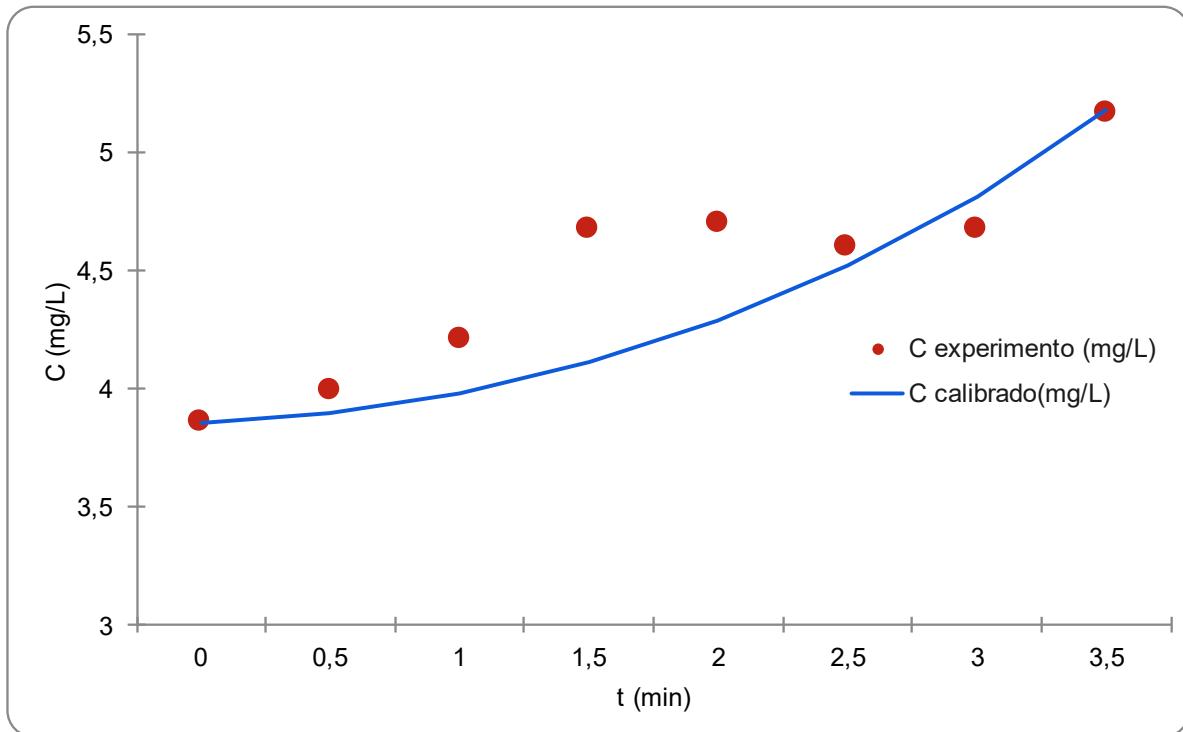
Gráfico 25 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 6,7 \text{ m/s}$ )

Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 7,0 m/s:

Foi definido o valor de  $K_2$ :  $0,021 \text{ min}^{-1}$  ou  $30,24 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,33 o maior encontrado. Na tabela 26 é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 27 (ANEXO) é possível reparar que os valores apresentaram uma variação considerável.

Gráfico 26 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V= 7,0 \text{ m/s}$ )

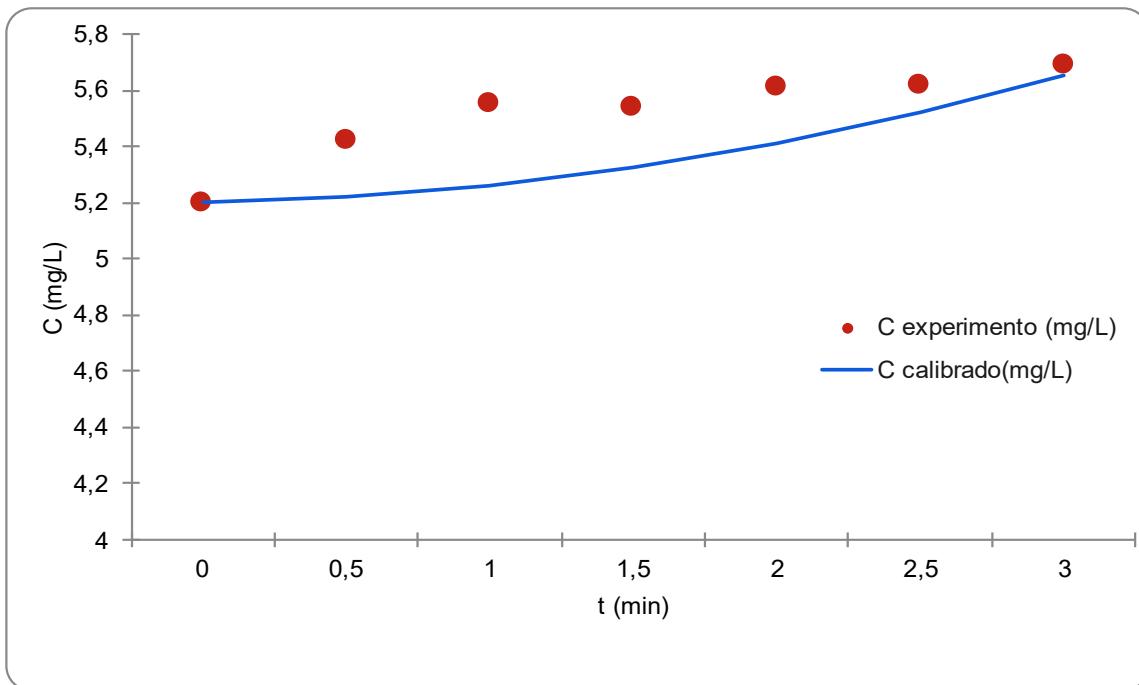


Fonte: Autoral (2022)

- Velocidade de 7,4 m/s:

Foi definido o valor de  $K_2$ :  $0,008 \text{ min}^{-1}$  ou  $11,52 \text{ Dia}^{-1}$ , apresentando o desvio total de 0,19. Na tabela 28 (ANEXO) é apresentado os valores pontuais de cada desvio. No gráfico 27 é possível reparar que os valores apresentaram uma certa variação.

Gráfico 27 - Comparação de coeficientes experimentais e calibrados ( $V = 7,4 \text{ m/s}$ )

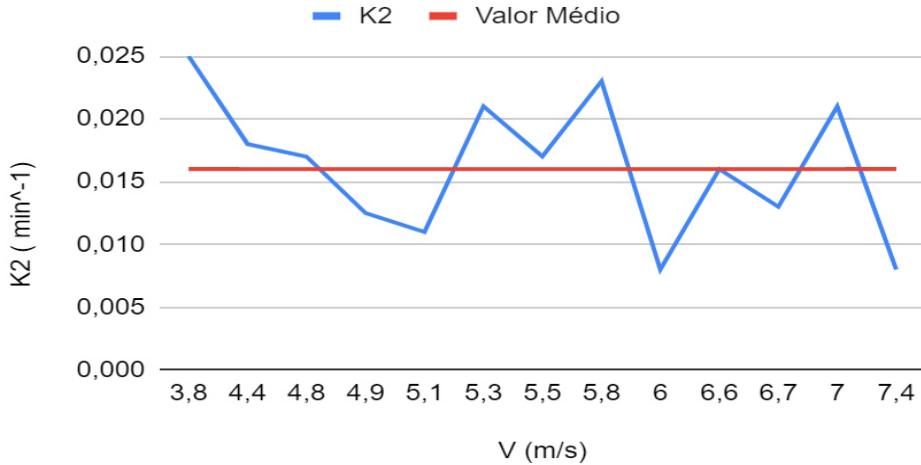


Fonte: Autoral (2022)

### 5.3 Correlação entre as velocidades de vento e oxigênio dissolvido

Após estimados os valores de coeficiente de concentração foi comparado com os demais dados, conforme gráfico 28. Nele é possível observar que a variação do coeficiente  $K_2$  foi baixa, com um valor médio de  $0,016 \text{ min}^{-1}$ . Apresentando uma pequena elevação ou queda dependendo da velocidade. Com base nisso, não foi possível desenvolver uma correlação direta entre as variáveis coeficientes de concentração e velocidade de vento, sendo assim, necessário um estudo mais avançado com a adição de outras possíveis variáveis como intensidade de vento, profundidade ou temperatura.

Gráfico 28 - Coeficiente (K2) x Velocidade de vento (m/s)



Fonte: Autoral (2022)

Na literatura, alguns trabalhos também estudaram a incorporação de oxigênio com a velocidade do vento, como o trabalho desenvolvido por Chu e Jirka (2003) com experimentos realizados no Tilting Wind-Water Tunnel. A partir deles foram verificados os resultados apresentados na Figura 12.

Figura 12 - Resumo das condições de vento e velocidade de transferência

Stream flow conditions	Wind parameters		$K_{L20}$ (m/day)
	$U_a$ (m/s)	$u_{*a}$ (cm/s)	
Case S0 pure wind	1.73	7.42	0.189
	4.22	17.26	0.538
	6.48	31.62	1.877
	8.65	42.16	3.895
Case S1 cocurrent	0.00	0.00	0.496
	1.60	6.39	1.089
	4.08	12.93	1.406
	6.28	25.34	2.291
	8.54	41.11	3.537
Case S2 cocurrent	0.00	0.00	2.817
	1.71	4.00	2.914
	4.23	9.82	2.973
	6.53	15.92	2.983
	8.67	25.56	3.365
Case S3 countercurrent	2.43	11.98	0.858
	3.91	15.48	2.044
	5.25	18.76	2.738
	6.40	21.65	3.132
Case S4 cocurrent	0.00	0.00	2.698
	2.03	6.83	3.000
	4.71	12.35	3.199
	7.34	24.30	3.764
	10.10	44.73	5.483
Case S5 cocurrent	0.00	0.00	0.555
	1.58	6.86	0.828
	4.03	16.07	1.854
	6.25	27.40	2.567
	8.56	37.00	3.442
	10.60	50.34	5.134

Fonte: Chu e Jirka (2003)

Nessa perspectiva, os valores encontrados nesta pesquisa, após multiplicados pela altura média de 0,18 m (Tabela 29 - Anexo), apresentaram semelhanças com os apresentados pelo autor de K<sub>2</sub> (m/dia), com algumas variações. Na tabela 1 exemplifica alguns casos onde os valores apresentaram uma variação pequena para velocidades semelhantes. Vale ressaltar que a velocidade de 5,1 m/s foi uma das que apresentou menor variação entre os dados experimentais e os calibrados, com um resultado satisfatório e bem próximo do apresentado por Chu e Jirka (2003).

Tabela 1 - Comparação de resultados autorais com os apresentados por Chu e Jirka (2003)

V (m/s) - Autoral	K <sub>2</sub> (m/dia) - Autoral	K <sub>2</sub> (m/dia) - Chu e Jirka (2003)	V (m/s) - Chu e Jirka (2003)
4,9	3,2400	3,199	4,71
5,1	2,8512	2,738	5,25
6	2,0736	2,291	6,28
6,6	4,1472	2,983	6,53

Fonte: Autoral (2022)

Desse modo, a hipótese de que com a elevação da velocidade de vento o processo de incorporação de oxigênio também se eleva, com base na faixa de velocidade adotada de 3,8 a 7,4 m/s, foi refutada. Em virtude do fato dos valores encontrados apresentarem comportamento que tendeu a uma constante de 0,016  $min^{-1}$ . No entanto, é comprovado que a variável vento, apesar de não ter uma influência possível de mensurar apenas com os dados investigados, se apresentou sempre positiva. Além disso, indica que para valores de velocidade superiores a 3 m/s os valores de k<sub>2</sub> se aproximam de uma constante.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Diante disso, apesar de a incorporação de oxigênio na água ser um processo complexo, tendo em vista as diversas variáveis que podem influenciar tanto o consumo quanto a absorção de água. O presente trabalho pôde contribuir mostrando os resultados experimentais separando uma única variável, velocidade de vento. Nele foi verificado que para uma faixa de variação de velocidade do vento entre 3,8 m/s e 7,4 m/s o coeficiente  $k_2$  pode ser considerado aproximadamente constante ( $0,016 \text{ min}^{-1}$ ).

Apesar de não ter sido possível encontrar uma correlação direta entre velocidade de vento e incorporação de oxigênio. Tal resultado não é de fato negativo, tendo em vista que a variação de velocidade de vento no ambiente é bem alta, e se essa influência fosse direta, em algumas épocas do ano, com velocidades de ventos mais baixas, se tornariam mais preocupantes.

Logo, a variável velocidade de vento, apesar de não ter demonstrado uma correlação direta com o aumento da incorporação, ainda assim apresentou dados que favorecem a investida nesse tipo de estudo. Tendo em vista que ficou claro que a incidência de vento sobre a água tem uma atuação positiva com curva de oxigenação com elevação e devido à alta de matéria orgânica presente nos rios por adições antrópicas o processo de autodepuração dos corpos hídricos está cada vez mais precário. Necessitando, assim, de investimentos em meios de auxiliar os rios a recuperarem suas condições naturais. Assim, mais estudos precisam ser realizados a fim de melhorar a qualidade da água.

### 6.1 Recomendações

Tendo em vista os dados encontrados, e a importância de desenvolver mais estudos no processo de utilização de recursos naturais para a melhoria da qualidade da água, sugerem-se algumas recomendações para trabalhos futuros:

- Analisar a influência da adição de outras variáveis ao estudo, como temperatura, profundidade, luminosidade e intensidade de vento, e verificar os seus impactos na curva de oxigenação da água;

- Avaliar os valores de consumo de oxigênio, incorporando na análise o consumo de oxigênio com a adição de matéria orgânica;
- Investigar medidas para diminuir os gastos em tratamento de água, utilizando o processo de incorporação de oxigênio na água, a fim de baratear esses custos.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, Rejane Freitas Benevides; ALMEIDA, Ítalo Wanderley; MACIEL, Girelene Figueiredo. CAPACIDADE DE AUTODEPURAÇÃO DE CORPOS D'ÁGUA URBANOS EM SITUAÇÕES DE VAZÕES CRÍTICAS: O CASO DO CÓRREGO PERNADA, PARAÍSO DO TOCANTINS–TO. Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental, v. 10, n. 4, p. 218-238, 2021.

ANA. AVALIAÇÃO DE QUALIDADE - INTRODUÇÃO. Brasil. 2022. Disponível em: <http://pnqa.ana.gov.br/avaliacao.aspx>. Visto em 15 de outubro de 2022.

ARAUJO, G. M. ; LIMA NETO, I. E. ; BECKER, H. . Phosphorus dynamics in a highly polluted urban drainage channel-shallow reservoir system in the Brazilian semiarid. ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS (ONLINE), v. 91, p. 1-8, 2019.

BARRETO, Luciano et al. Eutrofização em rios brasileiros. **Enciclopédia biosfera**, v. 9, n. 16, 2013.

BARROS, Mário U. G. e MAGALHÃES, Ramon Jaime Maia. RELATÓRIO MENSAL DE QUALIDADE DO AÇUDE CASTANHÃO. COGERH. Fortaleza. 2022

BATALHA, B. L.; ROCHA, A. A. Autodepuração nos cursos d'água. Revista DAE, v. 46, n. 144, 1986.

BENNETT, J. P., and RATHBUN, R. E. Reaeration in open channel flow." United States Geological Survey Professional Paper 737. 1972.

BEZERRA, Iury Steiner de Oliveira; MENDONÇA, Luiz Alberto Ribeiro; FRISCHKORN, Horst. Autodepuração de cursos d' água: um programa de modelagem Streeter Phelps com calibração automática e correção de anaerobiose. Rem: Revista Escola de Minas, v. 61, n. 2, p. 249-255, 2008.

BEZERRA, Thiago Weslley Rodrigues. Análise espacial da qualidade de águas para abastecimento público: um estudo de caso no canal eixão das águas do Ceará. 2021.

BOEHM, Camila. Apenas 7% dos rios da Mata Atlântica apresentam água de boa qualidade. Agência Brasil. 2022. Disponível em:

<https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2022-03/apenas-7-dos-rios-da-mata-atlantica-apresentam-agua-de-boa-qualidade>. Visto em 28 de Novembro de 2022.

BOYD, C. E., TUCKER, C. S. Pond Aquaculture Water Quality Management. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1998. 700P. Water Quality in Warm Water Fish Ponds. Auburn: Auburn University, AL, EUA. 1979. p. 359.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Brasília. Casa Civil, 1997.

CARNEIRO, B. L. D. S. ; ROCHA, M. J. D. ; BARROS, M. U. G. ; PAULINO, W. D. ; LIMA NETO, I. E. . Predicting anoxia in the wet and dry periods of tropical semiarid reservoirs. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, v. 326, p. 116720, 2023.

CHAPRA, S. C. Surface water quality modeling McGraw-Hill, 1997.

CHU, Chia R.; JIRKA, Gerhard H. Wind and stream flow induced reaeration. Journal of Environmental Engineering, v. 129, n. 12, p. 1129-1136, 2003.

DIAS, Carlos Henrique. Mancha de poluição no Rio Tietê aumenta 40% nos últimos 12 meses e agora se estende por 122 quilômetros. 2022. Disponível em: < <https://g1.globo.com/sp/sao-paulo/noticia/2022/09/22/mancha-de-poluicao-no-rio-tiete-aumenta-40percent-nos-ultimos-12-meses-e-agora-se-estende-por-122-quilometros.ghtml> > Visto em 28 de Novembro de 2022.

FRAGA, RÔMULO F. ; ROCHA, SOFIA M. G. ; LIMA NETO, IRAN E. . Impact of flow conditions on coliform dynamics in an urban lake in the Brazilian semiarid. Urban Water Journal, v. 17, p. 43-53, 2020.

FREIRE, L. L. ; COSTA, A. C. ; LIMA NETO, I. E. . Spatio-temporal patterns of river water quality in the semiarid Northeastern Brazil. WATER AIR AND SOIL POLLUTION, v. 232, p. 452, 2021.

FREITAS, Aline Carvalho de et al. Determinando sais minerais e oxigênio dissolvido na água através de experimentos. Encontro Regional de Ensino de Ciências (2.:

2018: Porto Alegre, RS). Anais do II Encontro Regional de Ensino de Ciências: formação do professor e o ensino de ciências. Porto Alegre, RS: UFRGS, 2018., 2018.

GUALTIERI, C. . Discussion of “Wind and Stream Flow Induced Reaeration” by Chia R. Chua and Gerhard H. Jirka. *Journal of Environmental Engineering*, 131(8), 1236–1238. 2005.

HESPAÑHOL, Katia Maria Hipolito. Monitoramento e diagnóstico da qualidade da água do Ribeirão Morangueiro. 2009. Dissertação (Pós-Graduação em Engenharia Urbana) – Faculdade de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, 2009.

JANZEN, Johannes Gérson. Fluxo de massa na interface ar-água em tanques de grades oscilantes e detalhes de escoamentos turbulentos isotrópicos. 2006. Tese (Doutorado) – Universidade de São Paulo, São Carlos, 2006.

JOSLIN, Matheus Uebel; ALBERTS, Ronald. Desenvolvimento de software para análise de autodepuração em rios. 2015. Trabalho de Conclusão de Curso. Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Lima, B. P. ; MAMEDE, G. L. ; LIMA NETO, I. E. . Monitoramento e modelagem da qualidade de água em uma bacia hidrográfica semiárida. *ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (ONLINE)*, v. 23, p. 125-135, 2018.

LIMA NETO, IRAN E.; MEDEIROS, PEDRO H.A. ; COSTA, ALEXANDRE C. ; WIEGAND, MARIO C. ; BARROS, ANTÔNIO RICARDO M. ; BARROS, MÁRIO U.G. . Assessment of phosphorus loading dynamics in a tropical reservoir with high seasonal water level changes. *SCIENCE OF THE TOTAL ENVIRONMENT*, v. 815, p. 152875, 2022.

LIMA NETO, Iran E. et al. Dissolved oxygen downstream of an effluent outfall in an ice-covered river: Natural and artificial aeration. *Journal of Environmental Engineering*, v. 133, n. 11, p. 1051-1060, 2007.

LIRA, Marcos Antonio Tavares et al. Caracterização do Regime de Ventos no Piauí Para o Aproveitamento de Energia Eólica. Revista Brasileira de Meteorologia. 2017, v. 32, n. 1, pp. 77-88.

MAGNAUDET, J. & CALMET, I. 2006 Turbulent mass transfer through a flat shear-free surface. *J. Fluid Mech.* 553, 155–185.

MENDONÇA, Thamyris Pereira; PETRECA, Weriton Luis; DE SOUZA, Antonio Donizetti Gonçalves. AUTODEPURAÇÃO DE CORPOS HÍDRICOS: ESTUDO DO LANÇAMENTO DE ESGOTO DOMÉSTICO NO RIO LAMBARI (POÇOS DE CALDAS/MG). *Geoambiente On-line*, n. 36, p. 85-103, 2020.

MERTEN, Gustavo H.; MINELLA, Jean P. Qualidade da água em bacias hidrográficas rurais: um desafio atual para a sobrevivência futura. *Agroecologia e desenvolvimento rural sustentável*, v. 3, n. 4, p. 33-38, 2002.

MESQUITA, J. B. F. ; PEREIRA, S. P. ; LIMA NETO, I. E. . Modelagem da drenagem urbana e avaliação das cargas bacteriológicas na vertente marítima de Fortaleza, Ceará. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 25, p. 205-216, 2020.

MOURA, DIANA S. ; LIMA NETO, IRAN E. ; CLEMENTE, ALLAN ; OLIVEIRA, SAMYLLA ; PESTANA, CARLOS J. ; APARECIDA DE MELO, MARIA ; CAPELO-NETO, JOSÉ . Modeling phosphorus exchange between bottom sediment and water in tropical semiarid reservoirs. *CHEMOSPHERE*, v. 246, p. 125686, 2019.

OLIVEIRA FILHO, ANTÔNIO ALVES DE ; LIMA NETO, IRAN EDUARDO . Modelagem da qualidade da água do rio Poti em Teresina (PI). *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 23, p. 3-14, 2017.

PEREIRA, Gabrielle Alberta; OLIVEIRA, Gustavo Henrique; PINTO, André Luiz. Avaliação da eficiência da utilização do oxigênio dissolvido como principal indicador da qualidade das águas superficiais da bacia do córrego Bom Jardim, Brasilândia/MS. *Revista Geomae*, v. 1, n. 1, p. 69-82, 2010.

PETRY, Vitor José; BORGES, Pedro Augusto Pereira; BRANCHER, Fernando Augusto. Determinação de Parâmetros do Modelo de Streeter Phelps. Proceeding Series of the Brazilian Society of Computational and Applied Mathematics, v. 6, n. 2, 2018.

RAULINO, J. B. ; SILVEIRA, C. S. ; LIMA NETO, I. E. . Eutrophication risk assessment of a large reservoir in the Brazilian semiarid region under climate change scenarios. ANAIS DA ACADEMIA BRASILEIRA DE CIÊNCIAS, v. 94, p. e20201689, 2022.

ROCHA, M. J. D. ; LIMA NETO, I. E. . Internal phosphorus loading and its driving factors in the dry period of Brazilian semiarid reservoirs. JOURNAL OF ENVIRONMENTAL MANAGEMENT, v. 312, p. 114983, 2022.

ROCHA, M. J. D. ; LIMA NETO, I. E. . Phosphorus mass balance and input load estimation from the wet and dry periods in tropical semiarid reservoirs. Environmental Science and Pollution Research, p. 1, 2021.

SALLAS, Marcio Ricardo et al. Estudo da Autodepuração do Rio Jordão, Localizado na bacia hidrográfica do Rio Dourados. Eng Saint Ambient, v. 18, n. 2, p. 105-114.

SCHULZ, H. E.;JANZEN J. G. Concentration fields near air-water interfaces during interfacial mass transport: oxygen transport and random square wave analysis. Brazilian Journal of Chemical Engineering Vol. 26, No. 03, pp. 527 - 536, July - September, 2009.

SILVA, G.R. Panorama do potencial eólico no Brasil. Ed. rev. Brasília: Dupligráfica, 2003.

SODRÉ, Fernando Fabriz. Fontes Difusas de Poluição da Água: Características e métodos de controle. **Agricultura**, v. 1, n. 20, p. 30, 2012.

SOUZA, Marielle Medeiros de e Gastaldini, Maria do Carmo Cauduro. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2014, v. 19, n. 3 , pp. 263-274.

SPERLING, M. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. 588p. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007. (Princípios do tratamento biológico de águas residuárias, v.7).

STREETER, H. W., PHELPS, E. B. A study of the natural purification of the Ohio River Public Health Bulletin 146, U.S. Washington: Public Health Service, 1925.

VALENTE, José Pedro Serra; PADILHA, Pedro Magalhães; SILVA, Assunta Maria Marques. Oxigênio dissolvido (OD), demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e demanda química de oxigênio (DQO) como parâmetros de poluição no ribeirão Lavapés/Botucatu-SP. **Eclética Química**, v. 22, p. 49-66, 1997.

VAREJÃO, M.A. Meteorologia e Climatologia. Pernambuco: Versão Digital 2, 2006.

VON SPERLING, M. Estudos e modelagem da qualidade da água de rios. Belo Horizonte (MG): Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA/UFMG), v.7, 1<sup>a</sup> Ed., 588 p, 2007.

VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Belo Horizonte: Ed. da UFMG, 2005.

WIEGAND, MÁRIO CÉSAR ; DO NASCIMENTO, ANTÔNIA TATIANA PINHEIRO ; COSTA, ALEXANDRE CUNHA ; LIMA NETO, IRAN EDUARDO . Trophic state changes of semi-arid reservoirs as a function of the hydro-climatic variability. JOURNAL OF ARID ENVIRONMENTS, v. 184, p. 104321, 2021.

## ANEXOS – TABELA COM OS RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Tabela 2 - Distância de 50 cm para velocidade de 3,8 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,09
0,5	4,18
1	4,24
1,5	4,51
2	4,64
2,5	4,62
3	4,56
3,5	4,62
4	4,58
4,5	4,57
5	4,53
5,5	4,59
6	4,6
6,5	4,61
7	4,62
7,5	4,66
8	4,74
8,5	4,74
9	4,65
9,5	4,65
10	4,74

Fonte: autoral (2022)

Tabela 3- Distância de 95 cm para velocidade de 3,8 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,2
0,5	4,18
1	4,13
1,5	4,25
2	4,49
2,5	4,63
3	4,71
3,5	4,77
4	4,71
4,5	4,64
5	4,67
5,5	4,66
6	4,71
6,5	4,68
7	4,65
7,5	4,62
8	4,58
8,5	4,55
9	4,53
9,5	4,5
10	4,45

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 4 - Velocidade de 4,4 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	3,57
0,5	3,65
1	3,81
1,5	3,92
2	4,05
2,5	4,18
3	4,3
3,5	4,36
4	4,31
4,5	4,29
5	4,26

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 5 - Velocidade de 4,8 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,52
0,5	4,52
1	4,63
1,5	4,69
2	4,77
2,5	4,94
3	5,08
3,5	5,11
4	5,14
4,5	5,17

5	5,15
---	------

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 6 - Velocidade de 4,9 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	3,74
0,5	3,76
1	3,8
1,5	3,89
2	4,1
2,5	4,31
3	4,42
3,5	4,42
4	4,49
4,5	4,55
5	4,59

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 7 - Velocidade de 5,1 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,52
0,5	4,52
1	4,63
1,5	4,69
2	4,77
2,5	4,94
3	5,08
3,5	5,11

4	5,14
4,5	5,17
5	5,15

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 8 - Velocidade de 5,3 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,62
0,5	4,79
1	4,9
1,5	5,06
2	5,14
2,5	5,25
3	5,23
3,5	5,19
4	5,16
4,5	5,14
5	5,07

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 9 - Velocidade de 5,5 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,9
0,5	4,92
1	5,39
1,5	5,47
2	5,54

2,5	5,56
3	5,62
3,5	5,61
4	5,69
4,5	5,66
5	5,63

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 10 - Velocidade de 5,8 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	3,5
0,5	3,52
1	3,54
1,5	3,71
2	4
2,5	4,15
3	4,11
3,5	4,05
4	4,08
4,5	4,05
5	4,17
5,5	4,62

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 11 - Velocidade de 6,0 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,58
0,5	4,52

1	4,62
1,5	4,71
2	4,83
2,5	4,88
3	5
3,5	5,11
4	5,12
4,5	5,15
5	5,17

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 12 - Velocidade de 6,6 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,78
0,5	5,17
1	5,21
1,5	5,3
2	5,38
2,5	5,39
3	5,49
3,5	5,5
4	5,41
4,5	5,43
5	5,45

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 13 - Velocidade de 6,7 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	4,86
0,5	4,85
1	5
1,5	5,29
2	5,38
2,5	5,48
3	5,56
3,5	5,58
4	5,5
4,5	5,45
5	5,45

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 14- Velocidade de 7,0 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	3,86
0,5	3,99
1	4,21
1,5	4,68
2	4,7
2,5	4,6
3	4,68
3,5	5,17
4	5,29
4,5	5,31

5	5,03
---	------

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 15 - Velocidade de 7,4 m/s

t (min)	C (mg/L)
0	5,2
0,5	5,42
1	5,55
1,5	5,54
2	5,61
2,5	5,62
3	5,69
3,5	5,71
4	5,6
4,5	5,5
5	5,57

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 16 - Calibração de valores ( $V = 3,8 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,09	0,00
0,5	4,14	0,01
1	4,25	0,00
1,5	4,41	0,02
2	4,63	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 17 - Calibração de valores ( $V = 4,4 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	3,57	0,00
0,5	3,60	0,01
1	3,67	0,04
1,5	3,77	0,04
2	3,91	0,04
2,5	4,09	0,02
3	4,31	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 18 - Calibração de valores ( $V = 4,8 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,52	0,00
0,5	4,54	0,01
1	4,60	0,01
1,5	4,67	0,00
2	4,78	0,00
2,5	4,91	0,01
3	5,07	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 19 - Calibração de valores ( $V = 4,9 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	3,74	0,00
0,5	3,76	0,00
1	3,81	0,00
1,5	3,88	0,00

2	3,98	0,03
---	------	------

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 20 - Calibração de valores ( $V = 5,1 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,52	0,00
0,5	4,54	0,01
1	4,60	0,01
1,5	4,67	0,00
2	4,78	0,00
2,5	4,91	0,01
3	5,07	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 21- Calibração de valores ( $V = 5,3 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,62	0,00
0,5	4,67	0,03
1	4,77	0,03
1,5	4,92	0,03
2	5,13	0,00
2,5	5,41	0,03

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 22- Calibração de valores ( $V = 5,5 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,9	0,000

0,5	4,94	0,004
1	5,03	0,067
1,5	5,16	0,057
2	5,33	0,037
2,5	5,57	0,001
3	5,86	0,042

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 23 - Calibração de valores ( $V = 5,8 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	3,5	0,00
0,5	3,54	0,01
1	3,62	0,02
1,5	3,75	0,01
2	3,93	0,02
2,5	4,16	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 24 - Calibração de valores ( $V = 6,0 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,58	0,00
0,5	4,60	0,02
1	4,64	0,00
1,5	4,69	0,00
2	4,77	0,01
2,5	4,86	0,00
3	4,98	0,00
3,5	5,12	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 25 - Calibração de valores ( $V = 6,6 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,78	0,00
0,5	4,82	0,07
1	4,90	0,06
1,5	5,02	0,05
2	5,18	0,04
2,5	5,39	0,00
3	5,65	0,03

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 26 - Calibração de valores ( $V = 6,7 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	4,86	0,00
0,5	4,89	0,01
1	4,96	0,01
1,5	5,05	0,04
2	5,19	0,04
2,5	5,36	0,02
3	5,57	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 27 - Calibração de valores ( $V = 7,0 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	3,86	0,00
0,5	3,90	0,02
1	3,98	0,05
1,5	4,11	0,12

2	4,29	0,09
2,5	4,52	0,02
3	4,81	0,03
3,5	5,18	0,00

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 28 - Calibração de valores ( $V = 7,4 \text{ m/s}$ )

t (Min)	C (mg/L)	Desvio
0	5,2	0,00
0,5	5,22	0,04
1	5,26	0,05
1,5	5,33	0,04
2	5,41	0,04
2,5	5,52	0,02
3	5,66	0,01

Fonte: Autoral (2022)

Tabela 29 - Valores de K2 para diferentes Unidades

V (m/s)	K2 ( $\text{min}^{-1}$ )	K2 ( $\text{Dia}^{-1}$ )	K2 (m/dia)
3,8	0,025	36	6,48
4,4	0,018	25,92	4,6656
4,8	0,017	24,48	4,4064
4,9	0,0125	18	3,24
5,1	0,011	15,84	2,8512
5,3	0,021	30,24	5,4432
5,5	0,017	24,48	4,4064
5,8	0,023	33,12	5,9616
6	0,008	11,52	2,0736
6,6	0,016	23,04	4,1472
6,7	0,013	18,72	3,3696
7	0,021	30,24	5,4432
7,4	0,008	11,52	2,0736

Fonte: Autoral (2022)