

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS**  
**DEPARTAMENTO DE HIDRÁULICA E SANEAMENTO**  
**PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA HIDRÁULICA E**  
**SANEAMENTO**

JOÃO PEDRO RIBEIRO GARCIA DE PAIVA LOPES

**O impacto gerado sobre o processo de flotação por ar dissolvido a partir da  
imposição de agitação mecânica controlada à etapa de contato entre  
partículas floculadas e microbolhas de ar**

VERSÃO CORRIGIDA

SÃO CARLOS

2021



JOÃO PEDRO RIBEIRO GARCIA DE PAIVA LOPES

**O impacto gerado sobre o processo de flotação por ar dissolvido a partir da imposição de agitação mecânica controlada à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar**

Dissertação de Mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Ciências.

Área de Concentração: Engenharia Hidráulica e Saneamento

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali

SÃO CARLOS

2021

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTA TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Prof. Dr. Sérgio Rodrigues Fontes da EESC/USP com os dados inseridos pelo(a) autor(a).

R484o      Ribeiro Garcia de Paiva Lopes, João Pedro  
O impacto gerado sobre o processo de flotação por ar dissolvido a partir da imposição de agitação mecânica controlada à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar / João Pedro Ribeiro Garcia de Paiva Lopes; orientador Marco Antonio Penalva Reali. São Carlos, 2021.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2021.

1. Tratamento de água. 2. Flotação por ar dissolvido. 3. Indução de colisões microbolhas-flocos.  
I. Título.

Eduardo Graziosi Silva - CRB - 8/8907

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **JOÃO PEDRO RIBEIRO GARCIA DE PAIVA LOPES**.

Título da dissertação: "O impacto gerado sobre o processo de flotação por ar dissolvido a partir da imposição de agitação mecânica controlada à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar".

Data da defesa: 19/11/2021.

### Comissão Julgadora

### Resultado

Prof. Dr. **Marco Antonio Penalva Reali**  
**(Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC-USP)

*Aprovado*

Prof. Associado **Rodrigo Braga Moruzzi**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP-Rio Claro)

*Aprovado*

Dr. **Andre Pioltine**  
(Companhia Ambiental do Estado de São Paulo/CETESB)

*Aprovado*

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

Prof. Dr. **Luiz Antonio Daniel**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:

Prof. Titular **Murilo Araujo Romero**



Dedico este trabalho aos meus pais,  
Maristela e José Carlos, às minhas irmãs,  
Ana Helena e Carolina, e aos meus cachorros  
(Cacau, Pumba, Lobo, Cléo, Bisnaga)  
e passarinho (Coquinho).





## AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer primeiro a Deus, por ter sido tão generoso comigo desde sempre, me dando uma família que me ama e apoia, amizades sinceras e uma vida tão feliz e farta de coisas boas.

Agradeço aos meus pais (Maristela e José Carlos) e às minhas irmãs (Ana Helena e Carolina), por serem meu porto-seguro e por me fazerem enxergar a vida com um brilho diferente daquele que meus olhos sozinhos carregam.

Agradeço ao Bijou, Flucke, Cacau, Timão, Pumba, Cléo, Bisnaga, Lobo, Coquinho, Oncinha, Bily, Fofão, Kiko, Drica (que na verdade era Drico) e todos os outros anjos que Deus colocou no meu caminho pra me oferecer companhia, amor e uma oportunidade de ser melhor ao longo dessa jornada.

Agradeço ao professor doutor Marco Antonio Penalva Reali, por ter acreditado em mim e por ter me dado a oportunidade de realizar esse sonho, me ajudando a amadurecer profissionalmente e como ser humano, e colocando o foco de luz na direção do melhor caminho. Em seu artigo científico intitulado *Dissolved air flotation and me*, de 2010, James K. Edzwald destaca logo no início do capítulo introdutório uma reflexão de autoria de Isaac Newton, que na tradução para o português fica mais ou menos assim: “se consegui enxergar um pouco mais adiante foi porque me apoiei nos ombros de gigantes”. É assim que eu me sinto tendo sido orientado pelo professor Marco e serei sempre grato e feliz por ter tido essa chance.

Devo agradecimentos também à professora doutora Márcia Damianovic, pela supervisão e orientação durante meu período como estagiário pelo Programa de Aperfeiçoamento de Ensino (PAE), e ao professor Luiz e ao Andre Pioltine, pela participação como membros da minha banca de qualificação.

Agradeço a todo o pessoal do SHS, em especial à Fernanda, Maria Cecília, Rose, Priscila e Sá. Para a Fernanda, Priscila e principalmente para a Sá eu devo um agradecimento mais que especial, por serem sempre tão solícitas e atenciosas, prontas para ajudar e solucionar qualquer problema, fazendo tudo acontecer.

Agradeço a todo o pessoal do LATAR, em especial ao professor Luiz, sempre justo e parceiro, e à Maria Teresa, sempre disposta a ajudar com calma e bom humor, mesmo durante

esse período tão turbulento de pandemia que vivenciamos. Durante a pós tive a oportunidade de conhecer muita gente legal, e com a convivência no LATAR tive a oportunidade de fortalecer algumas amizades. Assim, não poderia deixar de agradecer ao meu grande amigo Zé, parceiro de todas as horas (estudo, trabalho, festas, Fifa, futebol e cervejas) que tive o prazer e felicidade de conhecer nesse período. E também não posso deixar de citar outros nomes que fizeram parte da minha história no LATAR, de muito aprendizado, risadas e da construção de quem eu sou hoje: Milina, Kamila, Maria Julia, Mari, Luan, Natália, Julieta, Lucas, Fernando e Paulo.

Agradeço também e especialmente à Gabrielle Marega (Gabi), por ter me ensinado tanto sobre a operação do Flotateste e sobre a rotina de trabalho e de análises no LATAR. Além de ter aproveitado muitas das constatações obtidas pela Gabi para a concretização da minha pesquisa, a sua paciência e ajuda foram fundamentais para que eu chegasse até aqui, e por isso sou muito grato a ela.

E como as amizades que fiz nesse período não se limitaram às dependências do LATAR, devo um agradecimento especial também ao Renan, Dudu, Thiago, Francisco e Fernando, pela amizade, risadas e boas lembranças.

Devo agradecimentos especiais também ao Alcino, tanto por colocar “de pé” o Flotateste que utilizei ao longo da pesquisa quanto pela ajuda constante para dicas e reparos de última hora; Bergamo, pelo mesmo motivo; Wagner, pelas dicas precisas para reparo do *Jar Test*; e André, pela ajuda na parte de informática.

Agradeço também a todo o pessoal da Oficina Mecânica da USP, em especial ao Flávio, e ao Evaldo, do IFSC, pela construção dos tripés em aço inox usados para adaptar o Flotateste utilizado.

Agradeço à Universidade de São Paulo, à Escola de Engenharia de São Carlos e ao Departamento de Hidráulica e Saneamento, pela minha formação profissional e amadurecimento como engenheiro ambiental e ser humano.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 88887.339544/2019-00.

“Seus sonhos não sabem ver as horas do relógio.  
Nunca será tarde demais para realizá-los.”

**Ana Helena Lopes**

“The people who are trying to make this world worse  
are not taking the day off.

How can I?”

**Robert Nesta Marley**



## RESUMO

LOPES, J. P. R. G. P. **O impacto gerado sobre o processo de flotação por ar dissolvido a partir da imposição de agitação mecânica controlada à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar.** 2021. 193p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2021.

Este trabalho de pesquisa teve como objetivo explorar os efeitos que a imposição de agitação mecânica controlada (incremento do gradiente médio de velocidade) durante a etapa de contato flocos - microbolhas de ar, por intervalos de tempo de imposição específicos, pode exercer sobre a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido (FAD), com base em investigação experimental em escala de bancada e com uso de instalação com regime de alimentação por batelada (fluxo intermitente), denominada Flotateste. A pesquisa foi segmentada em três etapas sequenciais e interdependentes, concretizadas a partir de água bruta de estudo com turbidez de  $6,7 \pm 0,3$ UNT e cor aparente de  $48,4 \pm 0,9$ uC, com base na reprodução das condições ótimas de coagulação identificadas por Marega (2020) e valores fixos de pressão de saturação ( $500,0 \pm 10,0$ kPa) e razão de recirculação (6,0%). Foram variados os valores de gradiente médio de velocidade e intervalo de tempo associados à fase de floculação ( $G_f$  e  $T_f$ , respectivamente) e à fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$ , respectivamente); e velocidade de flotação ( $V_{flot}$ ). A execução dos ensaios da Etapa 01 baseou-se na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos com a conclusão da fase de indução mecânica de colisões, com a exploração de valores de  $G_f$  de 75, 130, 160 e  $200s^{-1}$ ;  $T_f$  de 8 e 12 minutos;  $G_{IC}$  de 0, 20, 40, 60 e  $80s^{-1}$ ;  $T_{IC}$  de 0, 20, 40, 60 e 80s;  $V_{flot}$  de 15, 12 e  $9m.h^{-1}$ . A hipótese adotada para a execução dos ensaios das Etapas 02 e 03 foi a de início do movimento ascensional dos aglomerados concomitantemente à fase de indução mecânica de colisões. Na Etapa 02 foram explorados valores de  $G_f$  de 75, 100, 150 e  $200s^{-1}$ ;  $T_f$  de 12 minutos;  $G_{IC}$  de 0, 40, 60, 80, 120 e  $160s^{-1}$ ;  $T_{IC}$  de 0, 30 e 60s;  $V_{flot}$  de 20, 15 e  $10m.h^{-1}$ . Na Etapa 03 foram explorados valores de  $G_f$  de 50, 75 e  $100s^{-1}$ ;  $T_f$  de 12 minutos;  $G_{IC}$  de 0, 40, 60, 80 e  $100s^{-1}$ ;  $T_{IC}$  de 0 e 5s;  $V_{flot}$  de 20, 15 e  $10m.h^{-1}$ . Dentre os resultados obtidos, foi possível notar que a imposição de agitação mecânica à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar foi capaz de incrementar ligeiramente a eficiência de clarificação alcançada pelo processo de FAD em alguns casos, com a maioria deles associando-se à imposição de valores de  $G_f$  abaixo do ótimo. Assim, a principal constatação alcançada destacou-se como a fundamental importância da otimização das condições de floculação precedendo a flotação, com  $G_f$  próximo de  $100s^{-1}$  e  $T_f$  próximo de 12 minutos para o tipo de água preparada para o estudo. Já para casos em que unidades FAD em escala plena estejam operando com baixa eficiência como consequência da aplicação de valores de  $G_f$  inferiores ao ótimo, acredita-se que a imposição de valor de  $G_{IC}$  (otimizado em Flotateste) na zona de contato do flotador possa configurar-se como opção para incremento de eficiência.

**Palavras-chave:** Tratamento de água. Flotação por ar dissolvido. Indução de colisões microbolhas-flocos.



## ABSTRACT

LOPES, J. P. R. G. P. **The impact on the dissolved air flotation process caused by the imposition of controlled mechanical agitation to the flocculated particles - air microbubbles contact step.** 2021. 193p. Dissertation (Masters) – School of Engineering of São Carlos, University of São Paulo, São Carlos, 2021.

This research work aimed to explore the effects caused by the imposition of controlled mechanical agitation (increase of the mean velocity gradient) during the floc - air microbubble contact step, during specific imposition time intervals, on the efficiency of the Dissolved Air Flotation (DAF) process, based on a bench scale experimental investigation and use of an intermittent flow installation, called Flotatest. The research was segmented into three sequential and interdependent steps, carried out with raw study water with turbidity of  $6,7 \pm 0,3$  NTU and apparent color of  $48,4 \pm 0,9$  uC, based on the reproduction of optimal coagulation conditions identified by Marega (2020) and constant saturation pressure ( $500,0 \pm 10,0$  kPa) and recirculation ratio (6,0%) values. The mean velocity gradient and time interval values related to the flocculation phase ( $G_f$  and  $T_f$ , respectively) and to the mechanical collision induction phase ( $G_{CI}$  and  $T_{CI}$ , respectively) were varied, as well as the flotation velocity ( $V_{flot}$ ) values. Stage 01 tests were based on the hypothesis of beginning of the upward movement performed by the microbubble-floc aggregates after the conclusion of the mechanical collision induction phase, and on the following values for  $G_f$ : 75, 130, 160 and  $200\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$ : 8 and 12 minutes;  $G_{CI}$ : 0, 20, 40, 60 and  $80\text{s}^{-1}$ ;  $T_{CI}$ : 0, 20, 40, 60 and 80s;  $V_{flot}$ : 15, 12 and  $9\text{m.h}^{-1}$ . Stages 02 and 03 tests were based on the hypothesis of beginning of the upward movement performed by the aggregates during the mechanical collision induction phase. During Step 02,  $G_f$  values explored were: 75, 100, 150 and  $200\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$ : 12 minutes;  $G_{CI}$ : 0, 40, 60, 80, 120 and  $160\text{s}^{-1}$ ;  $T_{CI}$ : 0, 30 and 60s;  $V_{flot}$ : 20, 15 and  $10\text{m.h}^{-1}$ . During Step 03,  $G_f$  values explored were: 50, 75 and  $100\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$ : 12 minutes;  $G_{CI}$ : 0, 40, 60, 80 and  $100\text{s}^{-1}$ ;  $T_{CI}$ : 0 and 5s;  $V_{flot}$ : 20, 15 and  $10\text{m.h}^{-1}$ . Among the results obtained, it was possible to note that the imposition of mechanical agitation during the flocculated particles - air microbubbles contact stage was able to slightly increase the clarification efficiency achieved by the DAF process in some cases, with most of them related to the imposition of suboptimal  $G_f$  values. Thus, the main finding achieved was highlighted as the fundamental importance of optimizing the flocculation conditions prior to flotation, with  $G_f$  close to  $100\text{s}^{-1}$  and  $T_f$  close to 12 minutes for the type of water prepared for this study. For cases of full-scale DAF units operating with low efficiency as a consequence of suboptimal  $G_f$  values, it is believed that the imposition of a  $G_{CI}$  value (optimized in Flotatest) in the floater contact zone may configure as an option to increase efficiency.

**Keywords:** Water treatment. Dissolved air flotation. Microbubbles-flocs collision induction.





## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

<b>Figura 1</b> – Representação esquemática de tanque de flotação por ar dissolvido evidenciando a separação física entre ZC e ZS. ....	37
<b>Figura 2</b> – Representação de vista em corte longitudinal da UPFAD utilizada ao longo das pesquisas de Souza (2012) e Meca (2014) (todas as unidades em metros). ....	48
<b>Figura 3</b> – Imagem da UPFAD utilizada ao longo das pesquisas de Souza (2012) e Meca (2014). ....	48
<b>Figura 4</b> – Imagens dos módulos de telas intercaladas aplicadas no interior da zona de contato da UPFAD por Souza (2012): modelo Hobby (A); modelo Hobby-Casanet (B). ....	50
<b>Figura 5</b> – Quadro de especificações técnicas dos dois modelos de telas aplicados por Souza (2012) no interior da zona de contato da UPFAD. ....	50
<b>Figura 6</b> – Imagem dos módulos de telas de aço galvanizado modelo Hobby incorporados ao interior da zona de contato da UPFAD por Meca (2014). ....	52
<b>Figura 7</b> – Unidade de equipamento <i>Jartest</i> empregado para a imposição do processo de coagulação. ....	59
<b>Figura 8</b> – Representação esquemática do Flotateste e das conexões entre suas partes constituintes. ....	60
<b>Figura 9</b> – Imagem do Flotateste utilizado para a execução dos ensaios propostos. ....	60
<b>Figura 10</b> – Imagens do dispositivo de amparo concebido para a sustentação das hastes metálicas giratórias. ....	64
<b>Figura 11</b> – Detalhes da instalação do dispositivo de amparo na base das colunas de flotação do Flotateste. ....	64
<b>Figura 12</b> – Representação esquemática de coluna de flotação do Flotateste e dos volumes de água bruta e de recirculação. ....	65
<b>Figura 13</b> – Diagrama hierárquico ilustrativo das associações entre parâmetros operacionais aplicados à realização dos ensaios da Etapa 02. ....	73
<b>Figura 14</b> - Diagrama hierárquico ilustrativo das associações entre parâmetros operacionais aplicados à realização dos ensaios da Etapa 03. ....	76
<b>Figura 15</b> – Diagrama representativo dos procedimentos sequenciais adotados nos ensaios estáticos de flotação da Etapa 01 em função da suposição de que as velocidades ascendentes dos aglomerados bolha-floco seriam desprezíveis durante a etapa de indução de colisões. ....	77
<b>Figura 16</b> – Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita (razão de recirculação (R) de 6,0%; $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ , $130\text{s}^{-1}$ , $160\text{s}^{-1}$ e $200\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0min). ....	79
<b>Figura 17</b> - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita (R=6,0%; $V_{\text{flot}} = 12,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ , $130\text{s}^{-1}$ , $160\text{s}^{-1}$ e $200\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0min). ....	80
<b>Figura 18</b> - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita (R = 6,0%; $V_{\text{flot}} = 9,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ , $130\text{s}^{-1}$ , $160\text{s}^{-1}$ e $200\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0min). ....	81
<b>Figura 19</b> - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita (R = 6,0%; $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ , $130\text{s}^{-1}$ , $160\text{s}^{-1}$ e $200\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0min). ....	82
<b>Figura 20</b> - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita (R = 6,0%; $V_{\text{flot}} = 12,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ , $130\text{s}^{-1}$ , $160\text{s}^{-1}$ e $200\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0min). ....	83
<b>Figura 21</b> - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita (R = 6,0%; $V_{\text{flot}} = 9,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ , $130\text{s}^{-1}$ , $160\text{s}^{-1}$ e $200\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0min). ....	84

<b>Figura 22</b> – Diagrama representativo do raciocínio adotado para a interpretação dos resultados dos ensaios estáticos de flotação da Etapa 01 em função da suposição de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos concomitantemente ao início da fase de indução de colisões. ...	86
<b>Figura 23</b> - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{\text{flot}} = 8,1 \pm 1,7\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75,0\text{s}^{-1}$ e $130,0\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0 minutos). .....	89
<b>Figura 24</b> - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{\text{flot}} = 8,1 \pm 1,7\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $160,0\text{s}^{-1}$ e $200,0\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0 minutos). .....	90
<b>Figura 25</b> - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{\text{flot}} = 8,1 \pm 1,7\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75,0\text{s}^{-1}$ e $130,0\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0 minutos). .....	91
<b>Figura 26</b> - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{\text{flot}} = 8,1 \pm 1,7\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $160,0\text{s}^{-1}$ e $200,0\text{s}^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0 minutos). .....	92
<b>Figura 27</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{\text{flot}} = 20,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ (A), $100\text{s}^{-1}$ (B), $150\text{s}^{-1}$ (C) e $200\text{s}^{-1}$ (D); Tf de 12,0 minutos). .....	100
<b>Figura 28</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$ e $T_{\text{IC}}$ nulos) e $V_{\text{flot}} = 20,0\text{m.h}^{-1}$ na Etapa 02. ....	101
<b>Figura 29</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{\text{IC}}$ de 30,0s e $V_{\text{flot}}$ de $20,0\text{m.h}^{-1}$ na Etapa 02. ....	101
<b>Figura 30</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{\text{IC}}$ de 60,0s e $V_{\text{flot}}$ de $20,0\text{m.h}^{-1}$ na Etapa 02. ....	101
<b>Figura 31</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ (A), $100\text{s}^{-1}$ (B), $150\text{s}^{-1}$ (C) e $200\text{s}^{-1}$ (D); Tf de 12,0 minutos). .....	107
<b>Figura 32</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$ e $T_{\text{IC}}$ nulos) e $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ na Etapa 02. ....	108
<b>Figura 33</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{\text{IC}}$ de 30,0s e $V_{\text{flot}}$ de $15,0\text{m.h}^{-1}$ na Etapa 02. ....	108
<b>Figura 34</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{\text{IC}}$ de 60,0s e $V_{\text{flot}}$ de $15,0\text{m.h}^{-1}$ na Etapa 02. ....	108
<b>Figura 35</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{\text{flot}} = 10,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de $75\text{s}^{-1}$ (A), $100\text{s}^{-1}$ (B), $150\text{s}^{-1}$ (C) e $200\text{s}^{-1}$ (D); Tf de 12,0 minutos). .....	109
<b>Figura 36</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$ e $T_{\text{IC}}$ nulos) e $V_{\text{flot}} = 10,0\text{m.h}^{-1}$ na Etapa 02. ....	110

<b>Figura 37</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 30,0s e $V_{flot}$ de 10,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	110
<b>Figura 38</b> – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 60,0s e $V_{flot}$ de 10,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	110
<b>Figura 39</b> – Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$ ; Gf de 75s <sup>-1</sup> (A), 100s <sup>-1</sup> (B), 150s <sup>-1</sup> (C) e 200s <sup>-1</sup> (D); Tf de 12,0minutos).	116
<b>Figura 40</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) e $V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$ na Etapa 02.	117
<b>Figura 41</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 30,0s e $V_{flot}$ de 20,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	117
<b>Figura 42</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 60,0s e $V_{flot}$ de 20,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	117
<b>Figura 43</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 15,0m.h^{-1}$ ; Gf de 75s <sup>-1</sup> (A), 100s <sup>-1</sup> (B), 150s <sup>-1</sup> (C) e 200s <sup>-1</sup> (D); Tf de 12,0minutos).	122
<b>Figura 44</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) e $V_{flot} = 15,0m.h^{-1}$ na Etapa 02.	123
<b>Figura 45</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 30,0s e $V_{flot}$ de 15,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	123
<b>Figura 46</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 60,0s e $V_{flot}$ de 15,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	123
<b>Figura 47</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 10,0m.h^{-1}$ ; Gf de 75s <sup>-1</sup> (A), 100s <sup>-1</sup> (B), 150s <sup>-1</sup> (C) e 200s <sup>-1</sup> (D); Tf de 12,0minutos).	124
<b>Figura 48</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) e $V_{flot} = 10,0m.h^{-1}$ na Etapa 02.	125
<b>Figura 49</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 30,0s e $V_{flot}$ de 10,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	125
<b>Figura 50</b> - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de $T_{IC}$ de 60,0s e $V_{flot}$ de 10,0m.h <sup>-1</sup> na Etapa 02.	125
<b>Figura 51</b> – Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$ ; Gf de 50s <sup>-1</sup> (A), 75s <sup>-1</sup> (B) e 100s <sup>-1</sup> (C); Tf de 12,0minutos).	136

<b>Figura 52</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $20,0m.h^{-1}$ na Etapa 03. ....	136
<b>Figura 53</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 15,0m.h^{-1}$ ; $G_f$ de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); $T_f$ de 12,0minutos). ....	138
<b>Figura 54</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $15,0m.h^{-1}$ na Etapa 03. ....	138
<b>Figura 55</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 10,0m.h^{-1}$ ; $G_f$ de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); $T_f$ de 12,0minutos). ....	139
<b>Figura 56</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $10,0m.h^{-1}$ na Etapa 03. ....	139
<b>Figura 57</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$ ; $G_f$ de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); $T_f$ de 12,0minutos). ....	145
<b>Figura 58</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $20,0m.h^{-1}$ na Etapa 03. ....	145
<b>Figura 59</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 15,0m.h^{-1}$ ; $G_f$ de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); $T_f$ de 12,0minutos). ....	147
<b>Figura 60</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $15,0m.h^{-1}$ na Etapa 03. ....	147
<b>Figura 61</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot} = 10,0m.h^{-1}$ ; $G_f$ de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); $T_f$ de 12,0minutos). ....	148
<b>Figura 62</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $10,0m.h^{-1}$ na Etapa 03. ....	148
<b>Figura 63</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) obtidos na Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot}=20,0m.h^{-1}$ ; $G_f$ de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); $T_f$ de 12,0minutos). ....	152
<b>Figura 64</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução	

mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $20,0m.h^{-1}$ na Etapa 03.....	152
<b>Figura 65</b> – Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) obtidos na Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot}=15,0m.h^{-1}$ ; Gf de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); Tf de 12,0minutos). .....	154
<b>Figura 66</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $15,0m.h^{-1}$ na Etapa 03.....	154
<b>Figura 67</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) obtidos na Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ; $V_{flot}=10,0m.h^{-1}$ ; Gf de $50s^{-1}$ (A), $75s^{-1}$ (B) e $100s^{-1}$ (C); Tf de 12,0minutos). .....	155
<b>Figura 68</b> - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) (A) e de imposição de $T_{IC}$ de 5,0s (B) para a $V_{flot}$ de $10,0m.h^{-1}$ na Etapa 03.....	155
<b>Figura 69</b> – Representação gráfica de correlação linear estabelecida entre os valores residuais de absorvância UV ( $\lambda$ de 495nm) e de cor aparente (colorímetro Digimed® - modelo DM-COR) registrados a partir dos ensaios realizados na Etapa 03.....	174



## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> – Caracterização físico-química da água proveniente do poço artesiano e da água bruta de estudo preparada para a condução da investigação experimental. ....	57
<b>Tabela 2</b> – Condições ótimas de coagulação aplicadas para a condução da investigação experimental, com base em Marega (2020). ....	57
<b>Tabela 3</b> – Parâmetros físico-químicos analisados e equipamentos associados. ....	68
<b>Tabela 4</b> – Caracterização dos parâmetros operacionais variados ao longo da realização dos ensaios da Etapa 01. ....	70
<b>Tabela 5</b> – Valores de $G_{IC}$ e $T_{IC}$ explorados na Etapa 01 em função dos valores de $G_f$ e $T_f$ empregados durante a etapa de floculação. ....	71
<b>Tabela 6</b> – Caracterização dos parâmetros operacionais variados ao longo da realização dos ensaios da Etapa 02. ....	72
<b>Tabela 7</b> – Caracterização dos parâmetros operacionais variados ao longo da realização dos ensaios da Etapa 03. ....	75
<b>Tabela 8</b> – Exposição dos cálculos para incorporação dos valores de $T_{IC}$ nos intervalos de tempo de coleta de amostras (separação por flotação) e para correção dos valores de $V_{flot}$ investigados. ....	87
<b>Tabela 9</b> – Agrupamento dos valores de velocidade de flotação corrigidos ( $V_{flotC}$ ) em três blocos distintos. ....	87
<b>Tabela 10</b> – Residuais de turbidez e cor aparente associados aos cenários ótimos de indução de colisões e cenários de ausência de indução ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos) da Etapa 01, com base em valores de velocidade de flotação pertencentes ao intervalo de $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ; $R=6,0\%$ ; $G_f$ de 75, 130, 160 e $200s^{-1}$ ; $T_f$ de 8,0 e 12,0 minutos. ....	95
<b>Tabela 11</b> - Comparação entre valores residuais médios de turbidez obtidos na Etapa 02 para os cenários de ausência de indução de colisões (A); ótimos desempenhos com indução de colisões (B) e piores desempenhos registrados (C), para $V_{flot}$ de $20,0m.h^{-1}$ . ....	103
<b>Tabela 12</b> - Comparação entre valores residuais médios de turbidez obtidos para os cenários de ausência de indução de colisões e de melhor desempenho registrado por meio da imposição da fase de indução de colisões (cenário ótimo) para $V_{flot}$ de $15,0m.h^{-1}$ e $10,0m.h^{-1}$ na Etapa 02. ....	112
<b>Tabela 13</b> - Comparação entre valores residuais médios de cor aparente obtidos na Etapa 02 para os cenários de ausência de indução de colisões (A); ótimos desempenhos com indução de colisões (B) e piores desempenhos registrados (C), para $V_{flot}$ de $20,0m.h^{-1}$ . ....	119
<b>Tabela 14</b> - Comparação entre valores residuais médios de cor aparente obtidos para os cenários de ausência de indução de colisões e de melhor desempenho registrado por meio da imposição da fase de indução de colisões (cenário ótimo) para $V_{flot}$ de $15,0m.h^{-1}$ e $10,0m.h^{-1}$ na Etapa 02. ....	127
<b>Tabela 15</b> – Exposição dos intervalos de tempo ocupados pela vigência da fase de indução de colisões em relação aos intervalos de tempo de coleta de amostras (ou de flotação), com base nos valores de $T_{IC}$ e de $V_{flot}$ investigados na Etapa 02. ....	130
<b>Tabela 16</b> - Análise comparativa entre valores residuais médios de turbidez obtidos por meio do processo de indução de colisões (cenário ótimo) e na ausência de indução ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos), em função de cada $G_f$ imposto e para as três $V_{flot}$ exploradas na Etapa 03. ....	141
<b>Tabela 17</b> - Análise comparativa entre valores residuais médios de cor aparente obtidos por meio do processo de indução de colisões (cenário ótimo) e na ausência de indução ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos), em função de cada $G_f$ imposto e para as três $V_{flot}$ exploradas na Etapa 03. ....	150
<b>Tabela 18</b> - Análise comparativa entre valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) obtidos por meio do processo de indução de colisões (cenário ótimo) e na ausência de indução ( $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos), em função de cada $G_f$ imposto e para as três $V_{flot}$ exploradas na Etapa 03. ....	157

<b>Tabela 19</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de turbidez da Etapa 02. ....	178
<b>Tabela 20</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos). ....	179
<b>Tabela 21</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões – $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos). ....	180
<b>Tabela 22</b> – Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de cor aparente da Etapa 02. ....	181
<b>Tabela 23</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos). ....	182
<b>Tabela 24</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões – $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos). ....	183
<b>Tabela 25</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de turbidez da Etapa 03. ....	187
<b>Tabela 26</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos). ....	187
<b>Tabela 27</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões – $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos). ....	188
<b>Tabela 28</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de cor aparente da Etapa 03. ....	189
<b>Tabela 29</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos). ....	189
<b>Tabela 30</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões – $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos). ....	190
<b>Tabela 31</b> - p-valores do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) para residuais médios de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm da Etapa 03. ....	191
<b>Tabela 32</b> - p-valores de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos). ....	191
<b>Tabela 33</b> - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$ 254nm) da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões – $G_{IC}$ e $T_{IC}$ nulos). ....	192



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

<b>COT</b>	Carbono Orgânico Total
<b>EESC</b>	Escola de Engenharia de São Carlos
<b>FAD</b>	Flotação por Ar Dissolvido
<b>G</b>	Gradiente médio de velocidade
<b>G<sub>f</sub></b>	Gradiente médio de velocidade aplicado à etapa de floculação
<b>G<sub>IC</sub></b>	Gradiente médio de velocidade aplicado à etapa de indução mecânica de colisões
<b>G<sub>MR</sub></b>	Gradiente médio de velocidade aplicado à etapa de mistura rápida
<b>G<sub>ZC</sub></b>	Gradiente médio de velocidade na zona de contato da UPFAD
<b>H</b>	Extensão vertical entre a base das colunas de flotação e a altura do par de mangueiras de coleta de amostras do Flotatest
<b>H<sub>ZC</sub></b>	Extensão vertical do anteparo de separação entre zonas de contato e de separação na UPFAD
<b>IC</b>	Indução mecânica de colisões
<b>LATAR</b>	Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas
<b>L<sub>ZC</sub></b>	Comprimento da zona de contato na UPFAD
<b>MON</b>	Matéria Orgânica Natural
<b>MWU</b>	Teste estatístico não paramétrico de Mann-Whitney U para a comparação entre duas médias
<b>P<sub>SAT</sub></b>	Pressão de saturação
<b>R</b>	Razão de recirculação
<b>SA</b>	Sulfato de Alumínio
<b>t</b>	Teste estatístico paramétrico de t para a comparação entre duas médias

<b>TAS</b>	Taxa de aplicação superficial
<b>TAS<sub>ZC</sub></b>	Taxa de aplicação superficial na zona de contato da UPFAD
<b>(<math>\Delta</math>)T<sub>f</sub></b>	Intervalo de tempo de duração da etapa de floculação
<b><math>\Delta</math>T<sub>(v)flot</sub></b>	Intervalo de tempo de duração da etapa de flotação
<b>(<math>\Delta</math>)T<sub>IC</sub></b>	Intervalo de tempo de duração da etapa de indução mecânica de colisões
<b>(<math>\Delta</math>)T<sub>MR</sub></b>	Intervalo de tempo de duração da etapa de mistura rápida
<b>(<math>\Delta</math>)T<sub>R</sub></b>	Intervalo de tempo de duração da etapa de introdução do volume de recirculação no interior das colunas de flotação
<b>T<sub>ZC</sub></b>	Intervalo de tempo de detenção hidráulica na zona de contato da UPFAD
<b>uC</b>	Unidade de cor
<b>UNT</b>	Unidade Nefelométrica de Turbidez
<b>UPFAD</b>	Unidade Piloto retangular de Flotação por Ar Dissolvido
<b>USP</b>	Universidade de São Paulo
<b>UV</b>	Radiação ultravioleta
<b>V<sub>flot</sub></b>	Velocidade de flotação
<b>V<sub>flotC</sub></b>	Velocidade de flotação corrigida
<b>ZC</b>	Zona de contato de unidade de flotação por ar dissolvido
<b>ZS</b>	Zona de separação de unidade de flotação por ar dissolvido

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	27
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	31
<b>2.1 Objetivo geral</b> .....	31
<b>2.2 Objetivos específicos</b> .....	31
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	33
<b>3.1 Breve revisão sobre a origem e histórico da FAD</b> .....	33
<b>3.2 Caracterização do processo de FAD</b> .....	36
<b>3.3 Caracterização do fornecimento de ar na FAD</b> .....	38
<b>3.4 Bolhas de ar, partículas floculadas e as interações existentes entre elas</b> .....	39
<b>3.5 As etapas de pré-tratamento e sua importância em relação à FAD</b> .....	41
<b>3.6 Contexto específico de investigação</b> .....	46
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	55
<b>4.1 Considerações gerais</b> .....	55
<b>4.2 Água de estudo e condições ótimas de coagulação</b> .....	56
<b>4.3 Processos e equipamentos associados</b> .....	57
4.3.1 <u>Preparação da água de estudo</u> .....	58
4.3.2 <u>Preparação das soluções de Sulfato de Alumínio e Barrilha</u> .....	58
4.3.3 <u>Coagulação</u> .....	58
4.3.4 <u>Floculação e Flotação por Ar Dissolvido</u> .....	59
4.3.5 <u>Análises físico-químicas</u> .....	67
<b>4.4 Procedimento experimental</b> .....	68
4.4.1 <u>Etapa 01</u> .....	69
4.4.2 <u>Etapa 02</u> .....	71
4.4.3 <u>Etapa 03</u> .....	74
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	77
<b>5.1 Etapa 01</b> .....	77
5.1.1 <u>Principais recomendações para a Etapa 02</u> .....	97
<b>5.2 Etapa 02</b> .....	98
5.2.1 <u>Análise dos residuais de turbidez</u> .....	99
5.2.2 <u>Análise dos residuais de cor aparente</u> .....	115
5.2.3 <u>Principais constatações comuns aos resultados de remoção de turbidez e cor aparente obtidos na Etapa 02</u> .....	129
5.2.4 <u>Principais recomendações para a Etapa 03</u> .....	133

<b>5.3</b>	<b>Etapa 03</b> .....	134
5.3.1	<u>Análise dos residuais de turbidez</u> .....	135
5.3.2	<u>Análise dos residuais de cor aparente</u> .....	144
5.3.3	<u>Análise dos residuais de absorvância UV em comprimento de onda (<math>\lambda</math>) de 254nm....</u>	151
5.3.4	<u>Principais constatações alcançadas a partir dos resultados da Etapa 03</u> .....	159
<b>6.</b>	<b>DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS</b> .....	163
<b>7.</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	167
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	169
	<b>APÊNDICE A – Equações e coeficientes de correlação e de correção para valores residuais de cor e absorvância de UV em comprimento de onda de 495nm da Etapa 03</b> .....	173
	<b>APÊNDICE B – Análises estatísticas características da Etapa 02</b> .....	175
	<b>APÊNDICE C – Análises estatísticas características da Etapa 03</b> .....	185

## 1. INTRODUÇÃO

A flotação por ar dissolvido (FAD) aplicada à clarificação de águas destinadas ao abastecimento caracteriza-se atualmente como técnica já consolidada, sendo opção segura e vantajosa, principalmente quanto à clarificação de águas que apresentam significativa concentração de algas em suspensão, ou mesmo cor elevada e turbidez moderada.

O arranjo físico das partes constituintes de um sistema de FAD, de acordo com o estado da arte, apresenta a seguinte ordem sequencial (REALI; PATRIZZI, 2016):

(A) Unidade de mistura rápida do coagulante e, opcionalmente, de polímero como auxiliar de floculação (após a aplicação do coagulante);

(B) Unidade de floculação, a qual apresenta parâmetros de projeto diferentes daqueles utilizados quando se empregam decantadores no lugar de flotadores. Recomenda-se, no caso da FAD, o emprego de floculadores com apenas dois ou três compartimentos em série, todos operando com o mesmo valor de gradiente médio de velocidade ( $G$ ), na faixa de 70 a 90s<sup>-1</sup>;

(C) Unidade de FAD propriamente dita, dividida em partes distintas com funções específicas e necessárias à promoção da separação dos flocos por flotação. Tais partes compreendem: Zona de Contato (ZC), situada logo na entrada do flotador, no interior da qual ocorre a colisão dos flocos (efluentes à unidade de floculação) com as microbolhas de ar geradas em bocais difusores, colocados junto à entrada da ZC; Zona de Separação (ZS), situada logo a jusante da ZC e separada da mesma por um anteparo, o qual é responsável por encaminhar, a partir de sua extremidade superior, a água contendo os aglomerados flocos-microbolhas de ar até o início da ZS; zona de acumulação dos flocos separados na ZS, situada na superfície da ZS (onde são instalados raspadores superficiais de lodo); e tubulações perfuradas ou fundo falso, para coleta da água clarificada, interligados a canal de saída contendo vertedor para controle do nível no interior da unidade de FAD.

Diversos tipos de flotadores têm sido desenvolvidos com essa configuração, com variações nas configurações das ZC e ZS, sempre com o intuito de se alcançar alto desempenho do processo aliado a taxas de aplicação superficial (TAS) cada vez mais elevadas, ou seja, obtenção de unidades eficientes e compactas.

Em seus estudos, Reali e Marchetto (2001) investigaram unidades FAD de alta taxa bastante eficientes, com a introdução de lamelas no interior da ZS. Esse tipo de unidade

apresentou excelentes condições hidrodinâmicas devido aos baixos valores de Número de Reynolds ( $Re$ ) na ZS, permitindo a operação com taxas extremamente elevadas (até  $1.000 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ ).

Outras unidades FAD patenteadas (como a Aquadaf®, da *Degrémont*, por exemplo) e disponíveis no mercado também são capazes de operar com taxas elevadas, por meio tanto da configuração adequada da ZS (objeto de patente citada) quanto do modelo de furação aplicado ao fundo falso, usado para a coleta da água clarificada.

A busca por maior eficiência e compacidade em sistemas FAD tem se verificado não só no que diz respeito à etapa de flotação, como também à etapa de floculação, que a antecede.

A esse respeito, Edzwald e Haarhoff (2012), com base em modelo matemático e em investigações experimentais conduzidas em escalas de bancada e piloto, afirmam ser possível o processo de separação por flotação de maneira associada a flocos de reduzida faixa de tamanho (inferiores a  $100\mu\text{m}$ ), cuja obtenção usualmente demanda tempos de floculação bastante baixos (5 a 7 minutos), associados a valores de  $G$  mais elevados ( $90$  a  $110\text{s}^{-1}$ ).

Simulações teóricas a partir da aplicação do modelo matemático do processo FAD desenvolvido por Reali (1991), por sua vez, indicam que a flotação de flocos com tamanho médio abaixo de  $100\mu\text{m}$  é possível, porém com eficiência inferior do que com flocos na faixa de  $200$  a  $400\mu\text{m}$ , por exemplo. Por meio do emprego de métodos de análise de imagens a investigações conduzidas em unidade FAD em escala piloto, Pioltine e Reali (2015) e Maia, Reali e Pioltine (2016) obtiveram resultados indicativos de que flocos nessa faixa de maiores tamanhos ( $200$  a  $400\mu\text{m}$ ) resultam em maiores eficiências de separação por FAD.

Sendo assim, a pesquisa em questão dedicou-se ao desenvolvimento de investigação experimental em escala de bancada (fluxo intermitente) com o objetivo central de se observar o comportamento do processo de flotação por ar dissolvido (FAD) a partir da aplicação de diferentes níveis de agitação (controlados por meio do valor de gradiente médio de velocidade -  $G$ ) à etapa em que ocorre o contato e aderência das microbolhas de ar aos flocos, no interior das colunas de flotação do Flotateste.

O trabalho pode ser concretizado a partir do aproveitamento de informações provenientes das investigações experimentais desenvolvidas por Marega (2020), atreladas ao uso do Flotateste para o estudo da influência das características das partículas floculadas e das

microbolhas de ar sobre a eficiência global do processo de FAD, para condições específicas de água bruta preparada com elevada cor e turbidez moderada a baixa.

Dentre os objetos de trabalho contemplados pela autora em sua pesquisa, foram otimizados os parâmetros de coagulação (mistura rápida) específicos para a água de estudo, bem como foram variados parâmetros operacionais, como gradiente e tempo aplicados à etapa de floculação e razão de recirculação imposta, para a otimização do processo de FAD como um todo.

Sabe-se que a etapa de contato e aderência entre flocos e microbolhas de ar ocorre no interior da zona de contato em flotações com escoamento contínuo, com nenhuma agitação sendo promovida nessa zona, a não ser pela resultante da soma do próprio escoamento líquido à agitação promovida pela ascensão das microbolhas de ar.

Neste sentido, a investigação experimental acerca da influência do incremento do valor de gradiente de velocidade ( $G$ ) no interior da zona de contato de unidade piloto de flotação por ar dissolvido (fluxo contínuo) sobre a eficiência do processo de FAD já foi contemplada por pesquisas realizadas no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR – EESC/USP), representadas pelos trabalhos de Souza (2012) e Meca (2014). Em suas pesquisas, as autoras garantiram incremento sobre o valor de  $G$  no interior da zona de contato por meio da introdução de módulos de telas sobrepostas no interior da referida zona, com a obtenção de resultados favoráveis ao uso das telas para o aumento da eficiência do processo de FAD.

Desta forma, com base nas constatações obtidas por Souza (2012) e Meca (2014), esta pesquisa dedicou-se a transportar a investigação iniciada pelas referidas autoras (em unidade piloto de FAD, de fluxo contínuo) para unidade experimental em escala de bancada e de regime de alimentação por batelada (fluxo intermitente), com base na investigação da existência ou não de vantagem ao processo de FAD quando do incremento do gradiente de velocidade característico da etapa de contato e aderência entre partículas floculadas e microbolhas de ar, induzido agora a partir da imposição de agitação mecânica à referida etapa.

Sendo assim, faz-se necessário destacar que a força motriz desta pesquisa consistiu primordialmente na busca pela possibilidade de contribuição para o aumento da eficiência de sistemas de tratamento de água por coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido,

fundamentando-se para tanto em investigação em escala de bancada baseada no uso do Flotatestes.



## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

O presente trabalho de pesquisa tem como objetivo geral explorar os efeitos que a imposição de agitação mecânica controlada (incremento do gradiente médio de velocidade) durante a etapa de contato flocos - microbolhas de ar, por intervalos de tempo de imposição específicos, pode exercer sobre a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido (FAD), com base em investigação experimental realizada em escala de bancada e em regime de fluxo intermitente, por meio do equipamento Flotateste.

### **2.2 Objetivos específicos**

- Reprodução da água de estudo e das condições ótimas de coagulação estabelecidas por Marega (2020) em investigação experimental em escala de bancada realizada no LATAR (EESC/USP), dedicada ao estudo da influência das características de flocos e microbolhas de ar sobre o processo de flotação por ar dissolvido;

- Exploração de maior diversidade de valores de gradiente de velocidade ( $G$ ) em relação aos contemplados por meio dos trabalhos de Souza (2012) e Meca (2014), dando continuidade e avançando na investigação experimental iniciada pelas referidas autoras acerca da influência do incremento do valor de  $G$  característico da etapa de contato e aderência entre flocos e microbolhas de ar sobre a eficiência do processo de FAD;



### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Breve revisão sobre a origem e histórico da FAD

De acordo com Edzwald e Haarhoff (2012), a primeira geração de sistemas de flotação por ar dissolvido (FAD) data dos anos de 1920, na Escandinávia, de forma aplicada à clarificação e recuperação de resíduos de águas residuárias de fábricas de papel, em substituição ao processo convencional de sedimentação. Já as primeiras aplicações do processo de FAD voltado à produção de água potável datam do ano de 1964, na Suécia, com a elaboração do projeto de duas plantas a vácuo por uma companhia especializada, de nome *Purac*. No ano seguinte, foi construída a primeira planta de FAD aplicada ao tratamento de água para abastecimento na Finlândia, com o comissionamento de uma segunda planta no país em 1967.

Segundo os autores, a rápida aceitação finlandesa quanto ao novo processo de clarificação foi motivada pelas dificuldades associadas à aplicação do processo de sedimentação. As frias e usualmente coloridas águas brutas dos mananciais finlandeses demandavam longos tempos de floculação e baixas taxas de aplicação superficial para viabilizar a clarificação por sedimentação, fazendo com que a FAD emergisse como alternativa de custo reduzido e mais eficiente. Nos anos de 1970, cerca de vinte plantas de flotação por ar dissolvido apresentavam-se em operação na Finlândia, com o processo de sedimentação tendo sido substituído pela FAD praticamente por completo nos anos que seguiram.

Aproximadamente na mesma época, emergia na África do Sul a necessidade de reuso da água residuária doméstica da cidade de *Windhoek* (Namíbia) para a elevação do volume hídrico fornecido à cidade. Um programa de pesquisa foi conduzido durante seis anos (1963-1968), como fruto de tal demanda, com a planta de recuperação tendo sido comissionada ao fim do sexto ano. A FAD foi implementada como uma das etapas do processo de clarificação adotado, com adição de ar disperso quando necessário.

Como consequência de tal experiência, um programa Sul-Africano de pesquisa sobre FAD foi iniciado em 1980, proporcionando fundamentos para diversas aplicações bem sucedidas da tecnologia nos segmentos de abastecimento e tratamento de efluentes industriais e domésticos. Em adição, o que foi alcançado em *Windhoek* motivou o início da investigação da FAD voltada ao abastecimento hídrico por parte do *Water Research Centre* (WRC), no Reino Unido (EDZWALD; HAARHOFF, 2012).

O aprimoramento prático da flotação por ar dissolvido alcançado ao longo das décadas de 1960 e 1970 despertou o interesse acadêmico pela tecnologia, que continuou a evoluir e se consolidar durante as décadas seguintes, por meio de aplicações em escalas piloto e plena no mundo todo. Como marco do início da colaboração internacional para o desenvolvimento da FAD, Haarhoff (2008) cita a Conferência Internacional organizada pelo WRc em *Felixstowe* (Inglaterra), em 1976. Outros eventos de mesma magnitude foram organizados ao longo dos anos, espalhados pelo globo (Bélgica, 1991; EUA, 1994; Inglaterra, 1997; Finlândia, 2000; Coreia do Sul, 2007; EUA, 2012).

O investimento científico e tecnológico para a otimização do processo de FAD ao longo dos anos, a partir tanto do monitoramento de plantas pré-existentes quanto da investigação científica em escalas de bancada e piloto, permitiu sua consolidação como tecnologia de tratamento robusta e eficiente, amplamente aplicada na atualidade.

De acordo com o trabalho desenvolvido por Valade, Becker e Edzwald (2009), a FAD é recomendada para o tratamento de águas brutas com níveis médio e máximo de turbidez de origem mineral de até 10 e 50UNT, respectivamente, e níveis médio e máximo de turbidez de origem não mineral (causada pela presença de algas, por exemplo) de 100 e 200UNT, nesta ordem.

Levantamentos realizados pelos autores em cerca de 400 estações de tratamento de água dos Estados Unidos e Canadá identificaram plantas de flotação por ar dissolvido aplicadas ao tratamento de águas brutas com nível médio de Carbono Orgânico Total (COT) de  $10\text{mg.L}^{-1}$ . Nota-se, contudo, como também enfatizado pelos autores, que não há recomendação quanto a um limite máximo em termos de COT e cor verdadeira para a aplicação da FAD. Teores orgânicos excessivos, representados por valores elevados de COT, cor verdadeira e turbidez de origem não mineral, demandam doses também elevadas de coagulante na etapa de pré-tratamento. As partículas floculadas geradas, contudo, tendem a apresentar baixa densidade, tendo sua remoção favorecida pelo processo de FAD, mesmo que em elevadas concentrações.

Em termos comparativos, a aplicação do processo de flotação por ar dissolvido mostra-se mais eficiente que o historicamente aplicado processo de clarificação por sedimentação, principalmente para águas com cor verdadeira e de baixa turbidez de origem mineral, que apresentem partículas de baixa densidade, algas e patógenos como *Giardia* e *Cryptosporidium*. Além disso, embora o desempenho de ambos os processos de FAD e

sedimentação sejam negativamente afetados por reduções de temperatura, o último é mais sensível que o primeiro (EDZWALD, 2010; EDZWALD, 2006).

A comparação se estende ao processo prévio de floculação, visto que a FAD associa-se a partículas floculadas de menores dimensões e menos densas que as aplicadas à sedimentação, e cuja formação é garantida a partir da imposição de tempos de floculação inferiores, que decresceram de 20 a 30 minutos (nos anos de 1990) para valores típicos atuais próximos de 10 minutos ou menos (há plantas de abastecimento como a de Croton, na cidade de Nova Iorque, que operam com tempo de floculação de 5 minutos) (EDZWALD, 2010; VALADE; BECKER; EDZWALD, 2009).

Menores tempos de floculação permitem a redução das dimensões dos tanques de floculação, contribuindo para a redução tanto de custos construtivos quanto do tempo necessário para a conclusão do ciclo de tratamento (VAN NIEUWENHUIJZEN; VAN DER GRAAF, 2011).

No que concerne às taxas de aplicação superficial (TAS), enquanto os processos de sedimentação convencional e de alta taxa operam com valores médios que variam de 0,5 a 1,0 m.h<sup>-1</sup> e de 2,5 a 6,0 m.h<sup>-1</sup>, respectivamente, os processos de flotação por ar dissolvido associam-se a taxas superiores (VALADE; BECKER; EDZWALD, 2009). Segundo Haarhoff (2008) e Edzwald (2010), os valores de TAS aos quais o processo de FAD é submetido têm aumentado com o tempo e conseqüente aperfeiçoamento da tecnologia, com valores variando de 5,0 m.h<sup>-1</sup>, nos anos de 1960 e 1970, até 20,0 a 40,0 m.h<sup>-1</sup> em aplicações atuais de alta taxa.

Um intervalo de valores típico para a FAD convencional, contudo, iguala-se a 10,0 a 15,0 m.h<sup>-1</sup>, ainda assim superior aos valores característicos do processo de sedimentação (VALADE; BECKER; EDZWALD, 2009). Isto se torna possível visto que a velocidade de deslocamento ascendente dos aglomerados formados por microbolhas de ar e partículas é capaz de atingir valores em muito superiores aos de sedimentação de partículas individuais (8 a 15 vezes a velocidade de sedimentação dos flocos) (LEPPINEN; DALZIEL; LINDEN, 2001; REALI, 1991).

A operação com mais altas taxas de aplicação superficial permite que os tanques de FAD ocupem menor área que os de sedimentação, com capacidade para clarificar maior volume de água em menos tempo.

No que diz respeito à remoção e concentração de partículas, mais especificamente as de origem não mineral e de baixa densidade, o estabelecimento prévio da FAD em vez do processo de sedimentação permite que as carreiras de filtração sejam mais longas e que a frequência de retro lavagens seja reduzida, contribuindo para a economia de recursos.

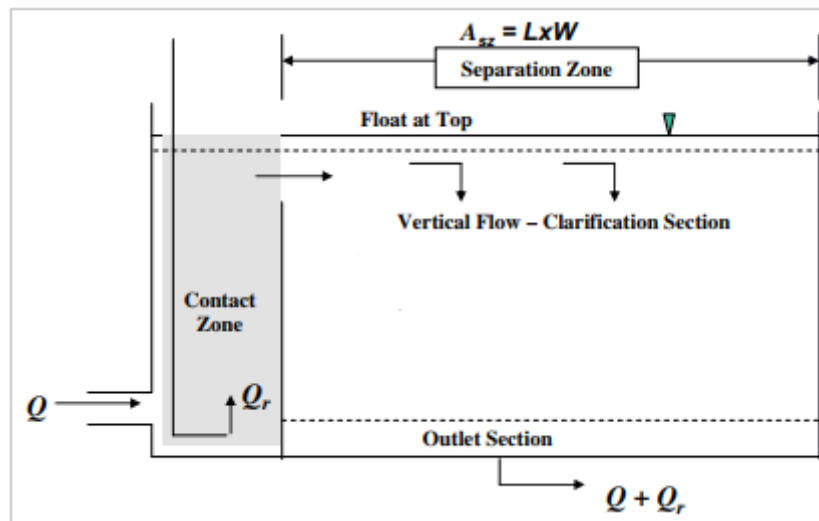
Por outro lado, é possível fazer proveito do menor aporte de partículas e elevar os valores de taxa de aplicação superficial aos quais os filtros são submetidos, reduzindo a demanda por área para a elevação da eficiência global da operação. Em adição, a maior concentração de sólidos no lodo flotado em comparação com o sedimentado permite a economia de recursos em termos de desidratação, transporte e disposição final (VAN NIEUWENHUIJZEN; VAN DER GRAAF, 2011).

### **3.2 Caracterização do processo de FAD**

A Flotação por Ar Dissolvido (FAD) pode ser caracterizada como um processo de clarificação aplicado à remoção de partículas da massa líquida por meio da utilização de bolhas de ar. Tais partículas envolvem aquelas inicialmente presentes no manancial; que tenham sido adicionadas; que tenham sido produzidas ao longo de processos de pré-tratamento, como a adição de coagulantes metálicos; e aquelas partículas características de processos de oxidação. A remoção se dá por meio da colisão e aderência entre pequenas bolhas de ar, de diâmetros da ordem de 10 a 100 $\mu$ m, e partículas, o que proporciona a formação de agregados compostos por bolhas e partículas, cuja separação da massa líquida é garantida por meio de sua ascensão até a superfície do tanque de FAD (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2010; EDZWALD, 2006; HAN; KIM, 2011).

O tanque de FAD é dividido basicamente em duas regiões distintas, separadas fisicamente por uma barreira ou anteparo, sendo a primeira delas a Zona de Contato (ZC) e a segunda a Zona de Separação (ZS) (Figura 1).

**Figura 1** – Representação esquemática de tanque de flotação por ar dissolvido evidenciando a separação física entre ZC e ZS.



Fonte: Modificada de Edzwald (2010).

Na ZC, as partículas previamente coaguladas e floculadas são introduzidas e estabelecem sua primeira interação com as microbolhas de ar. A finalidade de tal zona é proporcionar oportunidades para a ocorrência de colisões e de aderência entre microbolhas de ar e partículas, enquanto seu desempenho é relativo tanto à efetividade das colisões estabelecidas (colisões capazes de proporcionar aderência entre bolhas e partículas) quanto às suas características hidráulicas (período de permanência da água na ZC) (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2010).

A suspensão gerada, composta por agregados de bolhas e partículas, microbolhas de ar e partículas livres, deixa a ZC e move-se em direção à ZS.

Na ZS, os agregados previamente formados e de densidade inferior à da água separam-se do restante da massa líquida e concentram-se em uma camada flotada na superfície no tanque de FAD, a qual é posteriormente coletada e removida. Concomitantemente, na extremidade oposta (inferior) do tanque ocorre a coleta do subnadante clarificado.

Evidencia-se, contudo, como identificado por Edzwald e Haarhoff (2012) e Haarhoff (2008), que embora haja uma barreira física separando as Zonas de Contato (ZC) e de separação (ZS), os processos e fenômenos associados não se restringem a tal delimitação. Em outras palavras, há continuidade da interação entre microbolhas de ar, partículas floculadas e agregados microbolhas-partículas com o fluxo da suspensão em direção à ZS. Partículas floculadas podem sofrer quebras, dividir-se em flocos de menores dimensões e reflocular,

enquanto bolhas de ar podem se desconectar de agregados, readerir e mesmo coalescer, gerando bolhas de maiores dimensões. Sendo assim, embora a ZC e a ZS constituam zonas distintas no interior do tanque de FAD, os processos de contato e separação tendem a apresentar sobreposição.

No que concerne à produção de bolhas de ar, o método mais comumente aplicado consiste na recirculação de fluxo pressurizado, por meio da qual água previamente tratada é bombeada e recirculada para o interior de um tanque de saturação, com a dissolução de ar no interior do tanque viabilizada por meio de elevação da pressão imposta. Uma vez saturada a massa líquida, o fluxo de recirculação é liberado do interior do tanque de saturação e direcionado ao tanque de FAD, mais especificamente à Zona de Contato (ZC). A queda de pressão causada pela liberação do líquido saturado no interior da ZC permite a liberação do ar dissolvido na forma de pequenas bolhas de ar (EDZWALD; HAARHOFF, 2012).

### **3.3 Caracterização do fornecimento de ar na FAD**

Na teoria, a demanda de ar para que o processo de FAD se estabeleça de forma bem sucedida é condicionada pelo número de colisões necessárias entre bolhas de ar e partículas floculadas para que se alcance e garanta aderência entre ambas, permitindo que o agregado formado adquira densidade inferior à da água e velocidade ascensional superior ao valor de taxa de aplicação superficial (TAS) aplicado (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; REALI, 1991).

Na prática, faz-se necessário que as microbolhas de ar produzidas alcancem cobertura superficial capaz de garantir sua disponibilidade em quantidade e qualidade suficientes ao redor de cada floco. Qualidade relaciona-se, neste contexto, às dimensões das bolhas de ar disponíveis, tendo em vista que macro bolhas não são úteis para o processo e, uma vez presentes, concentram fração significativa do volume de ar fornecido.

Além disso, deve-se levar em conta que os processos tanto de dissolução de ar (no interior do tanque de saturação) quanto de desprendimento ou liberação de microbolhas (pela queda de pressão com a introdução do líquido saturado no interior do tanque de flotação) não são completamente eficientes, com o primeiro deles variando de 50 a 95%, em função do modelo de tanque de saturação adotado (EDZWALD, 2010). Em adição, águas submetidas ao processo de FAD e que não se apresentam saturadas em termos de oxigênio exercem demanda e consomem parte do volume de ar fornecido.



Sendo assim, a conjunção de tais fatores obriga que, na prática, a concentração de ar a ser fornecida para o estabelecimento bem sucedido da FAD exceda a teoricamente demandada, fazendo com que a concentração real de microbolhas tenda a superar a de partículas floculadas cerca de 50 a 100 vezes (EDZWALD; HAARHOFF, 2012).

A concentração de ar a ser fornecida pode ser expressa em termos mássicos, molares ou volumétricos e deve ser mantida constante ao longo de todo o processo de flotação para que um desempenho consistente seja atingido, com o volume de bolhas de ar atuando como parâmetro determinante sobre a eficiência dos processos tanto de contato entre bolhas e partículas floculadas quanto de separação. Tal concentração foi determinada empiricamente por meio de experimentos conduzidos em escalas piloto e plena nas décadas de 1960 e 1970, com valores variando de 5,6 a 8,6mL ar.L<sup>-1</sup> água, em termos volumétricos, para taxas de aplicação superficial (TAS) convencionais, e 6,0 a 8,0mg.L<sup>-1</sup>, em termos mássicos (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2010).

A concentração de ar fornecida é dependente tanto da Pressão de Saturação ( $P_{SAT}$ ) imposta quanto da Razão de Recirculação (R) aplicada, com a primeira variando tipicamente entre 400 e 600kPa, e a segunda, que representa a razão entre a vazão recirculada e a vazão total produzida, variando tipicamente de 8 a 12% (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2006).

### **3.4 Bolhas de ar, partículas floculadas e as interações existentes entre elas**

Na Flotação por Ar Dissolvido (FAD), a suspensão de bolhas de ar produzida na entrada da ZC apresenta elevada concentração, com valores de bilhões de bolhas ( $10^{10}$  a  $10^{11}$ ) por metro cúbico, mesmo após a mistura ao fluxo de água bruta, garantindo à suspensão um aspecto leitoso (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2006).

As bolhas são produzidas na entrada da ZC, em decorrência do processo de cavitação. Este se manifesta com a queda de pressão ocasionada pela passagem da massa líquida saturada pelos dispositivos de injeção utilizados, fenômeno de total influência sobre as dimensões das bolhas produzidas (EDZWALD, 2010; HAN; PARK; YU, 2002). Tais dimensões são significativamente afetadas, portanto, pelo modelo de dispositivo de injeção adotado, assim como pelos valores de Pressão de Saturação ( $P_{SAT}$ ) e Razão de Recirculação (R) impostos.

Já o formato das bolhas produzidas é influenciado tanto pelas dimensões quanto pela velocidade de ascensão das mesmas. Bolhas de ar de dimensões inferiores a  $100\mu\text{m}$ , caso da maioria das bolhas associadas ao processo de FAD, apresentam formato e deslocam-se pela massa líquida como esferas rígidas, sem sofrer deformação (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2010; EDZWALD, 2006).

Mais especificamente quanto à velocidade de ascensão das bolhas de ar, Edzwald (2006) identifica sua dependência em relação a três variáveis principais: a dimensão da bolha, a diferença de densidade massa líquida-bolha de ar, e a viscosidade da água. Esta última é afetada pela temperatura da água, com quedas de temperatura levando ao aumento da viscosidade e à conseqüente redução da velocidade de ascensão das bolhas.

Existe uma tendência de aumento da dimensão das bolhas de ar com sua ascensão na massa líquida, ao deslocarem-se da ZC em direção à ZS no interior do tanque de FAD, com a maioria delas apresentando tamanhos que variam de  $40$  a  $80\mu\text{m}$  na ZC e de  $50$  a  $150\mu\text{m}$  na ZS. Tal fenômeno justifica-se tanto pela queda de pressão a qual a massa líquida é submetida entre zonas quanto pelo fenômeno de coalescência (junção entre bolhas), em que o segundo exerce maior influência sobre o acréscimo de tamanho que o primeiro. Sendo assim, levando-se em consideração o tanque de FAD como um todo, a distribuição de tamanho de bolhas de ar associada varia tipicamente de  $10$  a  $150\mu\text{m}$  (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2010; EDZWALD, 2006).

Embora haja conhecimento de que o tamanho de bolhas associado ao desempenho ótimo da FAD é dependente das dimensões das partículas floculadas a serem removidas, a prática tem demonstrado que bolhas de menores dimensões associam-se a um melhor desempenho, apresentando maior área superficial para o contato com os flocos e mais chances de efetividade das colisões estabelecidas (aderência bolha-partícula), principalmente para comprimentos limitados de sítios hidrofóbicos nos flocos.

Macro bolhas, de dimensões geralmente iguais ou superiores a  $150\mu\text{m}$ , ascendem pela coluna líquida em alta velocidade, sendo capazes de desestruturar flocos, agregados bolha-floco e camadas flotadas previamente acumuladas. Além disso, a menor área interfacial das macro bolhas reduz a efetividade das colisões bolha-floco e a eficiência de flotação de flocos de baixa densidade (COUTO et al., 2009; EDZWALD; HAARHOFF, 2012; EDZWALD, 2010; EDZWALD, 2006; HAARHOFF, 2008; HAN; PARK; YU, 2002).

No que diz respeito às partículas floculadas, predominam em plantas de abastecimento que fazem uso da FAD concentrações mássicas inferiores a  $100\text{mg.L}^{-1}$  e densidades médias de  $1.000$  a  $1.100\text{kg.m}^{-3}$ . Já no que concerne às dimensões dos flocos, aplicações em escala piloto e plena identificam eficiências da ZC de aproximadamente 100% para flocos de dimensões iguais ou superiores a  $100\mu\text{m}$ . É possível citar, neste contexto, o trabalho de Pioltine e Reali (2015), em que elevado desempenho de clarificação por meio da FAD foi alcançado em associação a flocos de diâmetro médio superior a  $300\mu\text{m}$ .

Quanto às interações entre bolhas de ar e partículas, evidencia-se que entre duas partículas (ou bolha e partícula) sempre haverá a manifestação de forças interativas atrativas ou repulsivas, as quais atuam a distâncias ínfimas (da ordem de dezenas de nanômetros), mesmo comparadas às dimensões das próprias partículas ou bolhas, sendo necessário que a proximidade seja suficientemente grande para que a somatória de tais forças seja experimentada (NEWCOMBE; DIXON, 2006; EDZWALD, 2006).

Há basicamente quatro tipos de forças de natureza semelhante à descrita pelos autores citados atuando entre bolhas e partículas, sendo elas as forças eletrostáticas, as forças de London - Van der Waals, e as forças atreladas a efeitos hidrodinâmicos e hidrofóbicos, com apenas a última delas apresentando caráter reconhecidamente atrativo. A compreensão a respeito da origem e manifestação de tais forças é essencial para que condições que favoreçam o processo de desestabilização (superação das forças repulsivas pelas atrativas) sejam estimuladas, contribuindo, assim, para a formação de agregados bolha-floco e maximização do desempenho da FAD (EDZWALD; HAARHOFF, 2012; NEWCOMBE; DIXON, 2006).

### **3.5 As etapas de pré-tratamento e sua importância em relação à FAD**

De acordo com Haarhoff (2008) e Edzwald (2010), a eficiência última do processo de flotação depende fundamentalmente dos pré-tratamentos químico e físico estabelecidos, representados pelos processos de coagulação e floculação, com mudanças sutis atreladas à eficiência de aderência entre microbolhas e partículas floculadas resultando em alterações significativas sobre a eficiência da FAD.

Contudo, para devidamente caracterizar os processos de coagulação e floculação é interessante abordar o conceito de coloide, ou suspensão coloidal. Segundo Reali, Paz e Daniel (2019), fração considerável das partículas dispersas em águas superficiais é composta

por sólidos não sedimentáveis, cujas dimensões apresentam-se comumente no intervalo entre  $0,0001\mu\text{m}$  e  $100\mu\text{m}$ . As partículas coloidais, cujas dimensões variam de  $0,001\mu\text{m}$  a  $1\mu\text{m}$ , fazem parte do grupo de partículas sólidas não sedimentáveis e constituem fração significativa das mesmas.

De acordo com os mesmos autores, os coloides predominantemente encontrados em águas superficiais naturais são denominados sóis, nos quais a água é caracterizada como a fase dispersora e o constituinte sólido como a fase dispersa. Tais coloides apresentam elevados valores de razão área/volume e, por consequência, facilidade para a adsorção de substâncias em sua superfície, característica que lhes proporciona o desenvolvimento de carga elétrica superficial.

A natureza hidrofílica ou hidrofóbica dos coloides é condicionada à concentração de grupos solúveis em água em sua superfície, o que confere maior ou menor afinidade pela massa líquida na qual tais partículas encontram-se dispersas. Segundo Reali, Paz e Daniel (2019), quando dispersos em águas naturais, os coloides de natureza tanto hidrofóbica quanto hidrofílica apresentam, de maneira geral, cargas superficiais negativas (para valores de pH próximos ou superiores a 7,0 especificamente para os coloides hidrofílicos). Dessa forma, quando duas partículas coloidais semelhantes deslocam-se em águas naturais e se aproximam, ocorre interação entre as cargas elétricas (de mesmo sinal) das camadas de íons que as acompanham, com a consequente produção de potenciais de repulsão entre as mesmas.

A predominância do cenário de repulsão eletrostática entre coloides torna a suspensão eletrostaticamente estabilizada, com a possibilidade de aderência entre partículas coloidais e formação de agregados de maiores dimensões (desestabilização do sistema) condicionada à redução ou eliminação da barreira de energia que impede a aproximação entre os coloides até distância suficientemente pequena para garantir a prevalência das forças atrativas de Van der Waals em detrimento das forças eletrostáticas de repulsão. Tal barreira de energia é relativa ao Potencial Zeta negativo das partículas (potencial elétrico característico da superfície de cisalhamento que delimita o invólucro líquido que se movimenta juntamente com a partícula coloidal) (REALI; PAZ; DANIEL, 2019).

Sendo assim, segundo Arboleda (2000), o processo de coagulação compreende a desestabilização das partículas em suspensão por meio da remoção das forças que as mantêm separadas, tendo como base uma série de reações físicas e químicas entre os agentes coagulantes, a superfície das partículas e a alcalinidade da água. A coagulação se inicia

concomitantemente à adição dos coagulantes à massa líquida e ocorre rapidamente, com duração equivalente a frações de segundos.

Os agentes químicos coagulantes mais comumente empregados consistem em sais de alumínio e de ferro, como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico. Tais agentes coagulantes sofrem hidrólise ao serem adicionados à massa líquida, com a formação de espécies ionizadas e de precipitados insolúveis de hidróxido de alumínio ou de ferro. Estes fenômenos de especiação e de formação de precipitados são diretamente influenciados pelo valor de pH da água posteriormente à adição dos coagulantes, fazendo com que a alcalinidade natural da água exerça papel fundamental sobre tal processo (REALI; PAZ; DANIEL, 2019).

De acordo com Arboleda (2000), há três mecanismos principais de coagulação, sendo eles o de adsorção e neutralização de cargas (baseado nas forças eletrostáticas de atração e repulsão), adsorção e formação de pontes químicas (estabelece relação de dependência entre as forças químicas e a superfície dos coloides) e o de supersaturação da concentração de coagulante em água, ou coagulação por varredura. Segundo Reali, Paz e Daniel (2019), a utilização de sais de ferro ou de alumínio como agentes coagulantes associa-se principalmente aos processos de coagulação por adsorção e neutralização de cargas e de coagulação por varredura.

Com a coagulação por adsorção e neutralização de cargas, a redução do valor de Potencial Zeta e, conseqüentemente, da barreira de energia que sustenta o distanciamento espacial entre as partículas coloidais é alcançado por meio da adsorção das espécies ionizadas de carga positiva (espécies hidrolisadas e solúveis) sobre a superfície dos coloides (de carga predominantemente negativa), permitindo sua agregação. Já o processo de coagulação por varredura consiste na aplicação de elevadas dosagens de coagulante (significativamente superiores às administradas visando à adsorção e neutralização de cargas), com a formação de grande concentração de precipitado (gelatinoso) de hidróxido de ferro ou de alumínio. O deslocamento de tais precipitados de grande volume pela massa líquida permite a captura das partículas coloidais (REALI; PAZ; DANIEL, 2019).

Os referidos autores destacam a importância da realização de ensaios de laboratório para a otimização tanto da dosagem de agente coagulante quanto do valor (ou faixa de valores) de pH dedicados à eficiente coagulação da água que se almeja tratar. Em complemento, dentre os principais fatores listados por Arboleda (2000) como influenciadores do processo de coagulação, é interessante citar a dosagem de coagulantes, o pH, a concentração de coloides e

de substâncias orgânicas na água, a presença de ânions e cátions na água, bem como a intensidade da mistura rápida (associada ao gradiente médio de velocidade imposto ao processo de mistura).

A partir da conclusão do processo de coagulação e consequente desestabilização das suspensões coloidais, flocos primários de dimensões reduzidas começam a surgir. Torna-se possível, assim, estimular a aproximação e o contato entre as partículas, induzindo a formação de aglomerados de maiores dimensões, processo denominado floculação (REALI; PAZ; DANIEL, 2019).

Arboleda (2000) descreve o processo de floculação como o transporte das partículas previamente desestabilizadas (por meio de coagulação) no interior da massa líquida, com o objetivo de que façam contato entre si e produzam uma malha tridimensional de agregados de maiores dimensões, os flocos.

O referido autor destaca a existência de dois mecanismos particulares e consecutivos de floculação. O primeiro consiste na floculação pericinéctica (ou de subclasse viscosa), em que os contatos entre partículas são promovidos a partir da energia interna da água, característica do movimento das moléculas do próprio líquido (movimento Browniano). O período de atuação da floculação pericinéctica se inicia logo após o processo de desestabilização das partículas e tem reduzida duração (em torno de 6 a 10 segundos). A partir de então, as partículas floculadas adquirem dimensões acima das quais a atuação do movimento Browniano não é relevante (REALI; PAZ; DANIEL, 2019).

O mecanismo que passa a atuar em sequência é o de floculação ortocinéctica (ou de subclasse inercial), em que os contatos entre partículas são estimulados por meio de energia imposta ao meio líquido a partir de forças externas (gradientes de velocidade induzidos por turbulência imposta à massa líquida), seja por meio de unidades mecânicas ou hidráulicas.

Como destacado por Reali, Paz e Daniel (2019), é interessante notar que o nível de agitação demandado para a fase de floculação ortocinéctica é significativamente inferior àquele requerido para a etapa de coagulação (mistura rápida), visto que o aumento das dimensões dos flocos torna-os também mais suscetíveis a quebras, para o caso de aplicação de níveis de agitação mais elevados. Assim, a etapa de floculação é também caracterizada como etapa de mistura lenta da massa líquida.

De acordo com os mesmos autores, os principais parâmetros de projeto das unidades de floculação consistem no tempo total de floculação (Tf) e no gradiente médio de velocidade aplicado (Gf). Quando antecedem unidades de flotação, os sistemas de floculação mecânicos são geralmente projetados com dois ou três compartimentos em série, com Tf pertencente a intervalo de 8 a 20 minutos e Gf comumente na faixa de 70 a 110s<sup>-1</sup> (mantido constante em todas as câmaras adotadas).

Sendo assim, segundo Arboleda (2000), a atuação conjunta dos processos de coagulação e floculação tem sido aplicada quando há demanda pela remoção de partículas causadoras de turbidez orgânica e inorgânica na água, principalmente quando estas não sedimentam rapidamente; remoção de cor verdadeira e aparente; eliminação de bactérias, vírus e organismos patogênicos suscetíveis à separação por coagulação; eliminação de alguns compostos orgânicos e substâncias produtoras de sabor e odor na água.

Especificamente no que concerne à remoção de compostos orgânicos e substâncias causadoras de sabor e odor na água, Reali, Paz e Daniel (2019) destacam que é comum identificar em águas de mananciais superficiais a presença de compostos orgânicos caracterizados como Matéria Orgânica Natural (M.O.N.). Tais compostos são constituídos por macromoléculas, com muitas delas pertencentes à faixa de tamanho coloidal e portadoras de cargas superficiais negativas, sendo, assim, suscetíveis à atuação do processo de coagulação.

De acordo com Sharma et al. (2011), a M.O.N. pode ser caracterizada como uma complexa matriz heterogênea de compostos orgânicos identificados em praticamente todas as águas naturais. Suas moléculas são constituídas predominantemente por Carbono, Oxigênio e Hidrogênio, com Nitrogênio e Enxofre também podendo estar presentes. Cátions e ânions também podem ser incorporados à superfície das moléculas de M.O.N., conferindo-lhes carga superficial.

Segundo os mesmos autores, as fontes geradoras de Matéria Orgânica Natural podem ser alóctones, associadas à decomposição de biomassa terrestre e escoamento de restos vegetais em decomposição ao longo da bacia hidrográfica; autóctones, associadas à produção *in situ* a partir de matéria orgânica algal, fitoplânctons e macrófitas; e característica de efluentes de sistemas de tratamento de águas residuárias, englobando desde matéria orgânica residual até produtos microbianos solúveis formados durante o tratamento biológico. Quanto à sua composição, a M.O.N. consiste de substâncias húmicas e não húmicas. Em ambientes aquáticos, as substâncias húmicas são representadas pelos Ácidos Húmico e Fúlvico, com a

fração não húmica sendo representada por ácidos hidrofílicos, proteínas, aminoácidos e carboidratos.

A presença de Matéria Orgânica Natural na água é capaz de impactar de forma significativamente negativa os processos de tratamento de água para abastecimento e a qualidade da água nos sistemas de distribuição.

Alguns de tais impactos negativos consistem na produção de cor, sabor e odor na água; redução de fluxo ou mesmo colmatação de membranas, resultando no aumento da frequência de limpezas e nos custos de operação; redução da vida útil de filtros de carvão ativado aplicados à remoção de micropoluentes orgânicos, uma vez que as moléculas de M.O.N. competem por sítios de adsorção; possibilidade de reação com Cloro e outros agentes desinfetantes e oxidantes, com a formação de subprodutos da desinfecção, muitos dos quais apresentam caráter cancerígeno e mutagênico; possibilidade de estímulo ao crescimento microbiano e corrosão no sistema de distribuição (SHARMA et al., 2011).

Sendo assim, a coagulação tem sua importância reforçada por meio do parágrafo anterior, destacando-se como processo responsável pela desestabilização de suspensões coloidais e capaz de contribuir não somente para a remoção de turbidez e cor da água, mas também de M.O.N. Além disso, a implementação adequada dos processos de coagulação e floculação precedendo a FAD contribui para a produção de flocos de reduzida ou nula carga elétrica superficial e de caráter mais hidrofóbico, facilitando o processo de aderência entre bolhas e flocos (as microbolhas de ar tendem a apresentar Potencial Zeta negativo, como a maior parte das partículas coloidais previamente ao processo de coagulação) (EDZWALD, 2010).

### **3.6 Contexto específico de investigação**

Como já comentado, a concretização bem sucedida do processo de flotação por ar dissolvido é condicionada à ocorrência de colisões entre as microbolhas de ar e as partículas floculadas, para permitir que deste número total de colisões resulte um número de colisões efetivas, representadas pela aderência ou ligação estável entre as microbolhas e as partículas, e que parte destas ligações estáveis sejam mantidas em quantidade e por intervalo de tempo suficientes para reduzir a densidade do aglomerado formado em relação à da água e produzir velocidade ascensional capaz de vencer a tendência de arraste provocada pelo fluxo descendente de água na zona de flotação, atrelado ao valor de taxa de aplicação superficial (TAS) existente no reator (REALI, 1991).



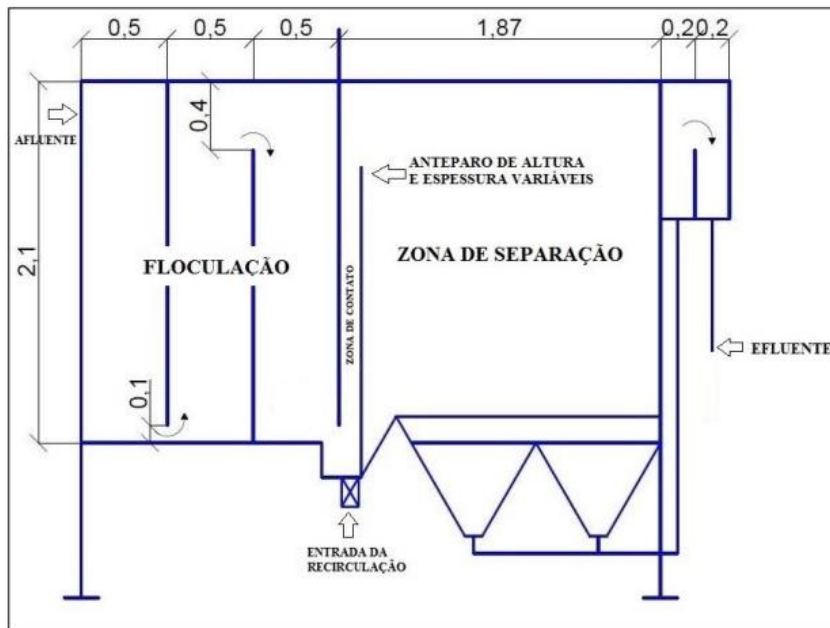
Em complemento, faz-se necessário destacar que as colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas são estimuladas pelos gradientes de velocidade existentes no interior do reator, especial e predominantemente no interior da Zona de Contato (ZC), concebida para tanto. Reali (1991) destaca que tais gradientes podem resultar de dois mecanismos particulares, sendo eles o próprio fluxo contínuo no interior do reator (gerador de campo turbulento) e/ou o movimento ascendente das microbolhas em relação ao movimento descendente dos flocos.

Dessa forma, a conexão entre o valor de gradiente de velocidade existente no interior da ZC e o bom desempenho da FAD permite identificar uma janela de oportunidade para a tentativa de aumento de eficiência do processo, condicionada à possibilidade de se elevar o valor de gradiente médio de velocidade imposto no interior da ZC e a partir disso tentar aumentar a frequência de colisões entre bolhas e flocos no interior da mesma zona.

A investigação experimental da influência exercida pelo incremento do gradiente médio de velocidade característico da etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar sobre o desempenho da FAD recebeu contribuições a partir de pesquisas realizadas no Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR – EESC/USP), representadas especificamente pelos trabalhos de Souza (2012) e Meca (2014).

Estes trabalhos de pesquisa foram desenvolvidos no setor de instalações piloto do Laboratório, a partir de investigações conduzidas em Unidade Piloto retangular de Flotação por Ar Dissolvido (UPFAD) (Figuras 2 e 3), unidade de escoamento contínuo concebida de forma atrelada ao projeto temático de pesquisa intitulado “Influência das características da zona de floculação, de contato e de separação na formação de conjuntos flocos-microbolhas de ar adequados para a separação em unidades de flotação de última geração aplicadas ao tratamento de água”.

**Figura 2** – Representação de vista em corte longitudinal da UPFAD utilizada ao longo das pesquisas de Souza (2012) e Meca (2014) (todas as unidades em metros).



Fonte: Meca (2014).

**Figura 3** – Imagem da UPFAD utilizada ao longo das pesquisas de Souza (2012) e Meca (2014).



Fonte: Meca (2014).

A UPFAD foi projetada tendo como foco sua compacidade e versatilidade, permitindo associar em sua estrutura os processos de coagulação, floculação e flotação, bem como viabilizar alterações de parâmetros operacionais e de projeto (gradiente –  $G_f$  – e intervalo de tempo –  $T_f$  – associados à etapa de floculação, vazão de entrada no tanque de flotação, dimensões das Zonas de Contato (ZC) e de Separação (ZS), intervalos de tempo de detenção

hidráulica e taxas de aplicação superficial) e a verificação, assim, de sua influência sobre o desempenho global da unidade ou de uma de suas partes constituintes.

Além de associarem-se a uma mesma unidade piloto para a condução de investigações experimentais, os trabalhos desenvolvidos por Souza (2012) e Meca (2014) empregaram procedimentos semelhantes no que concerne à preparação da água bruta de estudo e a algumas condições de coagulação e de operação adotadas.

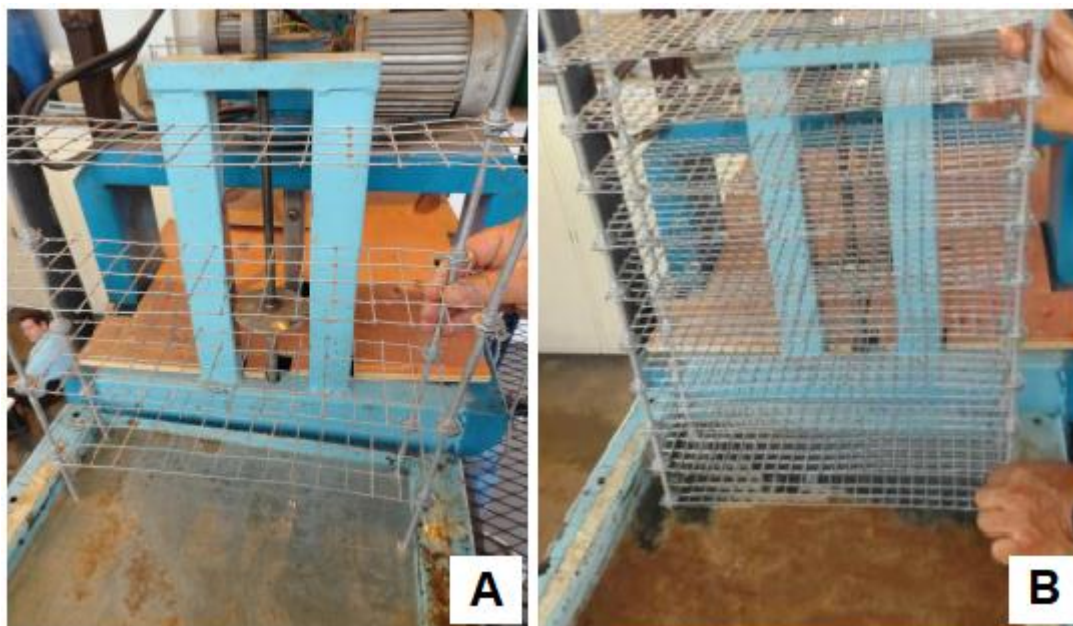
As duas pesquisas contemplaram a utilização de água de poço artesiano (com ponto de captação) alocado no interior da Área 1 do Campus da USP de São Carlos, SP, para a preparação da água de estudo, bem como o uso de soluções de Sulfato de Alumínio (S.A.) ( $\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3 \cdot 14-16,5\text{H}_2\text{O}$  – VETEC P.A. 277) e de Carbonato de Sódio (Barrilha GENCO®) como agentes de coagulação e de regulação de pH, respectivamente. A aplicação de Ácido Húmico comercial (Aldrich® 1,675-2) e Caulinita (Fluka® 60609) para conferir cor e turbidez à água de estudo também foi uma constante entre as duas pesquisas.

Nota-se, inclusive, que as concentrações adotadas para tais constituintes foram as mesmas para as duas investigações, totalizando  $1,0\text{mg.L}^{-1}$  de Ácido Húmico ( $\approx 37,0\text{uC}$  ou  $37,0\text{mgPt-Co.L}^{-1}$ , como cor aparente) e  $8,5\text{mg.L}^{-1}$  de Caulinita ( $\approx 7,3\text{UNT}$ ).

Em sua pesquisa, Souza (2012) investigou o efeito da variação de quatro parâmetros especificamente aplicados à Zona de Contato (ZC) da UPFAD sobre a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido para remoção de turbidez e cor aparente, sendo eles o gradiente médio de velocidade ( $G_{ZC}$ ), o tempo de detenção hidráulico ( $T_{ZC}$ ), a taxa de aplicação superficial ( $TAS_{ZC}$ ) e a concentração de ar fornecida para a geração de microbolhas, representada pela razão de recirculação (R) imposta.

A pressão de saturação foi fixada em  $450,0 \pm 10,0\text{kPa}$  para a condução de todos os ensaios, com a concentração de ar tendo sido variada por meio da adoção de três valores distintos de R (4,5; 6,0 e 8,0%). Quanto ao valor de  $G_{ZC}$ , este foi incrementado por meio da instalação de módulos contendo telas superpostas com aberturas distintas no interior da ZC, com dois modelos diferentes de telas tendo sido aplicados (Figura 4, A e B, e Figura 5). A utilização de tais módulos fundamentou-se em seu potencial de garantir não somente incremento sobre a magnitude total do  $G_{ZC}$ , como também permitir mais uniforme distribuição do gradiente de velocidade na massa líquida.

**Figura 4** – Imagens dos módulos de telas intercaladas aplicadas no interior da zona de contato da UPFAD por Souza (2012): modelo Hobby (A); modelo Hobby-Casanet (B).



Fonte: Souza (2012).

**Figura 5** – Quadro de especificações técnicas dos dois modelos de telas aplicados por Souza (2012) no interior da zona de contato da UPFAD.

Modelo	Dimensões da malha (mm)	Diâmetro dos fios (mm)	Material
Hobby	25,0 x 25,0	1,24	Aço galvanizado
Hobby-Casanet	12,5 x 12,5	0,89	Aço galvanizado

Fonte: Souza (2012).

Desta forma, a ZC da UPFAD foi estruturada em duas configurações diferentes (A e B), com cada configuração tendo sido submetida aos três valores de razão de recirculação adotados e a três valores distintos de  $G_{ZC}$ , característicos do fluxo hidráulico no interior da zona de contato na ausência de telas, na presença de telas modelo Hobby e na presença de telas modelo Hobby-Casanet.

Com base em vazão afluente ao tanque de flotação e largura da ZC fixadas em  $4,6\text{m}^3\cdot\text{h}^{-1}$  e  $0,405\text{m}$ , respectivamente, bem como velocidade de entrada na ZC fixada em  $180,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  (otimizada por Maia, 2010), a configuração A consistiu na estruturação da zona de contato com  $0,09\text{m}$  de comprimento,  $TAS_{ZC}$  de  $133,0 \pm 3,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  e  $T_{ZC}$  de  $54,0 \pm 1,0\text{s}$ . Os três valores de  $G_{ZC}$  produzidos foram de  $1,8\text{s}^{-1}$  (sem telas),  $6,5\text{s}^{-1}$  (telas Hobby) e  $10,2\text{s}^{-1}$  (telas Hobby-Casanet). Já a configuração B consistiu na estruturação da zona de contato com  $0,14\text{m}$  de

comprimento,  $TAS_{ZC}$  de  $86,0 \pm 1,0 m.h^{-1}$  e  $T_{ZC}$  de  $84,0 \pm 1,0 s$ . Os valores de  $G_{ZC}$  produzidos variaram entre  $0,9 s^{-1}$  (sem telas),  $4,7 s^{-1}$  (telas Hobby) e  $6,3 s^{-1}$  (telas Hobby-Casanet).

Sendo assim, as condições de coagulação (dose de S.A. de  $22,5 mg.L^{-1}$  e pH de coagulação de  $6,5 \pm 0,1$ ) e de floculação ( $G_f$  de  $110,0 s^{-1}$  e  $T_f$  de 17,2 minutos) foram fixadas e reproduzidas em todos os ensaios.

Dentre os principais resultados obtidos por Souza (2012), foi possível notar que o valor de razão de recirculação (R) de 6,0% (equivalente a 4,90g de ar por  $m^3$  de água) associou-se aos menores residuais de turbidez e cor aparente registrados para as duas configurações da zona de contato exploradas (A e B). Em complemento, a autora também pode notar que o valor de  $G_{ZC}$  incrementado a partir da utilização de módulos de telas modelo Hobby no interior da zona de contato ( $G_{ZC}$  de  $6,5 s^{-1}$  na configuração A e  $4,7 s^{-1}$  na configuração B) associou-se às mais altas eficiências de remoção de turbidez e cor aparente por configuração da ZC.

Em adição, a comparação realizada pela autora entre os melhores desempenhos alcançados para as configurações A e B evidenciou semelhança entre as eficiências médias obtidas para remoção de turbidez ( $\approx 87,0\%$ ), com pequena diferença entre a eficiência obtida pela configuração A (97,0%) e a eficiência obtida pela configuração B (94,0%) para a remoção de cor aparente.

De maneira similar à estabelecida por Souza (2012), a pesquisa desenvolvida por Meca (2014) teve como principal objetivo analisar a influência gerada por alterações estruturais e operacionais impostas à ZC da UPFAD sobre a eficiência alcançada pelo processo de flotação por ar dissolvido para remoção de turbidez e cor aparente.

Para tanto, a ZC foi estruturada em duas configurações distintas (A e B), variando-se entre elas o seu comprimento ( $L_{ZC}$ ) e a extensão vertical do anteparo responsável pela separação entre ZC e ZS ( $H_{ZC}$ ), alterando, assim, os valores de taxa de aplicação superficial ( $TAS_{ZC}$ ) e tempo de detenção hidráulico ( $T_{ZC}$ ) na zona de contato. Tendo como base as condições ótimas obtidas por Souza (2012), o gradiente médio de velocidade característico do fluxo hidráulico na ZC foi incrementado a partir da instalação de módulos contendo telas superpostas em seu interior (Figura 6), com  $G_{ZC}$  variado entre os cenários de ausência e de presença de telas modelo Hobby (Figura 5). A concentração de ar dissolvido foi modificada com a adoção de três valores distintos de razão de recirculação (R) (7,0; 8,0 e 8,5%).

**Figura 6** – Imagem dos módulos de telas de aço galvanizado modelo Hobby incorporados ao interior da zona de contato da UPFAD por Meca (2014).



Fonte: Meca (2014).

A configuração A consistiu em 0,09m de comprimento da ZC,  $H_{ZC}$  variado entre 2,01 e 1,12m,  $G_{ZC}$  produzido de  $2,25s^{-1}$  (sem telas) e de  $6,12s^{-1}$  (telas modelo Hobby). Já a configuração B associou-se a 0,14m de comprimento da ZC,  $H_{ZC}$  variado entre 2,01 e 0,72m, com  $G_{ZC}$  produzido de  $0,92s^{-1}$  (sem telas) e  $3,15s^{-1}$  (telas modelo Hobby). Para cada configuração adotada foram exploradas as três razões de recirculação mencionadas.

Os valores de vazão afluyente ao tanque de flotação e largura da ZC foram os mesmos aplicados por Souza (2012) ( $4,6m^3.h^{-1}$  e 0,405m, respectivamente), bem como a velocidade de entrada na ZC ( $180,0m.h^{-1}$ ) e as condições de coagulação (dose de S.A. de  $22,5mg.L^{-1}$  e pH de coagulação de  $6,5 \pm 0,1$ ) e de floculação ( $G_f$  de  $110,0s^{-1}$  e  $T_f$  de 17,2minutos).

Dentre os principais resultados alcançados por Meca (2014), foi possível notar que o valor de razão de recirculação (R) de 8,0% (equivalente a 5,0g de ar por  $m^3$  de água) associou-se aos menores residuais de turbidez e cor aparente registrados para as duas configurações da zona de contato exploradas (A e B). Em adição, também para ambas as configurações exploradas, a eficiência alcançada a partir da aplicação das telas foi superior à obtida em sua ausência na quase totalidade dos ensaios executados, para a remoção tanto de turbidez quanto de cor aparente, com resultados ótimos alcançando 90,0 a 95,0% de eficiência de remoção.

Levando-se em consideração a comparação entre os cenários de presença de telas no interior da ZC, Meca (2014) identificou a associação da configuração A ( $G_{ZC}$  de  $6,12s^{-1}$ ) às mais altas eficiências de remoção de turbidez em cerca de 80,0% dos casos, bem como sua associação à eficiência de remoção de cor aparente igual ou superior à alcançada pela configuração B ( $G_{ZC}$  de  $3,15s^{-1}$ ) em 55,0% dos casos. Comportamento semelhante foi observado a partir da comparação entre os cenários de ausência de telas na ZC, em que a configuração A ( $G_{ZC}$  de  $2,25s^{-1}$ ) associou-se às mais altas eficiências de remoção de turbidez em cerca de 90,0% dos casos e às mais altas eficiências de remoção de cor aparente em cerca de 66,0% dos casos.

Em adição, com base nas condições operacionais ótimas identificadas, Meca (2014) pode notar que a elevação de  $G_{ZC}$  de  $0,92s^{-1}$  (configuração B sem telas) a  $6,12s^{-1}$  (configuração A com telas modelo Hobby) foi acompanhada por incremento sobre as eficiências de remoção de turbidez (de 82,0 a 90,0%) e de cor aparente (de 93,0 a 95,0%). Na etapa conclusiva de seu trabalho, a autora destacou a necessidade da realização de ensaios com valores de  $G_{ZC}$  superiores aos investigados (maiores que  $6,12s^{-1}$ ), com o intuito de se explorar o limite até o qual o valor de  $G_{ZC}$  pode ser incrementado sem prejudicar a eficiência global do processo de flotação por ar dissolvido.

A partir dos principais resultados obtidos por Souza (2012) e Meca (2014) é possível notar que o incremento do valor de gradiente médio de velocidade no interior da zona de contato da UPFAD (adicionalmente ao proporcionado pelo fluxo turbulento e pelo movimento ascendente das microbolhas em relação ao movimento descendente dos flocos) foi capaz de melhorar o desempenho do processo de flotação por ar dissolvido para remoção de turbidez e cor aparente da água de estudo.

É interessante, notar, também, que o incremento produzido sobre o valor de  $G$  foi alcançado em ambos os trabalhos por meio da imposição de módulos de telas no interior da ZC. Em outras palavras, o incremento sobre o gradiente de velocidade no interior da ZC foi induzido pelo próprio fluxo hidráulico através da malha característica das telas, em instalação piloto e de regime de escoamento contínuo.





## 4. METODOLOGIA

A presente pesquisa foi desenvolvida no setor de equipamentos de bancada do Laboratório de Tratamento Avançado e Reuso de Águas (LATAR), o qual pertence ao Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo – EESC/USP. Os ensaios e análises laboratoriais propostos foram conduzidos entre o mês de fevereiro de 2020 e o mês de junho de 2021.

### 4.1 Considerações gerais

Esta pesquisa dedicou-se à investigação em escala de bancada e em regime de alimentação por batelada (uso do equipamento Flotateste) acerca da influência da imposição de agitação mecânica à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar sobre a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido (FAD).

A investigação foi dividida em três etapas sequenciais e interdependentes, fundamentadas constantemente no trabalho com água bruta de estudo preparada com cor aparente média de 48,4uC (48,4mg Pt-Co.L<sup>-1</sup>) e turbidez média de 6,7UNT, e na reprodução das condições ótimas de coagulação determinadas por Marega (2020).

A primeira etapa de investigação (Etapa 01) foi concebida como uma etapa de “sondagem”, dedicada a verificar as primeiras respostas oferecidas pelo sistema em função da variação de parâmetros operacionais de floculação (gradiente médio de velocidade empregado na etapa de floculação –  $G_f$  – e intervalo de tempo de duração da etapa de floculação –  $T_f$ ) e de agitação mecânica durante a fase de contato e aderência entre bolhas e flocos, em que o período de agitação foi aqui denominado de etapa de indução mecânica de colisões (gradiente médio de velocidade empregado na etapa de indução mecânica de colisões –  $G_{IC}$  – e intervalo de tempo de duração da etapa de indução mecânica de colisões –  $T_{IC}$ ).

As duas etapas subsequentes de investigação (Etapas 02 e 03) dedicaram-se ao refinamento das constatações obtidas na primeira etapa, bem como a garantir maior consistência aos resultados obtidos, alcançada a partir da realização de ensaios em repetição (cada condição operacional explorada foi reproduzida três vezes, com base na condução de ensaios em triplicata). O planejamento e execução dos ensaios da Etapa 02 basearam-se nas principais constatações alcançadas na Etapa 01, e o mesmo raciocínio foi empregado entre as Etapas 02 e 03.

Por conta da pandemia causada pelo vírus SARS-CoV-2, a realização dos ensaios laboratoriais e a concretização de cada etapa de investigação foram condicionadas aos períodos em que o LATAR encontrava-se em funcionamento e o acesso às suas dependências era permitido. Dessa forma, os ensaios da Etapa 01 foram realizados entre os meses de fevereiro e março de 2020; os ensaios da Etapa 02 entre os meses de outubro, novembro e dezembro de 2020; os ensaios da Etapa 03 entre os meses de maio e junho de 2021.

Todos os procedimentos laboratoriais adotados e análises físico-químicas executadas seguiram as determinações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (2012).

#### **4.2 Água de estudo e condições ótimas de coagulação**

A investigação experimental conduzida ao longo das três etapas constituintes do trabalho baseou-se na utilização de água de estudo preparada de forma idêntica à realizada por Marega (2020), cuja pesquisa dedicou-se à investigação da influência das características de partículas floculadas e microbolhas de ar sobre o processo de flotação por ar dissolvido (FAD). Dessa forma, os parâmetros ótimos de coagulação identificados pela autora para sua água de estudo foram reproduzidos nesta pesquisa para a realização das três etapas de investigação.

Sendo assim, todos os ensaios propostos foram conduzidos com água bruta de estudo preparada nas dependências do LATAR e a partir de água originária de poço artesiano com ponto de captação localizado no interior da Área 1 do *Campus* da USP de São Carlos. Seguindo o protocolo adotado por Marega (2020), a preparação da água de estudo consistiu exclusivamente na adição de Ácido Húmico comercial (*Humic Acid Sodium Salt* - ALDRICH Chemistry®) (dedicado a conferir cor à água) e de Caulinita (Kaolin - SIGMA-ALDRICH®) (dedicada a conferir turbidez à água) à água captada do referido manancial, de forma a garantir concentração final de tais constituintes de 6,0 e 4,0mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

Para o armazenamento da água bruta de estudo foi utilizado reservatório de material plástico com capacidade máxima de armazenamento de 90,0L, mantido constantemente no interior do setor de equipamentos de bancada do LATAR.

Algumas das características físico-químicas da água proveniente do referido poço e da água bruta de estudo preparada a partir da adição de ácido húmico e caulinita constam na Tabela 1, exposta a seguir.

**Tabela 1** – Caracterização físico-química da água proveniente do poço artesiano e da água bruta de estudo preparada para a condução da investigação experimental.

Parâmetro	Água do poço	Água bruta preparada
Absorbância UV <sub>254</sub> (cm <sup>-1</sup> ) (cubeta 50,0mm caminho óptico)	0,02 ± 0,01	0,83 ± 0,01
Alcalinidade parcial (mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	13,3 ± 0,8	15,9 ± 0,9
Alcalinidade total (mg CaCO <sub>3</sub> .L <sup>-1</sup> )	27,1 ± 0,7	27,3 ± 0,5
Condutividade (µS.cm <sup>-1</sup> )	51,6 ± 1,2	50,8 ± 1,5
Cor aparente (uC) (medida indireta – absorbância UV λ 495nm)	A.L.M. <sup>(1)</sup>	48,4 ± 0,9
Cor verdadeira (uC) (medida indireta – absorbância UV λ 495nm)	A.L.M. <sup>(1)</sup>	25,9 ± 0,6
pH	6,3 ± 0,2	6,5 ± 0,2
Temperatura (°C)	22,5 ± 2,4	20,0 ± 1,0
Turbidez (UNT)	0,26 ± 0,11	6,7 ± 0,3

**Observação:** (1) A sigla A.L.M. significa abaixo do limite mínimo de detecção (em que o limite mínimo de detecção do espectrofotômetro utilizado (0,005cm<sup>-1</sup>) equivale a valor de cor aparente de aproximadamente 1,7uC, ou 1,7mgPt-Co.L-1).

Como já comentado, a imposição do processo de coagulação deu-se a partir da reprodução das condições ótimas encontradas por Marega (2020) no início de sua pesquisa. Dessa forma, o tipo e dosagem de coagulante, pH de coagulação, intervalo de tempo de mistura rápida (T<sub>MR</sub>) e gradiente médio de velocidade empregado durante a etapa de mistura rápida (G<sub>MR</sub>) foram aqueles identificados como ótimos a partir de múltiplos ensaios realizados pela autora em unidade de flotação por ar dissolvido de fluxo intermitente (regime de alimentação por batelada) denominada Flotateste, no LATAR.

Desta forma, como evidenciado por meio da Tabela 2, para a coagulação fez-se uso de coagulante primário Sulfato de Alumínio (Al<sub>2</sub>(SO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>(16,5)H<sub>2</sub>O - LABSYNTH Ltda), em associação a solução de Carbonato de Sódio (Barrilha GENCO®) para a regulação do pH durante o processo de coagulação.

**Tabela 2** – Condições ótimas de coagulação aplicadas para a condução da investigação experimental, com base em Marega (2020).

Parâmetro	Valor
Dosagem de Sulfato de Alumínio (S.A.) (Al <sub>2</sub> (SO <sub>4</sub> ) <sub>3</sub> (16,5)H <sub>2</sub> O)	3,4mg.L <sup>-1</sup> Al <sup>3+</sup> (40,0mg.L <sup>-1</sup> S.A.)
pH	6,40 ± 0,02
G <sub>MR</sub> (s <sup>-1</sup> )	900,0
T <sub>MR</sub> (s)	20,0
Temperatura (°C)	20,0 ± 1,0

### 4.3 Processos e equipamentos associados

A concretização da investigação experimental proposta demandou a realização, em escala de bancada, da preparação de amostras e soluções; de processos de coagulação, floculação e

flotação por ar dissolvido; e da realização de análises físico-químicas. Os métodos e ferramentas aplicados para tanto são detalhadamente descritos em sequência.

#### 4.3.1 Preparação da água de estudo

O procedimento aplicado para a preparação da água bruta de estudo utilizada ao longo da pesquisa fundamentou-se naquele estabelecido por Marega (2020), seguindo-se o mesmo protocolo adotado pela autora. Sendo assim, tal preparação consistiu na captação de água do já mencionado manancial subterrâneo, seguida de seu armazenamento em reservatório com capacidade máxima de 90,0L. A etapa seguinte consistiu na pesagem das massas de ácido húmico e caulinita, com base em concentração final no reservatório de  $6,0\text{mg.L}^{-1}$  e  $4,0\text{mg.L}^{-1}$ , respectivamente.

As massas pesadas eram adicionadas a béquer preenchido com 2L de água deionizada, o qual era então submetido a agitação mecânica por período aproximado de 20,0 minutos. Ao final da agitação, o conteúdo do béquer era transferido para o reservatório de armazenamento, misturado à água captada a partir do poço artesiano e homogeneizado manualmente.

Padronizou-se a preparação de 80,0L de água de estudo por vez, utilizada por no máximo dois dias. Quando os ensaios realizados ao longo dos dois dias seguintes à preparação não eram capazes de consumir todo o volume produzido, a fração de água restante era descartada e nova preparação era realizada.

#### 4.3.2 Preparação das soluções de Sulfato de Alumínio e Barrilha

As soluções de coagulante Sulfato de Alumínio e de Carbonato de Sódio (Barrilha) foram preparadas com água deionizada e em concentração de  $20,0\text{g.L}^{-1}$ , tendo sido conservadas em frascos com capacidade máxima de armazenamento de 500,0mL. O prazo máximo para conservação das soluções foi de 7 dias, como recomendado por Di Bernardo, Di Bernardo Dantas e Voltan (2011).

#### 4.3.3 Coagulação

Como já comentado, o processo de coagulação se deu a partir da reprodução das condições ótimas identificadas por Marega (2020) e explicitadas na Tabela 2. O setor de equipamentos de bancada do LATAR dispõe de equipamento denominado Agitador *Jartest* (*Jartest* – Ethik Technology®) (Figura 7), o qual foi empregado para a implementação do

processo de coagulação (mistura rápida entre Carbonato de Sódio, Sulfato de Alumínio e a água bruta preparada).

**Figura 7** – Unidade de equipamento *Jartest* empregado para a imposição do processo de coagulação.



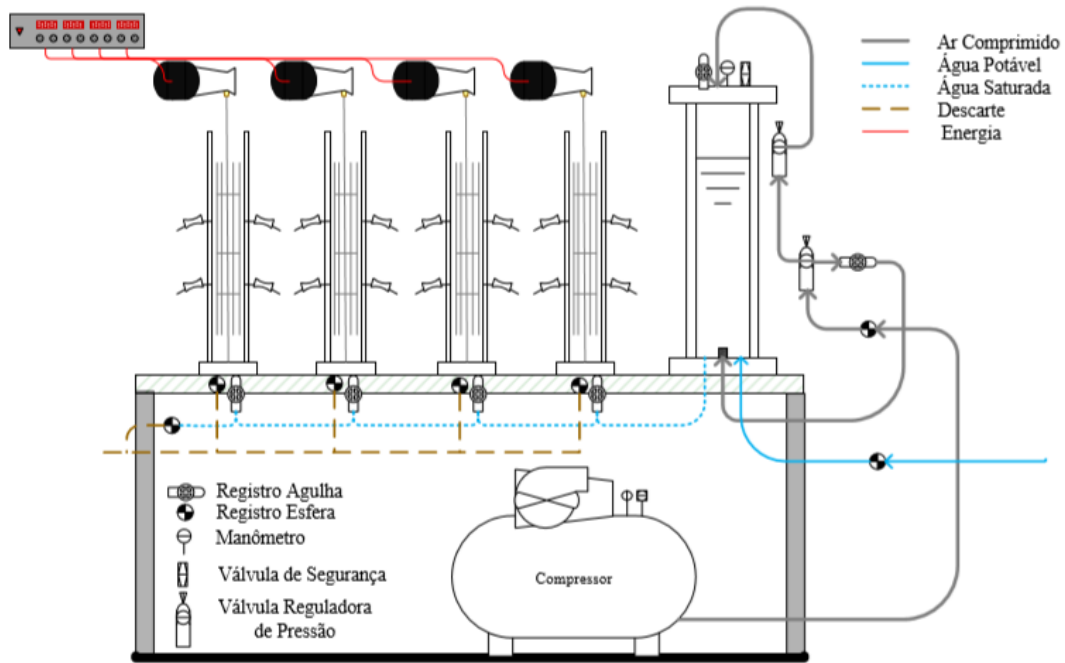
Fonte: O autor.

O equipamento é composto por seis jarros de acrílico de 2L de volume útil cada, motor conectado a seis hastes giratórias, sensor e dispositivo para monitoramento e regulação da intensidade de rotação imposta à massa líquida. O equipamento dispõe também de curva para conversão dos valores de gradiente médio de velocidade ( $G$ ) em rotações por minuto (rpm), em função da temperatura da água. Tendo em vista os valores de  $G_{MR}$  ( $900,0s^{-1}$ ) e de temperatura da água ( $20,0 \pm 1,0^{\circ}C$ ) estabelecidos por Marega (2020) e reproduzidos neste estudo para a etapa de coagulação, a rotação imposta à massa líquida durante a fase de mistura rápida foi de 450,0rpm.

#### 4.3.4 Floculação e Flotação por Ar Dissolvido

Os processos de floculação e de flotação por ar dissolvido foram implementados por meio de instalação em escala de bancada e de fluxo intermitente (regime de alimentação por batelada) denominada Flotateste (Figuras 8 e 9), estruturada com base em configuração desenvolvida por Reali (1991).

**Figura 8** – Representação esquemática do Flotateste e das conexões entre suas partes constituintes.



Fonte: Dibbern Sacchi (2015).

**Figura 9** – Imagem do Flotateste utilizado para a execução dos ensaios propostos.



Fonte: O autor.

O Flotateste é composto pela associação entre quatro componentes principais, listados em sequência:

(i) Conjunto formado por quatro motores conectados a sensores e dispositivos de regulação e monitoramento individual de rotação;

(ii) Câmara de saturação, dotada de manômetro, válvulas reguladoras de pressão, registros de entrada e saída de ar e água;

(iii) Quatro colunas de flotação independentes, estruturadas em vidro e dispostas em paralelo, com cada uma delas dotada de dois pares de mangueiras para a tomada d'água, bem como de haste metálica giratória removível, com extremidade superior moldada para acoplamento a cada um dos quatro motores;

(iv) Quatro registros metálicos associados a bocais difusores, alocados na base de cada uma das quatro colunas de flotação, um para cada.

Apesar da possibilidade de realização do processo de floculação no equipamento *Jartest*, a provável alteração das dimensões e particularidades morfológicas das famílias de flocos com a transferência de volume dos jarros do *Jartest* para as colunas do Flotateste levou à execução da referida transferência imediatamente após o término da etapa de coagulação, com a etapa de floculação tendo sido iniciada em sequência e conduzida integralmente no interior das colunas do Flotateste.

De maneira similar à observada para o trabalho com o *Jartest*, o Flotateste utilizado era dotado de tabela de correlação entre valores de gradiente médio de velocidade ( $G$ ) comumente aplicados e valores correspondentes em rotações por minuto (rpm). Dessa forma, os valores de gradiente médio de velocidade explorados durante a etapa de floculação ( $G_f$ ) foram previamente convertidos em rpm, permitindo o ajuste das rotações impostas pelas hastes giratórias (conectadas aos motores) à massa líquida.

No que diz respeito ao processo de flotação por ar dissolvido (FAD), faz-se necessário notar que, diferentemente de uma instalação em escala piloto, em que a operação se dá por meio de fluxo contínuo, as colunas de flotação do Flotateste são operadas em fluxo intermitente (regime de alimentação por batelada), com base na execução sequencial de alguns procedimentos.

Primeiramente executa-se o processo de saturação, que consiste na dissolução de ar na massa líquida, sob pressão, no interior da câmara de saturação. Para tanto, preenche-se inicialmente a câmara com água até que se atinja volume de saturação previamente estabelecido. Com o registro de alimentação de água já fechado é aberto, então, o registro de alimentação de ar (ligado a compressor), permitindo a elevação da pressão no interior da coluna (constantemente monitorada por meio do manômetro acoplado) e viabilizando a dissolução na massa líquida de parte da massa de ar introduzida.

Uma vez alcançado o valor de pressão de saturação requerido (manômetro) inicia-se a etapa de estabilização do processo de saturação, cuja duração foi adotada de forma padrão neste estudo e equivalente a aproximadamente 10,0 minutos.

Sendo assim, uma vez concluídos os processos de saturação da massa líquida (câmara de saturação) e de floculação (colunas de flotação), o procedimento padrão adotado para a condução do processo de flotação consiste na remoção das hastes giratórias do interior das colunas de flotação e abertura dos registros alocados na base das colunas para a liberação das microbolhas de ar. Tais registros são responsáveis por controlar o fluxo de água saturada do interior da câmara de saturação em direção ao interior das colunas de flotação, fazendo com que sua abertura promova queda de pressão e desprendimento da massa de ar (anteriormente dissolvida em água, sob pressão) na forma de microbolhas.

No Flotateste, o fechamento dos referidos registros ocorre quando o volume de recirculação adotado (formado pela mistura entre microbolhas de ar e água) é totalmente incorporado ao interior das colunas de flotação, permitindo que os volumes de água floculada e recirculada totalizem dois litros.

O intervalo de tempo estipulado para a coleta de amostras começa a ser contabilizado a partir do alcance da marca de dois litros, estando associado à velocidade de flotação imposta (em fluxo intermitente, ou seja, alimentação por batelada), segundo Reali (1991). Esta é determinada por meio da razão entre a altura do ponto de amostragem (extensão vertical da base da coluna até o ponto) e o intervalo de tempo de coleta.

Como já mencionado, cada uma das quatro colunas de flotação é dotada de dois pares de mangueiras para tomada d'água e coleta de amostras, posicionados ao longo de sua extensão vertical. O primeiro e o segundo par encontram-se, respectivamente, a 30,0 e a 55,0cm da base das colunas de flotação do Flotateste.



O término da fase de coleta de amostras corresponde à conclusão do ensaio. Procede-se, então, ao esvaziamento das colunas e limpeza com água deionizada, para permitir posterior preenchimento e início de novo ensaio.

#### 4.3.4.1 Adaptações estruturais realizadas para a concretização da pesquisa

Levando-se em consideração o objetivo central deste estudo, fez-se necessário realizar uma adaptação estrutural no Flotateste utilizado, para permitir a imposição de agitação mecânica à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar, logo após a conclusão do processo de floculação.

De acordo com o propósito para o qual foi concebido, o Flotateste pode operar não somente como unidade de flotação, mas também como unidade de floculação, já que o equipamento dispõe de conjunto de motores e hastes giratórias acopláveis. Dessa forma, durante a etapa de floculação no Flotateste, tais hastes giratórias têm sua extremidade superior acoplada aos motores e sua extremidade inferior inserida nos orifícios originalmente concebidos para permitir a entrada da manta de microbolhas no interior das colunas, durante a etapa de flotação.

Durante procedimento de operação convencional do Flotateste, tais hastes são desacopladas e removidas imediatamente após o término da etapa de floculação, viabilizando o início da etapa de flotação com a liberação da manta de microbolhas sem obstáculos. Porém, a investigação experimental em questão envolveu a imposição de agitação mecânica à etapa de contato entre partículas floculadas e microbolhas de ar (posteriormente à etapa de floculação), com tal imposição condicionada ao uso do mesmo conjunto de motores e hastes giratórias aplicado à floculação.

Sendo assim, foi concebido um dispositivo de amparo para cada uma das quatro hastes metálicas, produzido em aço inoxidável e constituído por corpo em formato cônico invertido, base circular e revestimento interno em politetrafluoretileno (Teflon®) (Figura 10).

**Figura 10** – Imagens do dispositivo de amparo concebido para a sustentação das hastes metálicas giratórias.



Fonte: O autor.

Tal dispositivo foi projetado com a ajuda do Professor Dr. Marco Antonio Penalva Reali e estruturado com a ajuda dos funcionários da Oficina Mecânica da USP (Flávio) e do IFSC (Evaldo), apresentando comprimento máximo de 4,5cm e tendo sido instalado na base das colunas do Flotateste utilizado, de forma concêntrica ao orifício dedicado à entrada da manta de microbolhas (Figura 11).

**Figura 11** – Detalhes da instalação do dispositivo de amparo na base das colunas de flotação do Flotateste.



Fonte: O autor.

Dessa forma, foi possível garantir a imposição de agitação mecânica no interior das colunas do Flotateste (com base no movimento rotacional desempenhado pelas hastes metálicas) concomitantemente à liberação de microbolhas de ar, conectando, assim, a

conclusão da etapa de floculação à etapa de estímulo ou indução de colisões entre flocos e microbolhas de ar, sem que as hastes metálicas fossem removidas.

#### 4.3.4.2 Correção dos resultados obtidos

Os valores residuais obtidos a partir da imposição do processo de flotação no Flotateste (fluxo intermitente) foram submetidos a cálculo de correção, já que o volume de água recirculada (formado pela mistura entre água e microbolhas de ar) promove a diluição do volume de água bruta inicialmente adicionado às colunas do Flotateste e submetido ao processo de floculação, produzindo resultados que não refletem a realidade. A Figura 12, a seguir, consiste em representação esquemática que auxilia na compreensão do cálculo de um fator de correção de diluição.

**Figura 12** – Representação esquemática de coluna de flotação do Flotateste e dos volumes de água bruta e de recirculação.



Fonte: Elaboração própria.

A partir da análise da Figura 12 é possível estruturar as Equações 1, 2 e 3.

$$\mathbf{Vol}_{\text{Água Bruta}} + \mathbf{Vol}_{\text{Recirculação}} = \mathbf{2L} \quad (1)$$

$$\mathbf{Vol}_{\text{Recirculação}} = \mathbf{Razão}_{\text{Recirculação}} \times \mathbf{Vol}_{\text{Água Bruta}} \quad (2)$$

$$\mathbf{Vol}_{\text{Água Bruta}} = \frac{\mathbf{2L}}{\mathbf{(1+Razão}_{\text{Recirculação}})}} \quad (3)$$

Em complemento, para a obtenção de um fator de correção aplicável aos valores medidos são estruturadas as Equações 4, 5 e 6, a seguir.

$$L_{Real} \times Vol_{\text{Água Bruta}} = L_{Mistura} \times (Vol_{\text{Água Bruta}} + Vol_{\text{Recirculação}}) \quad (4)$$

$$L_{Real} = \frac{L_{Mistura} \times (Vol_{\text{Água Bruta}} + Vol_{\text{Recirculação}})}{Vol_{\text{Água Bruta}}} \quad (5)$$

$$L_{Real} = L_{Mistura} \times \frac{2L}{Vol_{\text{Água Bruta}}} \quad (6)$$

Em que:

- $L_{Mistura}$ : valor lido para o parâmetro em estudo (absorbância, cor, turbidez ou outro) e referente ao volume amostral (diluído, característico da mistura entre água bruta floculada e água de recirculação);
- $L_{Real}$ : valor de leitura real (corrigido) para o parâmetro em estudo.

Sendo assim, para cada razão e respectivo volume de recirculação aplicado, obtém-se um valor de coeficiente de correção de diluição, que corresponde à razão entre o volume de 2L e o volume de água bruta adicionada à coluna de flotação (volume a ser submetido à floculação).

#### 4.3.4.3 Determinação da quantidade de ar adicionada ao processo

Para o cálculo da quantidade de ar adicionada ao processo de flotação (na forma de microbolhas) a partir da razão de recirculação imposta, fez-se uso de duas equações distintas e valores de referência apresentados por Edzwald (2010).

Segundo o autor, a concentração de microbolhas de ar na zona de contato de reatores FAD pode ser medida em termos numéricos, volumétricos e mássicos. A determinação da concentração mássica de microbolhas na manta formada ( $C_b$ ), logo após a liberação a partir dos bocais difusores, é comumente usada na prática de projeto e apresenta aplicação para a avaliação da eficiência do processo de fornecimento de ar à FAD. A Equação 7, utilizada para a determinação de  $C_b$ , é exposta a seguir.

$$C_b = \frac{\{e \times (C_r - C_{s,ar}) \times R - k\}}{1 + R} \quad (7)$$

Em que:

e: fator de eficiência para o fornecimento de ar (adimensional) – contabiliza tanto as limitações cinéticas para a dissolução de ar na massa líquida, no interior da câmara de saturação, quanto a queda de pressão entre seu interior e o ponto de injeção de água saturada – varia de 50 a 70% para câmaras de saturação sem recheio, como é o caso da utilizada;

$C_r$ : concentração de ar dissolvido na massa líquida, em equilíbrio, efluente à câmara de saturação – varia de 110,0 a 200,0mg.L<sup>-1</sup>, alcançando 130,0mg.L<sup>-1</sup> para pressão de saturação de 5Bar (500kPa) e temperatura de 20,0°C.

$C_{s,ar}$ : concentração de ar dissolvido na massa líquida afluyente à câmara de saturação – aproximadamente 24mg.L<sup>-1</sup> para temperatura de 20,0°C;

$C_r - C_{s,ar}$ : representação da quantidade de ar que, em teoria, irá se desprender da massa líquida;

R: razão de recirculação imposta (adimensional);

k: fator de déficit de ar na água previamente floculada (adimensional) – a situação mais comumente encontrada é a de inexistência de déficit, com o valor de k sendo nulo (k = 0);

Alternativamente à Equação 7, exposta anteriormente, Edzwald (2010) disponibiliza uma segunda equação para a determinação da concentração de microbolhas de ar após a mistura do volume de recirculação ao volume de água floculada (A/V), representada por meio da Equação 8, a seguir.

$$\frac{A}{V} = \left[ \frac{f \times (P+101,3)}{K_H} - \frac{P_{atm}}{K_H} \right] \times \frac{R}{(1+R)} \quad (8)$$

Em que:

f: fator de eficiência da câmara de saturação (adimensional);

P: pressão relativa na câmara de saturação (kPa);

$K_H$ : constante da Lei de Henry (kPaL/mg) – adotada como 4,179kPaL/mg para temperatura da água igual a 20,0°C;

$P_{atm}$ : pressão atmosférica local (kPa) – adotada como 96,0kPa para o município de São Carlos;

R: razão de recirculação imposta (adimensional);

#### 4.3.5 Análises físico-químicas

Os parâmetros físico-químicos analisados ao longo das três etapas componentes da pesquisa foram: absorvância de ultravioleta (UV) para comprimentos de onda ( $\lambda$ ) de 254 e 495nm; alcalinidade parcial e total; condutividade elétrica; cor aparente e verdadeira; pH; temperatura; turbidez. A Tabela 3, a seguir, reúne os equipamentos aplicados à execução das análises propostas.

**Tabela 3** – Parâmetros físico-químicos analisados e equipamentos associados.

<b>Parâmetro</b>	<b>Equipamento</b>
Absorbância UV <sub>254</sub> e UV <sub>495</sub>	Espectrofotômetro HACH® - Modelo DR 5000 (cubeta 50,0mm de caminho óptico)
Alcalinidade parcial e total	pHmetro Digimed® - Modelo DM 20
Condutividade	Condutivímetro Digimed®
Cor aparente	Colorímetro Digimed® - Modelo DM-COR /
	Espectrofotômetro HACH® - Modelo DR 5000 (cubeta 50,0mm de caminho óptico)
Cor verdadeira	Equipamento de filtração a vácuo e membrana 0,45µm Unifil®/
	Colorímetro Digimed® - Modelo DM-COR /
	Espectrofotômetro HACH® - Modelo DR 5000 (cubeta 50,0mm de caminho óptico)
pH	pHmetro Digimed® - Modelo DM 20
Temperatura	Termômetro de Mercúrio BOECO®
Turbidez	Turbidímetro HACH® - Modelo 2100N

#### 4.4 Procedimento experimental

Como já comentado, a presente investigação experimental foi segmentada em três etapas sequenciais e interdependentes, detalhadas nos tópicos em sequência.

Aém do trabalho constante com água bruta de estudo preparada com cor aparente média de 48,4uC (48,4mg Pt-Co.L<sup>-1</sup>) e turbidez média de 6,7UNT, e com base na reprodução das condições ótimas de coagulação determinadas por Marega (2020), alguns parâmetros operacionais foram fixados para a realização dos ensaios característicos das três etapas de investigação, sendo eles a temperatura da água (20,0 ± 1,0°C), a pressão de saturação aplicada na câmara de saturação do Flotateste (P<sub>SAT</sub> = 500,0 ± 10,0kPa), e a razão de recirculação imposta (R = 6,0%) (equivalente a volume de aproximadamente 1,890L de água bruta submetida ao processo de floculação no interior das colunas e volume de recirculação de 0,110L - coeficiente de correção de diluição de 1,06).

O valor de R de 6,0% corresponde ao mínimo valor recomendado para investigações em escala de bancada, segundo Edzwald e Haarhoff (2012). De acordo com as duas equações apresentadas por Edzwald (2010) e considerando como 70,0% o fator de eficiência de fornecimento de ar da câmara de saturação do Flotateste utilizado, a concentração mássica de microbolhas de ar na manta de microbolhas gerada (posteriormente à mistura entre os

volumes de recirculação e de água floculada no interior das colunas) é de  $4,3\text{mg.L}^{-1}$ , em média ( $C_b = 4,2\text{ mg.L}^{-1}$ ;  $A/V = 4,4\text{mg.L}^{-1}$ ).

Tendo em vista a imposição de agitação mecânica à etapa de contato entre microbolhas de ar e partículas floculadas, imediatamente após a conclusão do processo de floculação, o procedimento adotado consistiu na transição de  $G_f$  a  $G_{IC}$  no menor intervalo de tempo possível, por meio do ajuste dos valores de rotação (rpm) adotados entre uma etapa e outra. Assim que o nível de rotação compatível com cada  $G_{IC}$  foi alcançado, abriram-se os registros acoplados aos bocais difusores e as microbolhas de ar foram liberadas.

Para todas as combinações propostas entre  $G_f$ ,  $T_f$ ,  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$ , foi também investigado o cenário de flotação na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC} = 0,0\text{s}^{-1}$ ;  $T_{IC} = 0,0\text{s}$ ), no intuito de compor um “branco” e permitir análises comparativas de desempenho.

A conclusão da etapa de indução de colisões foi imediatamente seguida pelo desacoplamento dos motores e remoção das hastes metálicas giratórias.

Quanto à coleta de amostras, esta foi conduzida de acordo com o intervalo de tempo de flotação, característico de cada velocidade de flotação ( $V_{\text{flot}}$ ) imposta. As amostras foram armazenadas em frascos plásticos com capacidade de 40,0mL, em temperatura ambiente do interior das dependências do LATAR ( $21,0 \pm 2,0\text{ }^\circ\text{C}$ ). Todos os frascos permaneceram destampados pelos 10,0minutos que antecederam as análises físico-químicas propostas, de maneira semelhante ao realizado por Dibbern Sacchi (2015), com o objetivo de eliminar microbolhas de ar em excesso, as quais poderiam comprometer a qualidade das leituras subsequentes. Todas as análises físico-químicas foram realizadas no mesmo dia da amostragem e após homogeneização do volume amostral.

#### 4.4.1 Etapa 01

A Etapa 01, como já mencionado, caracterizou-se como uma etapa de “sondagem”, em que os parâmetros operacionais aplicados às etapas de floculação ( $G_f$  e  $T_f$ ) e de indução mecânica de colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$ ) foram explorados no Flotateste para tentar identificar as primeiras e principais respostas oferecidas pelo sistema aos estímulos aplicados.

Nesta primeira etapa de investigação, o desempenho do processo de flotação por ar dissolvido foi acompanhado a partir da caracterização de valores residuais de turbidez (medições com o turbidímetro HACH®, Modelo 2100N) e cor aparente (medições com o colorímetro Digimed®, modelo DM-COR), com os ensaios dedicados à exploração de cada uma das configurações operacionais adotadas (combinação entre valores de Gf, Tf, G<sub>IC</sub> e T<sub>IC</sub>) não tendo sido realizados em repetições.

A Tabela 4, a seguir, reúne os valores de Gf, Tf, G<sub>IC</sub> e T<sub>IC</sub> variados ao longo da investigação, bem como os três valores de velocidade de flotação (V<sub>flot</sub>) impostos, associados a seus respectivos valores de intervalo de tempo de flotação (ΔT<sub>flot</sub>), ou de coleta de amostras.

**Tabela 4** – Caracterização dos parâmetros operacionais variados ao longo da realização dos ensaios da Etapa 01.

Gf (s <sup>-1</sup> )	Intervalo de tempo de floculação (Tf) (min)	Intervalo de tempo		Velocidade de flotação (V <sub>flot</sub> ) (m.h <sup>-1</sup> ) - (cm.min <sup>-1</sup> )	Intervalo de tempo de flotação (ΔT <sub>flot</sub> ) <sup>(1)</sup> (s)
		G <sub>IC</sub> (s <sup>-1</sup> )	de indução de colisões (T <sub>IC</sub> ) (s)		
75,0;		0,0;	0,0;		
130,0;	8,0;	20,0;	20,0;	15,0 – 25,0;	72,0;
160,0;	12,0	40,0;	40,0;	12,0 – 20,0;	90,0;
200,0		60,0;	60,0;	9,0 – 15,0	120,0
		80,0	80,0		

Observação: (1) Os valores de intervalo de tempo de flotação (ΔT<sub>flot</sub>) correspondem aos intervalos de tempo transcorridos para a coleta de amostras.

Para a unidade de investigação experimental em escala de bancada e de fluxo intermitente utilizada (Flotateste), os valores de V<sub>flot</sub> são calculados a partir da razão entre a extensão vertical da base de cada coluna de flotação até o ponto de coleta de amostras (H) (extensão a ser percorrida pelos aglomerados microblhas-flocos formados) e o intervalo de tempo transcorrido desde o início do processo de flotação (início do deslocamento ascensional dos aglomerados) até o momento de coleta (intervalo de tempo de flotação ou de coleta – ΔT<sub>flot</sub>), como ilustra a Equação 9, a seguir.

$$V_{flot} = \frac{H}{\Delta T_{flot}} \quad (9)$$

O valor de H adotado nesta primeira etapa de investigação foi correspondente à altura do primeiro par de mangueiras de tomada d'água do Flotateste, alocado a 30,0cm da base de cada coluna de flotação. Em adição, em razão da turbulência produzida no interior das colunas de flotação pelos agitadores mecânicos, a hipótese levantada para o planejamento e execução dos



ensaios desta etapa considerou como praticamente desprezíveis as velocidades ascendentes dos aglomerados microbolhas-flocos durante a etapa de indução mecânica de colisões (imediatamente após a conclusão da etapa de floculação e com a liberação de microbolhas no interior das colunas).

Desta forma, a execução dos ensaios da Etapa 01 baseou-se no início da contagem dos intervalos de tempo transcorridos para a coleta de amostras (intervalos de tempo de flotação,  $\Delta T_{\text{flot}}$ ) imediatamente após o término dos intervalos de tempo de indução de colisões ( $T_{\text{IC}}$ ) empregados.

Em complemento, faz-se necessário destacar que a combinação entre os valores de  $G_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}^{-1}$  e  $80,0\text{s}^{-1}$ , e os valores de  $T_{\text{IC}}$  de 60,0s e 80,0s na Etapa 01 foi condicionada aos valores de  $G_f$  e de  $T_f$  empregados durante a etapa de floculação, como explicita a Tabela 5, a seguir.

**Tabela 5** – Valores de  $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  explorados na Etapa 01 em função dos valores de  $G_f$  e  $T_f$  empregados durante a etapa de floculação.

$G_f$ ( $\text{s}^{-1}$ )	Intervalo de tempo de floculação ( $T_f$ ) (minutos)	$G_{\text{IC}}$ ( $\text{s}^{-1}$ )	Intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{\text{IC}}$ ) (s)
75,0	8,0	0; 20; 40; 60	0; 20; 40; 60
	12,0	0; 20; 40; 60	0; 20; 40; 60
130,0	8,0	0; 20; 40; 60	0; 20; 40; 60
	12,0	0; 20; 40; 60	0; 20; 40; 60
160,0	8,0	0; 20; 40; 80	0; 20; 40; 80
	12,0	0; 20; 40; 60	0; 20; 40; 60
200,0	8,0	0; 20; 40; 60	0; 20; 40; 60
	12,0	0; 20; 40; 60; 80	0; 20; 40; 60; 80

A combinação entre os parâmetros operacionais variados levou à execução de 87 ensaios na Etapa 01, com os resultados obtidos tendo sido organizados por meio de representações gráficas e então submetidos a análises interpretativas e comparativas.

#### 4.4.2 Etapa 02

Os ensaios característicos da segunda etapa de investigação experimental foram planejados e executados com base nas principais constatações alcançadas com a Etapa 01, com cada configuração operacional (combinação entre  $G_f$ ,  $T_f$ ,  $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$ ) tendo sido explorada no Flotateste com base em ensaios aleatorizados e em triplicata. Em complemento, o

desempenho alcançado pelo processo de flotação por ar dissolvido foi também acompanhado a partir da caracterização de valores residuais de turbidez (medições com o turbidímetro HACH®, Modelo 2100N) e cor aparente (medições com o colorímetro Digimed®, modelo DM-COR).

Os valores de  $G_f$ ,  $T_f$ ,  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  explorados ao longo da Etapa 02 constam na Tabela 6, a seguir, assim como os valores de  $V_{flot}$  e respectivos valores de  $\Delta T_{flot}$  investigados.

**Tabela 6** – Caracterização dos parâmetros operacionais variados ao longo da realização dos ensaios da Etapa 02.

$G_f$ ( $s^{-1}$ )	Intervalo de tempo de flocculação ( $T_f$ ) (min)	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) (s)	Velocidade de flotação ( $V_{flot}$ ) ( $m.h^{-1}$ ) - ( $cm.min^{-1}$ )	Intervalo de tempo de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ) <sup>(1)</sup> (s)
		0,0;			
75,0;		40,0;		20,0 – 33,3;	99,0;
100,0;	12,0	60,0;	0,0; 30,0;	15,0 – 25,0;	132,0;
150,0;		80,0;	60,0	10,0 – 16,7	198,0
200,0		120,0;			
		160,0			

Observação: (1) Os valores de intervalo de tempo de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ) correspondem aos intervalos de tempo transcorridos para a coleta de amostras.

O valor de H (extensão vertical da base de cada coluna de flotação até o ponto de coleta de amostras) adotado nesta segunda etapa de investigação foi correspondente à altura do segundo par de mangueiras de tomada d'água do Flotatest, alocado a 55,0cm da base de cada coluna de flotação. Na Etapa 02, concebida com base nas constatações obtidas ao longo da Etapa 01, a hipótese levantada para o planejamento e execução dos ensaios propostos foi modificada e considerou o início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos já durante a fase de indução mecânica de colisões.

Desta forma, os valores de intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) explorados foram englobados pelos valores de intervalo de tempo de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ), equivalentes aos intervalos de tempo transcorridos para a coleta de amostras. Com isso, tendo em vista a elevação dos valores de  $V_{flot}$  investigados da Etapa 01 para a Etapa 02 e a vigência do processo de indução mecânica de colisões durante os intervalos de flotação impostos (associados a suas respectivas velocidades de flotação), optou-se por modificar o valor de H utilizado de 30,0cm (Etapa 01) para 55,0cm (Etapa 02).

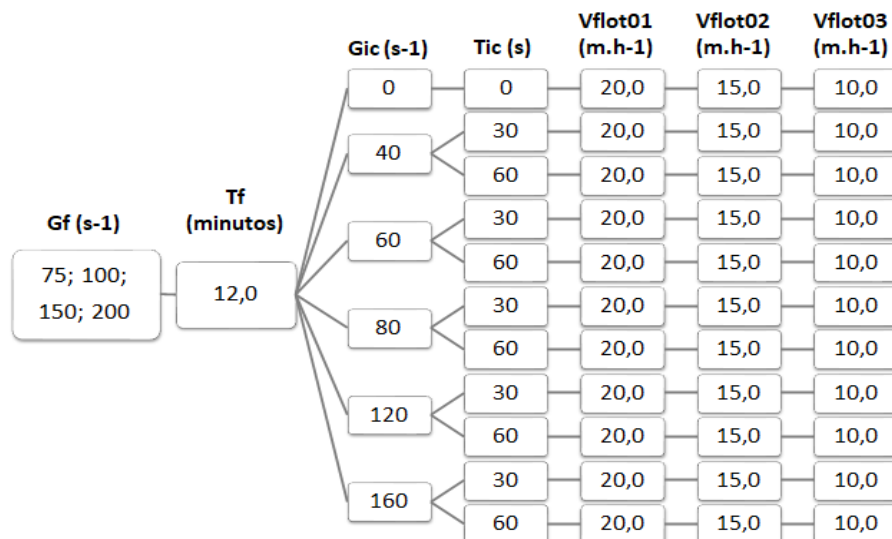
Tal modificação fundamentou-se na tentativa de aumentar o intervalo de tempo entre o fim da fase de indução mecânica de colisões e o momento de coleta de amostras, com o objetivo de reduzir o impacto potencialmente negativo que a turbulência produzida no interior das colunas de flotação pelos agitadores mecânicos pudesse gerar sobre a qualidade das amostras coletadas.

Como exemplo para ajudar a embasar o raciocínio exposto no parágrafo anterior basta admitir a investigação dos maiores valores de  $T_{IC}$  e  $V_{flot}$  explorados na Etapa 02 (60,0s e  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , respectivamente). Caso o valor de  $H$  não fosse aumentado na Etapa 02 (permanecesse igual a 30,0cm, como na Etapa 01), a incorporação de  $T_{IC}$  aos valores de  $\Delta T_{flot}$  faria com que o intervalo de tempo de vigência da etapa de indução mecânica de colisões (60,0s) superasse o intervalo de tempo de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ), ou de coleta de amostras (aproximadamente 54,0s).

Sendo assim, com base na exploração de valores de  $V_{flot}$  mais altos na Etapa 02, incorporação de  $T_{IC}$  aos valores de  $\Delta T_{flot}$ , e na tentativa de minimizar o impacto potencialmente negativo associado à proximidade entre o término de  $T_{IC}$  e o momento de coleta de amostras, optou-se por adotar o valor de  $H$  de 55,0cm para a realização dos ensaios da Etapa 02.

A Figura 13, a seguir, ilustra as associações entre os parâmetros operacionais variados para a realização dos ensaios da Etapa 02.

**Figura 13** – Diagrama hierárquico ilustrativo das associações entre parâmetros operacionais aplicados à realização dos ensaios da Etapa 02.



Ao todo foram realizados 132 ensaios na Etapa 02, garantindo a combinação entre todos os parâmetros operacionais variados, em triplicatas. Os resultados amostrais obtidos foram submetidos a análises estatísticas descritivas, com a aplicação de média, variância e desvio padrão, tendo sido representados graficamente por meio da aplicação do software *Microsoft Excel*®. A verificação de diferença estatisticamente significativa entre valores residuais médios alcançados foi contemplada por meio da aplicação do software *PAleontological STatistics (PAST)*®, de acesso livre desde o ano de 2001.

#### 4.4.3 Etapa 03

Os ensaios característicos da Etapa 03 foram planejados e executados com base na interpretação dos resultados e constatações alcançados nas Etapas 01 e 02, tendo sido também aleatorizados e realizados em triplicata no Flotatest. Na terceira etapa de investigação, o desempenho alcançado pelo processo de flotação por ar dissolvido foi acompanhado a partir da caracterização de valores residuais de turbidez (medições com o turbidímetro HACH®, Modelo 2100N), cor aparente (medições com o colorímetro Digimed®, modelo DM-COR) e absorvância de ultravioleta (UV) em comprimentos de onda ( $\lambda$ ) de 254nm e 495nm (medições em espectrofotômetro HACH®, modelo DR 5000).

A determinação de valores residuais de absorvância de UV em  $\lambda$  de 254nm dedicou-se à caracterização indireta da concentração de Matéria Orgânica Natural (M.O.N.) nas amostras coletadas, mais especificamente do teor húmico da M.O.N., de acordo com Sharma et al. (2011).

A determinação de valores residuais de absorvância de UV em  $\lambda$  de 495nm dedicou-se à caracterização indireta de cor aparente nas amostras coletadas. A correlação entre valores de absorvância ( $\lambda$  de 495nm) e de cor aparente foi estabelecida com base em metodologia implementada por Marega (2020), bem como em valores de referência determinados pela autora ao longo do trabalho com água bruta preparada de forma idêntica à estabelecida nesta pesquisa (Apêndice A).

Pelo fato de tal método indireto de determinação de cor ser considerado mais preciso e adequado ao trabalho com águas destinadas a abastecimento, em comparação com o método empregado nas Etapas 01 e 02 (leituras em colorímetro Digimed®, modelo DM-COR), os valores residuais registrados na Etapa 03 por meio do colorímetro Digimed® e a partir de absorvância UV em  $\lambda$  de 495nm foram correlacionados graficamente, tendo sido obtidas

curva e equação de correlação como resultado (Apêndice A). Tal equação de correlação foi, então, aplicada à correção dos valores residuais de cor aparente registrados nas Etapas 01 e 02, associados ao uso do colorímetro Digimed®.

Os valores de  $G_f$ ,  $T_f$ ,  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  investigados na Etapa 03 constam na Tabela 7, a seguir, assim como os valores de  $V_{flot}$  e respectivos valores de  $\Delta T_{flot}$  explorados.

**Tabela 7** – Caracterização dos parâmetros operacionais variados ao longo da realização dos ensaios da Etapa 03.

$G_f$ ( $s^{-1}$ )	Intervalo de tempo de floculação ( $T_f$ ) (minutos)	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) (s)	Velocidade de flotação ( $V_{flot}$ ) ( $m.h^{-1}$ ) – ( $cm.min^{-1}$ )	Intervalo de tempo de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ) <sup>(1)</sup> (s)
		0,0;			
50,0;		40,0;		20,0 – 33,3	99,0;
75,0;	12,0	60,0;	5,0	15,0 – 25,0	132,0;
100,0		80,0;		10,0 – 16,7	198,0
		100,0			

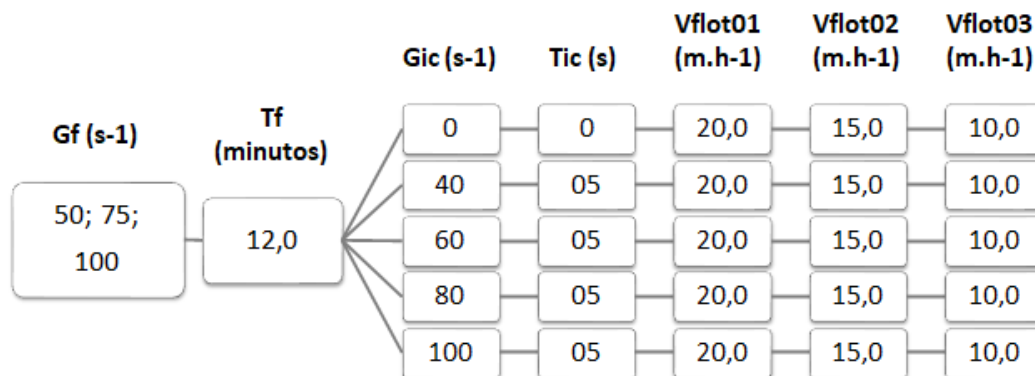
Observação: (1) Os valores de intervalo de tempo de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ) correspondem aos intervalos de tempo transcorridos para a coleta de amostras.

De maneira idêntica à estabelecida na Etapa 02, o valor de H (extensão vertical da base de cada coluna de flotação até o ponto de coleta de amostras) adotado na terceira etapa de investigação foi correspondente à altura do segundo par de mangueiras de tomada d'água do Flotatest, alocado a 55,0cm da base de cada coluna de flotação. Em adição, a hipótese levantada para o planejamento e execução dos ensaios propostos continuou a considerar o início da movimentação ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos concomitantemente à vigência da fase de indução mecânica de colisões.

Sendo assim, como na Etapa 02, o valor de intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) explorado foi englobado pelos valores de intervalo de tempo de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ), equivalentes aos intervalos de tempo transcorridos para a coleta de amostras.

A Figura 14, a seguir, ilustra as associações entre os parâmetros operacionais variados para a realização dos ensaios da Etapa 03.

**Figura 14** - Diagrama hierárquico ilustrativo das associações entre parâmetros operacionais aplicados à realização dos ensaios da Etapa 03.



Ao todo foram realizados 45 ensaios na Etapa 03, garantindo a combinação entre todos os parâmetros operacionais variados, em triplicatas. Como na Etapa 02, os resultados amostrais obtidos foram submetidos a análises estatísticas descritivas, com a aplicação de média, variância e desvio padrão, tendo sido representados graficamente por meio da aplicação do software *Microsoft Excel*®. A manifestação de diferença estatisticamente significativa entre valores residuais médios alcançados foi verificada por meio da aplicação do software *PAleontological STatistics (PAST)*®.

## 5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

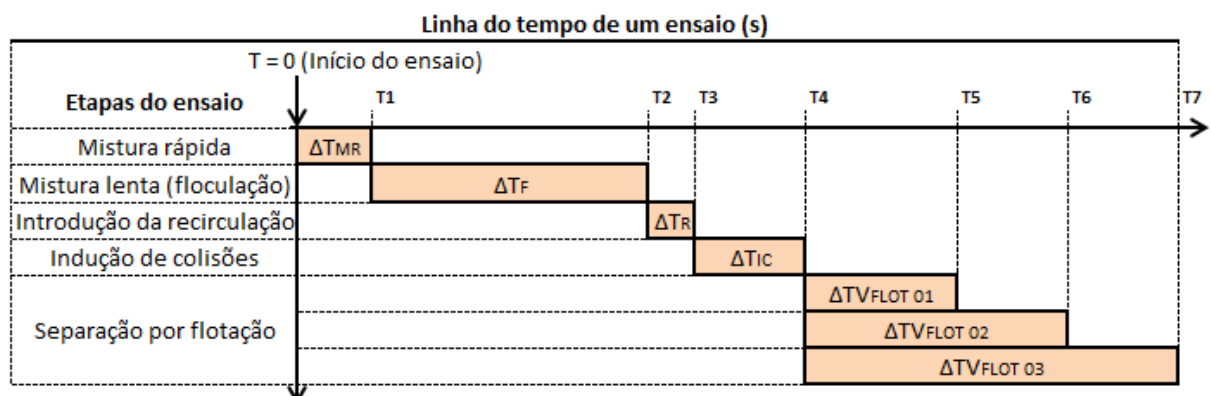
Tendo em vista a organização deste estudo em três etapas sequenciais e interdependentes, os resultados e discussões serão apresentados seguindo a ordem cronológica de execução das etapas.

### 5.1 Etapa 01

De acordo com a hipótese levantada para o planejamento e execução dos ensaios da primeira etapa de trabalho, considerou-se que, durante o período de imposição de agitação mecânica no interior das colunas de flotação (etapa de indução de colisões), imediatamente após o término da etapa de floculação e com a introdução de volume de água previamente saturada com ar no interior das colunas (volume de recirculação), os aglomerados formados pela associação entre flocos e microbolhas de ar apresentariam velocidades médias ascendentes desprezíveis em razão da turbulência gerada no interior das colunas pelos agitadores mecânicos.

Na Figura 15, exposta a seguir, é evidenciado um diagrama de blocos que ilustra os procedimentos adotados para a execução dos ensaios da Etapa 01 em função da hipótese simplificadora anteriormente descrita (velocidade média ascendente dos aglomerados microbolhas-flocos considerada como desprezível durante a etapa de indução de colisões).

**Figura 15** – Diagrama representativo dos procedimentos sequenciais adotados nos ensaios estáticos de flotação da Etapa 01 em função da suposição de que as velocidades ascendentes dos aglomerados bolha-floco seriam desprezíveis durante a etapa de indução de colisões.



Fonte: Elaboração própria.

Em que:

$\Delta T_{MR}$ : Intervalo de tempo consumido pela etapa de mistura rápida (s);

$\Delta T_F$ : Intervalo de tempo consumido pela etapa de floculação (s);

$\Delta T_R$ : Intervalo de tempo consumido pela introdução do volume de recirculação (s);

$\Delta T_{IC}$ : Intervalo de tempo dedicado à imposição da etapa de indução de colisões (s);

$\Delta TV_{FLOT\ 01}$ ,  $\Delta TV_{FLOT\ 02}$ ,  $\Delta TV_{FLOT\ 03}$ : intervalos de tempo associados às estimativas de valores de velocidade ascendente de aglomerados microbolhas-flocos (velocidades de flotação) 01, 02 e 03, respectivamente (s).

Na Etapa 01, cada valor de  $V_{flot}$  foi determinado a partir da divisão da extensão vertical (H) que separa a base das colunas de flotação do primeiro par de mangueiras de coleta (equivalente a 30,0cm para o Flotatesto utilizado) pelo seu respectivo valor de  $\Delta TV_{FLOT}$ , como ilustra a equação a seguir.

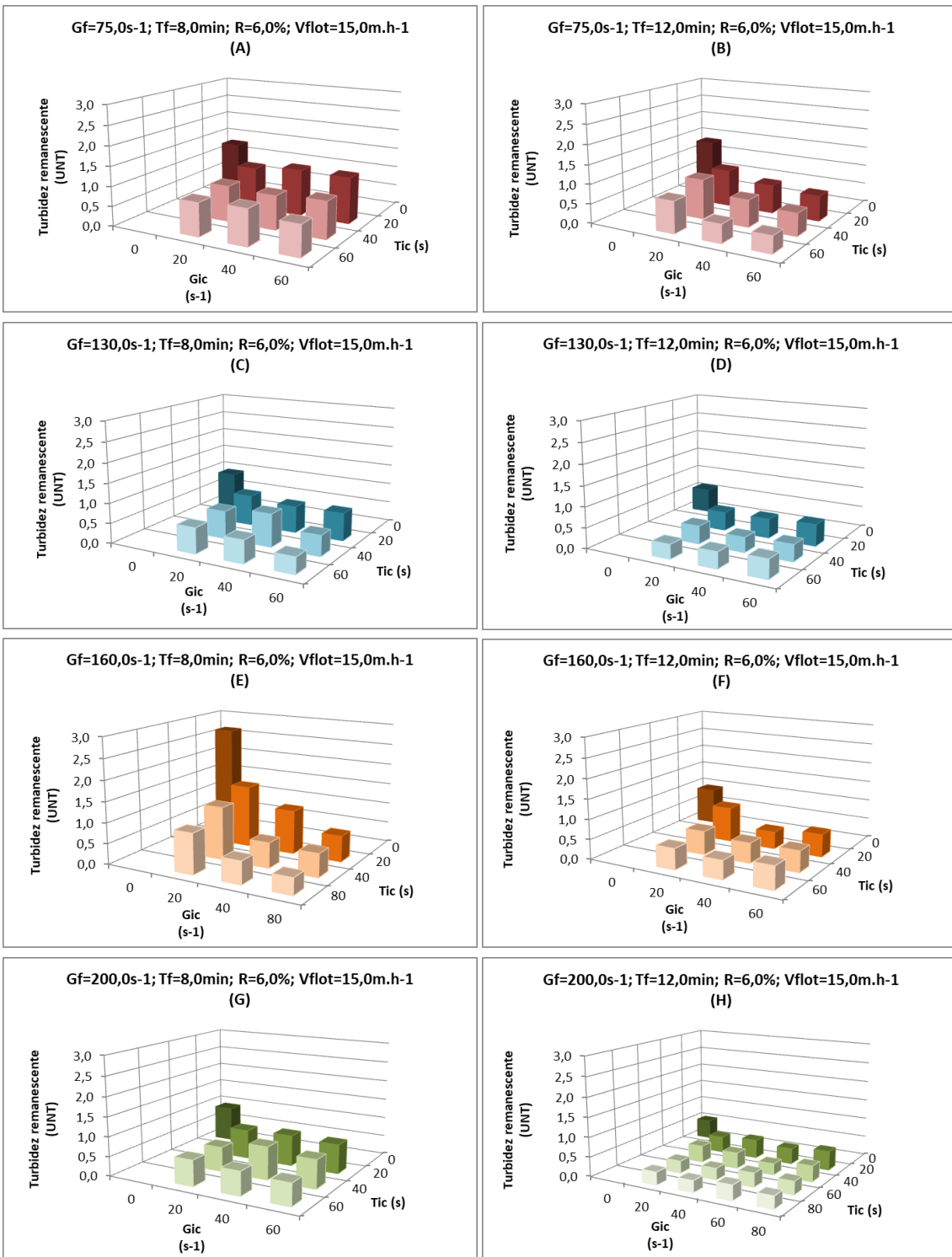
$$V_{FLOT} = \frac{H}{\Delta TV_{FLOT}}$$

Com base na hipótese simplificadora representada por meio do diagrama de blocos exposto (Figura 15), os intervalos de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) explorados não foram incluídos nos intervalos de tempo transcorridos para a coleta de amostras, atrelados a suas respectivas velocidades de flotação ( $V_{flot}$ ), reforçando a suposição de não ocorrência de separação durante a etapa de indução de colisões, mas tão somente de contato entre microbolhas de ar e flocos.

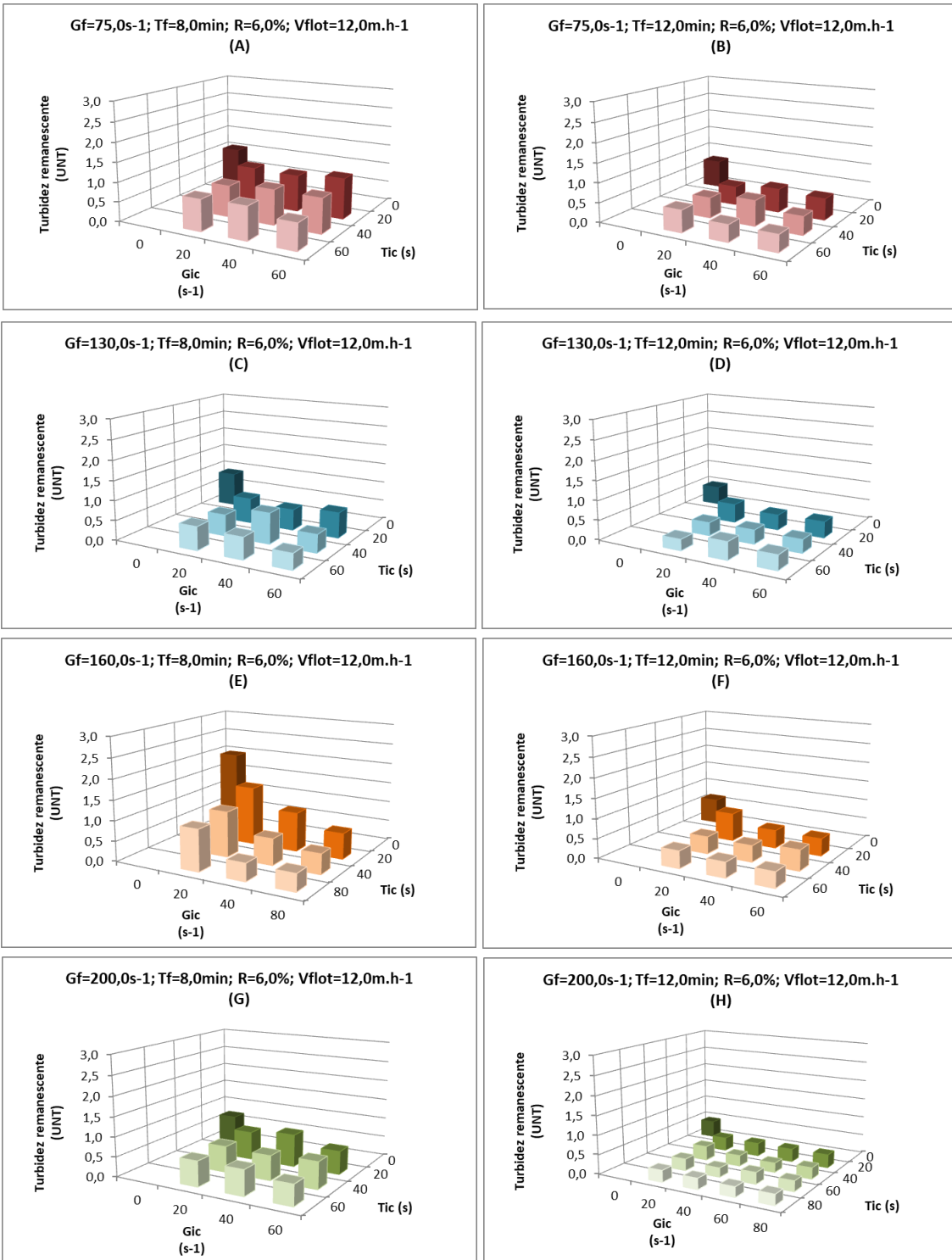
Os resultados de remoção de turbidez e cor aparente obtidos com base na adoção da hipótese simplificadora inicialmente levantada e contemplada por meio da Figura 15 são apresentados em sequência, por meio das Figuras 16 a 21. Os valores residuais de turbidez foram expressos em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT), e os valores residuais de cor aparente expressos em Unidades de Cor (uC), em que cada unidade de cor equivale a 1,0mg de Pt-Co.L<sup>-1</sup>.



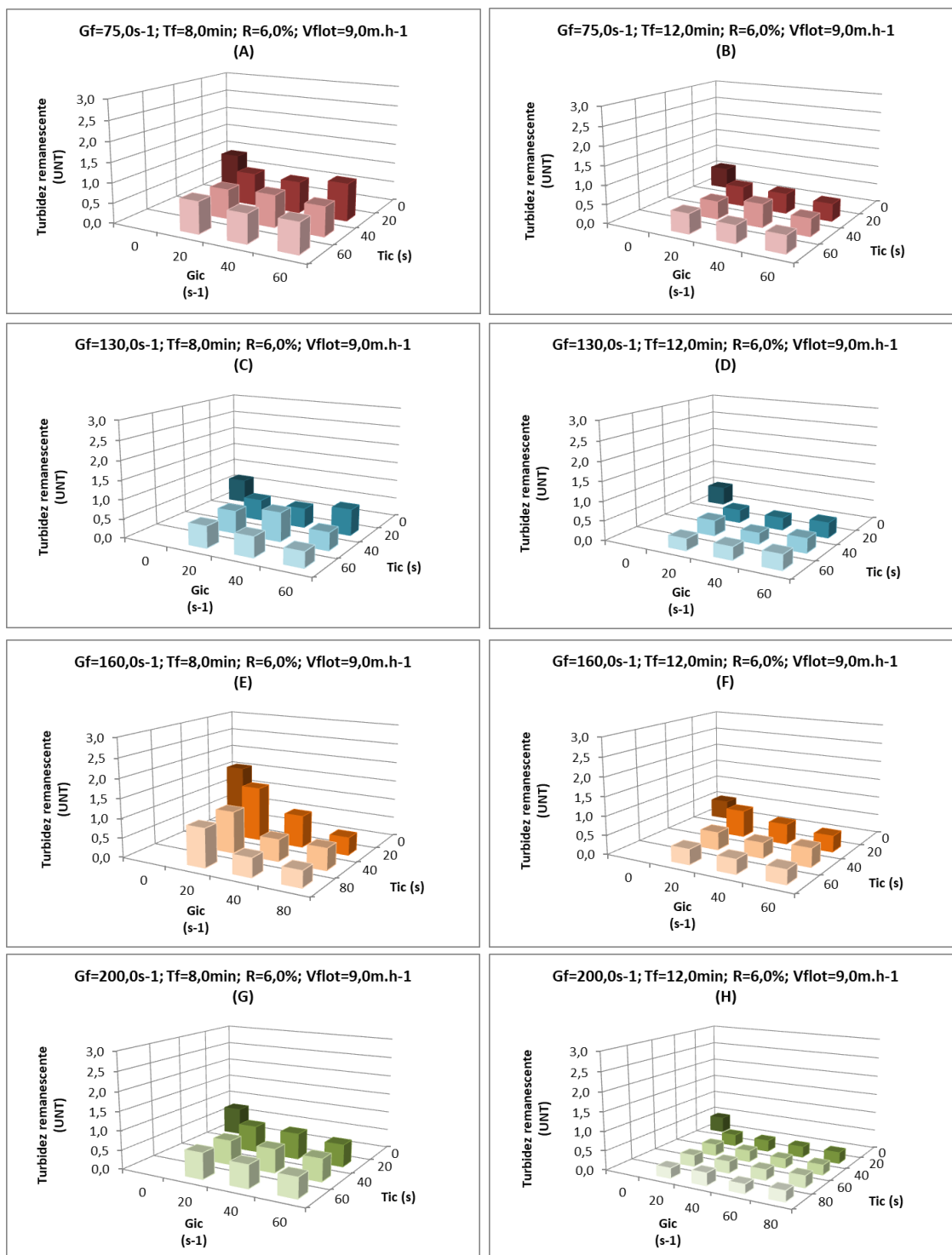
**Figura 16** – Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita (razão de recirculação (R) de 6,0%;  $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ ,  $130\text{s}^{-1}$ ,  $160\text{s}^{-1}$  e  $200\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0min).



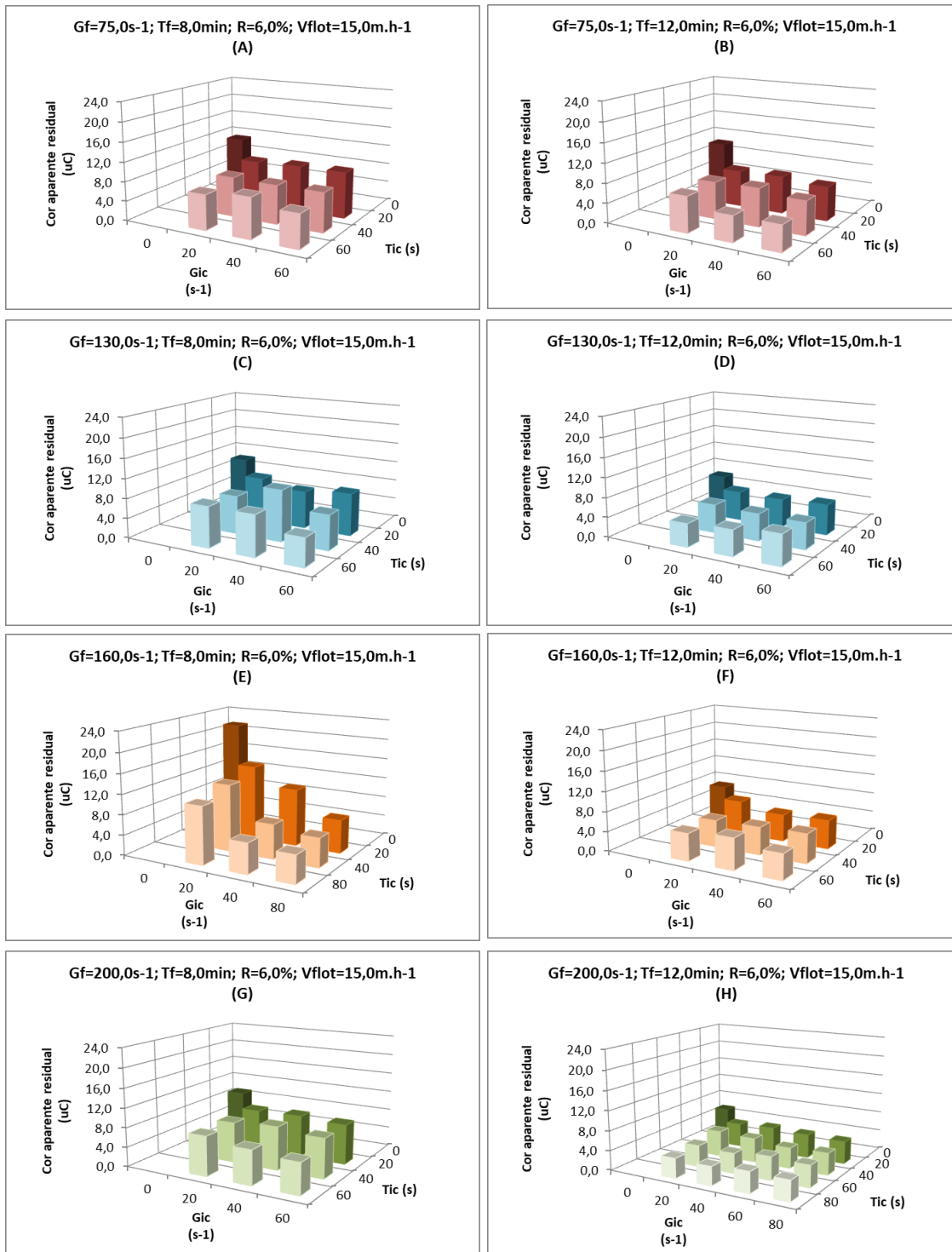
**Figura 17** - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita ( $R=6,0\%$ ;  $V_{flot} = 12,0m.h^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75s^{-1}$ ,  $130s^{-1}$ ,  $160s^{-1}$  e  $200s^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0min).



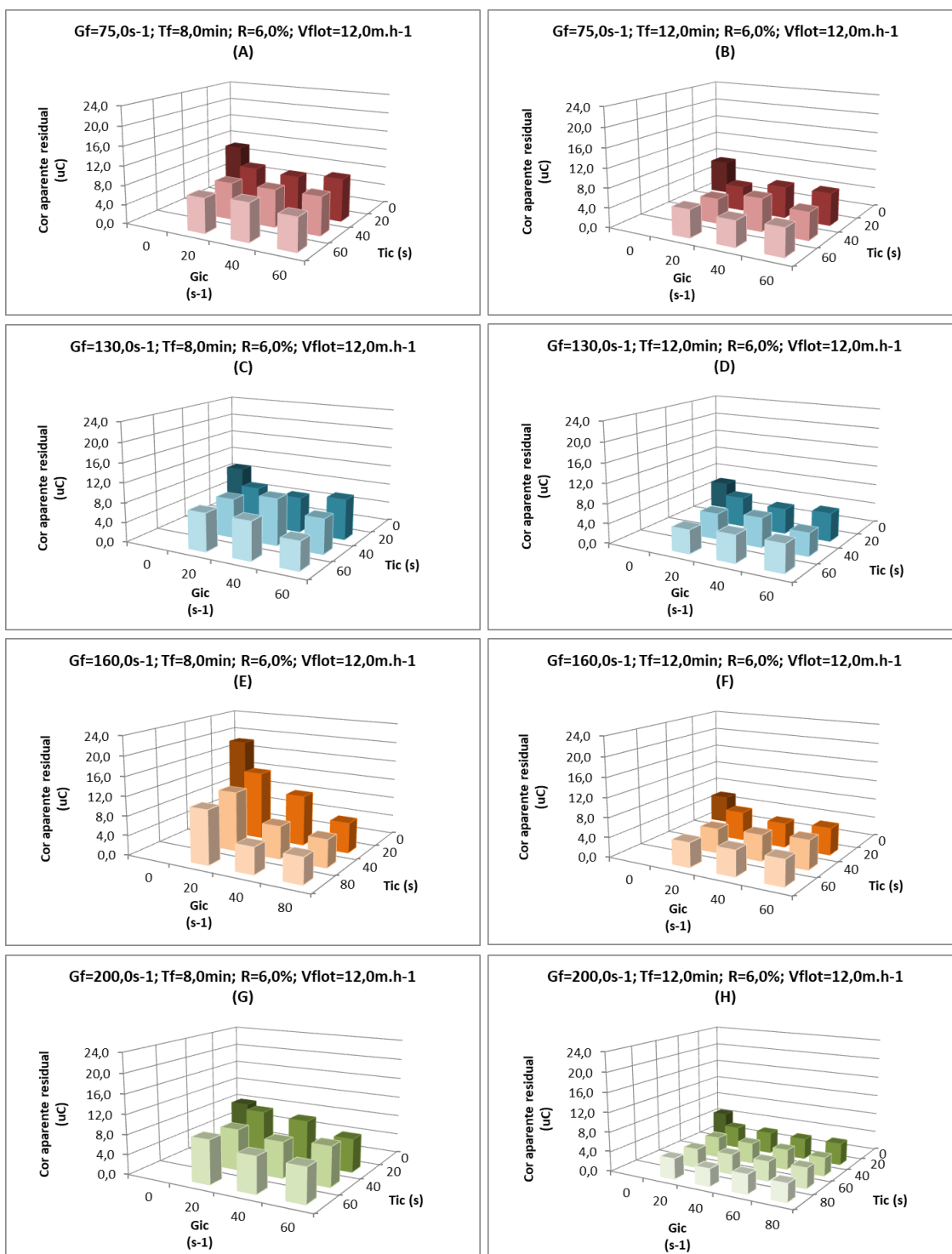
**Figura 18** - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 9,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ ,  $130\text{s}^{-1}$ ,  $160\text{s}^{-1}$  e  $200\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0min).



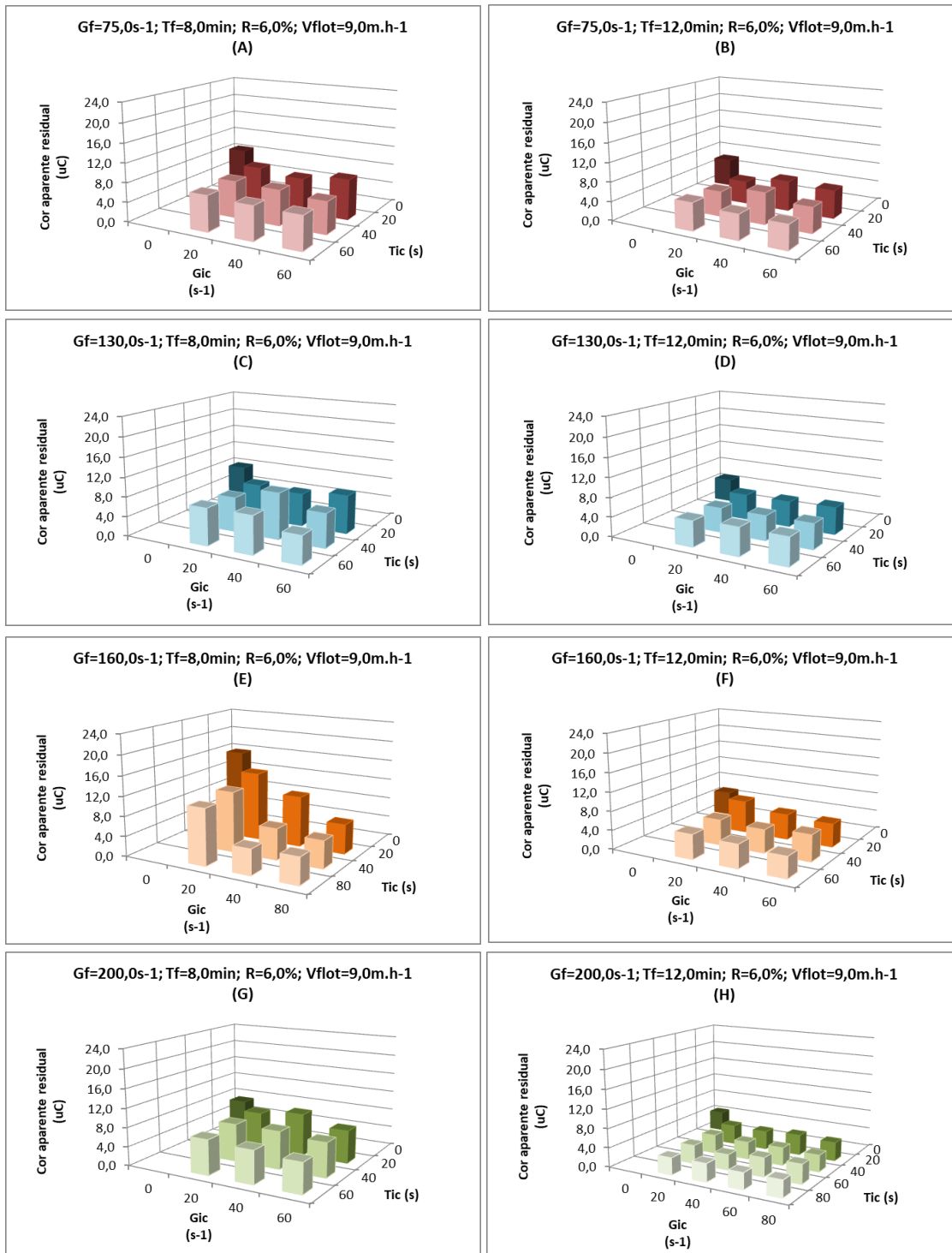
**Figura 19** - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ ,  $130\text{s}^{-1}$ ,  $160\text{s}^{-1}$  e  $200\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0min).



**Figura 20** - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 12,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ ,  $130\text{s}^{-1}$ ,  $160\text{s}^{-1}$  e  $200\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0min).



**Figura 21** - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 e com base na hipótese simplificadora descrita ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 9,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ ,  $130\text{s}^{-1}$ ,  $160\text{s}^{-1}$  e  $200\text{s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0min).



No entanto, com a realização dos ensaios característicos da primeira etapa de estudo e observação visual dos fenômenos em manifestação no interior das colunas do Flotateste, foi possível verificar a ascensão de parcela significativa de aglomerados microbolhas-flocos até a superfície das colunas de flotação durante os intervalos de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) investigados, contrariando a hipótese simplificadora assumida para a execução dos ensaios desta primeira etapa.

Notou-se que o aumento dos intervalos de tempo de indução aplicados foi acompanhado pelo também aumento da quantidade de aglomerados identificados na superfície das colunas, anteriormente ao início da contagem dos intervalos de tempo de coleta. Sendo assim, a partir desta constatação, optou-se por considerar, para a análise e interpretação dos resultados da Etapa 01, a inclusão dos valores de  $T_{IC}$  no cálculo dos intervalos de tempo de flotação, característicos do tempo transcorrido para a coleta de amostras e associados a respectivos valores de velocidade de flotação ( $V_{flot}$ ) (abordagem diferente daquela aplicada à execução dos ensaios).

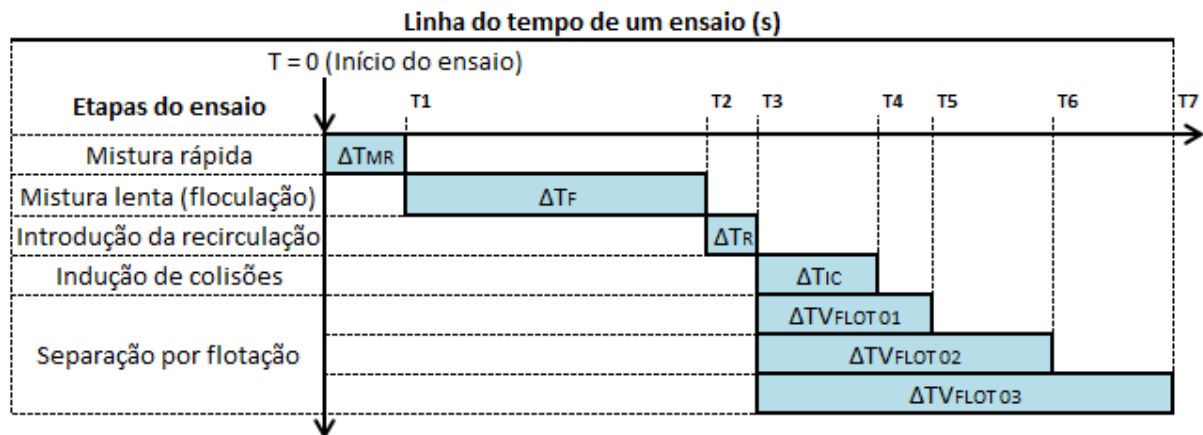
A inclusão proposta equivaleria, conceitualmente, a se admitir que os aglomerados microbolhas-flocos já adquiriam velocidade ascendente à medida que iam se formando, durante os intervalos de tempo de indução de colisões, mesmo com a imposição de agitação mecânica e conseqüente aumento da turbulência no meio. Dar o devido destaque a tal fenômeno torna-se importante neste contexto, tendo em vista a realização dos ensaios em unidade estática em escala de bancada (alimentação por batelada), em que as Zonas de Contato e de Separação ocupam o mesmo espaço no interior das colunas do Flotateste.

Por outro lado, a manifestação de fenômeno semelhante não seria verificada em unidade de flotação com escoamento contínuo, já que, fisicamente, as Zonas de Contato e de Separação encontram-se perfeitamente separadas entre si nestas unidades.

Na Figura 22, exposta a seguir, é evidenciado um diagrama de blocos que ilustra os procedimentos adotados para a interpretação dos resultados obtidos ao longo da Etapa 01, tendo como base as constatações anteriormente descritas e que sustentam a hipótese de início da separação por flotação já durante a fase de indução de colisões (velocidade média ascendente dos aglomerados microbolhas-flocos considerada como não desprezível durante a fase de indução de colisões e inclusão dos valores de  $T_{IC}$  nos intervalos de tempo totais

transcorridos com o deslocamento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos da base das colunas de flotação até o ponto de amostragem).

**Figura 22** – Diagrama representativo do raciocínio adotado para a interpretação dos resultados dos ensaios estáticos de flotação da Etapa 01 em função da suposição de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos concomitantemente ao início da fase de indução de colisões.



Fonte: Elaboração própria.

Em que:

$\Delta T_{MR}$ : Intervalo de tempo consumido pela etapa de mistura rápida (s);

$\Delta T_F$ : Intervalo de tempo consumido pela etapa de floculação (s);

$\Delta T_R$ : Intervalo de tempo consumido pela introdução do volume de recirculação (s);

$\Delta T_{IC}$ : Intervalo de tempo dedicado à imposição da etapa de indução de colisões (s);

$\Delta TV_{FLOT 01}$ ,  $\Delta TV_{FLOT 02}$ ,  $\Delta TV_{FLOT 03}$ : intervalos de tempo associados às estimativas de valores de velocidade ascendente de aglomerados microbolhas-flocos (velocidades de flotação) 01, 02 e 03, respectivamente (s).

Em vista do exposto, fez-se necessária a correção dos valores de  $V_{flot}$  explorados na Etapa 01, considerando-se agora os valores de intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) no cálculo do tempo total de ascensão dos aglomerados até a altura de coleta de amostras, conforme ilustrado por meio da nova linha do tempo de ensaio, representada pelo diagrama de blocos da Figura 22. Assume-se, a partir de então, a manifestação de movimentação ascensional não desprezível por parte dos aglomerados microbolhas-flocos durante a imposição da etapa de indução de colisões.

O raciocínio aplicado para recalculer os valores de  $V_{flot}$  foi evidenciado por meio da Tabela 8, exposta a seguir.



**Tabela 8** – Exposição dos cálculos para incorporação dos valores de  $T_{IC}$  nos intervalos de tempo de coleta de amostras (separação por flotação) e para correção dos valores de  $V_{flot}$  investigados.

Velocidade de flotação inicial ( $V_{flot}$ ) ( $m.h^{-1}$ ) – ( $cm.min^{-1}$ )	Tempo de coleta inicial (min)	Tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) (s)	Tempo de coleta corrigido (Inicial + $T_{IC}$ ) (min)	Velocidade de flotação corrigida ( $V_{flotC}$ ) ( $m.h^{-1}$ ) – ( $cm.min^{-1}$ )
15,0 – 25,0	1,2	20,0	1,53	11,8 – 19,6
		40,0	1,87	9,6 – 16,0
		60,0	2,20	8,2 – 13,6
		80,0	2,53	7,1 – 11,8
12,0 – 20,0	1,5	20,0	1,83	9,8 – 16,4
		40,0	2,17	8,3 – 13,8
		60,0	2,50	7,2 – 12,0
		80,0	2,83	6,4 – 10,6
9,0 – 15,0	2,0	20,0	2,33	7,7 – 12,9
		40,0	2,67	6,7 – 11,2
		60,0	3,00	6,0 – 10,0
		80,0	3,33	5,4 – 9,0

**Observação:** o intervalo de tempo de coleta remete ao tempo necessário para deslocamento ao longo dos 30,0cm que separam a base das colunas de flotação do primeiro par de mangueiras de coleta.

A soma dos valores de intervalo de tempo de coleta inicial aos valores de  $T_{IC}$  produziu um maior número de valores de  $V_{flot}$  em comparação com os três inicialmente propostos, reduzindo sua magnitude (Tabela 8). Dessa forma, buscou-se maneira de agrupar os doze valores obtidos em um número reduzido de blocos. O intuito foi o de garantir consistência à análise dos resultados alcançados, bem como viabilizar sua comparação com os residuais de cor aparente e turbidez característicos do cenário de ausência de indução de colisões, associado aos três valores de  $V_{flot}$  inicialmente propostos ( $15,0m.h^{-1}$ ;  $12,0m.h^{-1}$  e  $9,0m.h^{-1}$ ).

A conduta adotada consistiu no agrupamento em três blocos distintos, baseando-se em variação do valor de  $V_{flot}$  em  $1,7m.h^{-1}$  por bloco, para mais e para menos. A Tabela 9, a seguir, evidencia tal processo.

**Tabela 9** – Agrupamento dos valores de velocidade de flotação corrigidos ( $V_{flotC}$ ) em três blocos distintos.

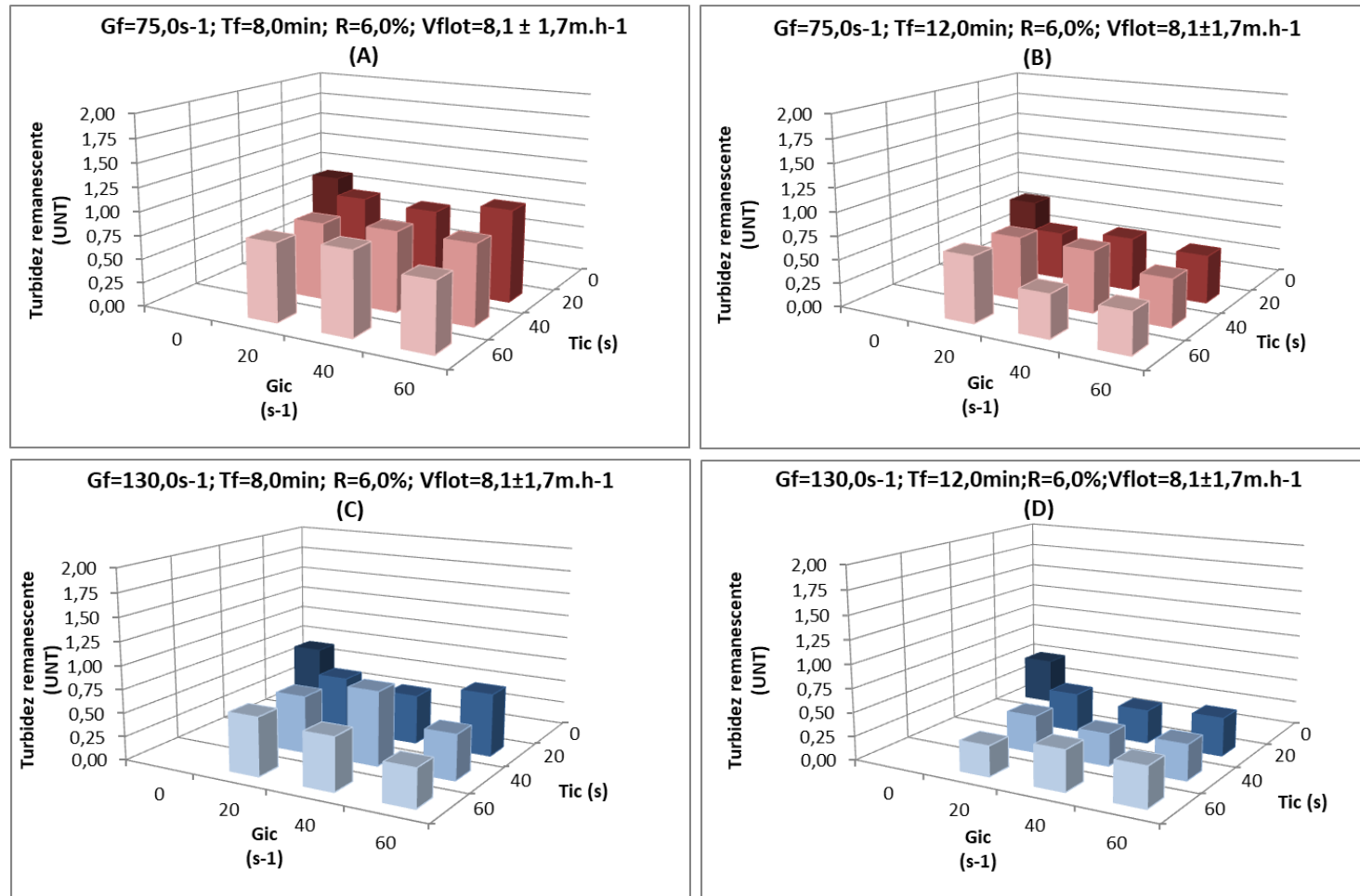
Blocos de velocidade de flotação propostos	Valores de $V_{flotC}$ englobados ( $m.h^{-1}$ )	Valores de $V_{flot}$ inicial englobados ( $m.h^{-1}$ )	Valores de $T_{IC}$ englobados (s)
Bloco 01: $11,6 \pm 1,7 m.h^{-1}$	11,8	15,0	20,0
	9,8		
	9,6		
	8,3		
	8,2		
	7,7		
Bloco 02: $8,1 \pm 1,7 m.h^{-1}$	7,2	15,0; 12,0; 9,0	20,0; 40,0; 60,0; 80,0
	7,1		
	6,7		
	6,4		
	6,0		
	5,4		
Bloco 03: $4,6 \pm 1,7 m.h^{-1}$	6,0	9,0	60,0
	5,4		80,0

A análise dos dados da Tabela 9 permitiu notar que o Bloco 02, associado a velocidades de flotação que variam de  $6,4$  a  $9,8\text{m.h}^{-1}$ , foi capaz de reunir o maior número de valores de  $V_{\text{flotC}}$  obtidos. Tal conduta foi proposital, tendo como intuito garantir ao bloco de velocidades intermediárias o maior aporte de dados possível, e assim contribuir para elevar a representatividade dos dados amostrais (valores residuais de cor aparente e turbidez) associados. Como consequência, os resultados inicialmente obtidos foram realocados e incorporados a novos grupos, com a aplicação de médias aritméticas quando necessário (aplicada a valores residuais distintos, porém característicos de um mesmo  $T_{\text{IC}}$ ).

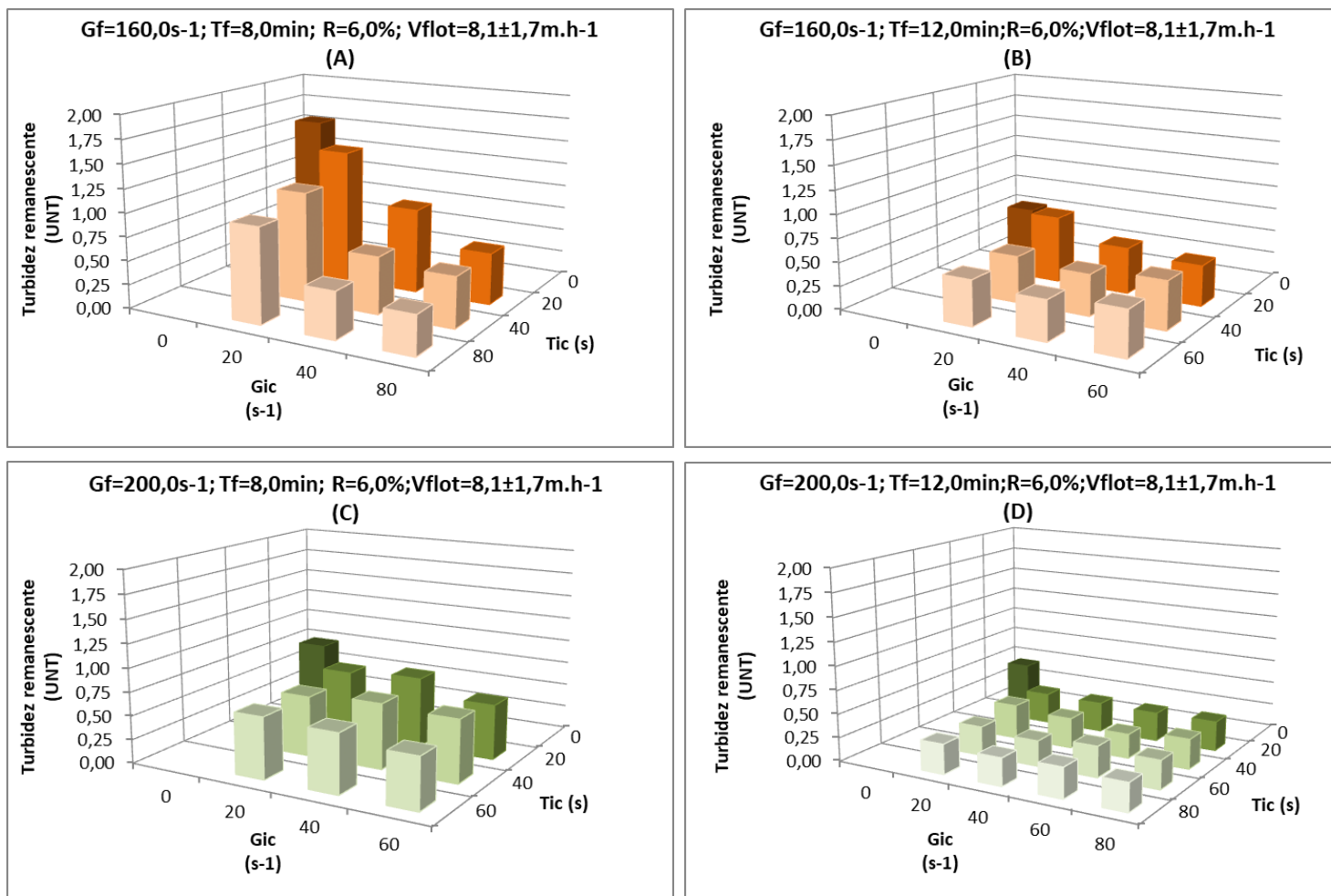
A abordagem adotada fez com que os valores residuais de cor aparente e turbidez característicos da aplicação de velocidade de flotação de  $4,6 \pm 1,7\text{m.h}^{-1}$  (Bloco 03) não apresentassem referência comparativa atrelada a cenário de ausência de indução de colisões (cenário independente da imposição de valores de  $T_{\text{IC}}$  e, portanto, não afetado pelas correções impostas), já que a menor velocidade de flotação originalmente investigada ao longo da execução dos ensaios da Etapa 01 foi de  $9,0\text{m.h}^{-1}$ . Em complemento e quanto aos resultados associados ao Bloco 01 (velocidade de flotação de  $11,6 \pm 1,7\text{m.h}^{-1}$ ), evidenciou-se a existência de referência comparativa para com o cenário de ausência de indução de colisões, embora também tenha sido identificada a associação de tal bloco a reduzido volume de dados agregados.

Sendo assim, optou-se por dar destaque apenas aos dados advindos da aplicação de velocidade de flotação de  $8,1 \pm 1,7\text{m.h}^{-1}$  (Bloco 02), tendo como referência comparativa os residuais de cor aparente e turbidez característicos do cenário de ausência de indução de colisões para a  $V_{\text{flot}}$  de  $9,0\text{m.h}^{-1}$ . Os resultados foram organizados e representados por meio das Figuras 23 a 26, expostas em sequência.

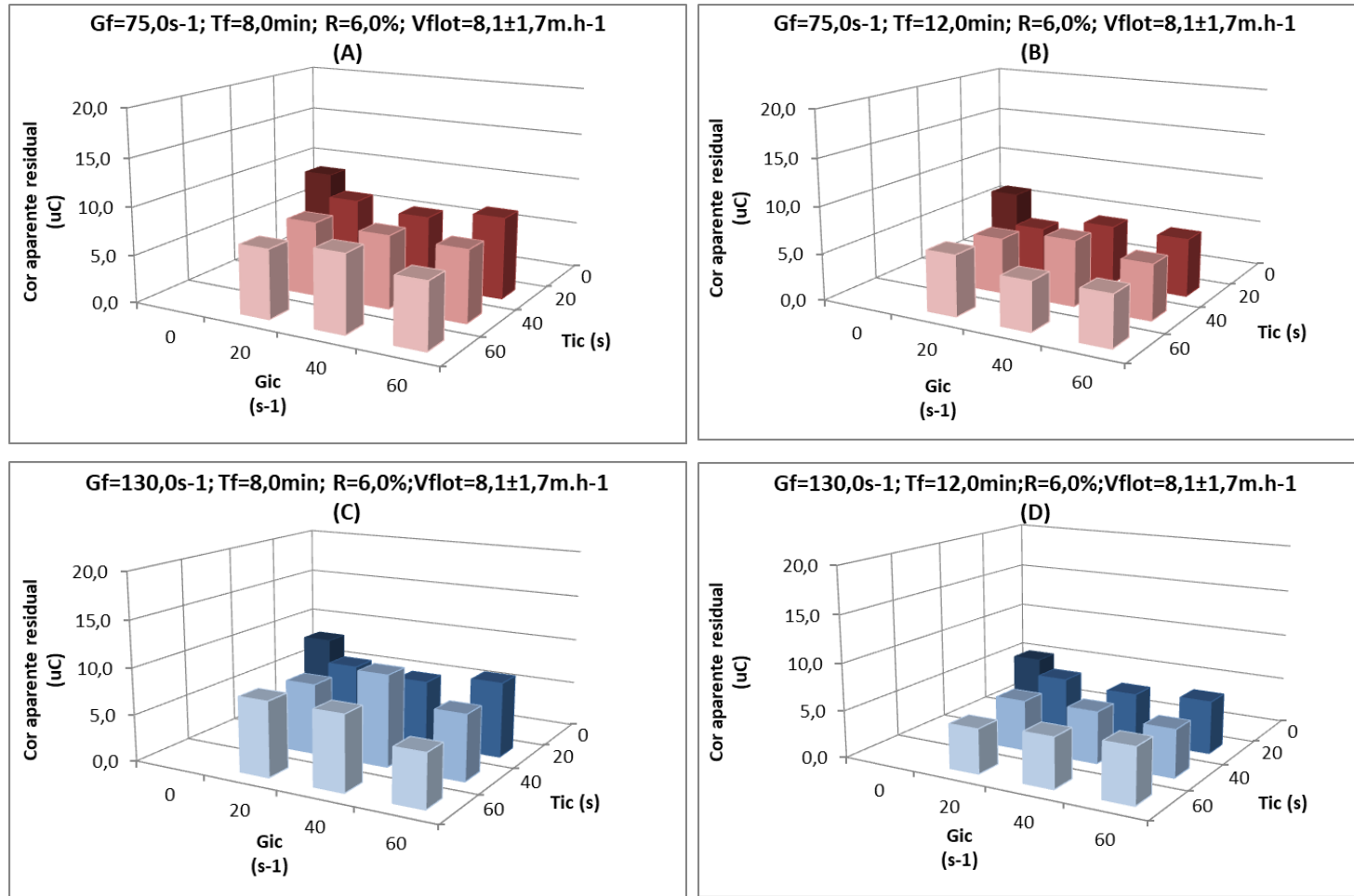
**Figura 23** - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{flot} = 8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $130,0s^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0 minutos).



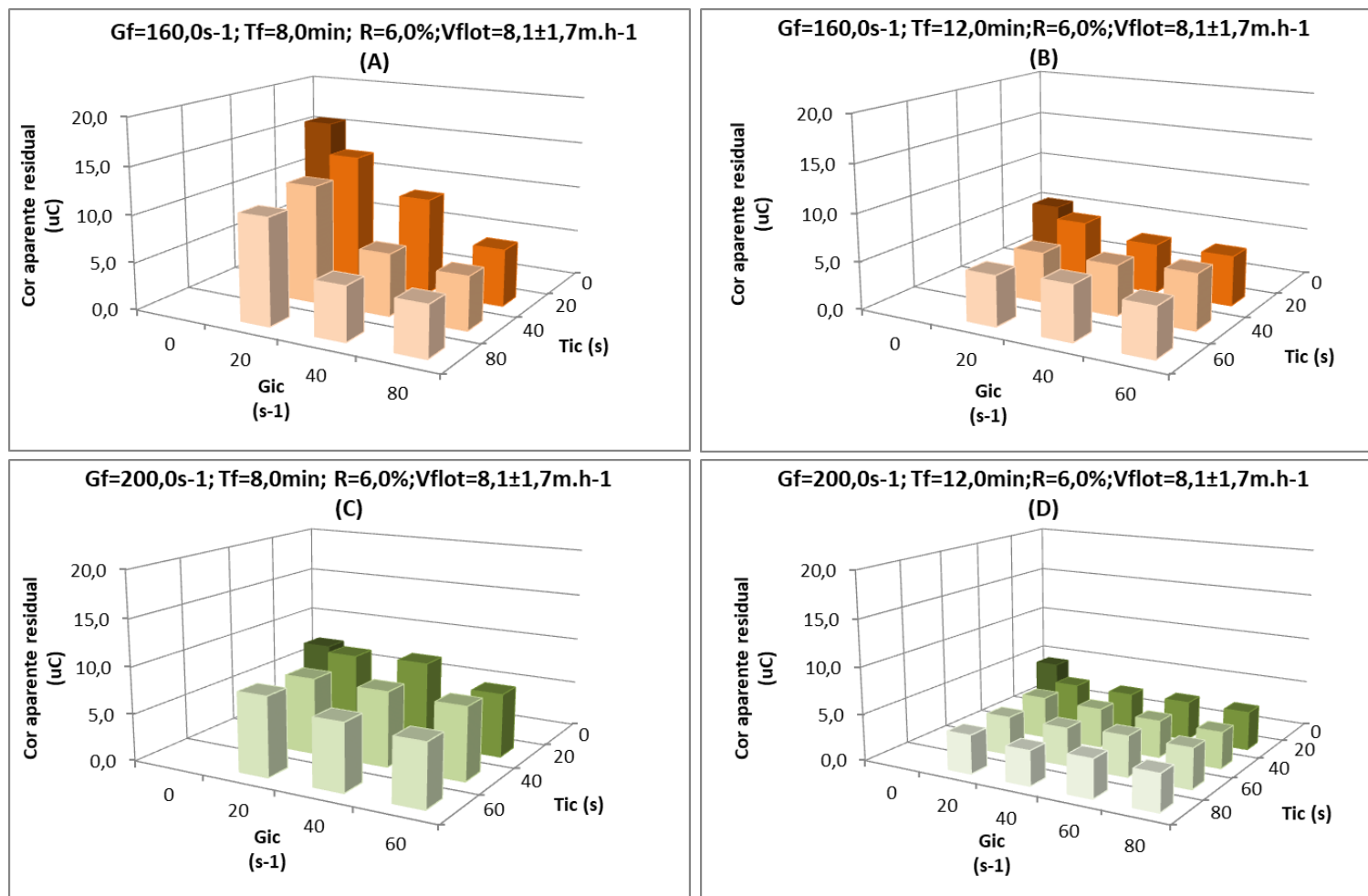
**Figura 24** - Representações gráficas dos valores residuais de turbidez obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 8,1 \pm 1,7 \text{ m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $160,0 \text{ s}^{-1}$  e  $200,0 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0 minutos).



**Figura 25** - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 8,1 \pm 1,7 \text{ m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75,0 \text{ s}^{-1}$  e  $130,0 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0 minutos).



**Figura 26** - Representações gráficas dos valores residuais de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 01 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 8,1 \pm 1,7 \text{ m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $160,0 \text{ s}^{-1}$  e  $200,0 \text{ s}^{-1}$ ;  $T_f$  de 8,0 e 12,0 minutos).



A análise dos dados reunidos por meio das Figuras 23, 24, 25 e 26, os quais representam todos os resultados referentes às amostras coletadas em intervalos de tempo que caracterizaram valores de velocidade de flotação pertencentes ao intervalo de  $8,1 \pm 1,7 \text{m.h}^{-1}$ , permitiu notar que a imposição de intervalo de tempo de floculação ( $T_f$ ) de 12,0 minutos por diversas vezes associou-se a valores residuais de turbidez e cor aparente inferiores àqueles encontrados com a imposição de  $T_f$  de 8,0 minutos, principalmente no contexto de ausência de imposição de agitação mecânica para a indução de colisões entre partículas floculadas e microbolhas de ar.

Tomando-se inicialmente este cenário ( $G_{IC}$  de  $0,0 \text{s}^{-1}$ ;  $T_{IC}$  de  $0,0 \text{s}$ ) e a aplicação do valor de gradiente médio de velocidade empregado na etapa de floculação ( $G_f$ ) de  $75,0 \text{s}^{-1}$ , os valores residuais de turbidez e cor aparente alcançados foram, respectivamente,  $0,55 \text{UNT}$  e  $5,8 \text{uC}$ , para  $T_f$  de 12,0 minutos, e  $0,85 \text{UNT}$  e  $8,4 \text{uC}$  para  $T_f$  de 8,0 minutos ( $V_{\text{flot}}$  de  $8,1 \pm 1,7 \text{m.h}^{-1}$ ) (Figuras 23 e 25, A e B).

Partindo-se do mesmo valor de  $V_{\text{flot}}$  ( $8,1 \pm 1,7 \text{m.h}^{-1}$ ) e da imposição da fase de indução de colisões, a análise das Figuras 23 e 25 (A e B) permitiu notar ligeiro aumento da eficiência de remoção de tais parâmetros para  $G_f$  de  $75,0 \text{s}^{-1}$ , com os mínimos residuais de turbidez e cor aparente para  $T_f$  de 8,0 minutos tendo sido alcançados por meio da aplicação de  $G_{IC}$  de  $60,0 \text{s}^{-1}$  e  $T_{IC}$  de  $60,0 \text{s}$  ( $0,72 \text{UNT}$  e  $6,8 \text{uC}$ , respectivamente). A imposição deste mesmo par  $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  resultou em ligeira redução dos residuais de turbidez e de cor aparente para  $G_f$  de  $75,0 \text{s}^{-1}$  e  $T_f$  de 12,0 minutos, sendo de  $0,43 \text{UNT}$  e  $5,3 \text{uC}$ , nesta ordem, acompanhados de perto pelo par  $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $40,0 \text{s}^{-1}$ ;  $60,0 \text{s}$  (residuais de  $0,45 \text{UNT}$  e  $5,1 \text{uC}$ ). O mínimo residual de cor aparente alcançado foi de  $4,8 \text{uC}$  para  $G_{IC}$  de  $20,0 \text{s}^{-1}$  e  $T_{IC}$  de  $20 \text{s}$ .

Também vale ressaltar que a tendência de ligeira redução dos valores residuais obtidos a partir do aumento do valor de  $T_f$  imposto foi verificada também para os outros valores de  $G_f$  estudados.

Para o valor de  $V_{\text{flot}}$  investigado ( $8,1 \pm 1,7 \text{m.h}^{-1}$ ) e  $G_f$  de  $130,0 \text{s}^{-1}$ , a ausência da fase de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) garantiu residuais de turbidez e cor aparente de  $0,63 \text{UNT}$  e  $7,8 \text{uC}$  para  $T_f$  de 8,0 minutos, e de  $0,48 \text{UNT}$  e  $4,8 \text{uC}$  para  $T_f$  de 12,0 minutos, nesta ordem (Figuras 23 e 25, A e B).

A observação das Figuras 23 e 25 (A e B) permitiu notar, contudo, que os menores valores residuais de turbidez e cor aparente para  $G_f$  de  $130,0 \text{s}^{-1}$  ( $V_{\text{flot}}$  de  $8,1 \pm 1,7 \text{m.h}^{-1}$ ) foram

alcançados por meio da associação da FAD ao processo de indução mecânica de colisões, tanto para  $T_f$  de 8,0 minutos ( $G_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 60,0s, com residuais de 0,40UNT e 5,6uC) quanto para  $T_f$  de 12,0 minutos ( $G_{IC}$  de  $20,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 60,0s, com residuais de 0,32UNT e 4,7uC). Especificamente para  $T_f$  de 12,0 minutos, residuais próximos aos mínimos registrados foram alcançados com a aplicação de  $G_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 40,0s (0,33UNT de turbidez residual) e  $G_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 40,0s (5,0uC de cor aparente residual).

Para  $G_f$  de  $160,0s^{-1}$  e levando-se em consideração o mesmo valor de  $V_{flot}$  abordado nos parágrafos anteriores ( $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ), os residuais de turbidez e cor aparente característicos do cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) foram equivalentes a 1,54UNT e 15,5uC para  $T_f$  de 8,0 minutos, e a 0,50UNT e 5,1uC para  $T_f$  de 12,0 minutos, nesta ordem (Figuras 24 e 26, A e B).

Neste mesmo contexto ( $V_{flot}$  de  $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$  e  $G_f$  de  $160,0s^{-1}$ ), o melhor desempenho para remoção de turbidez e cor aparente registrado para  $T_f$  de 8,0 minutos foi garantido pela combinação entre  $G_{IC}$  de  $80,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 80,0s (0,41UNT e 5,3uC, nesta ordem). Para os mesmos valores de  $V_{flot}$  ( $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ) e  $G_f$  ( $160,0s^{-1}$ ), porém para  $T_f$  de 12,0 minutos, o mínimo residual de turbidez registrado foi alcançado pela combinação entre  $G_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 60,0s (0,42UNT), com o mínimo residual de cor aparente obtido por meio da imposição do processo de indução de colisões (pares  $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$ ; 60,0s e  $40,0s^{-1}$ ; 20,0s) se assemelhando ao residual obtido com o cenário de ausência de indução de colisões (5,1uC de cor aparente residual) (Figuras 24 e 26, A e B).

Para  $G_f$  de  $200,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ , a observação das Figuras 24 e 26, A e B, permitiu notar que o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) mostrou-se atrelado a residuais de turbidez e cor aparente de 0,72UNT e 6,9uC para  $T_f$  de 8,0 minutos, e de 0,41UNT e 4,1uC para  $T_f$  de 12,0 minutos, nesta ordem. Neste mesmo contexto ( $G_f$  de  $200,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ), a imposição de  $G_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$  associado a  $T_{IC}$  de 60,0s resultou nos mínimos residuais de turbidez e cor aparente encontrados para  $T_f$  de 8,0 minutos (0,54 UNT e 6,6uC, nesta ordem). Já para  $T_f$  de 12 minutos, o melhor desempenho em termos de remoção de turbidez foi alcançado a partir da imposição de  $G_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$  aliado a  $T_{IC}$  de 40,0s (residual de 0,26UNT), enquanto o melhor desempenho em termos de remoção de cor aparente foi alcançado por meio da combinação entre  $G_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 80,0s (3,6uC de cor aparente residual).



Notou-se, em complemento, a obtenção de residual de cor aparente próximo do mínimo registrado para Tf de 12,0 minutos com a imposição de  $G_{IC}$  de  $80,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de 80,0s (3,8uC).

No intuito de facilitar a interpretação dos resultados alcançados foi estruturada a Tabela 10, exposta a seguir, que organiza alguns dos dados extraídos das Figuras 23 a 26, comentados anteriormente, e viabiliza a comparação entre desempenhos alcançados pelos cenários ótimos de imposição da fase de indução de colisões e pelos cenários de ausência de imposição ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) para a Etapa 01.

**Tabela 10** – Residuais de turbidez e cor aparente associados aos cenários ótimos de indução de colisões e cenários de ausência de indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) da Etapa 01, com base em valores de velocidade de flotação pertencentes ao intervalo de  $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ;  $R=6,0\%$ ; Gf de 75, 130, 160 e  $200s^{-1}$ ; Tf de 8,0 e 12,0 minutos.

$V_{flot} = 8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ( $P_{SAT} = 500,0kPa$ ; $R = 6,0\%$ )								
Gf ( $s^{-1}$ )	Tf (min)	Ausência de indução de colisões			Indução de colisões: cenário ótimo			
		$G_{IC}; T_{IC}$ (1)	Turbidez (UNT)	Cor aparente (uC)	$G_{IC}; T_{IC}$ (1)	Turbidez (UNT)	$G_{IC}; T_{IC}$ (1)	Cor aparente (uC)
75,0	8,0	0;0	0,85	8,4	60;60	0,72	60;60	6,8
	12,0	0;0	0,55	5,8	60;60	0,43	20;20	4,8
130,0	8,0	0;0	0,63	7,8	60;60	0,40	60;60	5,6
	12,0	0;0	0,48	4,8	20;60	0,32	20;60	4,7
160,0	8,0	0;0	1,54	15,5	80;80	0,41	80;80	5,3
	12,0	0;0	0,50	5,1	40;60	0,42	60;60 40;20	5,1
200,0	8,0	0;0	0,72	6,9	60;60	0,54	60;60	6,6
	12,0	0;0	0,41	4,1	60;40	0,26	40;80	3,6

Observação: (1) As unidades dos valores apresentados de  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  são  $s^{-1}$  e s, respectivamente.

A observação das Figuras 23 a 26, em associação à análise dos dados da Tabela 10, permitiu notar, como já identificado, que a imposição de intervalo de tempo de floculação (Tf) de 12,0 minutos garantiu valores residuais de cor aparente e turbidez na maioria das vezes inferiores àqueles obtidos com Tf de 8,0 minutos, tanto para o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) quanto para aquele de melhor desempenho registrado por meio da combinação entre  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$ .

Tal constatação contribui para sustentar a hipótese de que, para o tipo de água em estudo (turbidez inicial média de 6,62UNT e cor aparente inicial média de 51,0uC (51,0mgPt-Co.L<sup>-1</sup>) na Etapa 01) e para as condições operacionais exploradas, a imposição de Tf mínimo em torno de 12,0 minutos parece ser mais indicada que a imposição de Tf de 8,0 minutos, levando-se em consideração a busca pela otimização do processo.

Ao longo do trabalho desenvolvido por Marega (2020), cuja pesquisa dedicou-se (entre outros tópicos) ao estudo da influência da floculação (sem etapa de indução de colisões) no

desempenho do processo de flotação por ar dissolvido, foi utilizada água bruta de estudo preparada de forma idêntica à investigada nesta pesquisa, e a autora alcançou praticamente a mesma eficiência de remoção de cor aparente e turbidez a partir da imposição de valores de  $T_f$  de 16,0 e 12,0 minutos, com os respectivos valores residuais encontrados estando muito próximos. Sendo assim, embora valores de  $T_f$  superiores a 12,0 minutos não tenham sido explorados nesta pesquisa, a associação entre os resultados alcançados na Etapa 01 ( $V_{\text{flot}}$  de  $8,1 \pm 1,7 \text{ m.h}^{-1}$ ) e aqueles apresentados por Marega (2020) parece indicar  $T_f$  de 12,0 minutos como ótimo para a flotação por ar dissolvido da água de estudo, evidenciando a existência de um intervalo de tempo mínimo para a formação de flocos a partir das matérias desestabilizadas.

Em adição, a análise dos resultados alcançados (Tabela 10) e característicos de  $V_{\text{flot}}$  de  $8,1 \pm 1,7 \text{ m.h}^{-1}$ , permitiu notar, especificamente para a imposição de  $G_f$  de  $160,0 \text{ s}^{-1}$  e  $T_f$  de 8,0 minutos, e para o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos), o registro de valores residuais de turbidez ( $1,54 \text{ UNT}$ ) e cor aparente ( $15,5 \text{ uC}$ ) nitidamente superiores em relação aos demais. Tendo em vista tal discrepância, supõe-se que tais valores configurem conjunto de pontos anômalos em meio à matriz de resultados obtidos.

Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010), uma anomalia significa que o valor registrado não pode ser considerado como proveniente da distribuição responsável pela geração dos demais, não sendo coerente fundamentar qualquer constatação com base em sua manifestação. Acredita-se que no dia da realização de tais ensaios pode ter havido algum tipo de acúmulo de partículas em uma das mangueiras de coleta de amostras, ou mesmo no interior do frasco de coleta utilizado, promovendo aumento dos residuais computados. Acredita-se que a realização de ensaios em repetições (duplicatas e triplicatas) poderia ter auxiliado no amortecimento de tais discrepâncias e garantido maior representatividade aos dados.

Nessa primeira etapa preliminar de estudo da influência da introdução de uma etapa de indução de colisões no processo FAD, a análise dos resultados obtidos para  $V_{\text{flot}}$  de  $8,1 \pm 1,7 \text{ m.h}^{-1}$  e para os cenários explorados permitiu constatar que, de maneira geral, a imposição de uma etapa de indução de colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas no início do processo de flotação pareceu ter sido capaz de aumentar a eficiência de remoção de turbidez e cor aparente, desde que aplicados valores favoráveis de  $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$ , com destaque para os resultados obtidos para o menor dentre os quatro valores de  $G_f$  empregados ( $75,0 \text{ s}^{-1}$ ) (Tabela 10).

Em complemento, a interpretação dos dados da Tabela 10 permitiu notar que, quando comparados os cenários ótimos com indução de colisões e os cenários de ausência de indução, as diferenças entre residuais de turbidez e cor aparente mostraram-se mais expressivas para  $T_f$  de 8,0 minutos em relação a  $T_f$  de 12,0 minutos. Excluindo-se da análise os resultados obtidos com  $G_f$  de  $160,0s^{-1}$  e  $T_f$  de 8,0 minutos (anômalos), as máximas diferenças entre residuais de turbidez totalizaram 0,23UNT para  $T_f$  de 8,0 minutos e 0,16UNT para  $T_f$  de 12,0 minutos (ambas para  $G_f$  de  $130,0s^{-1}$ ), com as máximas diferenças entre residuais de cor aparente iguais a 2,2uC ( $G_f$  de  $130,0s^{-1}$ ) para  $T_f$  de 8,0 minutos e 1,0uC ( $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ ) para  $T_f$  de 12,0 minutos.

A análise destes resultados preliminares, obtidos ao longo da Primeira Etapa de estudos, evidenciou indícios de que a imposição da fase de indução de colisões poderia ser capaz de proporcionar maiores incrementos à eficiência do processo de FAD quando associada a intervalos de tempo de floculação inferiores ao ótimo, causando menor impacto positivo quando da aplicação de valores de  $T_f$  otimizados.

Em complemento à análise dos dados da Tabela 10, os mínimos residuais de turbidez e cor aparente registrados, levando-se em conta cada valor de  $G_f$  e  $T_f$  separadamente, foram fruto da combinação entre valores de  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  em quase 100,0% dos casos, com destaque para o par  $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$ ; 60,0s, que se associou ao cenário ótimo registrado com maior frequência que os demais. Quanto aos mínimos residuais globais alcançados, levando-se em conta simultaneamente os quatro valores de  $G_f$  e os dois de  $T_f$  explorados, se destacaram os pares  $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$ ; 40,0s para remoção de turbidez (0,26UNT) e de  $40,0s^{-1}$ ; 80,0s para remoção de cor aparente (3,6uC) (ambos para  $G_f$  de  $200,0s^{-1}$  e  $T_f$  de 12,0 minutos), configurando eficiência de remoção de aproximadamente 96,0% para turbidez e 93,0% para cor aparente.

#### 5.1.1 Principais recomendações para a Etapa 02

Com base nos resultados obtidos e interpretados ao longo da Etapa 01 foram planejados os ensaios referentes à Etapa 02. A partir de toda a discussão articulada foram elaboradas três recomendações fundamentais, a serem implementadas na etapa seguinte:

- (i) Os valores de  $T_{IC}$  explorados deveriam ser englobados pelos intervalos de tempo de coleta de amostras (ou de flotação), associados a cada um dos valores de  $V_{flot}$  a

serem investigados, desde a fase de planejamento e execução de ensaios até a fase de interpretação de resultados;

- (ii) Realização dos ensaios em repetições, preferencialmente em triplicatas;
- (iii) Priorizar a realização de ensaios com base na investigação de  $T_f$  de 12,0 minutos, interpretado como ótimo para o contexto de estudo, pois assim estaria sendo investigada a existência ou não de algum real benefício ao se adotar a indução de colisões no interior da Zona de Contato (ZC) de unidades FAD.

## 5.2 Etapa 02

As recomendações provenientes da Etapa 01 foram incorporadas ao planejamento dos ensaios da Segunda Etapa de investigação experimental.

Recapitulando brevemente o procedimento detalhadamente descrito na seção de Metodologia aplicada à Etapa 02 (Seção 4.4.2), os parâmetros analisados foram os mesmos da Etapa 01 (turbidez e cor aparente), bem como foram mantidos os valores de pressão de saturação (500,0kPa) e razão de recirculação ( $R = 6,0\%$ ) explorados. Apenas os valores de  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $200,0s^{-1}$  foram mantidos, com a investigação de dois novos valores de  $G_f$ , iguais a  $100,0s^{-1}$  e  $150,0s^{-1}$ .

Apenas o valor de  $T_f$  de 12,0 minutos foi explorado ao longo da Etapa 02, tendo em vista tanto sua associação aos cenários ótimos de desempenho registrados ao longo da Etapa 01 quanto o intervalo de tempo limitado disponibilizado para a condução da investigação experimental em questão, reflexo do período de pandemia e isolamento social vivenciado. Enquanto a quantidade de valores de  $G_{IC}$  explorados foi ampliada, com a incorporação de  $120,0s^{-1}$  e  $160,0s^{-1}$  ao contexto de investigação, a diversidade de valores de  $T_{IC}$  foi reduzida em comparação com a Etapa 01, com apenas 30,0s e 60,0s tendo sido analisados na Etapa 02.

Tendo em vista a demanda pela identificação das respostas oferecidas pelo processo em estudo quando submetido a situações de elevado nível de estresse operacional, os três valores de velocidade de flotação ( $V_{flot}$ ) investigados foram incrementados de 15, 12 e  $9m.h^{-1}$ , relativos à execução dos ensaios da Etapa 01, para 20, 15 e  $10m.h^{-1}$ , na Etapa 02. Em complemento, todos os ensaios programados foram realizados em triplicata, garantindo maior representatividade e consistência estatística aos resultados obtidos.

Seguindo recomendação advinda da Etapa 01, os valores de  $T_{IC}$  de 30,0s e 60,0s foram englobados pelos três intervalos de tempo de coleta de amostras investigados (ou intervalos de tempo de flotação, associados aos valores de  $V_{flot}$  explorados). Em outras palavras, os ensaios da Etapa 02 foram planejados, executados e tiveram seus resultados interpretados com base na hipótese de início da movimentação ascendente dos aglomerados microbolhas de ar-partículas floculadas concomitantemente ao período de indução de colisões.

Sendo assim, com base nos valores de  $V_{flot}$  impostos na Etapa 02 (mais altos que os da Etapa 01) e no impacto potencialmente negativo oferecido à eficiência de remoção pela proximidade entre o término de  $T_{IC}$  e o início da coleta de amostras (tópico já abordado na Seção 4.4.2), a extensão vertical percorrida pelos aglomerados microbolhas-flocos em ascensão ao longo das colunas de flotação do Flotateste foi elevada de 30,0cm (Etapa 01) para 55,0cm (Etapa 02). Essa nova altura foi obtida promovendo-se a retirada de amostras no segundo par de mangueiras de coleta de amostras no Flotateste com alimentação por batelada.

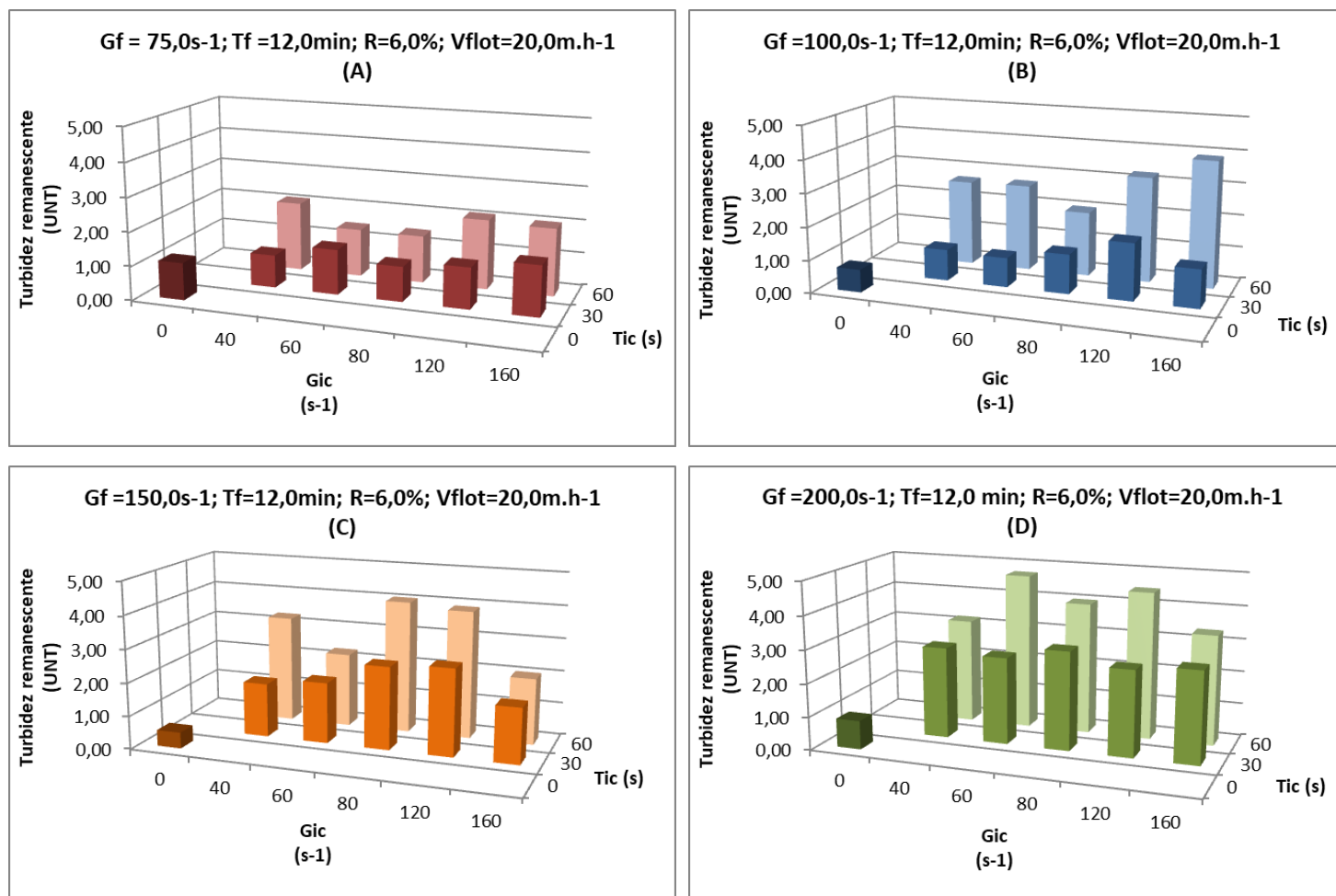
Tal alteração permitiu, assim, aumentar o intervalo de tempo entre o fim de  $T_{IC}$  e o momento de coleta, maximizando a relação entre os tempos de coleta representativos de cada valor de  $V_{flot}$  e os valores de  $T_{IC}$  investigados. Isso diminuiu eventual interferência negativa de  $T_{IC}$  sobre os valores reais de  $V_{flot}$  nas colunas de flotação operando em regime de alimentação por batelada.

A análise dos resultados obtidos para remoção de turbidez foi exposta no tópico a seguir, e na sequência a análise dos resultados para remoção de cor aparente.

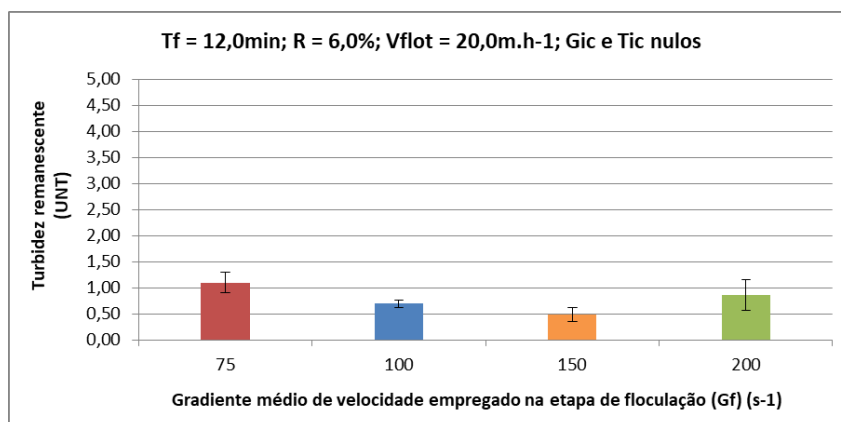
### 5.2.1 Análise dos residuais de turbidez

Partindo-se da organização dos dados residuais de turbidez com base na maior das três velocidades de flotação ( $V_{flot}$ ) exploradas ( $20,0m.h^{-1}$  ou  $33,3cm.min^{-1}$ ) na Etapa 02, representativa do mais alto nível de estresse imposto ao processo investigado, foram estruturadas as Figuras 27 a 30, expostas a seguir. Os valores residuais de turbidez foram expressos em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT).

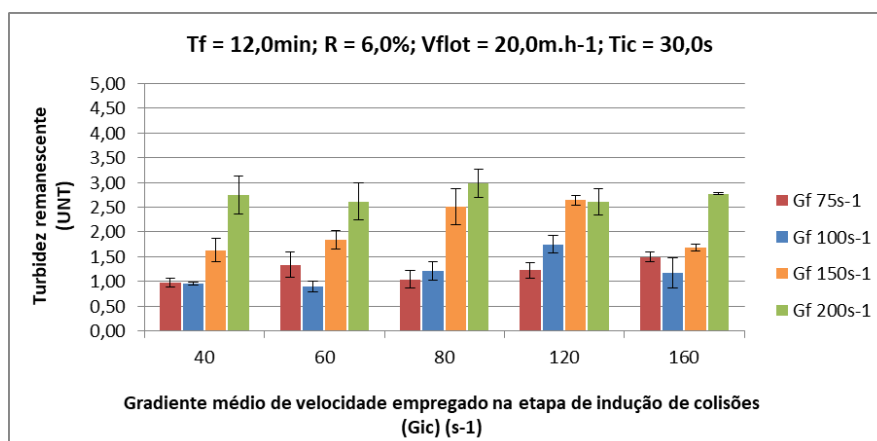
**Figura 27** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 20,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ (A),  $100\text{s}^{-1}$ (B),  $150\text{s}^{-1}$ (C) e  $200\text{s}^{-1}$ (D);  $T_f$  de 12,0 minutos).



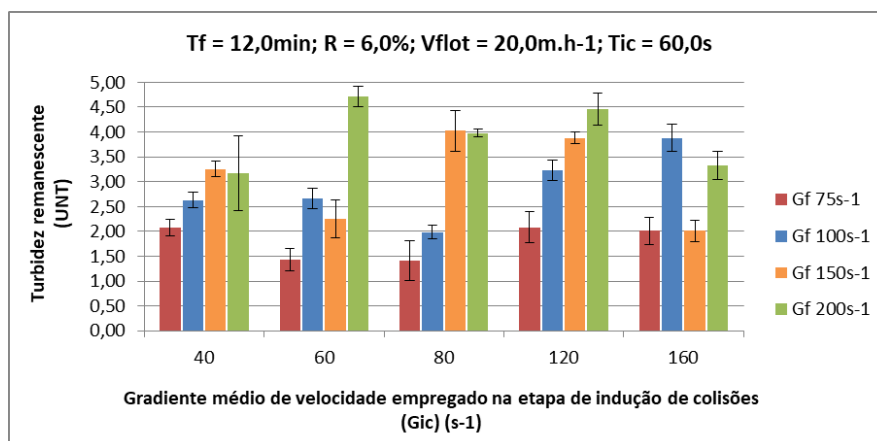
**Figura 28** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e  $V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



**Figura 29** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 30,0s e  $V_{flot}$  de 20,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



**Figura 30** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 60,0s e  $V_{flot}$  de 20,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



A análise conjunta das Figuras 27 (A, B, C e D) a 30, características dos resultados obtidos para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , permitiu notar que, dentre os quatro gradientes médios de velocidade explorados na floculação ( $G_f$ ) ( $75,0\text{s}^{-1}$ ;  $100,0\text{s}^{-1}$ ;  $150,0\text{s}^{-1}$ ;  $200,0\text{s}^{-1}$ ), o  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  foi o único para o qual a associação da Flotação por Ar Dissolvido (FAD) ao processo de indução mecânica de colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas produziu os menores residuais de turbidez registrados.

Para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , os dois melhores desempenhos associados ao  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  foram alcançados com os pares  $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$ ;  $30,0\text{s}$  e  $80,0\text{s}^{-1}$ ;  $30,0\text{s}$ , com residuais de  $0,97 \pm 0,09\text{UNT}$  (85,3% de eficiência de remoção) e  $1,04 \pm 0,17\text{UNT}$  (84,3% de eficiência de remoção), respectivamente. O cenário de desempenho alcançado a partir da implementação do processo de FAD na ausência da fase de indução de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) associou-se a residual de  $1,10 \pm 0,19\text{UNT}$ , equivalente a 83,5% de eficiência de remoção (Figuras 28 e 29).

A análise dos dados obtidos a partir dos outros três valores de  $G_f$  investigados ( $100,0\text{s}^{-1}$ ;  $150,0\text{s}^{-1}$ ;  $200,0\text{s}^{-1}$ ), e também para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  (Figura 27, B, C e D) permitiu notar que os cenários de desempenho alcançados pelo processo de FAD na ausência da fase de indução de colisões foram os mais favoráveis, gerando os menores residuais de turbidez e associando-se às maiores eficiências de remoção. Sendo assim, o cenário de ausência de indução de colisões garantiu os residuais de  $0,69 \pm 0,07\text{UNT}$  (89,5% de eficiência de remoção) para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ ;  $0,48 \pm 0,13\text{UNT}$  (92,7% de eficiência de remoção) para  $G_f$  de  $150,0\text{s}^{-1}$ ; e  $0,86 \pm 0,29\text{UNT}$  (87,0% de eficiência de remoção) para  $G_f$  de  $200,0\text{s}^{-1}$  (Figura 28).

Em adição e ainda para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , a observação da Figura 27 (A, B, C e D) mostrou que, independentemente do valor de  $G_f$  investigado ( $75,0\text{s}^{-1}$ ;  $100,0\text{s}^{-1}$ ;  $150,0\text{s}^{-1}$  ou  $200,0\text{s}^{-1}$ ), a aplicação de intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{\text{IC}}$ ) de  $30,0\text{s}$  associou-se a residuais de turbidez inferiores aos obtidos a partir de  $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}$  em todos os casos, com os piores desempenhos registrados associados à imposição de  $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}$ .

No intuito de facilitar a interpretação dos resultados de remoção de turbidez alcançados para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  foi estruturada a Tabela 11, exposta a seguir, que evidencia os valores residuais médios alcançados para cada  $G_f$  imposto em função de três cenários distintos: o cenário A, de ausência de indução de colisões; o cenário B, de melhores desempenhos registrados com a indução de colisões; e cenário C, de piores desempenhos.



**Tabela 11** - Comparação entre valores residuais médios de turbidez obtidos na Etapa 02 para os cenários de ausência de indução de colisões (A); ótimos desempenhos com indução de colisões (B) e piores desempenhos registrados (C), para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ .

$V_{\text{flot}} = 20,0\text{m.h}^{-1}; R = 6,0\%$								
Gf ( $\text{s}^{-1}$ )	Tf (min)	Cenário A: ausência de indução de colisões		Cenário B: melhores desempenhos com indução de colisões		Cenário C: piores desempenhos		B - A
		$G_{\text{IC}};T_{\text{IC}}$ ( <sup>(1)</sup> )	Residual (UNT)	$G_{\text{IC}};T_{\text{IC}}$ ( <sup>(1)</sup> )	Residual (UNT)	$G_{\text{IC}};T_{\text{IC}}$ ( <sup>(1)</sup> )	Residual (UNT)	
75,0	12,0	0;0	1,10	40;30	0,97	120;60	2,08	-0,13
100,0		0;0	0,69	60;30	0,90	160;60	3,88	0,21
150,0		0;0	0,48	40;30	1,63	80;60	4,03	1,15
200,0		0;0	0,86	120;30	2,61	60;60	4,71	1,75

**Observações:** (1) As unidades dos valores de  $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  expostos são iguais a  $\text{s}^{-1}$  e s, nesta ordem;  
(2) Diferença entre os valores residuais médios de turbidez do cenário B e os valores obtidos no cenário A.

A análise dos dados residuais médios de turbidez expostos na Tabela 11, mais especificamente dos relativos aos cenários de ausência de indução de colisões (cenário A) e de melhor desempenho alcançado com a imposição do processo de indução de colisões (cenário B), permitiu notar que os resultados de remoção alcançados foram significativos, mesmo para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , representativa de alta taxa de aplicação superficial quando comparada a sistemas operados em escala plena ( $480,0 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ ).

Como é possível observar, nenhum dos residuais associados ao cenário de ausência de indução de colisões (cenário A) ultrapassou 1,10UNT, independentemente do valor de Gf imposto, com valores até mesmo inferiores a 0,50UNT (Gf de  $150,0\text{s}^{-1}$ ). Quanto ao cenário B, deve-se dar destaque aos desempenhos associados aos valores de Gf de  $75,0\text{s}^{-1}$  e  $100,0\text{s}^{-1}$ , ambos com residuais de turbidez inferiores a 1,0UNT. Levando-se em consideração que a turbidez média da água bruta de estudo produzida para a execução da Etapa 02 foi de  $6,64 \pm 0,28\text{UNT}$ , residuais iguais ou menores que 1,0UNT e que 0,5UNT representam eficiências de remoção iguais ou superiores a 85,0% e a 92,5%, respectivamente.

Tal constatação representa evidência de que a FAD é capaz de operar com elevada eficiência, mesmo quando associada a altas taxas de aplicação superficial, desde que os processos precedentes de coagulação e floculação encontrem-se devidamente otimizados.

Em adição, a observação atenta dos dados da Tabela 11 possibilitou a identificação de tendência de aumento da diferença entre os residuais de turbidez obtidos para os cenários de ausência de indução de colisões (A) e de desempenho ótimo alcançado por meio da imposição da fase de indução de colisões no início da FAD (B), representada na tabela pela coluna “B – A”, à medida que o valor de  $G_f$  imposto foi incrementado de  $75,0s^{-1}$  a  $200,0s^{-1}$ .

Acredita-se que tal constatação represente evidência do aumento do caráter desfavorável assumido pela imposição da fase de indução de colisões com a elevação do valor de  $G_f$  aplicado, para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ . A tentativa de interpretação de tal fenômeno será implementada mais a frente, na Seção 5.2.3, com base nos comportamentos observados também para os residuais de cor aparente.

A observação dos dados da Tabela 11 possibilitou também reforçar comportamento anteriormente identificado e relativo à associação de  $T_{IC}$  de 60,0s aos cenários de pior desempenho registrados para remoção de turbidez para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , como evidenciado por meio do cenário C, exposto na tabela.

Tendo como base os dados reunidos na Tabela 11 foram implementadas análises dedicadas a dar embasamento estatístico a constatações realizadas a partir da comparação entre os valores residuais de turbidez obtidos, com o software utilizado para tanto tendo sido o *PAST® (PAleontological SStatistics)*.

Todas as análises estatísticas realizadas ao longo deste estudo tiveram como foco principal a comparação entre o cenário de imposição do processo de flotação por ar dissolvido na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e o cenário ótimo obtido a partir da imposição da fase de indução mecânica de colisões no início da FAD. A ideia central foi a de verificar, com base na investigação em escala de bancada e nos parâmetros experimentais explorados, se o melhor cenário de indução de colisões teria sido capaz de superar o de ausência de indução em termos de desempenho.

Sendo assim, as análises estatísticas aplicadas ao longo de todo o trabalho foram organizadas em três segmentos:

- (i) Comparações entre valores residuais característicos dos cenários de ausência e de presença ótima de indução de colisões, específicos para cada  $G_f$  explorado;

- (ii) Comparações entre o valor residual característico do cenário ótimo de indução de colisões obtido para um Gf específico e o residual característico do cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) obtido para o valor de Gf imediatamente superior (comparações dos residuais dos cenários ótimos de indução obtidos para Gf de  $75,0s^{-1}$ ,  $100,0s^{-1}$  e  $150,0s^{-1}$  com os residuais dos cenários de ausência de indução de colisões obtidos para Gf de  $100,0s^{-1}$ ,  $150,0s^{-1}$  e  $200,0s^{-1}$ , respectivamente, nesta etapa);
- (iii) Comparação entre os valores residuais obtidos por Gf exclusivamente a partir do cenário de ausência de indução de colisões (para o caso de nenhum dos cenários de indução de colisões explorados para cada Gf ter sido capaz de superar o de ausência).

A motivação associada ao segundo segmento de análises estatísticas (ii) residiu na busca pela máxima eficiência do processo com base na maior economia de recursos (financeiros e energéticos).

A ideia foi a de verificar se a associação entre um valor de Gf específico e a fase de indução de colisões no início da FAD (atrelada à imposição de agitação mecânica por intervalo de tempo reduzido, de apenas alguns segundos) teria sido capaz de alcançar desempenho igual ou superior ao obtido a partir da imposição de Gf mais alto (ligado a maior gasto energético) e da FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões microbolhas-flocos.

As análises estatísticas aplicadas aos valores residuais de turbidez evidenciados na Tabela 11, característicos da exploração da  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$  na Etapa 02, foram reunidas no Apêndice B.

Os resultados das análises não permitiram constatar diferença estatisticamente significativa entre os residuais característicos do cenário ótimo de indução de colisões (cenário B) e do cenário de ausência de indução (cenário A) para Gf de  $75,0s^{-1}$ , com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%. Quanto aos outros três valores de Gf explorados, os resultados estatísticos refletiram as diferenças entre residuais dos cenários A e B, evidenciando que nenhum dos desempenhos ótimos alcançados com a fase de indução de colisões foi capaz de superar o desempenho alcançado pela FAD na ausência de indução mecânica de colisões, por Gf.

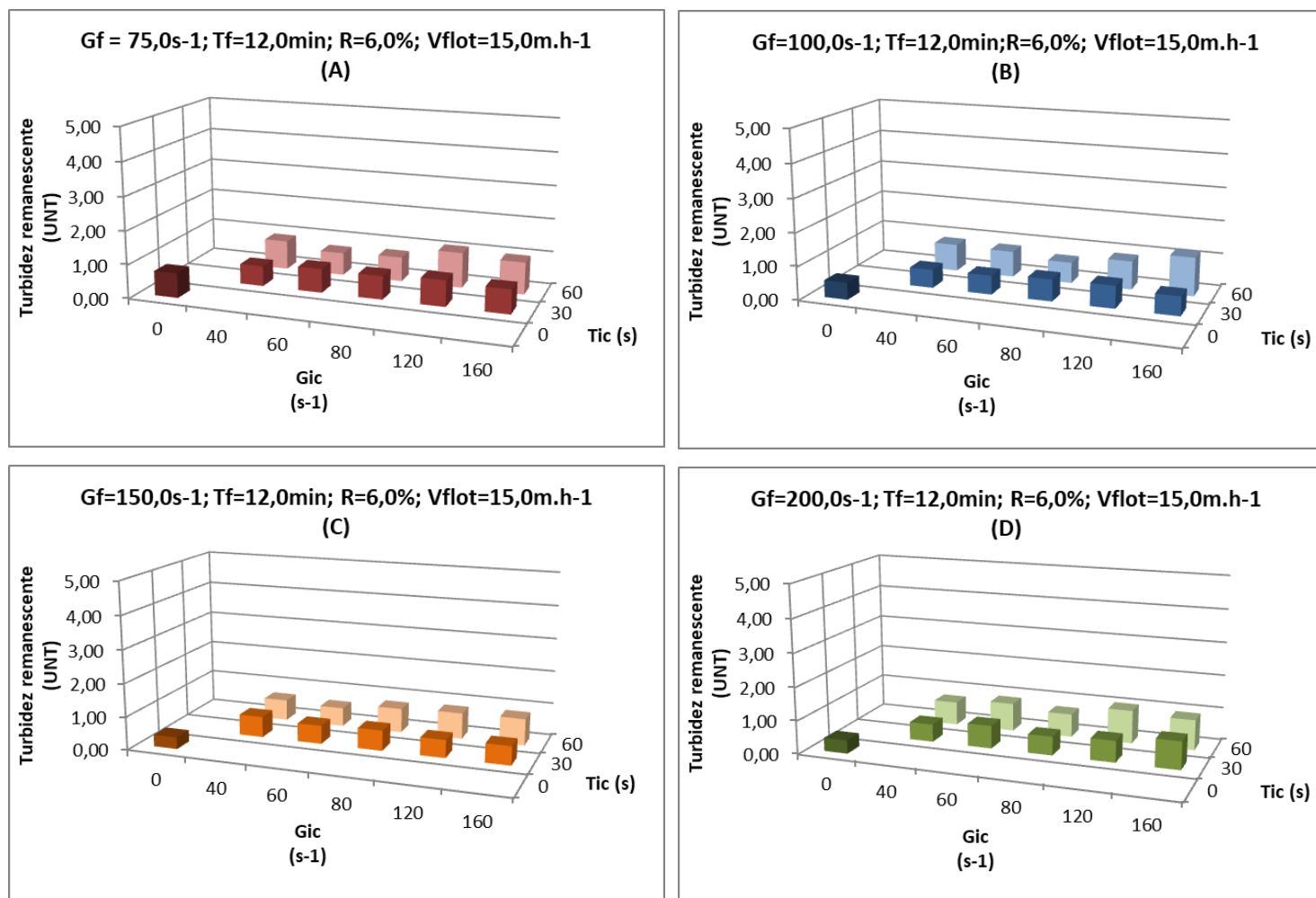
Em complemento e ainda para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , foi verificada a existência de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais de turbidez característicos dos cenários ótimos de indução de colisões obtidos por Gf e os cenários de ausência de indução de colisões obtidos por valor de Gf imediatamente superior, como sugere a comparação entre os respectivos valores residuais de turbidez (Tabela 11). A diferença constatada foi a favor do cenário de ausência de indução, atrelado aos menores residuais.

Em adição, as análises do Apêndice B para turbidez e  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 02 revelaram que, quando comparados os residuais obtidos por Gf exclusivamente para o cenário de ausência de indução de colisões, foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre os residuais de turbidez característicos da imposição de Gf de  $75,0\text{s}^{-1}$  e  $150,0\text{s}^{-1}$ .

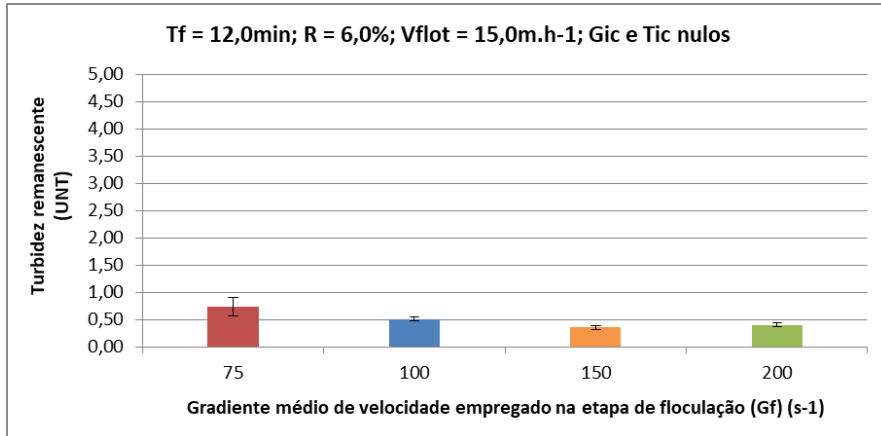
É interessante destacar, neste contexto, que o menor valor de turbidez residual média identificado para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 02 foi alcançado a partir de Gf de  $150,0\text{s}^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões, e não foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre este residual e o alcançado a partir de Gf de  $100,0\text{s}^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões.

Os resultados de remoção de turbidez característicos dos valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$  foram representados por meio das Figuras 31 a 38, expostas a seguir.

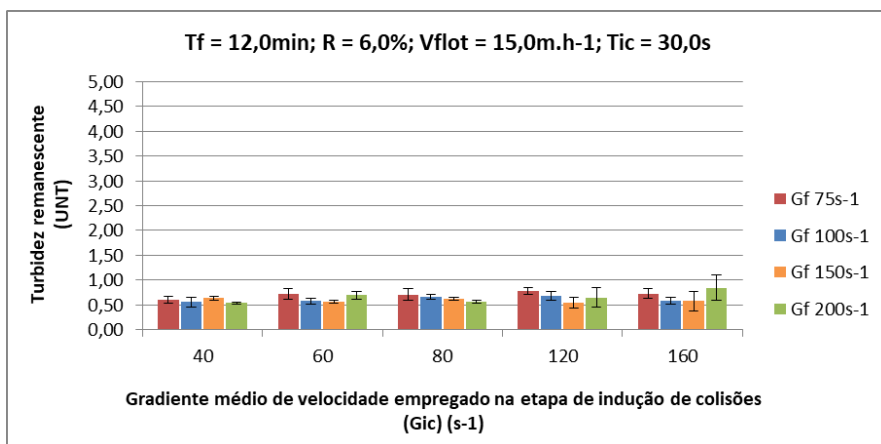
**Figura 31** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ (A),  $100\text{s}^{-1}$ (B),  $150\text{s}^{-1}$ (C) e  $200\text{s}^{-1}$ (D);  $T_f$  de 12,0 minutos).



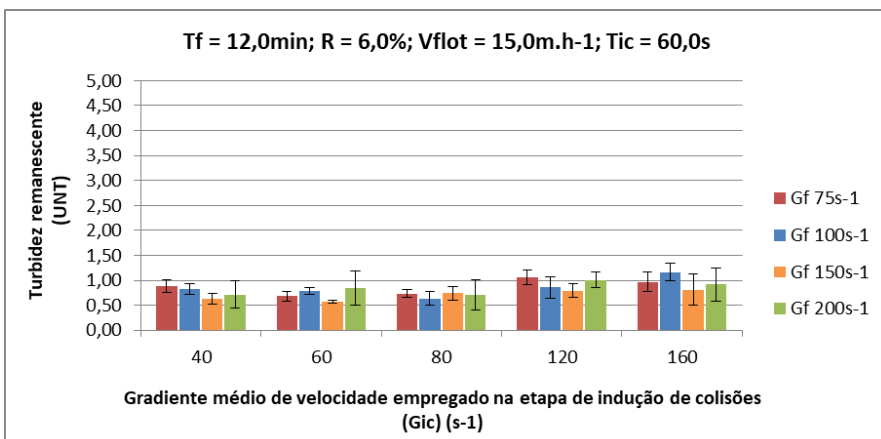
**Figura 32** - Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e  $V_{flot} = 15,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



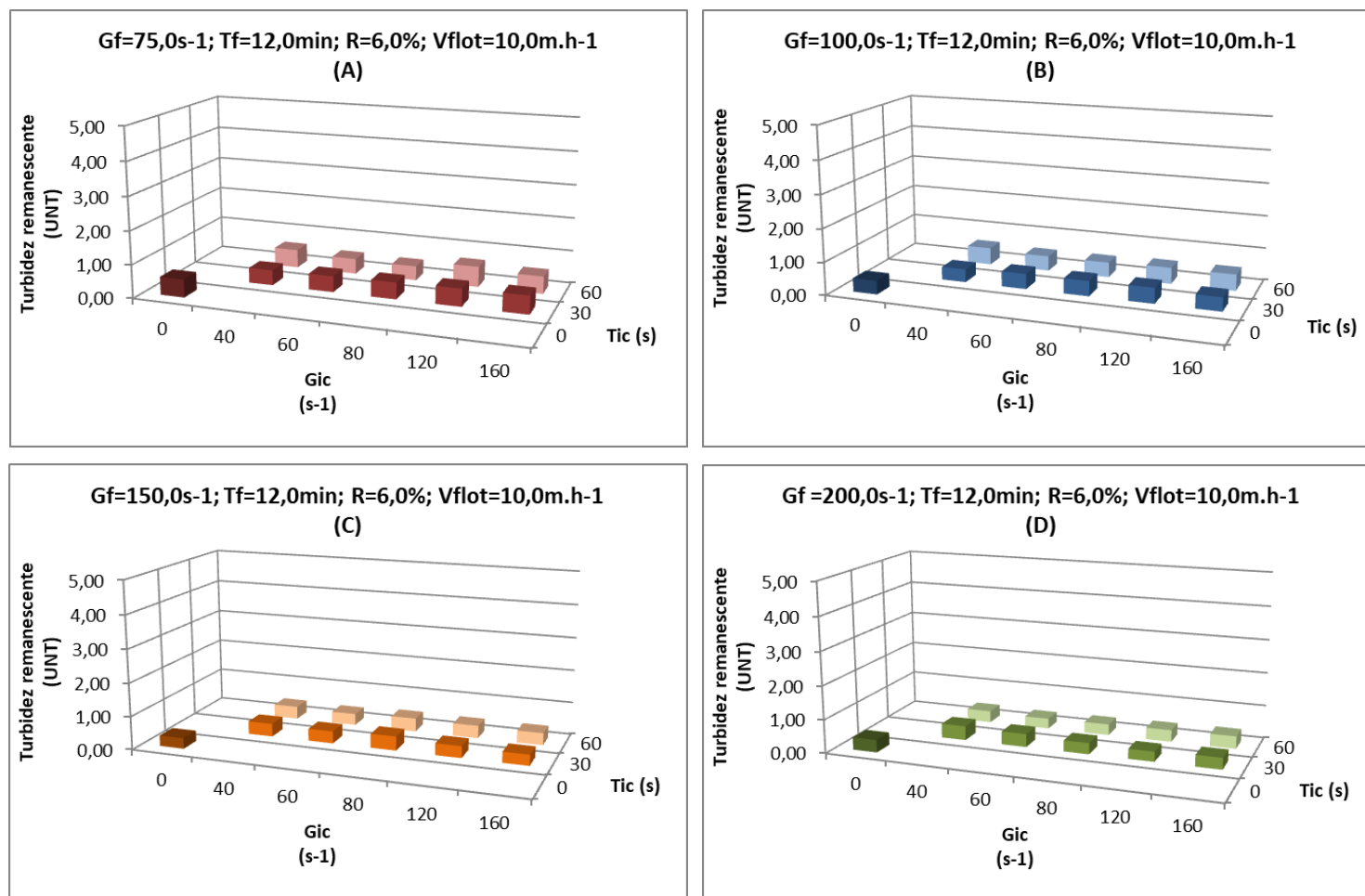
**Figura 33** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 30,0s e  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



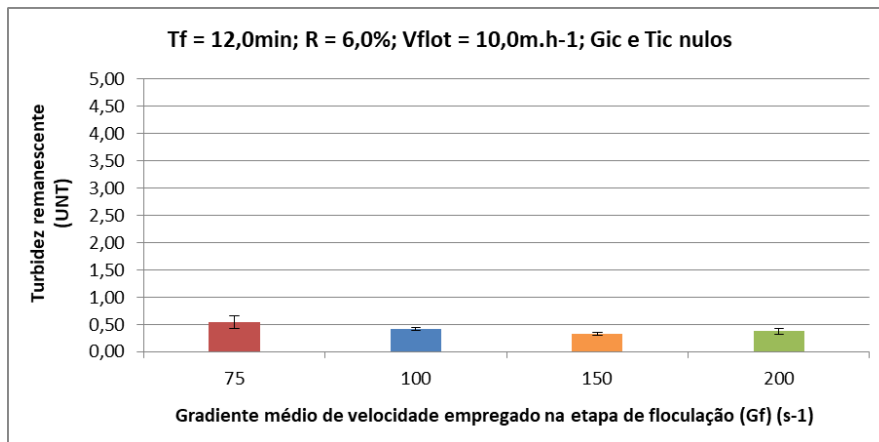
**Figura 34** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 60,0s e  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



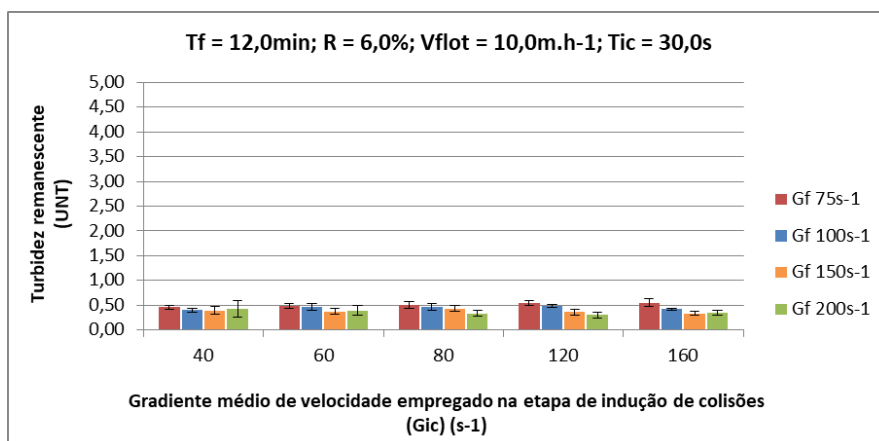
**Figura 35** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 10,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ (A),  $100\text{s}^{-1}$ (B),  $150\text{s}^{-1}$ (C) e  $200\text{s}^{-1}$ (D);  $T_f$  de 12,0minutos).



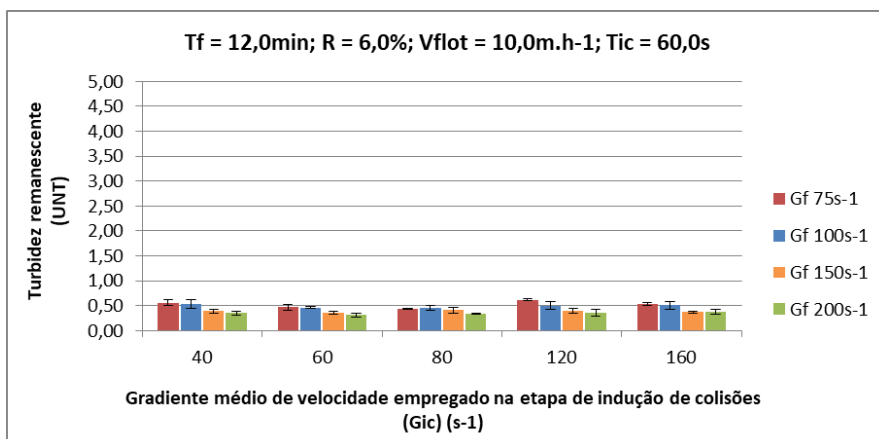
**Figura 36** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e  $V_{flot} = 10,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



**Figura 37** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 30,0s e  $V_{flot}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



**Figura 38** – Representação gráfica dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 60,0s e  $V_{flot}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.





Levando-se em consideração o menor valor de  $G_f$  explorado ( $75,0s^{-1}$ ) e  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , a análise das Figuras 31 (A) e 33 permitiu notar que o melhor desempenho para remoção de turbidez foi alcançado por meio do par  $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$ ;  $30,0s$  (de forma semelhante ao observado para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ ), com residual de  $0,60 \pm 0,06UNT$  e  $90,9\%$  de eficiência de remoção. Já o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ , tendo como base a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , associou-se a residual de  $0,73 \pm 0,17UNT$  e  $88,9\%$  de eficiência de remoção (Figura 32).

Para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ , os dois melhores desempenhos foram atribuídos aos pares  $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $80,0s^{-1}$ ;  $60,0s$  e  $40,0s^{-1}$ ;  $30,0s$ , com residuais de  $0,43 \pm 0,02UNT$  ( $93,5\%$  de eficiência de remoção) e  $0,46 \pm 0,04UNT$  ( $93,1\%$  de eficiência de remoção), respectivamente (Figuras 37 e 38). O cenário de ausência de indução de colisões para  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$  e  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  associou-se a residual de  $0,54 \pm 0,11UNT$  e  $91,8\%$  de eficiência de remoção (Figura 36).

Quando explorados os valores de  $G_f$  de  $100$ ,  $150$  e  $200s^{-1}$  para  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , a imposição da FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) garantiu os melhores desempenhos registrados para remoção de turbidez, produzindo residuais de  $0,51 \pm 0,04UNT$  para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  ( $92,3\%$  de eficiência de remoção),  $0,35 \pm 0,03UNT$  para  $G_f$  de  $150,0s^{-1}$  ( $94,6\%$  de eficiência de remoção) e  $0,40 \pm 0,04UNT$  para  $G_f$  de  $200,0s^{-1}$  ( $94,0\%$  de eficiência de remoção) (Figuras 31 (B, C e D) e 32).

Comportamento similar foi identificado quanto aos resultados de remoção de turbidez obtidos para os valores de  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ ,  $150,0s^{-1}$  e  $200,0s^{-1}$  a partir de  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ , com o cenário característico da ausência de indução de colisões garantindo o menor residual de turbidez para  $G_f$  de  $150,0s^{-1}$  ( $0,32 \pm 0,03UNT$  e  $95,2\%$  de eficiência de remoção); o segundo menor residual para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  ( $0,42 \pm 0,03UNT$  e  $93,7\%$  de eficiência de remoção), apenas  $0,02UNT$  acima do menor residual registrado ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$ ;  $30,0s$ ); e  $0,37 \pm 0,05UNT$  ( $94,4\%$  de eficiência de remoção) de turbidez residual para  $G_f$  de  $200,0s^{-1}$ , apenas  $0,07UNT$  acima do menor residual registrado ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $120,0s^{-1}$ ;  $30,0s$ ) (Figuras 35 (B, C e D), 36 e 37).

De maneira semelhante à realizada para a análise dos resultados de remoção de turbidez associados à  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , estruturou-se a Tabela 12, exposta a seguir, que permitiu explorar os resultados apresentados por meio das Figuras 31 a 38 (obtidos para os valores de

$V_{\text{flot}}$  de 15,0 e 10,0m.h<sup>-1</sup>) com base na comparação entre o cenário de ausência de indução de colisões e o de melhor desempenho registrado com imposição da fase de indução de colisões, para cada Gf explorado.

**Tabela 12** - Comparação entre valores residuais médios de turbidez obtidos para os cenários de ausência de indução de colisões e de melhor desempenho registrado por meio da imposição da fase de indução de colisões (cenário ótimo) para  $V_{\text{flot}}$  de 15,0m.h<sup>-1</sup> e 10,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.

Gf (s <sup>-1</sup> )	Tf (min)	$V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}; R = 6,0\%$				$V_{\text{flot}} = 10,0\text{m.h}^{-1}; R = 6,0\%$			
		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões	
		G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub>	Residual	G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub>	Residual	G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub>	Residual	G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub>	Residual
		(1)	(UNT)	(1)	(UNT)	(1)	(UNT)	(1)	(UNT)
75,0	12,0	0;0	0,73	40;30	0,60	0;0	0,54	80;60	0,43
100,0		0;0	0,51	40;30	0,56	0;0	0,42	40;30	0,40
150,0		0;0	0,35	120;30	0,54	0;0	0,32	160;30	0,33
200,0		0;0	0,40	40;30	0,53	0;0	0,37	120;30	0,30

**Observação:** (1) As unidades dos valores de G<sub>IC</sub> e T<sub>IC</sub> expressos são iguais a s<sup>-1</sup> e s, nesta ordem.

A análise dos dados da Tabela 12 permitiu reforçar, em primeiro lugar, o significativo potencial de remoção de turbidez por parte da Flotação por Ar Dissolvido (FAD), já destacado para os resultados associados à  $V_{\text{flot}}$  de 20,0m.h<sup>-1</sup> e agora ainda mais marcante no contexto de exploração de valores de  $V_{\text{flot}}$  de 15,0 e 10,0m.h<sup>-1</sup>. Dentre os residuais destacados pela Tabela 12, obtidos na ausência e na presença (ótima) da fase de indução de colisões, nenhum deles foi superior a 0,73UNT, com a obtenção de valores tão baixos quanto 0,35UNT (Gf de 150,0s<sup>-1</sup> e G<sub>IC</sub> e T<sub>IC</sub> nulos) para a  $V_{\text{flot}}$  de 15,0m.h<sup>-1</sup> e 0,30UNT (Gf de 200,0s<sup>-1</sup> e G<sub>IC</sub>; T<sub>IC</sub> de 120,0s<sup>-1</sup>; 30,0s) para a  $V_{\text{flot}}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup>, equivalentes a 94,6% e 95,5% de eficiência de remoção de turbidez.

Tal constatação soma-se às estabelecidas para os resultados obtidos com  $V_{\text{flot}}$  de 20,0m.h<sup>-1</sup> e contribui para reiterar o caráter robusto e versátil característico da tecnologia de FAD, capaz de garantir elevada eficiência de remoção de turbidez mesmo quando aplicadas altas taxas de aplicação superficial (até 20,0m.h<sup>-1</sup>, ou seja, 480,0m.dia<sup>-1</sup>, no presente estudo), desde que se encontrem devidamente otimizados os processos de coagulação e floculação precedentes.

De maneira similar ao observado para os resultados alcançados com Gf de 75,0s<sup>-1</sup> e  $V_{\text{flot}}$  de 20,0m.h<sup>-1</sup>, os residuais de turbidez obtidos para Gf de 75,0s<sup>-1</sup> e característicos do cenário ótimo de indução de colisões mostraram-se inferiores aos alcançados com o cenário de

ausência de indução, tanto para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  quanto para a de  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , como evidencia a Tabela 12.

Diferentemente do observado para com os resultados associados à  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , contudo, a análise dos dados da Tabela 12, característicos dos valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , não permitiu identificar tendência de aumento da diferença entre os residuais de turbidez obtidos para os cenários de ausência e de presença (ótima) de indução de colisões com o incremento de  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  a  $200,0\text{s}^{-1}$ . O que pode ser observado, inclusive, foi a redução das diferenças entre residuais característicos dos dois cenários citados (ausência e presença ótima de indução de colisões) com a diminuição dos valores de  $V_{\text{flot}}$  estudados. A análise dos dados das Tabelas 11 e 12 permite comprovar tal afirmação, reforçada com nitidez pela comparação entre as representações gráficas das Figuras 27, 31 e 35 (A, B, C e D).

Em adição, embora a observação das Figuras 31 e 35 (A, B, C e D), características dos valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , permita notar que os cenários de mais baixa eficiência alcançados para cada  $G_f$  explorado tenham permanecido atrelados a  $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}$  na quase totalidade dos casos, foi possível perceber que a diminuição das velocidades de flotação impostas (de  $20,0$  para  $15,0$  e para  $10,0\text{m.h}^{-1}$ ) reduziu a diferença entre os residuais característicos da aplicação de  $T_{\text{IC}}$  de  $30,0$  e  $60,0\text{s}$ , viabilizando até mesmo a associação deste ( $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}$ ) a um dos cenários ótimos de indução de colisões ( $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$ ,  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  e  $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $80,0\text{s}^{-1}$ ;  $60,0\text{s}$ ), fenômeno não identificado para os valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0$  e  $15,0\text{m.h}^{-1}$ .

Em complemento, o que pode ser notado em relação aos resultados obtidos para  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  e que não foi identificado para os valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0$  e  $15,0\text{m.h}^{-1}$ , foi a associação de dois pares  $G_{\text{IC}}; T_{\text{IC}}$  não nulos aos mínimos residuais de turbidez registrados para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e  $200,0\text{s}^{-1}$  (Tabela 12). Considerando-se os valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0$  e  $15,0\text{m.h}^{-1}$ , os mínimos residuais de turbidez identificados para os valores de  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ ,  $150,0\text{s}^{-1}$  e  $200,0\text{s}^{-1}$  mantiveram-se atrelados exclusivamente ao cenário de ausência de indução de colisões.

Acredita-se que os fenômenos descritos nos três últimos parágrafos estejam conectados e possam ser submetidos a tentativa de interpretação de forma conjunta, a qual será realizada na Seção 5.2.3, com base nos comportamentos observados também para os residuais de cor aparente.

As análises estatísticas aplicadas aos valores residuais de turbidez evidenciados na Tabela 12, característicos de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  e  $10,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  na Etapa 02, foram reunidas no Apêndice B.

De acordo com nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%, os resultados das análises não permitiram constatar diferença estatisticamente significativa entre os residuais característicos do cenário ótimo de indução de colisões e do cenário de ausência de indução ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) para  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$ , tanto para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  quanto para a de  $10,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ . Quanto aos outros três valores de  $G_f$  explorados neste contexto, as análises estatísticas de comparações mostraram que os residuais de turbidez obtidos com o cenário ótimo de indução de colisões foram estatisticamente superiores ou iguais ( $\alpha = 0,05$ ) aos obtidos na ausência da fase de indução de colisões, para cada  $G_f$ , para as  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  e  $10,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Especificamente para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ , não foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre o cenário ótimo de indução associado a  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  ( $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$ ;  $30,0\text{s}$ ) e o cenário de ausência de indução ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) associado a  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ . O mesmo foi verificado entre o cenário ótimo de indução associado a  $G_f$  de  $150,0\text{s}^{-1}$  ( $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $120,0\text{s}^{-1}$ ;  $30,0\text{s}$ ) e o cenário de ausência de indução ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) associado a  $G_f$  de  $200,0\text{s}^{-1}$ . Contudo, levando-se em conta a mesma  $V_{\text{flot}}$  ( $15,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ ), as análises realizadas permitiram notar a ausência de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais associados a  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  e  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ , e residuais de  $G_f$  de  $150,0\text{s}^{-1}$  e  $G_f$  de  $200,0\text{s}^{-1}$ , já para o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos).

Fenômeno semelhante foi observado a partir da aplicação de análises estatísticas às comparações entre residuais de turbidez obtidos com a  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  na Etapa 02, resultando na constatação de ausência de incremento de eficiência sobre o processo de FAD a partir da imposição da fase de indução de colisões.

Em complemento ao contexto de estudo exclusivamente do cenário de ausência de indução de colisões para remoção de turbidez, as análises estatísticas do Apêndice B para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  permitiram identificar diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre os residuais de turbidez associados a  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  e  $G_f$  de  $150,0\text{s}^{-1}$ , e associados a  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  e  $G_f$  de  $200,0\text{s}^{-1}$ . Mais uma vez, como para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ , o menor valor de turbidez residual média identificado para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  na Etapa 02 foi alcançado a partir de  $G_f$  de  $150,0\text{s}^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões, e não foi identificada

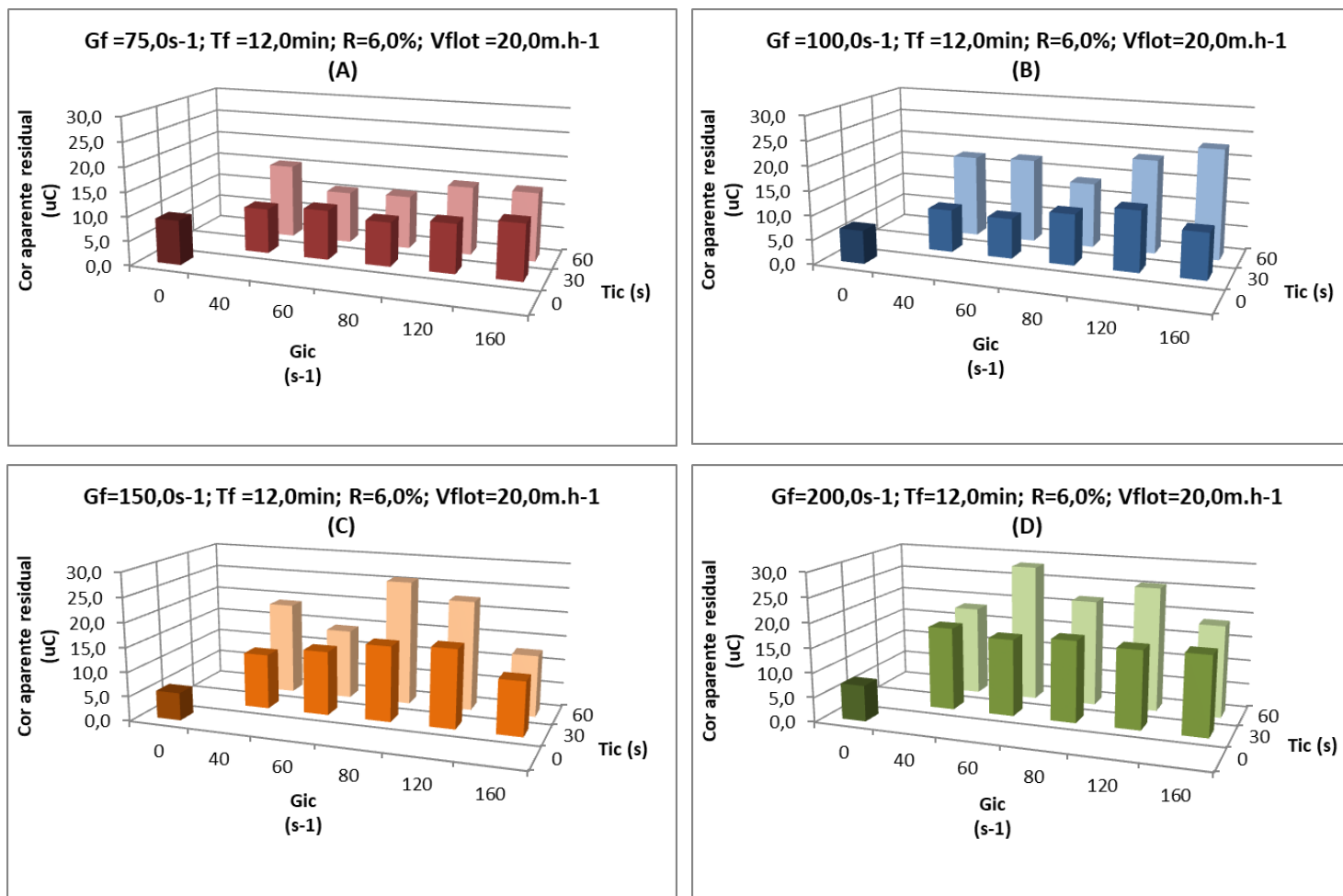
diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre este residual e o alcançado a partir de Gf de  $100,0s^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões.

Comportamento semelhante pode ser observado quanto aos dados característicos da  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0m.h^{-1}$  para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões. Contudo, neste caso, foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre os residuais de turbidez característicos da imposição de Gf de  $75,0s^{-1}$  e Gf de  $150,0s^{-1}$ .

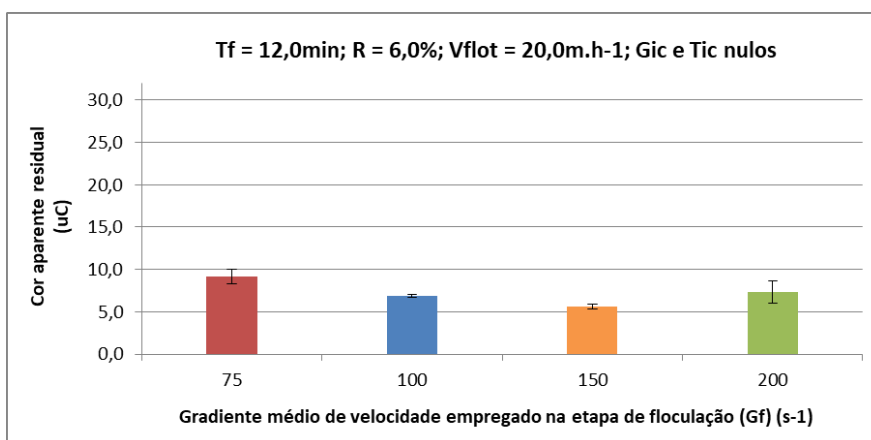
### 5.2.2 Análise dos residuais de cor aparente

Os dados residuais de cor aparente relativos ao cenário com velocidade de flotação ( $V_{\text{flot}}$ ) de  $20,0m.h^{-1}$  ( $33,3cm.min^{-1}$ ), representativo do mais alto grau de estresse operacional investigado, foram organizados e representados por meio das Figuras 39 a 42, expostas em sequência. Os valores residuais de cor aparente foram expressos em unidades de Cor (uC), em que cada unidade de cor equivale a  $1,0mg$  de Pt-Co.L<sup>-1</sup>.

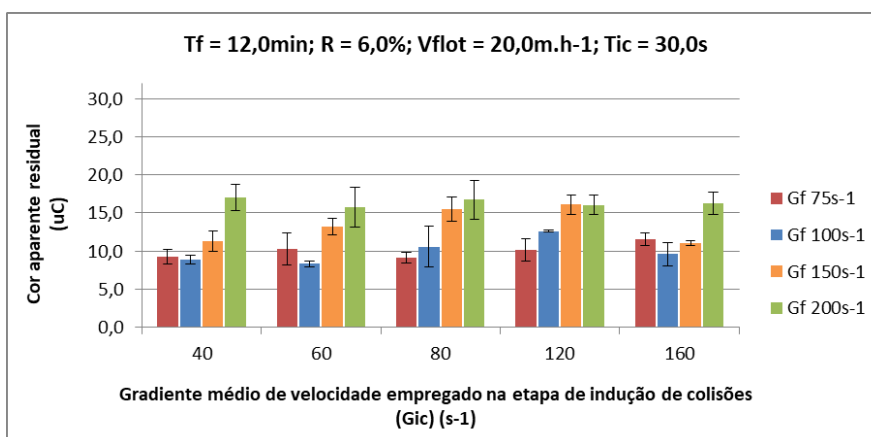
**Figura 39** – Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 20,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ (A),  $100\text{s}^{-1}$ (B),  $150\text{s}^{-1}$ (C) e  $200\text{s}^{-1}$ (D);  $T_f$  de 12,0 minutos).



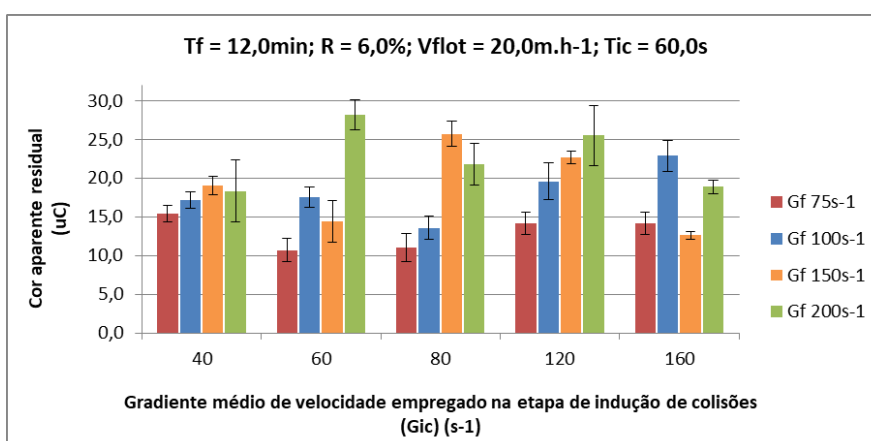
**Figura 40** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e  $V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



**Figura 41** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 30,0s e  $V_{flot}$  de 20,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



**Figura 42** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 60,0s e  $V_{flot}$  de 20,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



A análise das Figuras 39 a 42, relativas aos resultados para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , permitiu identificar que, de maneira semelhante ao observado para os dados de remoção de turbidez, a implementação do processo de indução mecânica de colisões no início da FAD foi capaz de garantir a mais alta eficiência de remoção de cor aparente registrada apenas para o menor dentre os quatro valores de  $G_f$  explorados ( $75,0\text{s}^{-1}$ ), levando-se em conta a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ . O melhor desempenho associado a  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  foi alcançado com o par  $G_{\text{IC}};T_{\text{IC}}$  de  $80,0\text{s}^{-1};30,0\text{s}$ , com residual de  $9,1 \pm 0,7\text{uC}$  (82,1% de eficiência de remoção). O cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) garantiu residual de  $9,2 \pm 0,9\text{uC}$  (82,0% de eficiência de remoção). (Figuras 40 e 41).

De maneira também semelhante ao observado com as análises de turbidez, os cenários de ausência da etapa de indução de colisões foram os mais eficientes para os valores de  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ ,  $150,0\text{s}^{-1}$  e  $200,0\text{s}^{-1}$ , para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ . Sendo assim, o cenário com  $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos garantiu os residuais de  $6,9 \pm 0,2\text{uC}$  (86,5% de eficiência de remoção) para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ ;  $5,6 \pm 0,3\text{uC}$  (89,0% de eficiência de remoção) para  $G_f$  de  $150,0\text{s}^{-1}$ ; e  $7,3 \pm 1,3\text{uC}$  (85,6% de eficiência de remoção) para  $G_f$  de  $200,0\text{s}^{-1}$  (Figura 40).

Em adição e ainda para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , a análise da Figura 39 (A, B, C e D) permitiu constatar que a imposição de intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{\text{IC}}$ ) de  $30,0\text{s}$  associou-se a valores residuais de cor aparente inferiores aos obtidos para  $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}$  em todos os casos explorados, independentemente do valor de  $G_f$  investigado ( $75,0\text{s}^{-1}$ ;  $100,0\text{s}^{-1}$ ;  $150,0\text{s}^{-1}$  ou  $200,0\text{s}^{-1}$ ), com os piores desempenhos registrados mais uma vez associados a  $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}$ , como observado para os dados de remoção de turbidez e  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ .

Para facilitar a interpretação dos resultados de remoção de cor aparente alcançados para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  foi estruturada a Tabela 13, exposta a seguir, que evidencia os residuais alcançados para cada  $G_f$  imposto em função de três cenários distintos: o cenário A, de ausência de indução de colisões; o cenário B, de melhores desempenhos registrados com a indução de colisões; e cenário C, de piores desempenhos.



**Tabela 13** - Comparação entre valores residuais médios de cor aparente obtidos na Etapa 02 para os cenários de ausência de indução de colisões (A); ótimos desempenhos com indução de colisões (B) e piores desempenhos registrados (C), para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ .

		$V_{\text{flot}} = 20,0\text{m.h}^{-1}; R = 6,0\%$						
Gf ( $\text{s}^{-1}$ )	Tf (min)	Cenário A: ausência de indução de colisões		Cenário B: melhores desempenhos com indução de colisões		Cenário C: piores desempenhos		B - A Diferença entre residuais <sup>(2)</sup> (uC)
		$G_{\text{IC}};T_{\text{IC}}$ <sup>(1)</sup>	Residual (uC)	$G_{\text{IC}};T_{\text{IC}}$ <sup>(1)</sup>	Residual (uC)	$G_{\text{IC}};T_{\text{IC}}$ <sup>(1)</sup>	Residual (uC)	
75,0	12,0	0;0	9,2	80;30	9,1	40;60	15,4	-0,1
100,0		0;0	6,9	60;30	8,3	160;60	22,9	1,4
150,0		0;0	5,6	160;30	11,0	80;60	25,7	5,4
200,0		0;0	7,3	60;30	15,8	60;60	28,1	8,5

Observações: (1) As unidades dos valores de  $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  expressos são  $\text{s}^{-1}$  e s, nesta ordem;

(2) Diferença entre os valores residuais médios de cor aparente do cenário B e os valores obtidos no cenário A.

A análise dos dados residuais de cor aparente característicos da Tabela 13 ( $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ ) permitiu notar resultados de remoção consideráveis, em especial para o cenário de ausência de indução de colisões (cenário A) e imposição de Gf de  $100,0\text{s}^{-1}$  e  $150,0\text{s}^{-1}$ . É interessante observar, neste contexto, que foram estes mesmos dois valores de Gf que estiveram associados aos menores residuais médios de turbidez obtidos para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  na ausência do processo de indução de colisões, com Gf de  $150,0\text{s}^{-1}$  mais uma vez atrelando-se ao mínimo residual alcançado.

O registro de valores residuais de cor aparente tão baixos quanto o de  $5,6\text{uC}$  (Gf  $150,0\text{s}^{-1}$  e  $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos), equivalente a eficiência de remoção de aproximadamente  $90,0\%$ , e de forma associada ao cenário de maior estresse operacional investigado ( $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ ) contribuiu para destacar a robustez da tecnologia de FAD para operar em elevada eficiência mesmo quando associada a altas taxas de aplicação superficial, desde que otimizados os processos precedentes de coagulação e de floculação (destaque para a importância da busca pela otimização tanto de Tf quanto de Gf).

Em complemento e de forma também semelhante ao observado para os residuais de turbidez para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , a análise dos dados da Tabela 13 possibilitou a identificação de tendência de aumento da diferença entre os residuais de cor aparente obtidos para os cenários de ausência de indução de colisões (cenário A) e de desempenho ótimo com indução

de colisões (cenário B), representada na tabela pela coluna “B – A”, à medida que o valor Gf foi incrementado de  $75,0s^{-1}$  a  $200,0s^{-1}$ .

Acredita-se que tal fenômeno represente, mais uma vez, evidência do aumento do caráter desfavorável assumido pela imposição da fase de indução de colisões com a elevação do valor de Gf imposto, para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ . A tentativa de interpretação de tal fenômeno se dará na Seção 5.2.3 e de forma conjunta para os resultados de remoção de turbidez e cor aparente.

De maneira também similar ao observado com os resultados de remoção de turbidez para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , a observação dos dados da Tabela 13 possibilitou destacar a associação de  $T_{IC}$  de 60,0s aos cenários de pior desempenho registrados para remoção de cor aparente por Gf estudado, para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$  (cenário C).

As análises estatísticas aplicadas aos valores residuais de cor aparente evidenciados na Tabela 13, característicos da exploração da  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$  na Etapa 02, foram reunidas no Apêndice B.

Os resultados das análises não permitiram constatar diferença estatisticamente significativa entre os residuais característicos do cenário ótimo de indução de colisões (cenário B) e do cenário de ausência de indução (cenário A) para Gf de  $75,0s^{-1}$ , com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%. Para os outros três valores de Gf explorados, as diferenças estatísticas entre residuais dos cenários A e B foram significativas ( $\alpha = 0,05$ ), evidenciando o cenário de ausência de indução mecânica de colisões (cenário A) como o mais efetivo em cada comparação.

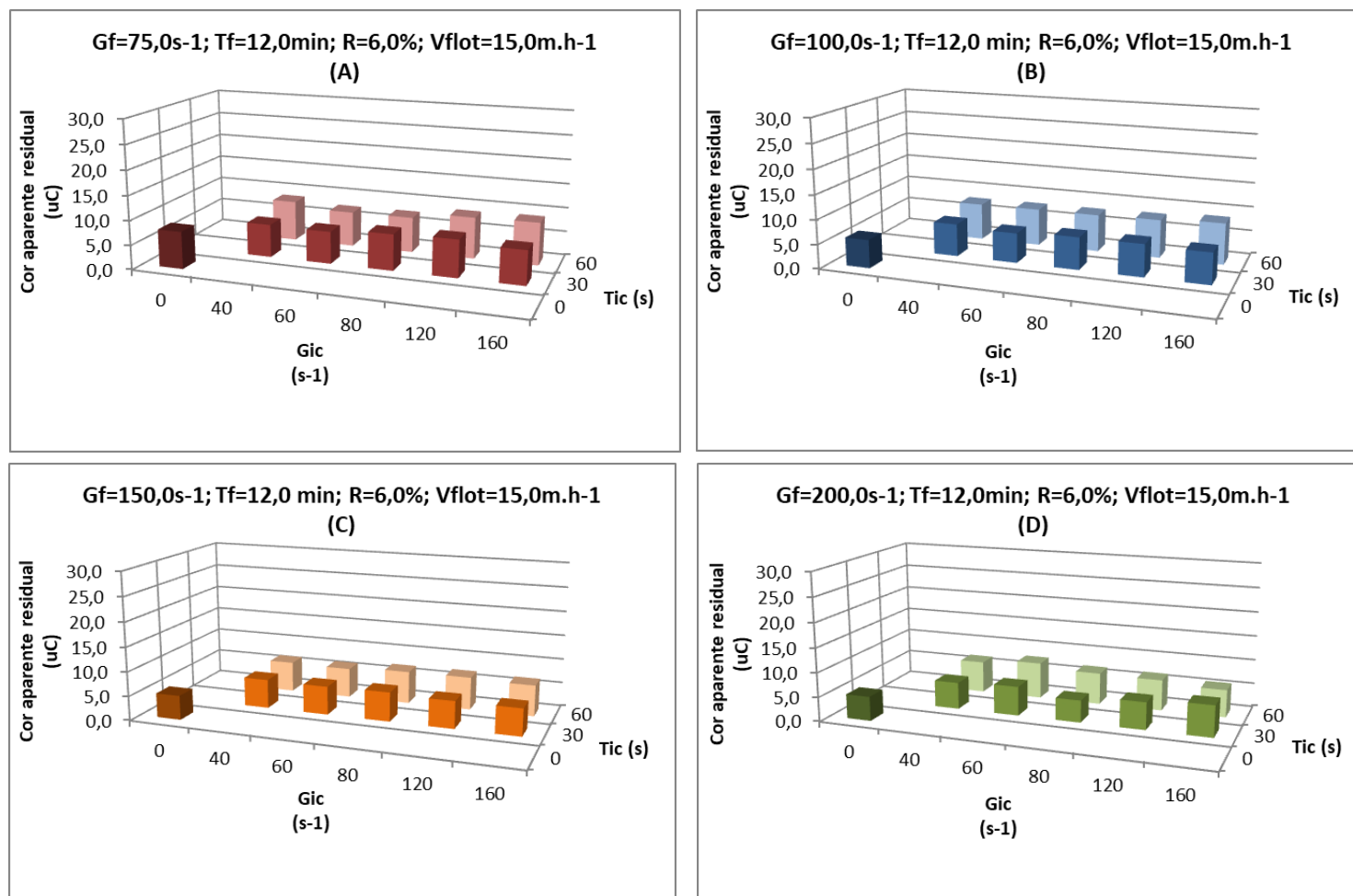
Como observado com a análise dos dados de turbidez para a  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , foi verificada a existência de diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais de cor aparente característicos dos cenários ótimos de indução de colisões obtidos por Gf e os cenários de ausência de indução de colisões obtidos por valor de Gf imediatamente superior, para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ . As diferenças constatadas foram novamente a favor dos cenários de ausência de indução, que se destacaram como os mais efetivos.

Em complemento, quando comparados os residuais obtidos por Gf exclusivamente para o cenário de ausência de indução de colisões e  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre os residuais de cor aparente característicos da imposição de Gf de  $75,0s^{-1}$  e  $150,0s^{-1}$ . Como observado para os dados de turbidez, o menor valor de cor aparente residual média identificado para a  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$

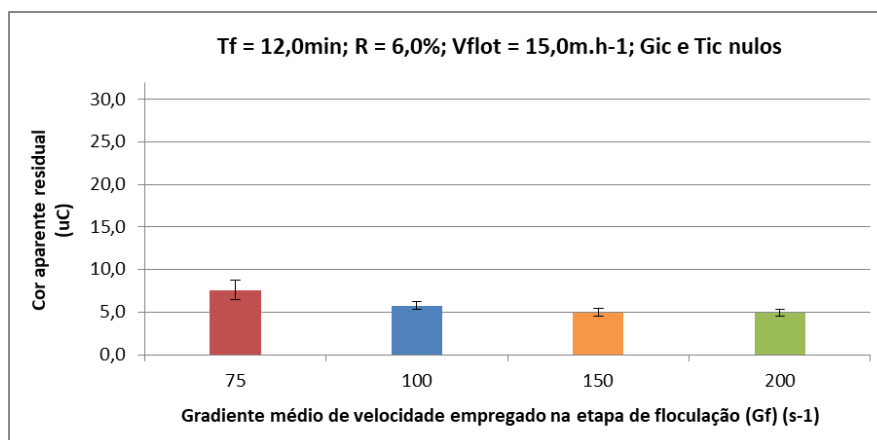
na Etapa 02 associou-se a  $Gf$  de  $150,0s^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões, não tendo sido identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre este residual e o alcançado a partir de  $Gf$  de  $100,0s^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões.

No que concerne aos residuais de cor aparente associados às velocidades de flotação ( $V_{\text{flot}}$ ) de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ , os resultados obtidos foram representados por meio das Figuras 43 a 50, expostas a seguir.

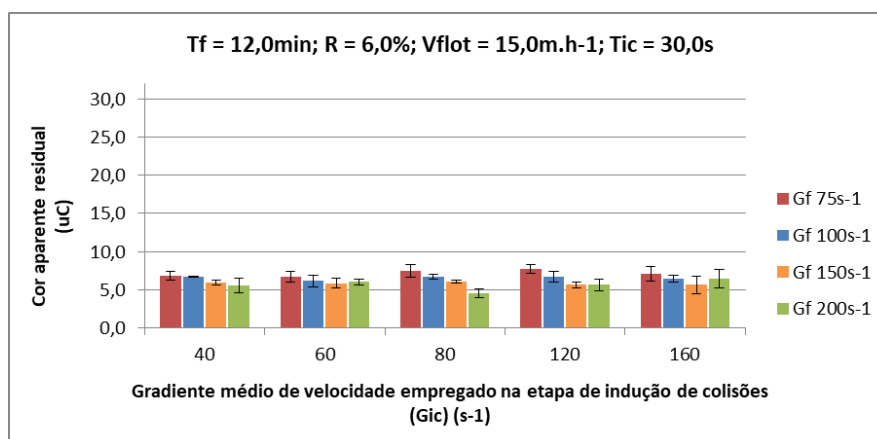
**Figura 43** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ (A),  $100\text{s}^{-1}$ (B),  $150\text{s}^{-1}$ (C) e  $200\text{s}^{-1}$ (D);  $T_f$  de 12,0 minutos).



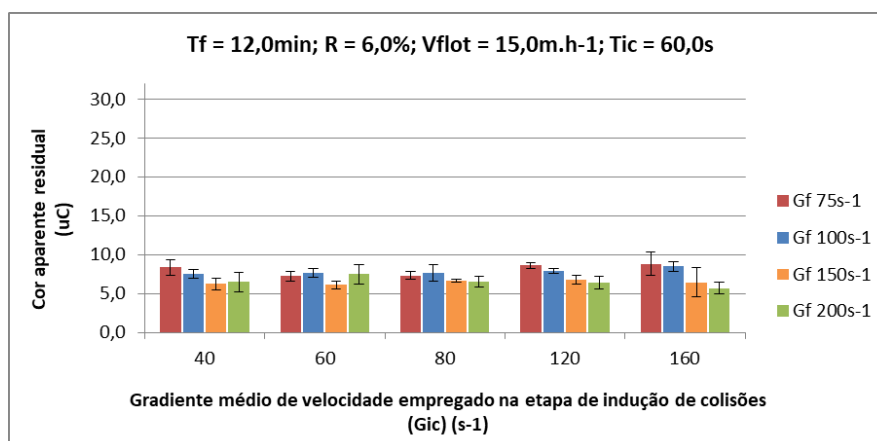
**Figura 44** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e  $V_{flot} = 15,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



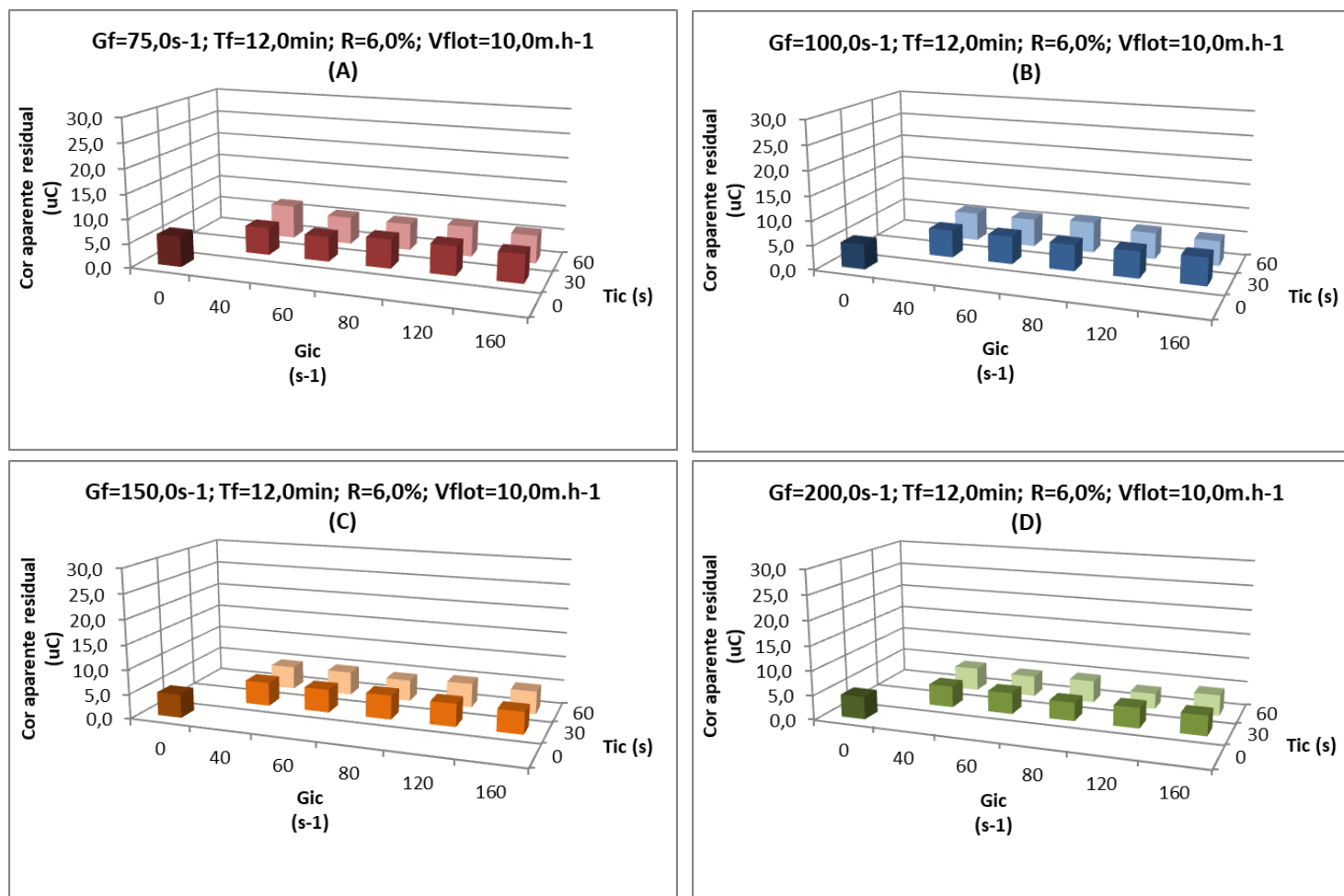
**Figura 45** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 30,0s e  $V_{flot}$  de 15,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



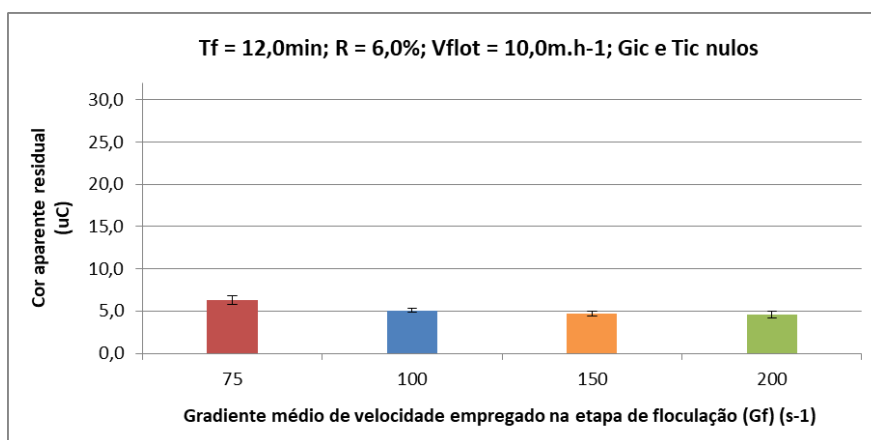
**Figura 46** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 60,0s e  $V_{flot}$  de 15,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



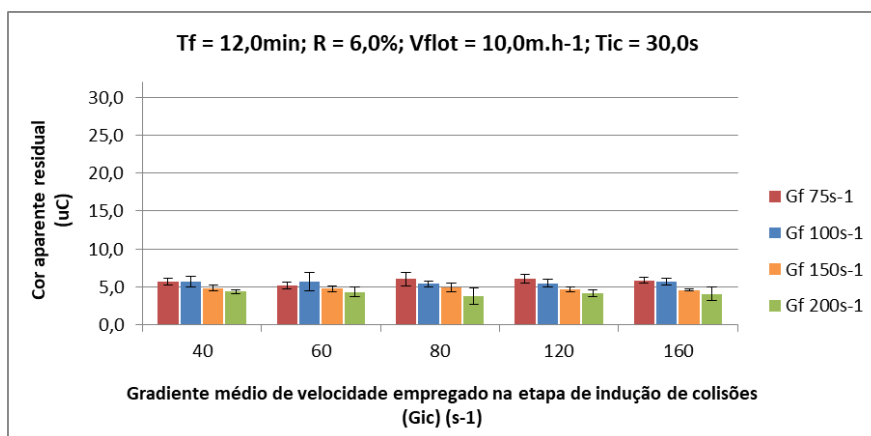
**Figura 47** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 02 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 10,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $75\text{s}^{-1}$ (A),  $100\text{s}^{-1}$ (B),  $150\text{s}^{-1}$ (C) e  $200\text{s}^{-1}$ (D);  $T_f$  de 12,0 minutos).



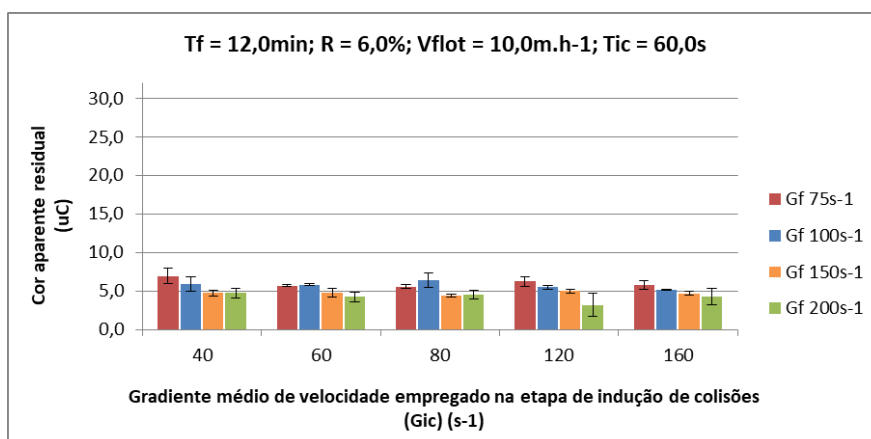
**Figura 48** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de ausência de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e  $V_{flot} = 10,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.



**Figura 49** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 30,0s e  $V_{flot}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



**Figura 50** - Representação gráfica dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para o cenário de imposição de  $T_{IC}$  de 60,0s e  $V_{flot}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup> na Etapa 02.



De maneira semelhante ao observado para os dados de remoção de cor aparente para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , a análise das Figuras 43 (A) e 47 (A) (características de resultados de remoção de cor aparente para os valores de  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ , respectivamente) permitiu notar que o cenário de imposição da fase de indução de colisões no início da FAD manteve-se atrelado aos mínimos residuais obtidos para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ . Os dois melhores desempenhos obtidos para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  foram alcançados a partir dos pares  $G_{IC};T_{IC}$  de  $60,0s^{-1};30,0s$  ( $6,6 \pm 0,7uC$  e 87,0% de eficiência de remoção) e  $40,0s^{-1};30,0s$  ( $6,8 \pm 0,6uC$  e 86,7% de eficiência de remoção), com o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) atrelando-se a residual de  $7,6 \pm 1,1uC$  (85,0% de eficiência de remoção) (Figuras 44 e 45).

Comportamento semelhante foi observado para  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ , em que os dois melhores desempenhos alcançados para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  associaram-se aos pares  $G_{IC};T_{IC}$  de  $60,0s^{-1};30,0s$  ( $5,2 \pm 0,5uC$  e 89,8% de eficiência de remoção) e  $80,0s^{-1};60,0s$  ( $5,6 \pm 0,2uC$  e 89,1% de eficiência de remoção). Já o cenário de ausência de indução de colisões para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$  associou-se a residual de  $6,2 \pm 0,5uC$  (87,7% de eficiência de remoção) (Figuras 48, 49 e 50).

No que diz respeito aos outros três valores de  $G_f$  explorados ( $100,0s^{-1}$ ;  $150,0s^{-1}$ ;  $200,0s^{-1}$ ) e  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) foi o mais eficiente para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  ( $5,8 \pm 0,4uC$  e 88,7% de eficiência de remoção) e  $G_f$  de  $150,0s^{-1}$  ( $5,0 \pm 0,5uC$  e 90,2% de eficiência de remoção), e o segundo mais eficiente para  $G_f$  de  $200,0s^{-1}$  ( $5,0 \pm 0,4uC$  e 90,2% de eficiência de remoção), com residual médio apenas  $0,4uC$  superior ao mínimo registrado ( $G_{IC}; T_{IC}$  de  $80,0s^{-1}; 30,0s$ ) (Figuras 44 e 45).

A análise dos residuais associados à  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$  revelou semelhança entre o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e de desempenho ótimo com indução de colisões ( $G_{IC}; T_{IC}$  de  $160,0s^{-1}; 60,0s$ ) para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  ( $5,1 \pm 0,2uC$  e 90,0% de eficiência de remoção). Ainda quanto à  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ , a observação das Figuras 47 (C e D) a 50 permitiu notar que os residuais de cor aparente obtidos com os cenários de ausência de indução de colisões e com  $G_f$  de  $150,0s^{-1}$  ( $4,7 \pm 0,3uC$  e 90,7% de eficiência de remoção) e  $G_f$  de  $200,0s^{-1}$  ( $4,6 \pm 0,4uC$  e 91,0% de eficiência de remoção) foram superiores aos mínimos residuais obtidos para cada  $G_f$ , característicos da imposição da fase de indução de colisões.

A interpretação dos resultados de remoção relativos aos valores de  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$  foi complementada com a estruturação da Tabela 14, exposta em sequência, a qual



permitiu a comparação entre os residuais médios de cor aparente obtidos a partir dos cenários de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) e de desempenho ótimo alcançado por meio da imposição da fase de indução de colisões, para cada  $G_f$  explorado.

**Tabela 14** - Comparação entre valores residuais médios de cor aparente obtidos para os cenários de ausência de indução de colisões e de melhor desempenho registrado por meio da imposição da fase de indução de colisões (cenário ótimo) para  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$  na Etapa 02.

Gf (s <sup>-1</sup> )	Tf (min)	$V_{flot} = 15,0m.h^{-1}; R = 6,0\%$				$V_{flot} = 10,0m.h^{-1}; R = 6,0\%$			
		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões	
		$G_{IC}; T_{IC}$ ( <sup>(1)</sup> )	Residual (uC)	$G_{IC}; T_{IC}$ ( <sup>(1)</sup> )	Residual (uC)	$G_{IC}; T_{IC}$ ( <sup>(1)</sup> )	Residual (uC)	$G_{IC}; T_{IC}$ ( <sup>(1)</sup> )	Residual (uC)
75,0	12,0	0;0	7,6	60;30	6,6	0;0	6,2	60;30	5,2
100,0		0;0	5,8	60;30	6,1	0;0	5,1	160;60	5,1
150,0		0;0	5,0	160;30	5,6	0;0	4,7	80;60	4,4
200,0		0;0	5,0	80;30	4,6	0;0	4,6	120;60	3,2

Observação: (1) As unidades dos valores de  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  expressos são s<sup>-1</sup> e s, nesta ordem.

Em primeiro lugar, a observação dos dados da Tabela 14 permitiu identificar os baixos valores residuais de cor aparente obtidos para os valores de  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ , com o menor deles associado ao menor valor de  $V_{flot}$  explorado, como era de se esperar. Independentemente dos valores de  $G_f$  impostos e da presença (ótima) ou ausência da fase de indução de colisões, todos os residuais de cor aparente associados à  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$  foram inferiores a aproximadamente  $6,0u_C$ , com mínimo de  $3,2u_C$  ( $G_f$  de  $200,0s^{-1}$  e  $G_{IC}; T_{IC}$  de  $120,0s^{-1}; 60,0s$ ), residual equivalente a aproximadamente 94,0% de eficiência de remoção. Tais constatações contribuem para destacar o potencial da tecnologia de FAD quando se requer alta eficiência de remoção de cor aparente.

De forma semelhante ao observado para os resultados de remoção de turbidez e resultados de remoção de cor aparente para a  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , os residuais de cor aparente característicos da imposição de  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  em associação ao cenário ótimo de indução de colisões mostraram-se mais uma vez inferiores aos alcançados na ausência da fase de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), agora para os valores de  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ , como evidencia a Tabela 14.

Contudo, diferentemente do observado para com os resultados de remoção de cor aparente associados à  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , a análise dos dados característicos dos valores de  $V_{flot}$  de  $15,0$

e  $10,0\text{m.h}^{-1}$  não permitiu identificar tendência de aumento da diferença entre os residuais de cor aparente obtidos para os cenários de ausência e de presença (ótima) de indução de colisões com o incremento de  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  a  $200,0\text{s}^{-1}$ .

Em complemento, embora a análise das Figuras 43 e 47 (A, B, C e D), características das velocidades de flotação de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , tenha permitido notar que as mais baixas eficiências de remoção de cor aparente continuam atreladas à imposição de  $T_{IC}$  de  $60,0\text{s}$ , a observação atenta das mesmas figuras possibilitou identificar que a diminuição dos valores de  $V_{flot}$  impostos foi acompanhada pela redução das diferenças numéricas entre residuais obtidos com  $T_{IC}$  de  $30,0\text{s}$  e  $60,0\text{s}$ , fenômeno também identificado com os resultados de remoção de turbidez.

Em adição e também de maneira próxima ao observado para os resultados de remoção de turbidez, a análise dos dados da Tabela 14, mais especificamente para  $V_{flot}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , permitiu notar a associação de valores de  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  não nulos ( $T_{IC}$  de  $60,0\text{s}$ ) aos mínimos residuais de cor aparente registrados para  $G_f$  de  $150,0\text{s}^{-1}$  e  $200,0\text{s}^{-1}$ . Cenário diferente do observado para a  $V_{flot}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , em que os mínimos residuais de cor aparente para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ ,  $150,0\text{s}^{-1}$  e  $200,0\text{s}^{-1}$  mantiveram-se atrelados exclusivamente à implementação da FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões.

A tentativa de interpretação de tais fenômenos se dará de forma conjunta para os resultados de remoção de turbidez e cor aparente, na Seção 5.2.3.

As análises estatísticas aplicadas aos valores residuais de cor aparente evidenciados na Tabela 14, característicos de  $V_{flot}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 02, foram reunidas no Apêndice B.

De acordo com nível de significância ( $\alpha$ ) de  $5,0\%$ , os resultados das análises não permitiram constatar diferença estatisticamente significativa entre os residuais característicos do cenário ótimo de indução de colisões e do cenário de ausência de indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) para nenhum dos quatro valores de  $G_f$  explorados, tanto para a  $V_{flot}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  quanto para a de  $10,0\text{m.h}^{-1}$ . Em outras palavras, os desempenhos associados aos cenários ótimos de indução de colisões obtidos por  $G_f$  se equipararam aos alcançados pelos respectivos cenários de ausência de indução, não os superando em nenhum caso.

É essencial destacar, neste contexto, que, tanto para a  $V_{flot}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  quanto para a de  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , não foram identificadas diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre o

cenário ótimo de indução mecânica de colisões associado a  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$ ;  $30,0s$ ) e o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) associado a  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ . Ao mesmo tempo, foram identificadas diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais de cor aparente obtidos a partir da imposição dos mesmos dois valores de  $G_f$  ( $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ ) na ausência da fase de indução mecânica de colisões, tanto para a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  quanto para a de  $10,0m.h^{-1}$ .

Em outras palavras, tendo como base a investigação em escala de bancada e todo o contexto experimental delimitado, as constatações reunidas no parágrafo anterior evidenciaram que a implementação de uma etapa de indução mecânica de colisões entre partículas floculadas e microbolhas de ar no início da FAD foi capaz de alcançar residual de cor aparente estatisticamente semelhante ( $\alpha = 0,05$ ) àquele obtido a partir do processo de FAD associado a  $G_f$  de maior magnitude ( $25,0s^{-1}$  mais elevado, mais especificamente), para valores de  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ . E as análises estatísticas do Apêndice B comprovam que tal semelhança não foi observada na ausência da etapa de indução de colisões.

De maneira similar à observada para os dados de turbidez, os residuais de cor aparente alcançados a partir de  $G_f$  de  $150,0s^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões no início da FAD estiveram dentre os menores registrados para as  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ , mais uma vez não tendo sido identificadas diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre estes residuais e os alcançados a partir de  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  na ausência da fase de indução de colisões, para cada  $V_{flot}$ .

### 5.2.3 Principais constatações comuns aos resultados de remoção de turbidez e cor aparente obtidos na Etapa 02

Um dos fenômenos observados ao longo da realização da Etapa 02, e de manifestação comum aos resultados de remoção tanto de turbidez quanto de cor aparente, foi o registro de marcante diferença entre valores residuais característicos da aplicação de  $T_{IC}$  de  $30,0s$  e  $60,0s$ , mais especificamente para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , com os residuais atrelados a  $T_{IC}$  de  $60,0s$  sendo nitidamente superiores e associando-se, portanto, às mais baixas eficiências de remoção.

Uma possível justificativa para tal fenômeno pode estar relacionada à limitação imposta pelo equipamento de investigação experimental em escala de bancada utilizado, o Flotateste. Diferentemente da operação em fluxo contínuo, característica de sistemas de FAD em escala piloto e plena, a operação do Flotateste se dá por fluxo em batelada, com as Zonas de Contato

(ZC) e de Separação (ZS) ocupando praticamente o mesmo espaço físico no interior das colunas de flotação. A transição entre uma zona e outra não apresenta delimitação física e se dá por meio do avanço vertical ascendente do complexo trifásico formado por água, microbolhas de ar e partículas floculadas.

Dessa forma, tendo em vista que a haste metálica empregada para a imposição de agitação mecânica no interior das colunas do Flotateste durante a fase de indução de colisões foi a mesma usada na etapa de floculação e ocupou simultaneamente tanto a ZC quanto a ZS, é possível sustentar a hipótese de que a turbulência de origem mecânica imposta no interior das colunas (fase de indução de colisões) não tenha impedido integralmente a movimentação ascensional dos aglomerados formados (como verificado visualmente na Etapa 01), mas tenha oferecido alguma resistência à mesma.

Sendo assim, tendo como base a adoção da hipótese de início da movimentação ascensional de aglomerados microbolhas-flocos concomitantemente à fase de indução de colisões ( $T_{IC}$  englobado por  $\Delta t_{flot}$ ), e especificamente para a configuração experimental deste estudo (atrelada ao uso do Flotateste), acredita-se que a combinação entre fases prolongadas de indução de colisões (associadas a valores de  $T_{IC}$  como o de 60,0s, por exemplo) e reduzidos intervalos de tempo de coleta de amostras ou de flotação (associados a valores de  $V_{flot}$  como o de 20,0m.h<sup>-1</sup>, por exemplo) possa ter contribuído de forma negativa para a qualidade final da amostra em termos de remoção de turbidez e cor aparente. A Tabela 15, exposta em sequência, ajuda a embasar tal argumento.

**Tabela 15** – Exposição dos intervalos de tempo ocupados pela vigência da fase de indução de colisões em relação aos intervalos de tempo de coleta de amostras (ou de flotação), com base nos valores de  $T_{IC}$  e de  $V_{flot}$  investigados na Etapa 02.

Velocidade de flotação ( $V_{flot}$ ) (m.h <sup>-1</sup> ) – (cm.min <sup>-1</sup> )	Altura do ponto de coleta ( $\Delta S$ ) (m)	Intervalo de tempo de coleta (ou de flotação) ( $\Delta t_{flot}$ )	Intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ) (s)	Discriminação dos intervalos de tempo ocupados por $T_{IC}$ em $\Delta t_{flot}$ (s)
20,0 – 33,33	0,55	1min. + 39,0s	30,0	30,0(IC) + 69,0
			60,0	60,0(IC) + 39,0
15,0 – 25,00	0,55	2min. + 12,0s	30,0	30,0(IC) + 102,0
			60,0	60,0(IC) + 72,0
10,0 – 16,66	0,55	3min. + 18,0s	30,0	30,0(IC) + 168,0
			60,0	60,0(IC) + 138,0

Observação: A sigla IC representa a vigência do processo de indução de colisões.

Levando-se em consideração a altura de coleta de amostras adotada ao longo da execução da Etapa 02 (0,55m), a análise dos dados da Tabela 15 permitiu notar que o intervalo de tempo de coleta associado à  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  representa aproximadamente metade do intervalo de coleta característico da  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ . Com base na inclusão dos valores de  $T_{\text{IC}}$  explorados nos intervalos de tempo de coleta (ou de flotação), como foi feito, o emprego de  $T_{\text{IC}}$  de 60,0s, por exemplo, faz com que o intervalo de tempo entre o fim da fase de indução mecânica de colisões e a coleta de amostras em  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  seja equivalente a menos de um terço do intervalo associado à  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ .

Desta forma, a exploração de valores de  $V_{\text{flot}}$  elevados, como o de  $20,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ , acaba por ofertar menos tempo entre o término do  $T_{\text{IC}}$  aplicado e a coleta de amostras, em comparação com valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ , por exemplo. Assim, para a operação com fluxo em batelada, característica do Flotateste, quanto menor o intervalo de tempo entre o término da fase de indução de colisões e a execução da coleta (característico dos maiores valores de  $T_{\text{IC}}$  e de  $V_{\text{flot}}$  explorados), menor é o intervalo de tempo disponível para que os aglomerados formados vençam a resistência imposta pelas turbulências de origem mecânica e ultrapassem a altura do ponto de amostragem antes da execução da coleta, elevando os valores residuais obtidos, tanto de turbidez quanto de cor aparente.

Acredita-se ser possível justificar a associação de  $T_{\text{IC}}$  de 60,0s às mais baixas eficiências de remoção obtidas para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$  com base no raciocínio exposto.

Por outro lado, com  $T_{\text{IC}}$  englobado por  $\Delta t_{\text{flot}}$  e com base na operação do Flotateste, quanto maior o intervalo de tempo entre o término da fase de indução de colisões e a execução da coleta (característico dos menores valores de  $T_{\text{IC}}$  e de  $V_{\text{flot}}$  explorados), maior é o intervalo de tempo disponível para que os aglomerados formados vençam a resistência imposta pelas turbulências de origem mecânica e ultrapassem a altura do ponto de amostragem antes da execução da coleta, reduzindo os valores residuais obtidos, tanto de turbidez quanto de cor aparente.

Faz-se importante adicionar à reflexão o fato de que os mínimos residuais de turbidez e cor aparente registrados na Etapa 01 (com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos concomitantemente à vigência da fase de indução de colisões ( $V_{\text{flot}}$  de  $8,1 \pm 1,7\text{m}\cdot\text{h}^{-1}$ )) associaram-se ao cenário de imposição da fase de indução de colisões ( $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}^{-1}$ ;  $40,0\text{s}$  e  $40,0\text{s}^{-1}$ ;  $80,0\text{s}$ , respectivamente), com  $T_f$  de 12,0minutos e  $G_f$  de  $200,0\text{s}^{-1}$ .

Outro fenômeno identificado para os resultados de remoção tanto de turbidez quanto de cor aparente consistiu na identificação do caráter mais favorável assumido pela imposição da fase de indução de colisões à medida que os valores de  $G_f$  explorados foram reduzidos de  $200,0s^{-1}$  a  $75,0s^{-1}$ , para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ . Tal constatação contribui para sustentar a hipótese de que a imposição da fase de indução de colisões no início da FAD aparenta ser mais profícua para valores de  $G_f$  e  $T_f$  inferiores aos ótimos, com a suposição de que valores de  $G_f$  iguais e inferiores a  $75,0s^{-1}$  façam parte deste grupo (para este contexto de estudo).

A identificação de fenômeno semelhante na Etapa 01 ( $V_{flot}$  de  $8,1 \pm 1,7m.h^{-1}$ ), porém ligado aos valores de  $T_f$  impostos, contribui para sustentar a mesma hipótese. No caso, as máximas diferenças entre residuais dos cenários de ausência e presença ótima da fase de indução de colisões, por  $G_f$ , foram mais expressivas a favor da manutenção da etapa de indução de colisões quando da imposição de  $T_f$  de 8,0minutos, em vez de  $T_f$  de 12,0minutos (admitido como ótimo para a água de estudo).

Em outras palavras, acredita-se que os valores de  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $T_f$  de 8,0minutos se encontravam abaixo da faixa ótima para a água de estudo em questão, produzindo flocos com características diferentes das ideais para o máximo desempenho da FAD. Assim, acredita-se que a imposição da etapa de indução de colisões tenha sido capaz de contribuir de forma mais produtiva para esses casos (seja pelo aumento das velocidades de ascensão dos aglomerados formados ou pelo aumento do número de colisões efetivas) em comparação com aqueles com valores de  $G_f$  e  $T_f$  ótimos ou superiores aos ótimos.

Em relação às constatações comuns aos dados residuais tanto de turbidez quanto de cor aparente registrados na Etapa 02 e obtidas a partir da aplicação de análises estatísticas, foi possível notar que, uma vez fixados os valores de  $G_f$ , a imposição da fase de indução mecânica de colisões no início da FAD não foi capaz de superar o desempenho alcançado pelo processo de flotação na ausência da fase de indução de colisões para nenhuma das três velocidades de flotação exploradas.

Em complemento, a observação dos resultados de remoção de turbidez e cor aparente obtidos na ausência da fase de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) permitiu notar a associação de  $G_f$  de  $150,0s^{-1}$  aos menores valores residuais médios alcançados para ambos os parâmetros e para as três  $V_{flot}$  exploradas ( $20,0m.h^{-1}$ ,  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ ). Somam-se a tal constatação a identificação de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais obtidos para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $150,0s^{-1}$  na ausência da fase de indução em

todas as comparações realizadas (Apêndice B), bem como a identificação de ausência de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre residuais obtidos para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  e  $150,0s^{-1}$  na ausência de indução também para todos os casos (levando-se em conta turbidez e cor aparente e as três  $V_{flot}$  exploradas).

Sendo assim, com base no cenário experimental investigado e nas características da água bruta produzida para a realização da pesquisa, os resultados obtidos na Etapa 02 aparentam evidenciar o valor de  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  como o mais recomendado para a etapa de floculação, tendo como norte a busca pelo cenário otimizado, de máxima eficiência com o menor dispêndio de energia.

Em adição, embora não identificado de maneira comum aos dois parâmetros estudados, é importante destacar mais uma vez o fenômeno evidenciado para os residuais de cor aparente e  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ , associado à identificação de ausência de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais obtidos a partir do cenário ótimo de indução de colisões ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$ ;  $30,0s$ ) obtido para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) obtido para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ .

Embora identificado para apenas um dos parâmetros investigados, tal fenômeno representa o caráter favorável da imposição de uma breve fase de indução mecânica de colisões no início da FAD e seu potencial incremento sobre a eficiência global do processo, evidenciando, assim, uma janela de oportunidade para aumento de eficiência, principalmente em casos de unidades de flotação que tenham sido projetadas com valores de  $T_f$  e/ou  $G_f$  inferiores ao ótimo e que estejam apresentando baixa eficiência de flotação.

Além disso, é interessante notar a manifestação do referido fenômeno apenas quando da aplicação da fase de indução de colisões no início da FAD de forma associada ao mais baixo valor de  $G_f$  investigado ( $75,0s^{-1}$ ). Levando-se em consideração as reflexões estabelecidas ao longo deste tópico, talvez esta seja mais uma evidência que contribui para sustentar a hipótese de que a imposição da fase de indução de colisões no início da FAD é mais profícua para valores de  $G_f$  (e  $T_f$ ) inferiores aos ótimos.

#### 5.2.4 Principais recomendações para a Etapa 03

Com base nos resultados obtidos e interpretados ao longo da Etapa 02 foram planejados os ensaios referentes à Etapa 03. Foram elaboradas, assim, três recomendações fundamentais, a serem implementadas na etapa seguinte:

- (i) Investigar o resultado da interação entre a imposição da fase de indução de colisões no início da FAD e valor de  $G_f$  inferior a  $75,0s^{-1}$  (valor mais distante daqueles comumente utilizados em unidades em escala plena);
- (ii) Reduzir ao máximo possível a magnitude dos valores de  $T_{IC}$  explorados, na busca tanto por desempenhos ótimos quanto pela minimização do impacto exercido pelos mesmos sobre a qualidade das amostras coletadas, principalmente para valores elevados de velocidade de flotação ( $20,0m.h^{-1}$ ) (minimização da influência exercida pela limitação inerente à realização de ensaios em batelada sobre a qualidade dos resultados obtidos);
- (iii) Priorizar a investigação de valores de  $G_{IC}$  que tenham se associado a cenários ótimos de desempenho na presença da fase de indução mecânica de colisões ao longo da Etapa 02;

### 5.3 Etapa 03

As recomendações provenientes da Etapa 02 foram incorporadas ao planejamento dos ensaios da Terceira Etapa de investigação experimental.

Os valores de  $G_f$  foram reduzidos a três, sendo eles  $50,0s^{-1}$ ,  $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ , com o  $T_f$  de 12,0 minutos permanecendo como o único investigado. Quanto aos valores de gradiente médio de velocidade empregados na etapa de indução de colisões ( $G_{IC}$ ), optou-se pela escolha daqueles associados aos melhores desempenhos registrados com indução para os menores valores de  $G_f$  explorados na Etapa 02 ( $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ ). Dessa forma, optou-se pela investigação de valores de  $G_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$ ,  $60,0s^{-1}$ ,  $80,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ .

Quanto aos valores de intervalo de tempo de indução de colisões ( $T_{IC}$ ), a associação entre a recomendação advinda da Etapa 02, atrelada à máxima redução da magnitude dos valores de  $T_{IC}$ , e o reduzido intervalo de tempo disponível para a conclusão da pesquisa, reflexo do período de pandemia, isolamento social e consequente restrição de acesso às dependências do LATAR por mais de sete meses, influenciou de forma decisiva a escolha por apenas um valor de  $T_{IC}$  a ser investigado na Etapa 03, reduzido ao valor mínimo de 5,0s, o qual foi englobado pelos três intervalos de tempo de coleta de amostras investigados (ou intervalos de tempo de flotação, associados aos três valores de  $V_{flot}$  explorados).



Em outras palavras, os ensaios da Etapa 03 foram planejados, executados e tiveram seus resultados interpretados com base na hipótese de início da movimentação ascendente dos aglomerados formados por partículas floculadas e microbolhas de ar concomitantemente ao período de indução de colisões.

Em adição, os valores de pressão de saturação (500,0kPa), razão de recirculação ( $R = 6,0\%$ ) e de velocidades de flotação ( $20,0\text{m.h}^{-1}$ ,  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$ ) explorados na Etapa 03 foram os mesmos da Etapa 02, bem como a altura de coleta de amostras (0,55m).

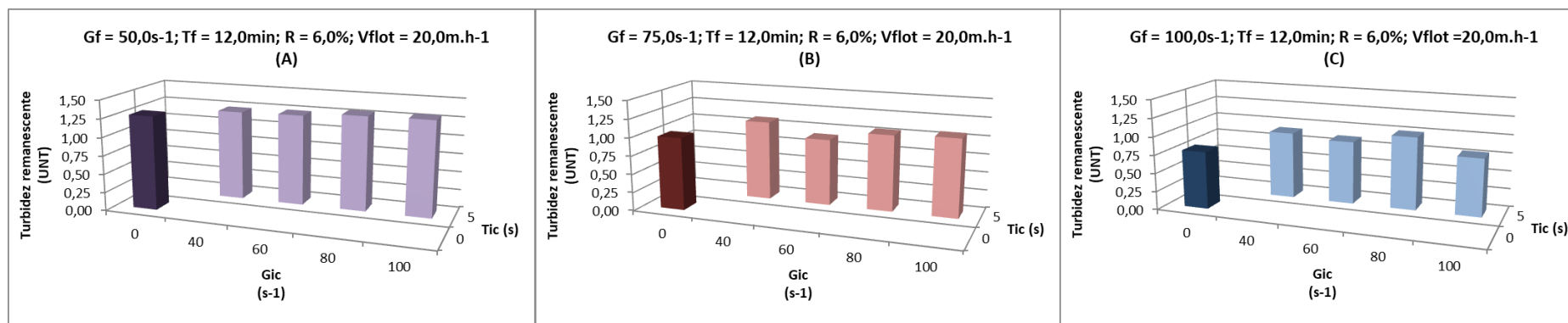
Além de turbidez e cor aparente, a investigação conduzida ao longo da Etapa 03 dedicou-se também à análise dos residuais de absorbância de luz ultravioleta (UV) em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm, como indicador indireto do teor de Matéria Orgânica Natural (M.O.N.) presente nas amostras, com todos os ensaios tendo sido realizados em triplicata.

A análise dos resultados obtidos para remoção de turbidez encontra-se exposta no tópico a seguir.

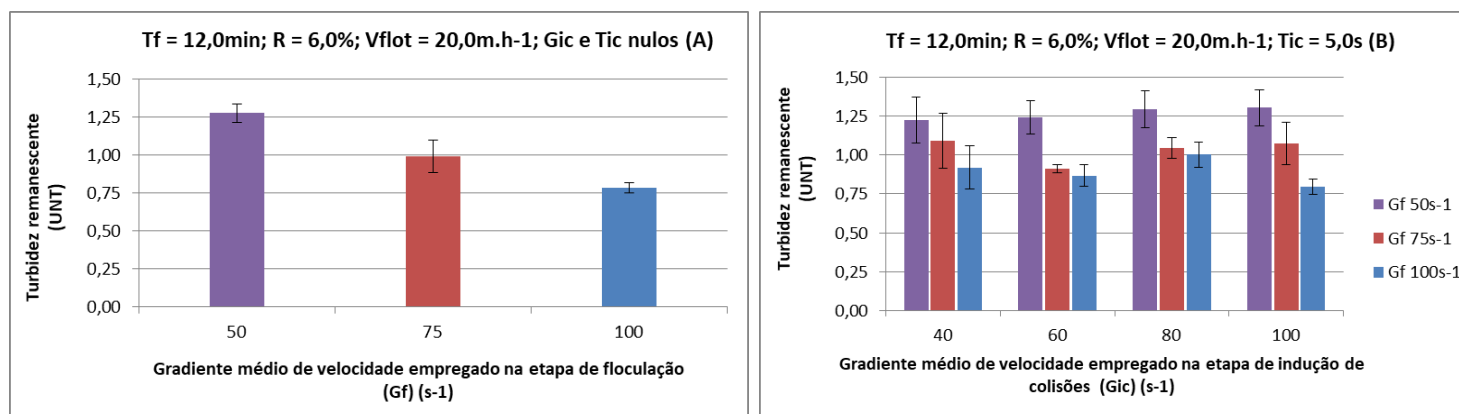
### 5.3.1 Análise dos residuais de turbidez

Os valores residuais de turbidez obtidos na Etapa 03 para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  foram expressos em Unidades Nefelométricas de Turbidez (UNT) e representados por meio das Figuras 51 e 52.

**Figura 51** – Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 20,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $50\text{s}^{-1}$  (A),  $75\text{s}^{-1}$  (B) e  $100\text{s}^{-1}$  (C);  $T_f$  de 12,0minutos).



**Figura 52** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{IC}$  de 5,0s (B) para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 03.



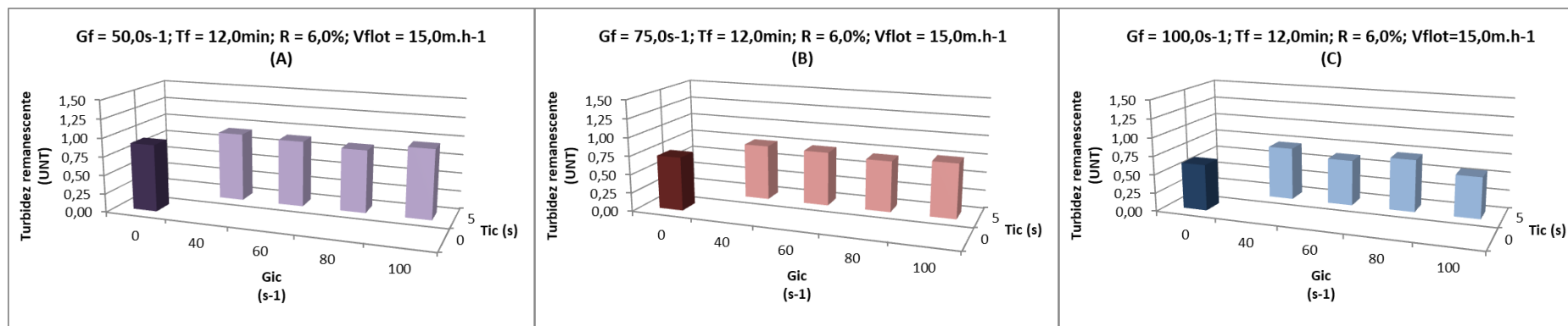
A análise da Figura 51 (A, B e C), característica dos resultados de remoção de turbidez obtidos para a velocidade de flotação ( $V_{\text{flot}}$ ) de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , permitiu notar que o melhor desempenho geral foi alcançado a partir da imposição de  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e da aplicação da FAD na ausência do processo de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos), garantindo residual de  $0,78 \pm 0,03\text{UNT}$  (88,7% de eficiência de remoção). Tal valor foi identificado, contudo, como apenas  $0,01\text{UNT}$  inferior ao segundo melhor desempenho registrado (residual de  $0,79 \pm 0,05\text{UNT}$ ), característico da imposição de  $G_{\text{IC}}$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ) (Figura 52, A e B).

Ainda quanto à  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , dentre os dois valores de  $G_f$  remanescentes ( $50,0\text{s}^{-1}$  e  $75,0\text{s}^{-1}$ ), foi a imposição de  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  que garantiu o melhor resultado, com destaque para a presença do processo de indução de colisões, representado por  $G_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ), e residual de  $0,91 \pm 0,03\text{UNT}$  (86,9% de eficiência de remoção) (Figura 52, B). Para efeito de comparação, nessa mesma condição de  $G_f$  ( $75,0\text{s}^{-1}$ ), a ausência de uma etapa de indução de colisões resultou em turbidez residual média em torno de  $1,0\text{UNT}$ .

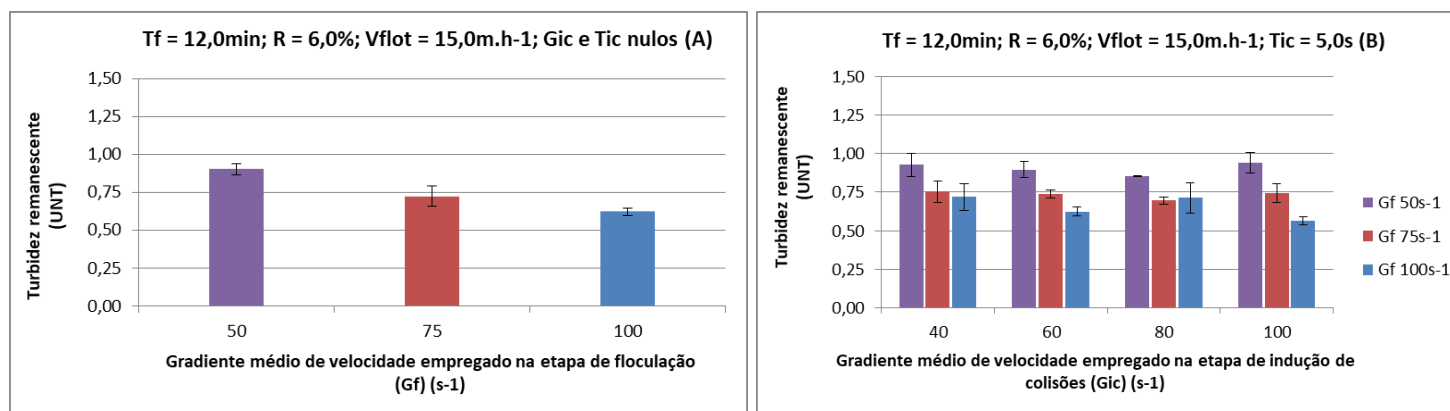
O cenário de indução de colisões também se mostrou associado ao melhor desempenho obtido para remoção de turbidez para  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$  e  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , com destaque para  $G_{\text{IC}}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ) e residual de  $1,23 \pm 0,15\text{UNT}$  (82,4% de eficiência de remoção), acompanhado muito de perto pelo residual médio obtido na ausência de indução de colisões (em torno de  $1,28\text{UNT}$ ) (Figuras 51, A, e 52, A e B).

Os resultados de remoção de turbidez obtidos na Etapa 03 para os valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$  foram representados por meio das Figuras 53 a 56, expostas em sequência.

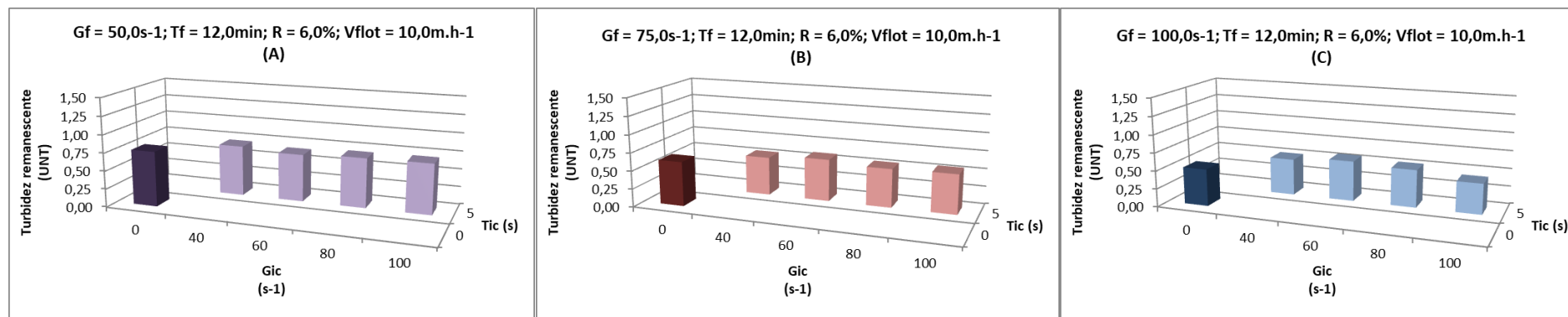
**Figura 53** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $50\text{s}^{-1}$  (A),  $75\text{s}^{-1}$  (B) e  $100\text{s}^{-1}$  (C);  $T_f$  de 12,0minutos).



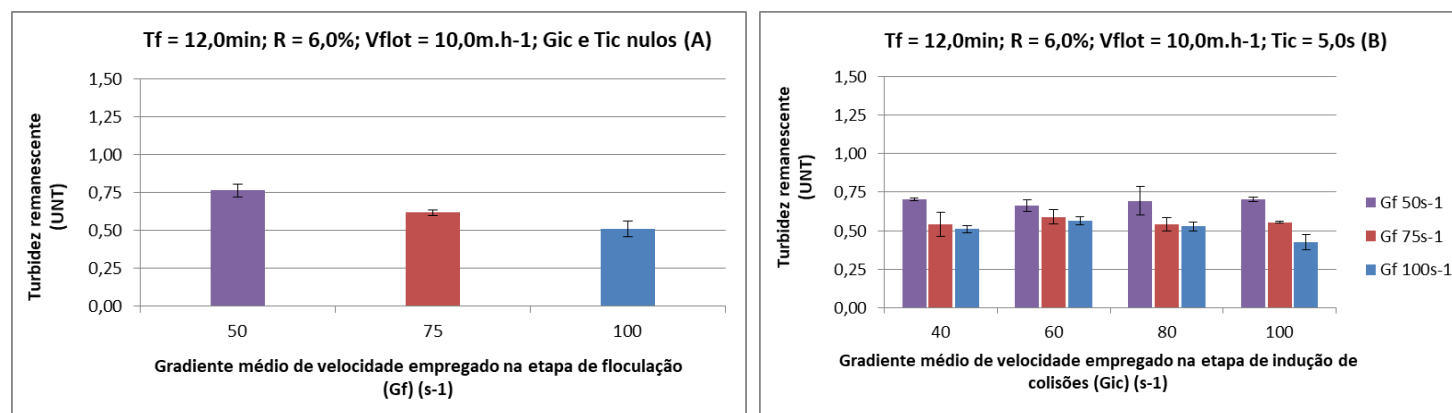
**Figura 54** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{IC}$  de 5,0s (B) para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 03.



**Figura 55** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 10,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $50\text{s}^{-1}$  (A),  $75\text{s}^{-1}$  (B) e  $100\text{s}^{-1}$  (C);  $T_f$  de 12,0minutos).



**Figura 56** - Representações gráficas dos valores residuais médios de turbidez e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{IC}$  de 5,0s (B) para a  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 03.



A análise das Figuras 53 a 56, características dos resultados de remoção de turbidez obtidos para os valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , permitiu constatar que os melhores desempenhos gerais registrados permaneceram atrelados à imposição de  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ , porém com o cenário ótimo de indução de colisões destacando-se como um pouco mais favorável que o cenário de ausência de indução neste contexto, representado por  $G_{\text{IC}}$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ) tanto para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  ( $0,56 \pm 0,02\text{UNT}$  e  $91,9\%$  de eficiência de remoção) quanto para a  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  ( $0,43 \pm 0,05\text{UNT}$  e  $93,9\%$  de eficiência de remoção) (Figuras 54, B, e 56, B).

Quanto à máxima eficiência de remoção obtida a partir da imposição dos dois valores de  $G_f$  restantes ( $50,0$  e  $75,0\text{s}^{-1}$ ), foi possível constatar que os menores residuais de turbidez atrelaram-se à imposição de  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$ , tanto para  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $0,69 \pm 0,02\text{UNT}$  e  $90,0\%$  de eficiência de remoção) quanto para  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $0,54 \pm 0,06\text{UNT}$  e  $92,2\%$  de eficiência de remoção), com destaque para o cenário de indução de colisões (como para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ ). O valor de  $G_{\text{IC}}$  associado aos cenários de melhor desempenho em ambos os casos foi o de  $80,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ), sendo que, para o menor valor de  $V_{\text{flot}}$  ( $10,0\text{m.h}^{-1}$ ), o desempenho alcançado por meio da imposição de  $G_{\text{IC}}$  de  $80,0\text{s}^{-1}$  foi semelhante ao alcançado pela imposição de  $G_{\text{IC}}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$  (Figuras 54, B, e 56, B).

O cenário de indução de colisões associou-se também aos mínimos residuais de turbidez registrados com  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$ . Neste contexto, as duas maiores eficiências de remoção registradas tanto para  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  ( $87,8\%$  e  $87,1\%$ ) quanto para  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  ( $90,5\%$  e  $90,0\%$ ) associaram-se à imposição de  $G_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}^{-1}$  e  $80,0\text{s}^{-1}$ , com este associando-se ao melhor desempenho para  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $0,85 \pm 0,01\text{UNT}$ ) e  $G_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}^{-1}$  associando-se ao melhor desempenho para  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $0,66 \pm 0,04\text{UNT}$ ). A diferença entre os dois menores residuais registrados foi de apenas  $0,05\text{UNT}$  para  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $0,03\text{UNT}$  para  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  (Figuras 54, B, e 56, B).

Os resultados médios de remoção de turbidez obtidos para os três valores de velocidade de flotação explorados e característicos dos cenários tanto de ausência de indução de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) quanto de desempenho ótimo obtido por meio da imposição da fase de indução de colisões no início da FAD são expostos por meio da Tabela 16, a seguir.

**Tabela 16** - Análise comparativa entre valores residuais médios de turbidez obtidos por meio do processo de indução de colisões (cenário ótimo) e na ausência de indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), em função de cada  $G_f$  imposto e para as três  $V_{flot}$  exploradas na Etapa 03.

$G_f$ ( $s^{-1}$ )	$T_f$ (min)	$V_{flot} = 20,0m.h^{-1}; R = 6,0\%$				$V_{flot} = 15,0m.h^{-1}; R = 6,0\%$				$V_{flot} = 10,0m.h^{-1}; R = 6,0\%$			
		Cenário ótimo de indução de colisões ( $T_{IC} = 5,0s$ )		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões ( $T_{IC} = 5,0s$ )		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões ( $T_{IC} = 5,0s$ )		Cenário de ausência de indução de colisões	
		$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> UNT	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> UNT	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> UNT	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> UNT	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> UNT	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> UNT
50,0		40,0	1,23	0,0	1,28	80,0	0,85	0,0	0,90	60,0	0,66	0,0	0,76
75,0	12,0	60,0	0,91	0,0	0,99	80,0	0,69	0,0	0,72	80,0 e 40,0	0,54	0,0	0,62
100,0		100,0	0,79	0,0	0,78	100,0	0,56	0,0	0,62	100,0	0,43	0,0	0,51

Observação: (1) A abreviatura “Res.” expressa significância residual.

A análise dos dados da Tabela 16 permitiu notar que, com exceção dos dados característicos da imposição de  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , todos os demais residuais foram inferiores a 1,0UNT, para os três valores de  $V_{flot}$  explorados. Observando com atenção os cenários de menor estresse operacional investigado, com base em  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ , foi possível identificar residuais de turbidez tão baixos quanto 0,43UNT, característico da imposição de  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  e  $G_{IC}; T_{IC}$  de  $100,0s^{-1}; 5,0s$  ( $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ ) e equivalente a 94,0% de eficiência de remoção.

Tal constatação evidencia a robustez da tecnologia de FAD, já destacada ao longo da discussão dos resultados da Etapa 02, e destaca seu potencial de operação em elevado nível de eficiência (especificamente aqui para remoção de turbidez) mesmo quando associada a valor de  $G_f$  inferior a  $75,0s^{-1}$ .

A observação dos dados da Tabela 16 permitiu notar, também e especificamente para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ , que os desempenhos ótimos alcançados a partir do cenário de indução de colisões estiveram atrelados a  $G_{IC}$  de mesma magnitude ( $100,0s^{-1}$ ) para as três  $V_{flot}$  exploradas.

Em complemento, a interpretação dos dados da mesma tabela permitiu constatar que a imposição do processo de indução de colisões no início da FAD produziu residuais de

turbidez inferiores àqueles alcançados na ausência de indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) para os valores de  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $75,0s^{-1}$  de acordo com os três valores de  $V_{flot}$  explorados. O mesmo foi observado para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ , com a exceção do identificado para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , em que o cenário ótimo de indução de colisões ( $G_{IC}$  de  $100,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de  $5,0s$ ) foi praticamente igualado pelo cenário de ausência de indução (diferença de apenas  $0,01UNT$ ).

Tais diferenças entre residuais de turbidez foram submetidas a análises estatísticas com base em raciocínio idêntico ao aplicado ao longo da Etapa 02 e de forma segregada por grupo de dados característicos de cada velocidade de flotação ( $V_{flot}$ ) explorada. As análises estatísticas realizadas ao longo da Etapa 03 foram reunidas no Apêndice C.

Levando-se em conta primeiramente a  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , as análises realizadas não permitiram identificar diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais de turbidez característicos dos cenários de ausência e presença ótima da fase de indução de colisões no início da FAD, com os dois cenários tendo se equiparado em termos de desempenho para cada  $G_f$  explorado. Já quando considerado exclusivamente o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), as análises aplicadas revelaram diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais associados aos três  $G_f$  investigados ( $50,0s^{-1}$ ,  $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ ).

Contudo, deve-se destacar que, com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de  $5,0\%$ , não foi identificada diferença estatisticamente significativa entre os residuais do cenário ótimo de indução de colisões ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$ ;  $5,0s$ ) associado a  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e do cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) associado a  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ , para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ .

Em outras palavras, com base nos residuais de turbidez obtidos na Etapa 03 para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , pode-se declarar que somente a partir da imposição de breve fase de indução de colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas no início da FAD (duração de  $5,0s$  com  $G_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$ ) foi possível tornar o desempenho alcançado a partir da aplicação de  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  estatisticamente semelhante ( $\alpha = 0,05$ ) ao alcançado a partir da FAD na ausência de indução mecânica de colisões e em associação a  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ .

Para a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , as análises aplicadas entre os residuais de turbidez obtidos na ausência e presença ótima da fase de indução de colisões, separadas por  $G_f$  explorado, permitiram identificar diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre os



residuais obtidos para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ , com o residual associado ao cenário ótimo de indução ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $100,0s^{-1}$ ; 5,0s) tendo sido considerado estatisticamente inferior.

No que concerne exclusivamente aos residuais de turbidez alcançados com o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) para a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , foram identificadas diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores associados aos  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $75,0s^{-1}$ , e aos  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ . Deve-se salientar, contudo, como constatado para a  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , que não foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais de turbidez característicos do cenário ótimo de indução de colisões ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $80,0s^{-1}$ ; 5,0s) associado a  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) associado a  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ , para a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ .

Já quanto às análises associadas à  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ , aplicadas entre residuais de turbidez obtidos na ausência e presença ótima da fase de indução de colisões e separadas por  $G_f$  explorado, os resultados permitiram constatar a manifestação de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre os residuais obtidos para  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$ , em que o residual característico do cenário ótimo de indução ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$ ; 5,0s) foi considerado estatisticamente inferior.

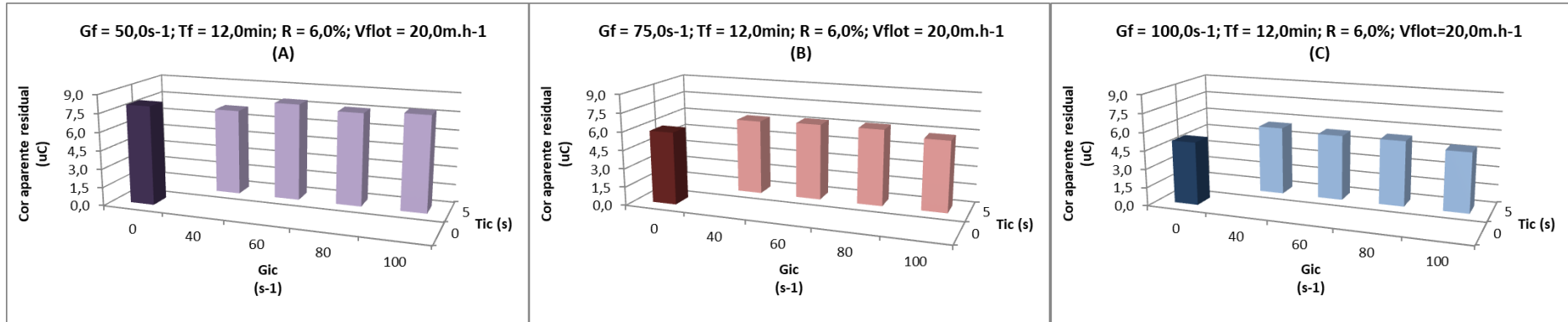
Observando-se a mesma  $V_{flot}$  ( $10,0m.h^{-1}$ ) e com foco apenas sobre o cenário de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), as análises revelaram que os residuais de turbidez obtidos para os valores de  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$ ,  $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$  podem ser considerados diferentes uns dos outros de forma estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ).

É fundamental destacar, contudo, que, para esta mesma  $V_{flot}$  ( $10,0m.h^{-1}$ ), não foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais de turbidez obtidos na presença ótima da fase de indução de colisões ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $60,0s^{-1}$ ; 5,0s) para  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e na ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ . Comportamento idêntico pode ser observado entre o cenário ótimo de indução de colisões ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$ ; 5,0s) para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e o cenário de ausência de indução para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ .

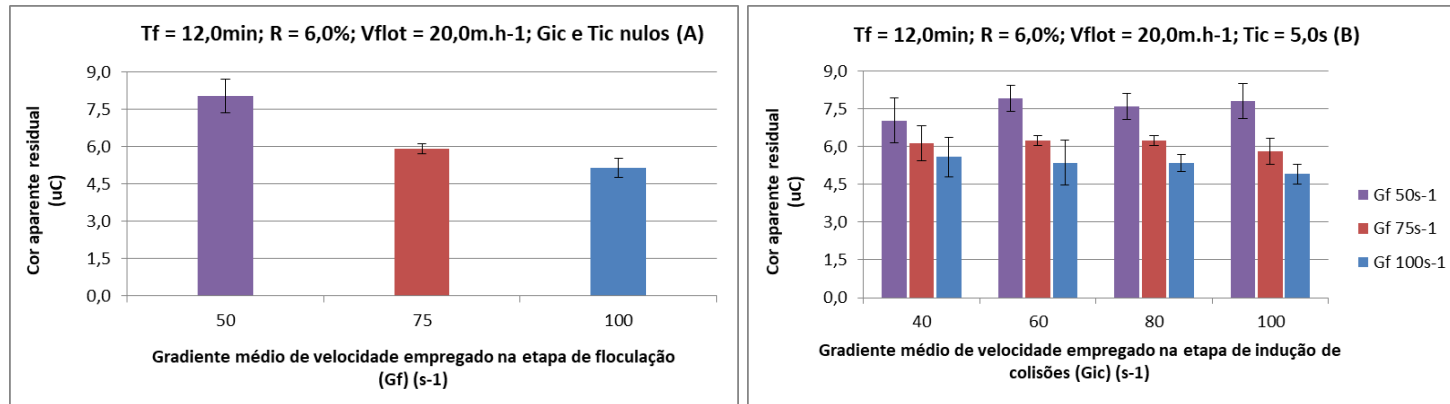
### 5.3.2 Análise dos residuais de cor aparente

Os resultados de remoção de cor aparente obtidos para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 03 foram representados por meio das Figuras 57 e 58, expostas em sequência. Os valores residuais de cor aparente foram expressos em unidades de Cor (uC), em que cada unidade de cor equivale a  $1,0\text{mgPt-Co.L}^{-1}$ .

**Figura 57** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$ ;  $Gf$  de  $50s^{-1}$  (A),  $75s^{-1}$  (B) e  $100s^{-1}$  (C);  $Tf$  de 12,0minutos).



**Figura 58** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{IC}$  de 5,0s (B) para a  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$  na Etapa 03.



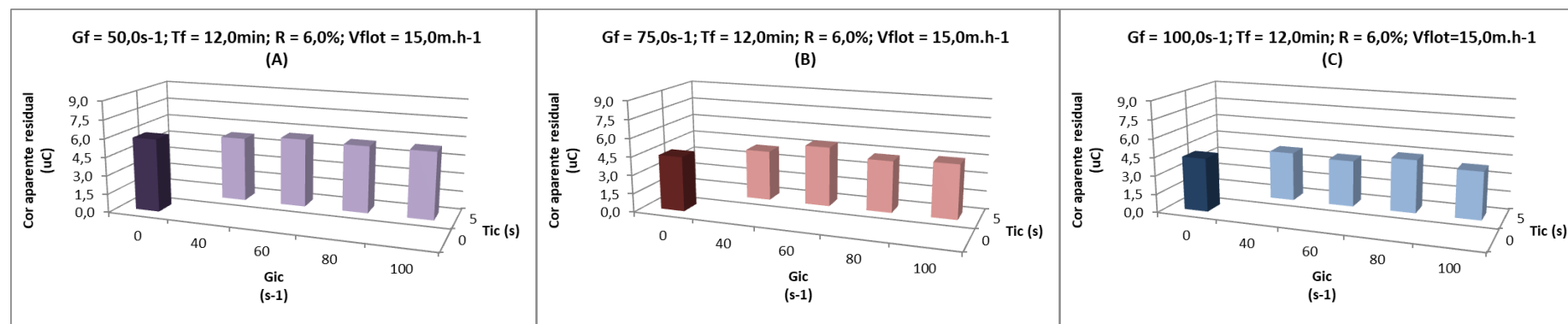
Levando-se em consideração a mais alta das três velocidades de flotação impostas ( $20,0\text{m.h}^{-1}$ ) e representativa do cenário de maior estresse operacional investigado, a análise das Figuras 57 (A, B e C) e 58 (B) permitiu constatar que o melhor desempenho geral em termos de remoção de cor aparente, para os três valores de  $G_f$  explorados, foi alcançado a partir da imposição de  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  (como para os resultados de remoção de turbidez) e da imposição da fase de indução de colisões no início da FAD, com a aplicação de  $G_{IC}$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{IC}$  de  $5,0\text{s}$ ) e obtenção de residual de  $4,9 \pm 0,4\text{uC}$  (89,8% de eficiência de remoção). Notou-se, contudo, que tal valor residual foi acompanhado de perto por aquele alcançado na ausência da fase de indução de colisões (em torno de  $5,1\text{uC}$ ).

Ainda acerca dos resultados para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  e dentre os dois outros valores de  $G_f$  investigados, o responsável pelo melhor desempenho registrado foi o  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$ , por meio da imposição de  $G_{IC}$  também de  $100,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{IC}$  de  $5,0\text{s}$ ) e garantindo residual de  $5,8 \pm 0,5\text{uC}$  (88,0% de eficiência de remoção) (Figura 58, A e B). Mais uma vez notou-se, contudo, a proximidade para com o valor médio de cor aparente residual alcançado na ausência de indução (em torno de  $5,9\text{uC}$ ).

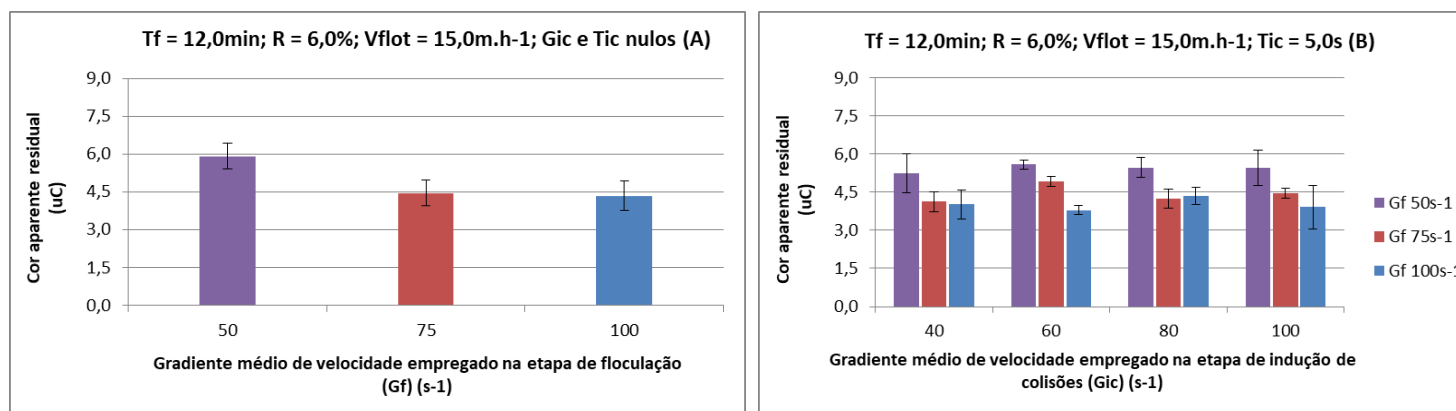
O cenário de indução de colisões também se mostrou um pouco mais favorável em comparação com o de ausência ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) com a imposição de  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$ , com destaque para o emprego de  $G_{IC}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{IC}$  de  $5,0\text{s}$ ) (como para os resultados de remoção de turbidez) e residual de  $7,0 \pm 0,9\text{uC}$  (85,5% de eficiência de remoção) (Figura 58, A e B). Neste caso, a implementação da FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões resultou em residual médio de aproximadamente  $8,0\text{uC}$ .

Os resultados de remoção de cor aparente obtidos na Etapa 03 para os valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$  foram representados por meio das Figuras 59 a 62, a seguir.

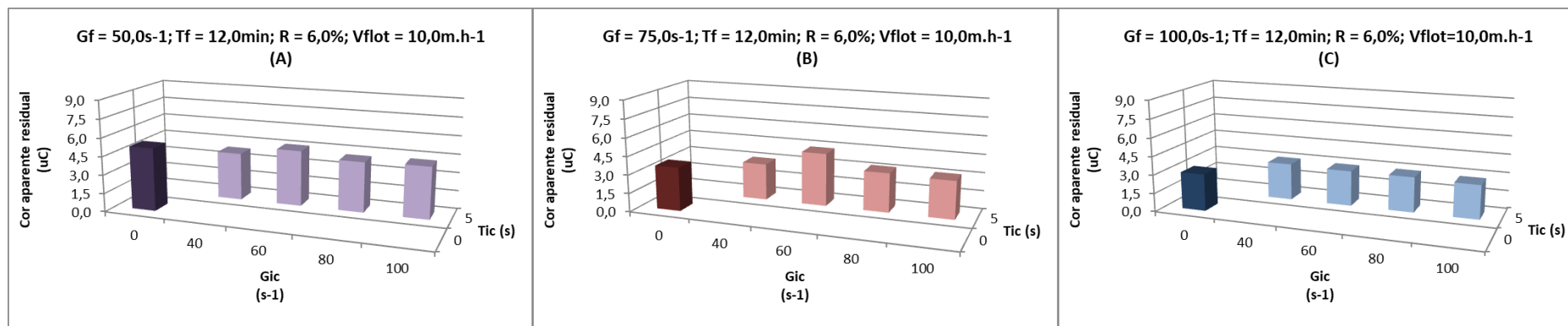
**Figura 59** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 15,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $50\text{s}^{-1}$  (A),  $75\text{s}^{-1}$  (B) e  $100\text{s}^{-1}$  (C);  $T_f$  de 12,0minutos).



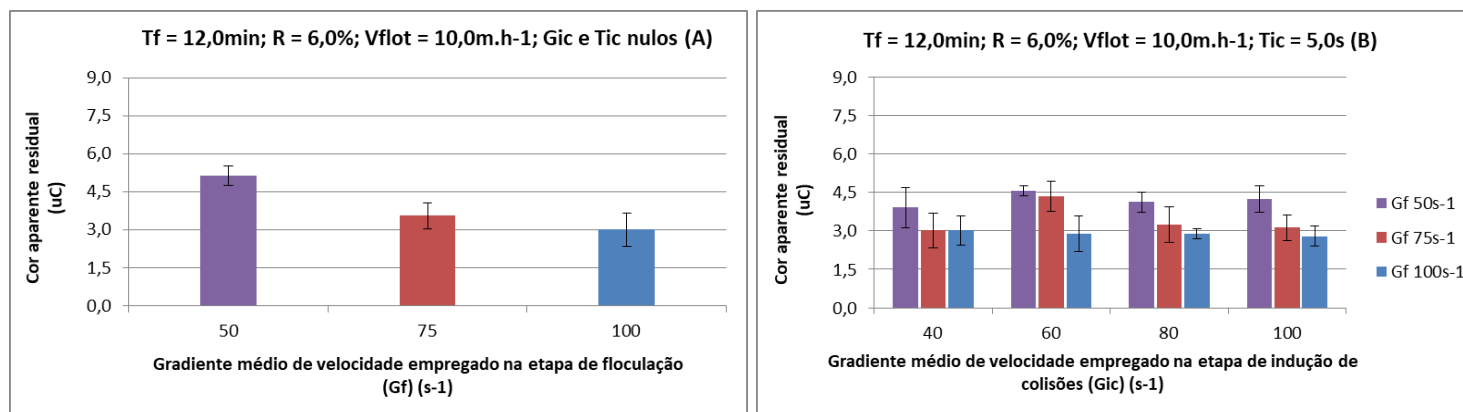
**Figura 60** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{\text{IC}}$  de 5,0s (B) para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 03.



**Figura 61** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente obtidos ao longo da Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}} = 10,0\text{m.h}^{-1}$ ;  $G_f$  de  $50\text{s}^{-1}$  (A),  $75\text{s}^{-1}$  (B) e  $100\text{s}^{-1}$  (C);  $T_f$  de  $12,0\text{minutos}$ ).



**Figura 62** - Representações gráficas dos valores residuais médios de cor aparente e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$  (B) para a  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 03.



No que concerne à análise dos resultados de remoção de cor aparente com base em velocidades de flotação ( $V_{\text{flot}}$ ) de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , foi possível notar comportamentos semelhantes aos observados com os resultados de remoção de turbidez (Seção 5.3.1) e com base nos resultados de remoção de cor aparente para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , discutidos anteriormente.

A observação das Figuras 59 e 61 (A, B e C) permitiu constatar que os melhores desempenhos gerais em termos de remoção de cor aparente obtidos para os valores de  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$  foram alcançados a partir da imposição de  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  de maneira associada ao cenário de indução de colisões no início da FAD.

O mínimo residual alcançado para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  foi de  $3,8 \pm 0,2\text{uC}$  (92,2% de eficiência de remoção e  $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}^{-1}$ ; 5,0s), valor médio apenas  $0,1\text{uC}$  inferior ao segundo melhor, alcançado com  $G_{\text{IC}}$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de 5,0s). O mínimo residual de cor aparente alcançado para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  foi de  $2,8 \pm 0,4\text{uC}$  (94,2% de eficiência de remoção e  $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $100,0\text{s}^{-1}$ ; 5,0s) (Figuras 60, B, e 62, B).

Dentre os resultados obtidos com os outros dois valores de  $G_f$  investigados, os melhores desempenhos foram registrados para  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  e na presença da fase de indução de colisões ( $G_{\text{IC}}$ ;  $T_{\text{IC}}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$ ; 5,0s), tanto para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $4,1 \pm 0,4\text{uC}$  e 91,5% de eficiência de remoção) quanto para a de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $3,0 \pm 0,7\text{uC}$  e 93,8% de eficiência de remoção) (Figuras 60 e 62, A e B).

A imposição da fase de indução de colisões no início da FAD também resultou nos mínimos residuais de cor aparente para  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$ , tanto para  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $5,2 \pm 0,8\text{uC}$  e 89,2% de eficiência de remoção) quanto para a  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  (residual de  $3,9 \pm 0,8\text{uC}$  e 91,9% de eficiência de remoção). Uma vez fixado o valor de  $T_{\text{IC}}$  explorado ao longo da Etapa 03 (5,0s), é interessante notar que o valor de  $G_{\text{IC}}$  associado às mais altas eficiências de remoção de cor aparente obtidas para  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$  foi idêntico para as três velocidades de flotação exploradas e igual a  $40,0\text{s}^{-1}$  (Figuras 60 e 62, A e B).

Os valores residuais médios de cor aparente obtidos para as três  $V_{\text{flot}}$  exploradas na Etapa 03 e característicos dos cenários tanto de ausência quanto de presença (ótima) da fase de indução mecânica de colisões no início da FAD são expostos por meio da Tabela 17, a seguir.

**Tabela 17** - Análise comparativa entre valores residuais médios de cor aparente obtidos por meio do processo de indução de colisões (cenário ótimo) e na ausência de indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), em função de cada  $G_f$  imposto e para as três  $V_{flot}$  exploradas na Etapa 03.

<b>Gf</b> (s <sup>-1</sup> )	<b>Tf</b> (min)	<b><math>V_{flot} = 20,0m.h^{-1}</math>; R = 6,0%</b>				<b><math>V_{flot} = 15,0m.h^{-1}</math>; R = 6,0%</b>				<b><math>V_{flot} = 10,0m.h^{-1}</math>; R = 6,0%</b>			
		<b>Cenário</b>		<b>Cenário de</b>		<b>Cenário</b>		<b>Cenário de</b>		<b>Cenário</b>		<b>Cenário de</b>	
		<b>ótimo de</b>		<b>ausência de</b>		<b>ótimo de</b>		<b>ausência de</b>		<b>ótimo de</b>		<b>ausência de</b>	
		<b>indução de</b>		<b>indução de</b>		<b>indução de</b>		<b>indução de</b>		<b>indução de</b>		<b>indução de</b>	
		<b>colisões</b>		<b>colisões</b>		<b>colisões</b>		<b>colisões</b>		<b>colisões</b>		<b>colisões</b>	
		<b>(<math>T_{IC} = 5,0s</math>)</b>		<b>(<math>T_{IC} = 5,0s</math>)</b>		<b>(<math>T_{IC} = 5,0s</math>)</b>		<b>(<math>T_{IC} = 5,0s</math>)</b>		<b>(<math>T_{IC} = 5,0s</math>)</b>		<b>(<math>T_{IC} = 5,0s</math>)</b>	
		<b><math>G_{IC}</math></b>	<b>Res.<sup>(1)</sup></b>	<b><math>G_{IC}</math></b>	<b>Res.<sup>(1)</sup></b>	<b><math>G_{IC}</math></b>	<b>Res.<sup>(1)</sup></b>	<b><math>G_{IC}</math></b>	<b>Res.<sup>(1)</sup></b>	<b><math>G_{IC}</math></b>	<b>Res.<sup>(1)</sup></b>	<b><math>G_{IC}</math></b>	<b>Res.<sup>(1)</sup></b>
		<b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>(uC)</b>	<b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>(uC)</b>	<b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>(uC)</b>	<b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>(uC)</b>	<b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>(uC)</b>	<b>(s<sup>-1</sup>)</b>	<b>(uC)</b>
50,0		40,0	7,0	0,0	8,0	40,0	5,2	0,0	5,9	40,0	3,9	0,0	5,1
75,0	12,0	100,0	5,8	0,0	5,9	40,0	4,1	0,0	4,5	40,0	3,0	0,0	3,6
100,0		100,0	4,9	0,0	5,1	60,0	3,8	0,0	4,3	100,0	2,8	0,0	3,0

Observação: (1) A abreviatura “Res.” expressa significa residual.

A interpretação dos dados da Tabela 17 permitiu reforçar o marcante potencial de aplicação da FAD à remoção de cor aparente, já identificado na Etapa 02. Levando-se em consideração o cenário de maior estresse operacional investigado ( $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ ), a estruturação da referida tabela possibilitou o destaque de valores residuais tão baixos quanto  $4,9uC$ , característico da imposição de  $G_f$  e de  $G_{IC}$  de mesma magnitude ( $100,0s^{-1}$ ) ( $T_{IC}$  de  $5,0s$ ) e equivalente a aproximadamente 90,0% de eficiência de remoção.

A redução do estresse operacional imposto, reflexo da investigação de velocidades de flotação de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0 m.h^{-1}$ , foi acompanhada pela também redução dos residuais de cor aparente obtidos, como era de se esperar, com valores médios ótimos pertencentes a intervalo de  $2,8$  a  $3,9uC$  para a  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ . Este último ( $3,9uC$ ) atrelado à imposição de  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  na presença da fase de indução de colisões.

Em complemento, a análise dos dados da Tabela 17 permitiu constatar que o valor de  $G_{IC}$  associado aos menores residuais médios obtidos para  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e para as três  $V_{flot}$  exploradas foi igual a  $40,0s^{-1}$ , como já observado. Além disso, e de maneira próxima ao observado para os dados de remoção de turbidez na Etapa 03, o valor de  $G_{IC}$  associado aos menores residuais médios de cor aparente alcançados para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  e para duas das três  $V_{flot}$  exploradas ( $20,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ ) foi igual a  $100,0s^{-1}$ .



Como evidencia a Tabela 17, todos os valores residuais de cor aparente alcançados a partir do cenário ótimo de indução de colisões no início da FAD foram inferiores aos obtidos pela imposição do processo de flotação por ar dissolvido na ausência de indução mecânica ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), fixando-se os valores de  $G_f$  e de  $V_{flot}$ .

Fez-se necessário, contudo, fundamentar estatisticamente tal análise comparativa e verificar a existência de diferença estatisticamente significativa entre residuais (Apêndice C).

Com base nos dados associados à  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$ , as análises realizadas não permitiram identificar diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais de cor aparente dos cenários de ausência e presença ótima da fase de indução de colisões no início da FAD, com os residuais dos dois cenários tendo se equiparado para cada  $G_f$  explorado. Comportamento idêntico foi observado a partir da aplicação de análises estatísticas aos valores residuais de cor aparente associados às  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ .

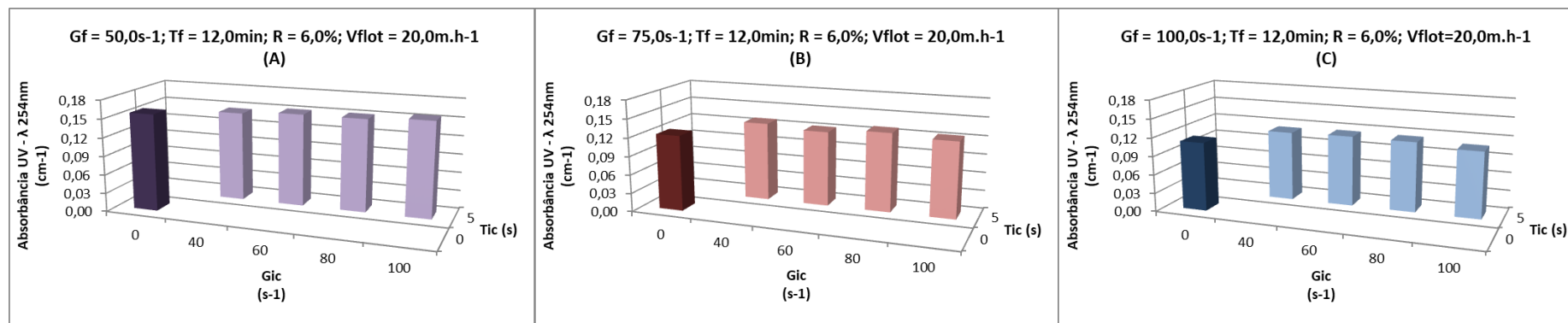
No que concerne às análises aplicadas exclusivamente entre cenários de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), os resultados alcançados para a  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$  revelaram diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre os residuais atribuídos a  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ . Comportamento idêntico foi observado para a  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ .

Já para a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , a observação exclusivamente dos cenários de ausência de indução de colisões permitiu a identificação de ausência de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais de cor aparente associados aos três valores de  $G_f$  estudados ( $50,0s^{-1}$ ,  $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ ).

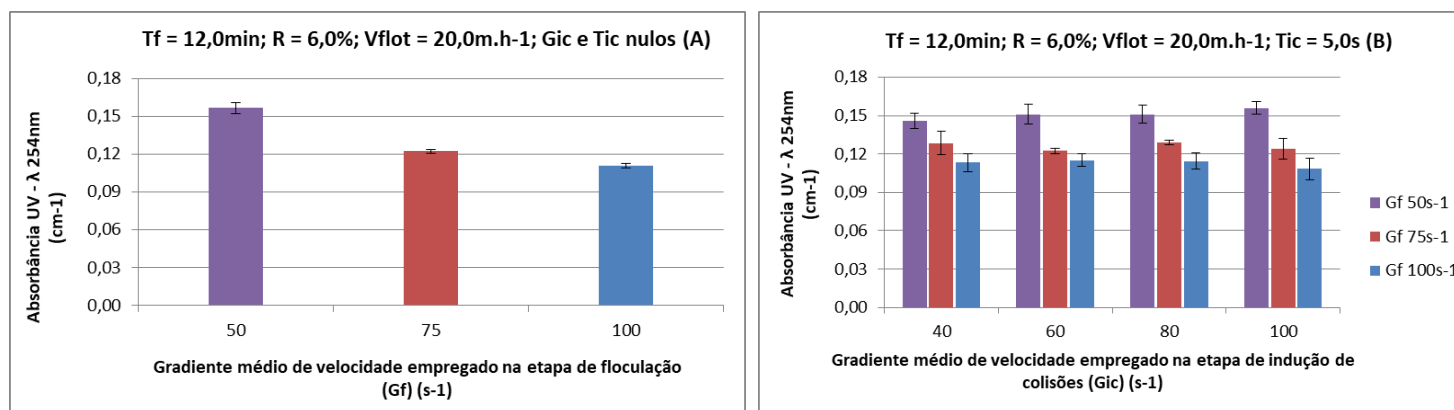
### 5.3.3 Análise dos residuais de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm

Os valores residuais médios de absorvância de UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm obtidos a partir dos ensaios da Etapa 03 para  $V_{flot}$  de  $20,0m.h^{-1}$  foram representados por meio das Figuras 63 e 64, expostas em sequência. Os valores residuais de absorvância foram expressos em  $cm^{-1}$ .

**Figura 63** - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorbância UV ( $\lambda$  254nm) obtidos na Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{\text{flot}}=20,0\text{m.h}^{-1}$ ; Gf de  $50\text{s}^{-1}$  (A),  $75\text{s}^{-1}$  (B) e  $100\text{s}^{-1}$  (C); Tf de 12,0minutos).



**Figura 64** - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorbância UV ( $\lambda$  254nm) e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{\text{IC}}$  de 5,0s (B) para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  na Etapa 03.



A análise da Figura 63 (A, B e C) permitiu notar que, de maneira semelhante ao observado com os dados de remoção de turbidez e cor aparente da Etapa 03, o melhor desempenho geral para  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  e relativo, neste contexto, ao menor valor residual médio de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de  $254\text{nm}$  registrado, foi garantido pela aplicação de  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e por meio da imposição da fase de indução mecânica de colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas no início da FAD ( $G_{\text{IC}}$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e  $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ), com residual aproximado de  $0,11 \pm 0,01\text{cm}^{-1}$  e  $86,9\%$  de eficiência de remoção.

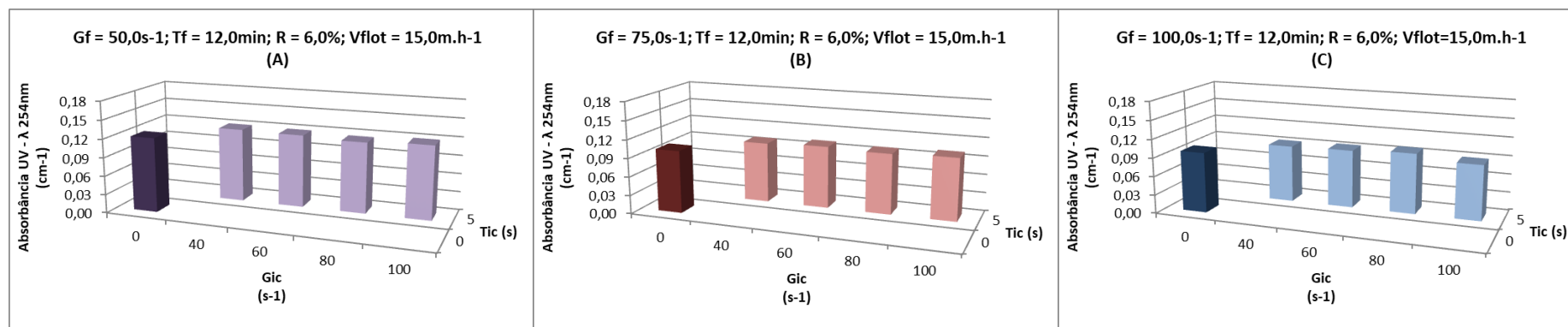
Notou-se, contudo, que o valor residual médio característico do cenário de imposição da FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos), equivalente a  $86,6\%$  de eficiência de remoção, foi superado pelo cenário ótimo de indução de colisões apenas quando consideradas três casas decimais. Ou seja, os valores residuais médios de absorvância associados aos cenários de ausência e de presença ótima de indução de colisões para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  foram praticamente iguais.

Ainda para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$  e considerando os desempenhos alcançados a partir dos outros dois valores de  $G_f$  explorados ( $50,0\text{s}^{-1}$  e  $75,0\text{s}^{-1}$ ), foi possível notar a associação de  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  ao melhor resultado registrado, com residual médio aproximado de  $0,12\text{cm}^{-1}$  ( $85,2\%$  de eficiência de remoção) e desvio padrão de aproximadamente  $0,002\text{cm}^{-1}$ . A observação da Figura 64 (A e B) permitiu constatar que tal valor residual foi alcançado a partir tanto da imposição de  $G_{\text{IC}}$  de  $60,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ) quanto do processo de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos).

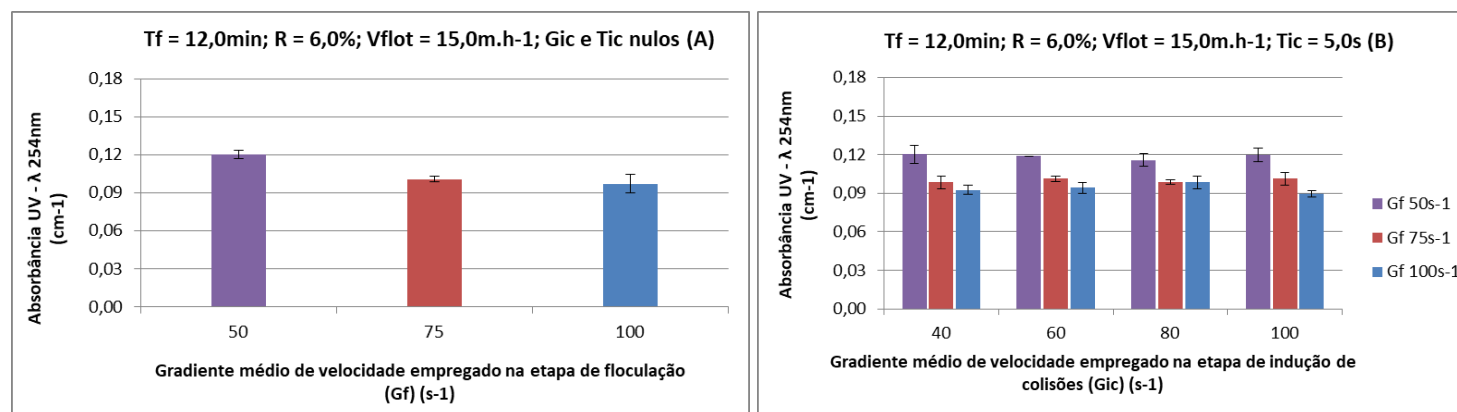
Quanto ao valor de  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$  e considerando ainda a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , o cenário de indução de colisões foi responsável por garantir o menor residual registrado (aproximadamente  $0,15 \pm 0,01\text{cm}^{-1}$  e  $82,4\%$  de eficiência de remoção), com destaque para  $G_{\text{IC}}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ) (Figura 64, A e B). Notou-se, contudo, que tal residual também foi acompanhado de perto por aquele associado ao cenário de ausência de indução (em torno de  $0,16\text{cm}^{-1}$ ).

Os valores residuais médios de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de  $254\text{nm}$  obtidos na Etapa 03 para as velocidades de flotação de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  e  $10,0\text{m.h}^{-1}$  foram representados por meio das Figuras 65 a 68, expostas em sequência.

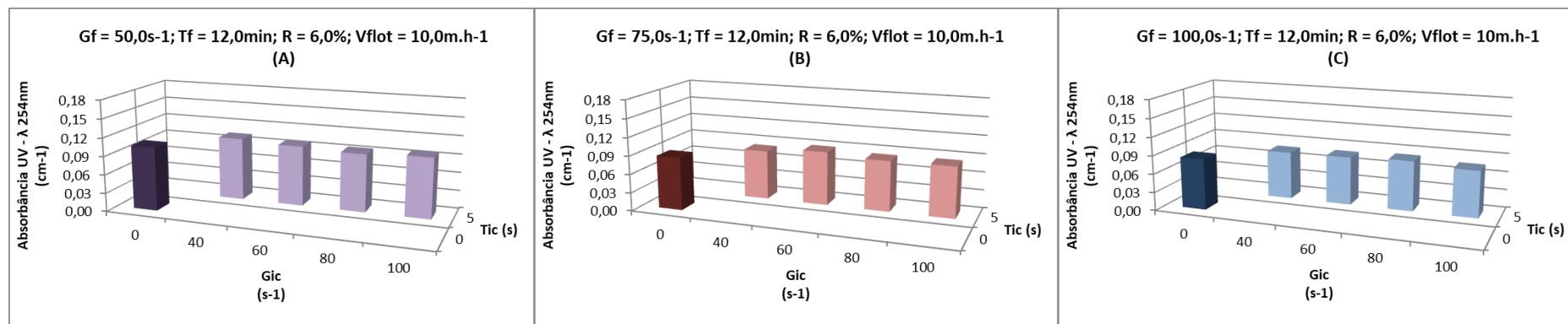
**Figura 65** – Representações gráficas dos valores residuais médios de absorbância UV ( $\lambda$  254nm) obtidos na Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{flot}=15,0m.h^{-1}$ ;  $G_f$  de  $50s^{-1}$  (A),  $75s^{-1}$  (B) e  $100s^{-1}$  (C);  $T_f$  de 12,0minutos).



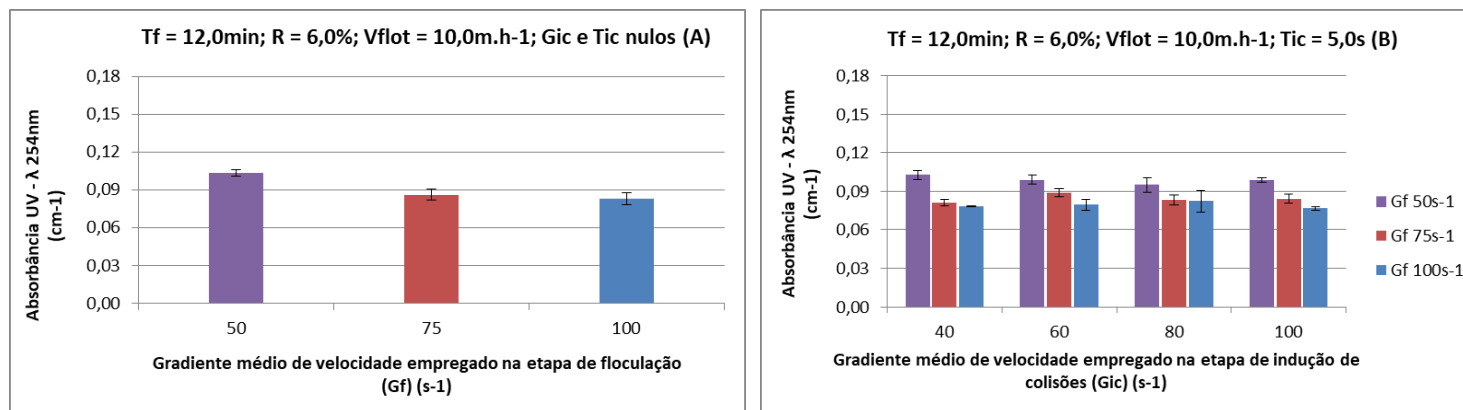
**Figura 66** - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorbância UV ( $\lambda$  254nm) e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{IC}$  de 5,0s (B) para a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  na Etapa 03.



**Figura 67** - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) obtidos na Etapa 03 e com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos durante a fase de indução de colisões ( $R = 6,0\%$ ;  $V_{flot}=10,0m.h^{-1}$ ; Gf de  $50s^{-1}$  (A),  $75s^{-1}$  (B) e  $100s^{-1}$  (C); Tf de 12,0minutos).



**Figura 68** - Representações gráficas dos valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) e respectivos valores de desvio padrão obtidos para os cenários de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) (A) e de imposição de  $T_{IC}$  de 5,0s (B) para a  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$  na Etapa 03.



No que concerne aos resultados obtidos para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$ , a observação da Figura 65 (A, B e C) permitiu notar que o melhor desempenho geral foi alcançado pela imposição de valores de  $G_f$  e de  $G_{\text{IC}}$  idênticos e iguais a  $100,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ), com residual médio de absorvância de aproximadamente  $0,09\text{cm}^{-1}$  (desvio padrão de aproximadamente  $0,003\text{cm}^{-1}$ ) e  $89,2\%$  de eficiência de remoção.

Ainda para a mesma  $V_{\text{flot}}$  ( $15,0\text{m.h}^{-1}$ ) e considerando os outros dois valores de  $G_f$  explorados ( $50,0$  e  $75,0\text{s}^{-1}$ ), o melhor desempenho registrado foi garantido com a imposição de  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  (residual médio de absorvância de aproximadamente  $0,10\text{cm}^{-1}$  e  $88,1\%$  de eficiência de remoção, com desvio padrão de aproximadamente  $0,003\text{cm}^{-1}$ ) e na presença da fase de indução mecânica de colisões no início da FAD ( $G_{\text{IC}}$  de  $40,0\text{s}^{-1}$  e  $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ). Notou-se, contudo, que o desempenho alcançado pelo cenário ótimo de indução de colisões superou o de ausência ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) apenas quando consideradas três casas decimais na análise de residuais médios (Figura 66, A e B), tornando os valores residuais associados a tais desempenhos praticamente iguais.

O menor valor residual médio de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de  $254\text{nm}$  alcançado a partir da imposição de  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$  e para a  $V_{\text{flot}}$  de  $15,0\text{m.h}^{-1}$  foi de aproximadamente  $0,12\text{cm}^{-1}$  ( $86,0\%$  de eficiência de remoção e desvio padrão de aproximadamente  $0,005\text{cm}^{-1}$ ), com destaque para  $G_{\text{IC}}$  de  $80,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ). Porém, assim como constatado para  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$ , o desempenho alcançado a partir do cenário ótimo de indução mecânica de colisões superou o de ausência ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) apenas quando consideradas três casas decimais (Figura 66, A e B).

Quanto aos resultados obtidos para a  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$ , o melhor desempenho geral registrado foi mais uma vez garantido por valores de  $G_f$  e de  $G_{\text{IC}}$  idênticos e iguais a  $100,0\text{s}^{-1}$  ( $T_{\text{IC}}$  de  $5,0\text{s}$ ), com residual médio de absorvância de aproximadamente  $0,08\text{cm}^{-1}$  e desvio padrão de aproximadamente  $0,001\text{cm}^{-1}$  ( $90,8\%$  de eficiência de remoção). Porém, mais uma vez o cenário ótimo de indução mecânica de colisões superou o de ausência ( $G_{\text{IC}}$  e  $T_{\text{IC}}$  nulos) apenas quando consideradas três casas decimais na análise de residuais médios (Figura 67, A, B e C).

Fixada a  $V_{\text{flot}}$  de  $10,0\text{m.h}^{-1}$  e consideradas apenas duas casas decimais para a comparação entre desempenhos, teria sido identificada semelhança entre os valores residuais de absorvância UV ( $\lambda$   $254\text{nm}$ ) alcançados a partir dos cenários de ausência e presença ótima de indução mecânica de colisões para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  (como comentado anteriormente), e a partir

do cenário de desempenho ótimo registrado para Gf de  $75,0s^{-1}$ , atrelado ao cenário de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$  e  $T_{IC}$  de  $5,0s$ ). A Figura 68 (A e B) ilustra tal cenário.

O melhor desempenho identificado com a aplicação de Gf de  $50,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$  foi alcançado com a imposição de  $G_{IC}$  de  $80,0s^{-1}$  ( $T_{IC}$  de  $5,0s$ ), com residual de  $0,09 \pm 0,01cm^{-1}$  (88,5% de eficiência de remoção) (Figura 68, B).

Os valores residuais médios de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm obtidos para as três  $V_{flot}$  exploradas na Etapa 03 e característicos dos cenários tanto de ausência quanto de presença (ótima) da fase de indução mecânica de colisões no início da FAD são expostos por meio da Tabela 18, a seguir.

**Tabela 18** - Análise comparativa entre valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) obtidos por meio do processo de indução de colisões (cenário ótimo) e na ausência de indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), em função de cada Gf imposto e para as três  $V_{flot}$  exploradas na Etapa 03.

Gf ( $s^{-1}$ )	Tf (min)	$V_{flot} = 20,0m.h^{-1}$ ; R = 6,0%				$V_{flot} = 15,0m.h^{-1}$ ; R = 6,0%				$V_{flot} = 10,0m.h^{-1}$ ; R = 6,0%					
		Cenário ótimo de indução de colisões ( $T_{IC} = 5,0s$ )		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões ( $T_{IC} = 5,0s$ )		Cenário de ausência de indução de colisões		Cenário ótimo de indução de colisões ( $T_{IC} = 5,0s$ )		Cenário de ausência de indução de colisões			
		$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> $cm^{-1}$	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> $cm^{-1}$	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> $cm^{-1}$	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> $cm^{-1}$	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> $cm^{-1}$	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> $cm^{-1}$	$G_{IC}$ ( $s^{-1}$ )	Res. <sup>(1)</sup> $cm^{-1}$
		50,0		40,0	0,146	0,0	0,157	80,0	0,116	0,0	0,121	80,0	0,095	0,0	0,104
75,0	12,0	60,0	0,122	0,0	0,122	40,0	0,098	0,0	0,101	40,0	0,081	0,0	0,086		
100,0		100,0	0,108	0,0	0,111	100,0	0,090	0,0	0,097	100,0	0,077	0,0	0,083		

Observação: (1) A abreviatura “Res.” expressa significância residual. (2) Foram consideradas três casas decimais para a representação dos valores residuais de absorvância.

Levando-se em consideração que a água bruta produzida para a realização dos ensaios da Etapa 03 apresentou valor de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm de  $0,830 \pm 0,008cm^{-1}$ , e que tal parâmetro representa um indicador indireto do teor de Matéria Orgânica Natural (M.O.N.) presente no meio (mais especificamente da fração húmica da M.O.N.), a observação dos dados da Tabela 18 permitiu notar a nítida contribuição oferecida pelo processo de flotação por ar dissolvido para a redução do teor orgânico da água em estudo.

Observando com atenção os menores residuais de absorvância alcançados a partir da imposição da FAD, associados ao Gf de  $100,0s^{-1}$ , para os cenários tanto de ausência quanto de

presença ótima da fase de indução de colisões, foi possível notar que os valores residuais médios alcançados para as três  $V_{\text{flot}}$  investigadas foram todos inferiores a aproximadamente  $0,112\text{cm}^{-1}$ , representando eficiência de remoção igual ou superior a 86,5% para  $G_f$  de  $100\text{s}^{-1}$ . Tal constatação é de fundamental importância neste contexto, tendo em vista os impactos potencialmente negativos que a presença de M.O.N. pode gerar sobre os sistemas de tratamento e sobre a qualidade da água destinada a abastecimento, atuando como precursora da formação de subprodutos da desinfecção, por exemplo, muitos dos quais apresentam caráter cancerígeno e mutagênico (SHARMA et al., 2011).

Em complemento, a observação dos dados da Tabela 18 permitiu constatar que, de forma semelhante ao observado para os resultados de remoção de turbidez e cor aparente da Etapa 03, o valor de  $G_{\text{IC}}$  que se associou aos cenários ótimos de indução de colisões obtidos para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  e para as três  $V_{\text{flot}}$  exploradas foi mais uma vez igual a  $100,0\text{s}^{-1}$ .

Quanto às análises estatísticas aplicadas às comparações entre residuais de absorvância, estas foram segregadas por valor de  $V_{\text{flot}}$  investigado, seguiram o mesmo raciocínio aplicado aos dados de turbidez e cor aparente e foram reunidas no Apêndice C.

Primeiramente, as análises realizadas para cada valor de  $G_f$  refletiram a constatada proximidade entre residuais de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) característicos dos cenários de ausência e presença ótima da fase de indução de colisões, não permitindo identificar diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais atrelados a tais cenários para nenhuma das três velocidades de flotação investigadas.

Especificamente para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ , a comparação entre residuais médios característicos dos cenários de ausência de indução de colisões permitiu identificar diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) apenas entre aqueles associados aos valores de  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$  e  $100,0\text{s}^{-1}$ .

É importante observar que não foi verificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais de absorvância do cenário ótimo de indução de colisões obtido para  $G_f$  de  $50,0\text{s}^{-1}$  e o cenário de ausência de indução obtido para  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$ , para a  $V_{\text{flot}}$  de  $20,0\text{m.h}^{-1}$ . O mesmo foi observado entre o cenário ótimo de indução obtido para  $G_f$  de  $75,0\text{s}^{-1}$  e o cenário de ausência de indução obtido para  $G_f$  de  $100,0\text{s}^{-1}$  para a mesma  $V_{\text{flot}}$ . Contudo, com a inexistência de diferença estatisticamente significativa entre os residuais associados aos referidos valores de  $G_f$ , na ordem em que foram citados, com base no cenário de ausência de



indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), a semelhança entre desempenhos obtidos por  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$ , e por  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  não pode ser vinculada à implementação da fase de indução de colisões no início da FAD.

Fenômeno semelhante foi observado para com os dados de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) associados à  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ , em que não foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre nenhum dos residuais associados aos três valores de  $G_f$  explorados ( $50,0s^{-1}$ ,  $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ ) para o cenário de ausência de indução de colisões.

Quanto à  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$ , a observação exclusivamente dos cenários de ausência de indução de colisões permitiu a identificação de diferenças estatisticamente significativas ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais de absorvância associados aos  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $75,0s^{-1}$ , e  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$  (como para turbidez). Não foi identificada diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais característicos do cenário ótimo de indução de colisões ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $40,0s^{-1}$ ; 5,0s) associado a  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e o cenário de ausência de indução associado a  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ . Contudo, os cenários de desempenho associados a estes dois valores de  $G_f$  na ausência da fase de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) já são considerados estatisticamente semelhantes ( $\alpha = 0,05$ ).

#### 5.3.4 Principais constatações alcançadas a partir dos resultados da Etapa 03

Primeiramente, a observação dos resultados obtidos para os três parâmetros investigados na Etapa 03 (turbidez, cor aparente e absorvância UV -  $\lambda$  254nm) e para os três valores de velocidade de flotação explorados ( $20,0m.h^{-1}$ ,  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ ) permitiu constatar que os residuais alcançados a partir da implementação de forma otimizada da fase de indução mecânica de colisões entre partículas floculadas e microbolhas de ar no início da FAD foram ligeiramente inferiores àqueles alcançados na ausência da fase de indução na quase totalidade dos casos, com base em comparações por valor de  $G_f$  aplicado.

Contudo, a aplicação de análises estatísticas (nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%) às diferenças entre residuais viabilizou a constatação de que apenas em dois casos específicos o desempenho atrelado ao cenário ótimo de indução foi capaz de superar aquele associado ao cenário de ausência ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) de forma estatisticamente significativa, com ambos os casos característicos das análises de remoção de turbidez. Um deles remete ao cenário ótimo de indução de colisões ( $G_{IC}$ ;  $T_{IC}$  de  $100,0s^{-1}$ ; 5,0s) alcançado para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de

15,0m.h<sup>-1</sup>, e o outro remete ao cenário ótimo de indução ( $G_{IC}; T_{IC}$  de 60,0s<sup>-1</sup>; 5,0s) alcançado para  $G_f$  de 50,0s<sup>-1</sup> e  $V_{flot}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup>.

Fenômeno semelhante não foi identificado a partir da aplicação de análises estatísticas aos resultados de remoção de turbidez e cor aparente da Etapa 02, em que muitos dos desempenhos associados aos cenários ótimos de indução alcançados por valor de  $G_f$  foram capazes de se igualar estatisticamente ( $\alpha = 0,05$ ) àqueles obtidos na ausência de indução, sem superá-los.

Em complemento, a análise dos resultados da Etapa 03 permitiu constatar que a verificação de existência de diferenças estatisticamente significativas entre os residuais dos cenários ótimos de indução associados a um valor de  $G_f$  e aqueles residuais alcançados a partir da imposição de valor de  $G_f$  imediatamente superior e na ausência da fase de indução mostrou-se mais uma vez pertinente. Deixando de lado os casos em que a semelhança estatística entre desempenhos atribuídos a valores de  $G_f$  distintos foi verificada já para o cenário de FAD na ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos), foram registrados quatro casos de semelhança estatística entre residuais associados a valores de  $G_f$  distintos, garantida a partir da implementação da fase de indução de colisões (com  $G_{IC}$  otimizado) no início da FAD.

Todos os quatro casos foram identificados com a análise dos residuais de turbidez, com três deles associando-se à ausência de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os valores residuais do cenário ótimo de indução obtido para  $G_f$  de 50,0s<sup>-1</sup> e o cenário de ausência de indução obtido para  $G_f$  de 75,0s<sup>-1</sup>, um para cada uma das três  $V_{flot}$  investigadas. É interessante notar que a presença ótima da fase de indução de colisões para remoção de turbidez com  $G_f$  de 50,0s<sup>-1</sup> ( $G_{IC}; T_{IC}$  de 60,0s<sup>-1</sup>, 5,0s) e  $V_{flot}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup> foi responsável não somente por superar estatisticamente o desempenho do correspondente cenário de ausência de indução (como já comentado), mas também alcançar estatisticamente o desempenho atribuído a  $G_f$  de 75,0s<sup>-1</sup> para  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos.

O quarto caso evidenciado para os dados de turbidez associou-se também à  $V_{flot}$  de 10,0m.h<sup>-1</sup>, com base na identificação de ausência de diferença estatisticamente significativa ( $\alpha = 0,05$ ) entre os residuais do cenário ótimo de indução obtido para  $G_f$  de 75,0s<sup>-1</sup> e o cenário de ausência de indução obtido para  $G_f$  de 100,0s<sup>-1</sup>.

Fenômenos de natureza semelhante não foram identificados em relação aos dados residuais de cor aparente e de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) obtidos na Etapa 03, embora tenham sido observados para os dados residuais de cor aparente obtidos na Etapa 02, mais especificamente entre o cenário ótimo de indução obtido para  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e o cenário de ausência de indução ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) obtido para  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$ , para as velocidades de flotação tanto de  $15,0m.h^{-1}$  quanto de  $10,0m.h^{-1}$ .

Como já destacado, acredita-se que a possibilidade de concretização de cenários como os evidenciados anteriormente, em que a garantia de semelhança entre desempenhos de remoção originalmente distintos e atribuídos a valores de  $G_f$  também distintos é condicionada à imposição de breve fase de indução mecânica de colisões microbolhas-flocos no início da FAD, representa, em termos práticos, uma janela de oportunidade para aumento de eficiência, principalmente em casos de unidades de flotação originalmente projetadas com valores de  $T_f$  e/ou  $G_f$  inferiores ao ótimo e que estejam apresentando baixa eficiência de flotação.

Soma-se a este contexto a identificação do potencial garantido pela implementação de fase de indução de colisões para superar o desempenho obtido pela flotação na ausência de indução, para um mesmo valor de  $G_f$ , verificado estatisticamente para dois cenários de remoção de turbidez na Etapa 03. Acredita-se que tal constatação evidencie mais um impacto potencialmente positivo da imposição de uma breve fase de indução de colisões microbolhas-flocos no início da FAD, representando possibilidade concreta de aumento de eficiência.

Em adição, a análise dos resultados obtidos na Etapa 03 permitiu notar a associação de  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  aos mais baixos valores residuais médios obtidos por  $V_{flot}$  analisada e para os três parâmetros estudados.



## 6. DISCUSSÃO GERAL DOS RESULTADOS OBTIDOS

Levando-se em consideração o contexto de investigação explorado, característico do trabalho com o Flotatesto (unidade em escala de bancada e de regime de alimentação por batelada, ou seja, de fluxo intermitente), e as condições e parâmetros operacionais fixados e reproduzidos ao longo de toda a execução desta pesquisa (água bruta de estudo preparada com elevada cor e baixa turbidez, condições ótimas de coagulação determinadas por Marega (2020), pressão de saturação de  $500,0 \pm 10,0$  kPa e razão de recirculação de 6,0%), os resultados obtidos a partir das três etapas de investigação realizadas permitiram constatar que o incremento do gradiente de velocidade característico da etapa de contato e aderência entre partículas floculadas e microbolhas de ar, induzido a partir da imposição de agitação mecânica, foi capaz de elevar ligeiramente a eficiência de clarificação alcançada pelo processo de flotação por ar dissolvido para alguns casos específicos.

Com base na hipótese de início do movimento ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos concomitantemente à fase de indução de colisões, os resultados obtidos ao longo da Etapa 01 para remoção de turbidez e cor aparente permitiram destacar que os melhores desempenhos alcançados por valor de  $G_f$  a partir da imposição do processo de indução mecânica de colisões no início da FAD superaram aqueles alcançados na ausência de indução em praticamente todos os casos, com base em velocidade de flotação de  $8,1 \pm 1,7$  m.h<sup>-1</sup>. Deve-se notar, contudo, que os ensaios da Etapa 01 foram concebidos como ensaios de “sondagem”, sem a repetição de ensaios para caracterizar as respostas do sistema a uma mesma configuração operacional.

A hipótese de início da movimentação ascensional dos aglomerados microbolhas-flocos concomitantemente à fase de indução de colisões fundamentou o planejamento, execução e interpretação dos resultados alcançados ao longo das duas etapas subsequentes de investigação (Etapas 02 e 03), cujos ensaios foram realizados em triplicata, a fim de garantir maior consistência aos mesmos.

Sendo assim, com base na verificação de diferença estatisticamente significativa entre residuais (nível de significância de 5,0%), os resultados alcançados a partir dos ensaios da Etapa 02 permitiram notar que os cenários de indução mecânica de colisões bolha-floco com valores de  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  otimizados foram capazes de assemelhar estatisticamente valores

residuais de cor aparente originalmente distintos e associados à aplicação de valores de  $G_f$  também distintos ( $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ ), para as velocidades de flotação de  $15,0$  e  $10,0m.h^{-1}$ .

Fenômeno semelhante foi observado para alguns dos resultados alcançados a partir dos ensaios da Etapa 03, mais especificamente quanto à remoção de turbidez da água. Neste contexto, os cenários de indução mecânica de colisões bolha-floco com valores de  $G_{IC}$  otimizados e  $T_{IC}$  fixado em  $5,0s$  foram capazes de assemelhar estatisticamente ( $\alpha = 0,05$ ) valores residuais de turbidez originalmente distintos e associados à aplicação de valores de  $G_f$  mais uma vez distintos ( $G_f$  de  $50,0s^{-1}$  e  $75,0s^{-1}$ ), para as três velocidades de flotação exploradas ( $20,0m.h^{-1}$ ,  $15,0m.h^{-1}$  e  $10,0m.h^{-1}$ ). Especificamente para a  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$ , tal fenômeno pode ser observado também entre os valores de  $G_f$  de  $75,0s^{-1}$  e  $100,0s^{-1}$ .

Ainda no que concerne aos resultados característicos da terceira etapa de investigação, foi possível notar que a implementação da fase de indução mecânica de colisões durante os cinco segundos iniciais do processo de FAD e com base em valor de  $G_{IC}$  otimizado possibilitou a superação de desempenhos obtidos na ausência de indução mecânica para a  $V_{flot}$  de  $15,0m.h^{-1}$  e  $G_f$  de  $100,0s^{-1}$  e  $V_{flot}$  de  $10,0m.h^{-1}$  e  $G_f$  de  $50,0s^{-1}$ .

Dando maior destaque à interpretação dos resultados obtidos nas Etapas 02 e 03, cujos ensaios foram realizados em triplicata e cujos resultados, por consequência, são admitidos como mais consistentes e capazes de representar a realidade de forma mais fidedigna, foi possível constatar que as reduções impostas entre uma etapa e outra aos valores de  $G_f$ ,  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  parecem ter sido pertinentes e coerentes em relação ao propósito de verificação do caráter vantajoso ou não da imposição de fase de indução de colisões no início da FAD.

É possível embasar tal argumento a partir da observação da frequência com que os cenários ótimos de imposição de agitação mecânica à etapa de contato entre microbolhas de ar e partículas floculadas garantiram a semelhança entre residuais originalmente distintos e associados a valores de  $G_f$  também distintos, duas vezes maior na Etapa 03. Panorama similar foi observado quanto à frequência com que os cenários ótimos de agitação mecânica (indução de colisões) foram capazes de superar os desempenhos atrelados aos cenários de ausência de agitação, para um mesmo  $G_f$ . Dois casos desta natureza foram identificados na Etapa 03 e nenhum na Etapa 02.

As pesquisas realizadas por Souza (2012) e Meca (2014), associadas, entre outros tópicos, à investigação da influência gerada pelo incremento do valor de gradiente de

velocidade no interior da zona de contato ( $G_{ZC}$ ) de unidade piloto de flotação por ar dissolvido (UPFAD) sobre a eficiência do processo de flotação, evidenciaram resultados favoráveis ao incremento de  $G_{ZC}$  e ofereceram uma espécie de “prévia” do que poderia ser constatado na investigação em questão.

Em suas pesquisas, as autoras incrementaram o valor de  $G_{ZC}$  pré-existente (característico do fluxo turbulento e do movimento ascensional das bolhas em relação ao movimento descendente dos flocos) por meio da inserção de módulos de telas sobrepostas no interior da zona de contato da UPFAD. Independentemente das configurações estruturais impostas à zona de contato por cada uma das autoras, Souza (2012) e Meca (2014) puderam constatar que os cenários de introdução de telas modelo Hobby no interior da ZC ( $G_{ZC}$  de 4,7 a 6,5s<sup>-1</sup> para Souza (2012) e de 3,15 a 6,12s<sup>-1</sup> para Meca (2014)) foram mais eficientes que os cenários de ausência de telas para remoção de turbidez e cor aparente em praticamente todos os casos explorados.

No caso específico deste estudo, contudo, foi possível notar que os cenários de indução mecânica de colisões com valores de  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  otimizados foram capazes de superar o desempenho dos cenários de ausência de indução apenas em duas oportunidades (Etapa 03), uma vez fixado o valor de  $G_f$  explorado.

Deve-se enfatizar, porém, que as diferenças entre esta pesquisa e aquelas realizadas por Souza (2012) e Meca (2014) vão além dos resultados obtidos e partem, fundamentalmente, da natureza das unidades experimentais utilizadas. Diferentemente deste estudo, conduzido em unidade experimental em escala de bancada e de fluxo intermitente (Flotateste), os estudos das referidas autoras foram conduzidos em unidade em escala piloto e de escoamento em fluxo contínuo, cuja dinâmica de operação e funcionamento é completamente diferente da característica do Flotateste.

Além disso, é possível notar que os valores de  $G_{ZC}$  ótimos identificados por Souza (2012) e Meca (2014) (incrementados por meio do fluxo hidráulico através das telas) são consideravelmente inferiores ao menor valor de gradiente médio de velocidade empregado na etapa de indução mecânica de colisões ( $G_{IC}$ ) nesta pesquisa (20,0s<sup>-1</sup>). Em adição, embora o valor de  $G_f$  explorado pelas autoras (110,0s<sup>-1</sup>) esteja próximo do valor de  $G_f$  de 100,0s<sup>-1</sup>, explorado neste estudo, os valores de  $T_f$  são significativamente diferentes ( $T_f$  de 17,2minutos para Souza (2012) e Meca (2014);  $T_f$  de 8,0 e 12,0minutos para este estudo).

Tais diferenças inviabilizam a comparação direta entre resultados e desempenhos, bem como demandam cuidado quanto à realização de qualquer tipo de aproximação entre comportamentos observados nos dois sistemas. De qualquer forma, a observação atenta dos resultados obtidos nesta pesquisa e daqueles obtidos por Souza (2012) e Meca (2014) permite sugerir que, em pesquisas futuras associadas ao uso do Flotateste, o cenário de indução mecânica de colisões bolha-floco seja explorado a partir de menores valores de  $G_{IC}$ , talvez mais próximos dos investigados pelas referidas autoras.

Faz-se necessário destacar também, ainda no contexto de continuidade desta investigação com o uso do Flotateste, que um dos principais fatores (senão o principal) a ser aprimorado corresponde à segregação entre as etapas de indução de colisões e de separação no interior das colunas de flotação com alimentação por batelada.

Como foi possível notar, o início do movimento ascensional dos aglomerados formados durante a fase de indução de colisões motivou a incorporação de  $T_{IC}$  aos intervalos de tempo de coleta de amostras ou de flotação ( $\Delta T_{flot}$ ), e a ausência de separação física entre as zonas de contato e de separação no interior das colunas (de fluxo intermitente) fez com que a associação entre fases prolongadas de indução de colisões (60,0s, por exemplo) e elevados valores de  $V_{flot}$  (20,0m.h<sup>-1</sup>, por exemplo) impactassem negativamente a qualidade das amostras coletadas.

Dessa forma, é pertinente sugerir a construção de novos dispositivos de agitação para as colunas do Flotateste, dedicados às etapas tanto de floculação quanto de indução de colisões. Tais dispositivos poderiam ser construídos em formato helicoidal, por exemplo, impulsionando levemente o líquido para a parte de baixo da coluna e garantindo que durante a etapa de indução de colisões os aglomerados microbolhas-flocos não apresentassem tendência de ascender ao topo da coluna. Tal adaptação permitiria separar com mais segurança as fases de indução e de separação no Flotateste.

Sendo assim, face aos resultados das três fases do presente estudo, ficou patente a enorme importância de se otimizar as condições de floculação ( $G_f$  e  $T_f$ ) antecedendo a flotação, com valores de  $G_f$  em torno de 100,0s<sup>-1</sup> e  $T_f$  de 12,0minutos para o tipo de água bruta do presente estudo (valores ótimos próximos aos encontrados por Marega (2020)). Por sua vez, nos casos de unidades já construídas e em cujo projeto porventura tenham sido adotados valores de  $G_f$  inadequados à FAD (inferiores ao ótimo), a indução de colisões pode constituir opção para se tentar melhorar a eficiência da flotação.



## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS, CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

De maneira geral, de acordo com o contexto experimental e condições operacionais investigadas, a imposição de fase de indução mecânica de colisões entre microbolhas de ar e partículas floculadas no Flotateste foi capaz de contribuir ligeiramente para o aumento da eficiência do processo de FAD em alguns casos específicos.

Dessa forma, como principal constatação alcançada com esta pesquisa é possível destacar a fundamental importância da busca pela otimização das condições de floculação ( $G_f$  e  $T_f$ ) antecedendo o processo de flotação, com valores de  $G_f$  próximos de  $100,0s^{-1}$  e valores de  $T_f$  próximos de 12,0 minutos para o tipo de água bruta preparada para este estudo. Já para os casos de unidades FAD em escala plena que porventura estejam operando com baixa eficiência devido a valores de  $G_f$  inferiores ao ótimo, acredita-se que os resultados alcançados nesta pesquisa permitam sugerir como opção de tentativa de aumento de eficiência a imposição de um valor (otimizado em Flotateste) de  $G_{IC}$  na zona de contato do flotador.

Em complemento, propõe-se a continuidade da investigação em escala de bancada (uso do Flotateste) acerca da influência do incremento do gradiente de velocidade característico da etapa de contato entre microbolhas e flocos sobre a eficiência do processo de flotação por ar dissolvido, tendo como base a exploração de diferentes valores de  $T_{IC}$  e de valores de  $G_{IC}$  mais baixos, talvez mais próximos dos identificados como ótimos por Souza (2012) e Meca (2014).

Para tanto, recomenda-se a estruturação de novos dispositivos de agitação para o Flotateste, com pás agitadoras ligeiramente “torcidas” em formato helicoidal, capazes de impulsionar levemente o líquido para a parte inferior da coluna. Tal configuração poderia contribuir para a redução ou até eliminação da tendência de ascensão dos aglomerados microbolhas-flocos ao topo da coluna durante a etapa de indução de colisões, permitindo a segregação com maior nitidez das etapas de indução de colisões e de separação no interior das colunas do Flotateste.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO, Cláudio Júnior. **Influência da velocidade cross-flow na câmara de flotação na eficiência de unidades de flotação por ar dissolvido tratando água para abastecimento.** Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali. 2010. 113p. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-03022011-141840/pt-br.php> Acesso em: 10 jul. 2021.
- ARBOLEDA, Jorge Valencia. **Teoría y práctica de la Purificación del agua.** 3.ed. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana, 2000. ISBN-10: 9584100122
- AWWA. **Standard Methods for The Examination of Water and Wastewater.** 22. ed. Washington, DC: American Public Health Association, 2012. American Water Works Association, Water Environment Federation.
- BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria.** 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2010. 414 p., 25 cm. ISBN 978-85-7780-652-2
- COUTO; H. J. B.; NUNES, D. G.; NEUMANN, R.; FRANÇA, S. C. A. Micro-bubble size distribution measurements by laser diffraction technique. **Minerals Engineering**, v. 22, ed. 4, p. 330-335, mar. 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.09.006>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0892687508002355> Acesso em: 17 nov. 2019.
- DIBBERN SACCHI, Gabriel. **Flotação por ar dissolvido aplicado à separação de microalgas cultivadas em fotobiorreator, alimentado com vinhaça pré-tratada físico-quimicamente, com vistas à exploração de seu potencial bioenergético.** Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali. Co-orientadora: Professora Doutora Mirna Helena Regali Selegim. 2015. 305p. Tese (Doutorado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2015. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-10052016-112512/pt-br.php> Acesso em: 25 de julho 2021.
- DI BERNARDO, Luiz; DI BERNARDO DANTAS, Angela; VOLTAN, Paulo Eduardo Nogueira. **Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água.** São Carlos: LDiBe Editora, 2011. 454 p. ISBN 978-85-62324-03-1.
- EDZWALD, James K.; HAARHOFF, Johannes. **Dissolved Air Flotation for Water Clarification.** American Water Works Association. EUA: McGraw-Hill Companies, Inc, 2012. ISBN 978-0-07-174562-8.
- EDZWALD, James K. Dissolved air flotation and me. **Water Research**, v. 44, ed. 7, p. 2077-2106, abr. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.12.040>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0043135409008525>. Acesso em: 02 set. 2019.

EDZWALD, James K. Dissolved Air Flotation in Drinking Water Treatment. *In*: NEWCOMBE, Gayle; DIXON, David (ed.). **Interface Science in Drinking Water Treatment: Theory and Applications**. Londres, Reino Unido: ELSEVIER, Ltd, 2006. p. 89 – 107. *E-book*. 365 p. (Interface Science and Technology, v.10). ISBN-13: 978-0-12-088380-6.

HAARHOFF, Johannes. Dissolved air flotation: progress and prospects for drinking water treatment. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 57, ed. 8, p. 555-567, dez. 2008. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2008.046b>. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article-abstract/57/8/555/31148/Dissolved-air-flotation-progress-and-prospects-for?redirectedFrom=fulltext>. Acesso em: 13 set. 2019.

HAN, M.Y.; KIM, T.I. Dissolved air flotation development, application and research needs. *In*: VAN NIEUWENHUIJZEN, Arjen; VAN DER GRAAF, Jaap (ed.). **Handbook on Particle Separation Processes**. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2011. p. 117 – 128. *E-book*. 211 p. ISBN 1843392771.

HAN, M. Y.; PARK, Y. H.; YU, T. J. Development of a new method of measuring bubble size. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 2, ed. 2, p. 77-83, abr. 2002. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2002.0048>. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/2/2/77/25586/Development-of-a-new-method-of-measuring-bubble>. Acesso em: 05 set. 2019.

LEPPINEM, D. M.; DALZIEL, S. B.; LINDEN, P. F. Modelling the global efficiency of dissolved air flotation. **Water Science and Technology**, v. 43, ed. 8, p. 159-166, abr. 2001. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0490>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/43/8/159/9512/Modelling-the-global-efficiency-of-dissolved-air>. Acesso em: 12 out. 2019.

MAIA, Kisner Anderson. **Influência da velocidade de entrada na zona de contato na eficiência de clarificação de unidades retangulares de flotação por ar dissolvido aplicado no tratamento de águas para abastecimento**. Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali. 2010. 102 p. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-12112010-103728/pt-br.php> Acesso em: 09 maio 2020.

MAIA, Kisner Anderson; REALI, Marco Antonio Penalva; PIOLTINE, Andre. Evaluation of the effects of varying the water velocity at the entrance of the contact zone on the performance of a dissolved air flotation (DAF) unit using the image analysis method. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, ed. 3, p. 802-809, jun. 2016. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2015.189>. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/16/3/802/27848/Evaluation-of-the-effects-of-varying-the-water>. Acesso em: 27 jan. 2020.

MAREGA, Gabrielle Migliato. **Influência das características das partículas floculadas e das microbolhas de ar no processo de Flotação por Ar Dissolvido**. Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali. 2020. 111 p. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2020. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-08102020-164126/pt-br.php> Acesso em: 25 jul. 2021.

MECA, Karen Soraia. **Influência do tempo de detenção hidráulica e do gradiente médio de velocidade na zona de contato no desempenho de unidade piloto de flotação por ar dissolvido aplicado à clarificação de água para abastecimento**. Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali. 2014. 87 p. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2014. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-14112017-104621/pt-br.php> Acesso em: 07 maio 2020.

NEWCOMBE, Gayle; DIXON, David. Introduction. *In*: NEWCOMBE, Gayle; DIXON, David (ed.). **Interface Science in Drinking Water Treatment: Theory and Applications**. Londres, Reino Unido: ELSEVIER, Ltd, 2006. p. 1 – 4. *E-book*. 365 p. (Interface Science and Technology, v.10). ISBN-13: 978-0-12-088380-6.

PIOLTINE, Andre; REALI, Marco Antonio Penalva. Influência do tamanho de flocos e da concentração de ar dissolvido na eficiência da flotação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 20, n. 3, p. 513-523, jul./set. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1413-4152201502000090030>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522015000300513&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.br/scielo.php?pid=S1413-41522015000300513&script=sci_arttext). Acesso em: 27 jan. 2020.

REALI, Marco Antonio Penalva. **Concepção e avaliação de um sistema compacto para tratamento de águas de abastecimento utilizando o processo de flotação por ar dissolvido e filtração com taxa declinante**. Orientador: Prof. Dr. José Roberto Campos. 1991. 373 p. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 1991. 2v.

REALI, Marco Antonio Penalva; MARCHETTO, Margarida. High-rate dissolved air flotation for water treatment. **Water Science and Technology**, v. 43, ed. 8, p. 43-49, abr. 2001. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2001.0461>. Disponível em: <https://iwaponline.com/wst/article/43/8/43/9532/High-rate-dissolved-air-flotation-for-water>. Acesso em: 28 jan. 2020.

REALI, Marco Antonio Penalva; PATRIZZI, Leila Jorge. The influence of the contact zone configuration on the performance of a DAF pilot plant applied to water treatment. **Water Science and Technology: Water Supply**, v. 16, ed. 1, p. 186-192, fev. 2016. DOI: <https://doi.org/10.2166/ws.2015.127>. Disponível em: <https://iwaponline.com/ws/article/16/1/186/27724/The-influence-of-the-contact-zone-configuration-on>. Acesso em: 27 jan. 2020.

REALI, Marco Antonio Penalva; PAZ, Lyda Patricia Sabogal; DANIEL, Luiz Antonio. Tratamento de água para consumo humano. *In*: CALIJURI, Maria do Carmo; CUNHA, Davi Gasparini Fernandes (org.). **Engenharia ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2019. p. 323 – 363. 685 p. ISBN 978-85-352-9047-9.

SHARMA, S.K.; SALINAS RODRIGUEZ, S.G.; BAGHOTH, S.A.; MAENG, S.K.; AMY, G. Characterization Profiling of NOM – as a Basis for Treatment Process Selection and Performance Monitoring. *In*: VAN NIEUWENHUIJZEN, Arjen; VAN DER GRAAF, Jaap (ed.). **Handbook on Particle Separation Processes**. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2011. p. 61 – 88. *E-book*. 211 p. ISBN 1843392771.

SOUZA, Irene Monteiro da Franca. **Influência do gradiente médio de velocidade na zona de contato na eficiência de clarificação de água para abastecimento por flotação.**

Orientador: Prof. Dr. Marco Antonio Penalva Reali. 2012. 85 p. Dissertação (Mestrado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2012. Disponível em: <https://teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-17102012-103326/pt-br.php> Acesso em: 05 maio 2020.

VALADE, M. T.; BECKER, W. C.; EDZWALD, J. K. Treatment selection guidelines for particle and NOM removal. **Journal of Water Supply: Research and Technology-Aqua**, v. 58, ed. 6, p. 424-432, set. 2009. DOI: <https://doi.org/10.2166/aqua.2009.201>. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article/58/6/424/28932/Treatment-selection-guidelines-for-particle-and>. Acesso em: 10 jan. 2020.

VAN NIEUWENHUIJZEN, Arjen; VAN DER GRAAF, Jaap. Introduction. *In*: VAN NIEUWENHUIJZEN, Arjen; VAN DER GRAAF, Jaap (ed.). **Handbook on Particle Separation Processes**. Londres, Reino Unido: IWA Publishing, 2011. p. 01 – 14. *E-book*. 211 p. ISBN 1843392771.

**APÊNDICE A – Equações e coeficientes de correlação e de correção para valores residuais de cor e absorvância de UV em comprimento de onda de 495nm da Etapa 03**

De acordo com Marega (2020), o comprimento de onda ( $\lambda$ ) adotado em sua pesquisa para a realização das leituras de absorvância UV e posterior correlação com valores de cor verdadeira e aparente foi de 495nm, com base em metodologia implementada por Araújo (2010) e reproduzida em seu trabalho (varredura em espectrofotômetro e identificação de pico de absorvância de UV para a presença de ácido húmico quando de medição em  $\lambda$  de 495nm).

Dessa forma, foi preparada solução mãe de ácido húmico em concentração de 7,5mg.L<sup>-1</sup>, seguida pela produção de oito diluições distintas a partir da solução mãe. Uma amostra de cada uma das oito diluições foi submetida a análise tanto em colorímetro de discos Orbeco Hellige®, modelo 711, quanto em espectrofotômetro HACH®, modelo DR 5000 (com base em medições de absorvância UV em  $\lambda$  de 495nm e cubeta de 50,0mm de caminho óptico). Os valores registrados foram correlacionados linearmente, com a obtenção da seguinte equação:

$$Y = 334,75 * X$$

$$(R^2 = 0,9807)$$

Em que:

Y: valores de cor registrados por meio do colorímetro de discos (mgPt-Co.L<sup>-1</sup>);

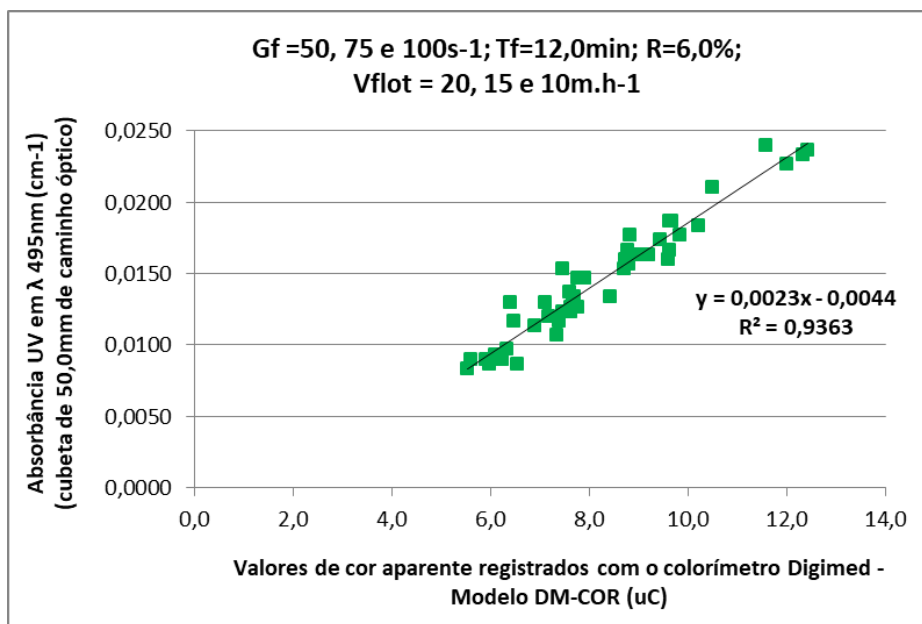
X: valores de absorvância de UV em  $\lambda$  de 495nm (cm<sup>-1</sup>);

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação do modelo de tendência linear aplicado;

Sendo assim, todos os valores de absorvância UV em  $\lambda$  de 495nm registrados ao longo da Etapa 03 desta pesquisa foram multiplicados pelo valor do coeficiente angular da equação anteriormente exposta (334,75), com o objetivo de obtenção de valores correspondentes de cor, indiretamente atrelados ao uso do colorímetro de discos Orbeco Hellige®, modelo 711.

Quanto à correção aplicada aos valores de cor medidos por meio do colorímetro Digimed® (modelo DM-COR) ao longo das Etapas 01 e 02 desta pesquisa, o procedimento adotado consistiu no estabelecimento de correlação linear entre os valores residuais de cor aparente (colorímetro Digimed®) e de absorvância UV em  $\lambda$  de 495nm (espectrofotômetro HACH® - modelo DR 5000, e cubeta de 50,0mm de caminho óptico) registrados para cada amostra ao longo da Etapa 03 (Figura 69).

**Figura 69** – Representação gráfica de correlação linear estabelecida entre os valores residuais de absorbância UV ( $\lambda$  de 495nm) e de cor aparente (colorímetro Digimed® - modelo DM-COR) registrados a partir dos ensaios realizados na Etapa 03.



A observação da Figura 69 permite evidenciar a equação de correlação obtida:

$$Y = 0,0023 * X - 0,0044$$

$$(R^2 = 0,9363)$$

Em que:

Y: valores residuais de absorbância UV em  $\lambda$  de 495nm ( $\text{cm}^{-1}$ );

X: valores residuais de cor aparente registrados com o colorímetro Digimed® (uC ou  $\text{mgPt-Co.L}^{-1}$ );

R<sup>2</sup>: coeficiente de determinação do modelo de tendência linear aplicado;

Dessa forma, a aplicação da equação anterior permitiu a obtenção de um valor equivalente de absorbância UV em  $\lambda$  de 495nm (Y) para cada valor residual de cor aparente obtido a partir do uso do colorímetro Digimed® nas Etapas 01 e 02. Assim, a multiplicação de cada novo valor de absorbância (Y) pelo valor do coeficiente de conversão obtido por Marega (2020) (334,75) permitiu a obtenção de valores correspondentes de cor (em uC, ou  $\text{mgPt-Co.L}^{-1}$ ), indiretamente atrelados ao uso do colorímetro de discos Orbeco Hellige®, modelo 711.



## APÊNDICE B – Análises estatísticas características da Etapa 02

Como já mencionado, o software aplicado à realização das análises estatísticas da Etapa 02 foi o *PAST*® (*PAleontological STatistics*), de acesso livre.

Cada um dos cenários experimentais explorados na Etapa 02, fruto de uma combinação específica entre valores de  $G_f$ ,  $G_{IC}$ ,  $T_{IC}$  e  $V_{flot}$ , foi investigado a partir da realização de ensaios em triplicata, com as amostras componentes de cada triplicata tendo sido consideradas independentes entre si e em relação às amostras de outras triplicatas. Foram realizados, então, testes para a verificação da existência ou não de diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios amostrados. A realização de tais testes fundamentou-se na formulação de duas hipóteses centrais:

$H_0$  (ou hipótese nula): não há diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios comparados;

$H_1$  (ou hipótese alternativa): existe diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios comparados (ou pelo menos entre dois deles, para o caso de comparação entre três ou mais valores).

Sendo assim, fixou-se nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0% para todas as análises estatísticas aplicadas aos dados residuais de turbidez e cor aparente da Etapa 02. Dessa forma, quando os p-valores alcançados a partir da aplicação dos testes estatísticos foram iguais ou superiores ao valor de  $\alpha$  (0,05), a hipótese nula ( $H_0$ ) foi aceita e foi admitida a ausência de diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios comparados, com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%. Por outro lado, quando os p-valores alcançados a partir da aplicação dos testes foram inferiores ao valor de  $\alpha$  (0,05), a hipótese nula ( $H_0$ ) foi rejeitada e a hipótese alternativa ( $H_1$ ) foi aceita (admitida a existência de diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios comparados), com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%.

Em complemento, a aplicação dos testes estatísticos fundamentou-se também na escolha entre testes paramétricos e não paramétricos. Além do trabalho com amostras provenientes de populações independentes, a premissa respeitada para a aplicação de testes paramétricos consistiu na manifestação de valores Normalmente distribuídos (devem seguir uma distribuição Normal de probabilidade) e na igualdade entre as variâncias das amostras

comparadas (ou variâncias homogeneamente distribuídas). Quando tais premissas não foram respeitadas os testes estatísticos aplicados foram os não paramétricos.

O teste “t” (paramétrico) e o teste de Mann-Whitney U (não paramétrico) foram aplicados quando da comparação entre os valores residuais médios característicos de apenas dois grupos distintos. A escolha pelo teste paramétrico ou não paramétrico deu-se com base nos p-valores resultantes do teste de normalidade de Shapiro-Wilk W e do teste “F”, para a igualdade entre variâncias, testes estes aplicados aos valores residuais médios comparados. Para cada teste (“t” ou Mann-Whitney U), a comparação do p-valor calculado com o valor do nível de significância pré-estabelecido ( $\alpha = 0,05$ ) permitiu constatar a existência ou não de diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais em análise e concluir, assim, o teste.

Quando a comparação se deu entre três ou mais valores residuais médios, como ocorrido com a comparação entre os residuais dos cenários de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) obtidos para cada  $G_f$  (75, 100, 150 e  $200s^{-1}$ ) e  $V_{flot}$  (20, 15 e  $10m.h^{-1}$ ), os testes aplicados foram One-Way ANOVA (paramétrico) e Kruskal-Wallis (não paramétrico). A escolha pelo teste paramétrico ou não paramétrico deu-se novamente com base nos p-valores resultantes do teste de normalidade de Shapiro-Wilk W e, neste contexto, do teste de homogeneidade de variâncias de Levene, testes estes aplicados aos residuais médios comparados.

Uma vez satisfeita a premissa para a realização do teste paramétrico de One-Way ANOVA (garantida a normalidade dos dados amostrais e homogeneidade entre variâncias – com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%) este foi aplicado. Em caso contrário, optou-se pela aplicação do teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.

Quando os p-valores obtidos a partir da aplicação dos referidos testes foram iguais ou superiores ao valor de nível de significância pré-estabelecido ( $\alpha = 0,05$ ), considerou-se como satisfeita a hipótese nula ( $H_0$ ), de ausência de diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios comparados. Por outro lado, quando os p-valores obtidos foram inferiores ao valor de nível de significância pré-estabelecido ( $\alpha = 0,05$ ), rejeitou-se  $H_0$  e considerou-se como satisfeita a hipótese alternativa ( $H_1$ ), de existência de diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois dos valores residuais médios comparados.

A partir do cenário de aceitação de  $H_1$  foram aplicados testes *a posteriori* (*post hoc*) aos valores residuais médios comparados para localizar a ocorrência das diferenças

estatisticamente significativas identificadas. Em outras palavras, os residuais médios associados a cada um dos valores de Gf explorados (75, 100, 150 e 200s<sup>-1</sup>) foram comparados entre si e foi determinado um p-valor a partir de cada comparação. Quando inferiores ao valor de nível de significância pré-estabelecido ( $\alpha = 0,05$ ), tais p-valores indicaram a manifestação de diferença estatisticamente significativa entre os residuais comparados, permitindo a conclusão do teste.

Quando implementados os testes *a posteriori* (*post hoc*), a escolha pelos modelos utilizados foi condicionada à natureza dos testes previamente aplicados à comparação entre valores residuais médios. Para One-Way ANOVA (teste paramétrico), o teste *post hoc* utilizado foi o de Tukey's pairwise. Já para Kruskal-Wallis (teste não paramétrico), o teste *post hoc* aplicado foi o de Dunn.

### Análises aplicadas aos residuais de turbidez

**Tabela 19** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de turbidez da Etapa 02.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de turbidez obtidos na Etapa 02												
$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )	$Gf = 75,0s^{-1}$			$Gf = 100,0s^{-1}$			$Gf = 150,0s^{-1}$			$Gf = 200,0s^{-1}$		
	$V_{flot\ 01}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 02}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 03}$ ( $10m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 01}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 02}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 03}$ ( $10m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 01}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 02}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 03}$ ( $10m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 01}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 02}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{flot\ 03}$ ( $10m.h^{-1}$ )
	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
0;00	0,2105	0,8644	0,2786	0,7244	0,2983	0,1066	0,0375	0,2006	0,3631	0,1108	0,4430	0,5311
40;30	0,4381	0,9243	0,5641	0,8168	0,6053	0,9249	0,3057	0,0000	0,1270	0,8170	0,3409	0,1033
40;60	0,4435	0,3813	0,6931	0,6369	0,0190	0,8210	0,8816	0,8776	0,3458	0,4745	0,2145	0,1300
60;30	0,7496	0,8459	0,9659	0,7249	0,9292	0,7703	0,1093	0,1866	0,2455	0,9518	0,1650	0,3345
60;60	0,2759	0,3257	0,7726	0,9426	0,5682	0,7262	0,8041	0,3051	0,4469	0,4477	0,7992	0,0882
80;30	0,8883	0,4851	0,1832	0,6861	0,5566	0,2550	0,2738	0,3037	0,4763	0,4332	0,6116	0,2158
80;60	0,2746	0,1075	0,0561	0,3802	0,2012	0,7355	0,2979	0,7581	0,0170	0,6847	0,5317	0,0000
120;30	0,1287	0,1049	0,3590	0,5088	0,1094	0,8195	0,0944	0,8304	0,7941	0,3450	0,4633	0,3522
120;60	0,3170	0,9192	0,9755	0,1025	0,5595	0,8986	0,2426	0,1971	0,0198	0,1877	0,1946	0,9661
160;30	0,2168	0,3971	0,1736	0,4283	0,4211	0,6369	0,5327	0,1945	0,4105	0,6591	0,2215	0,3511
160;60	0,1811	0,1567	0,3704	0,3369	0,9879	0,1939	0,1443	0,7658	0,5367	0,6927	0,8097	0,9107

**Tabela 20** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos).

<b>Testes para comparações entre duas médias (<math>\alpha = 0,05</math>) – Residuais de turbidez obtidos na Etapa 02</b>											
<b>Velocidade de Flotação (m.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Comparações por valor de Gf</b>					<b>Comparações entre valores de Gf</b>					
	<b>Gf (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Ausência de indução</b>	<b>Indução ótima</b>	<b>Teste F (p-valor)</b>	<b>Teste entre médias (p-valor)</b>	<b>Indução ótima</b>		<b>Ausência de indução</b>		<b>Teste F (p-valor)</b>	<b>Teste entre médias (p-valor)</b>
		<b>G<sub>IC</sub>; T<sub>IC</sub> (s<sup>-1</sup>; s)</b>	<b>G<sub>IC</sub>; T<sub>IC</sub> (s<sup>-1</sup>; s)</b>			<b>Gf (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>G<sub>IC</sub>; T<sub>IC</sub> (s<sup>-1</sup>; s)</b>	<b>Gf (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>G<sub>IC</sub>; T<sub>IC</sub> (s<sup>-1</sup>; s)</b>		
20,0	75,0	0;0	40;30	0,3793	“t”: 0,3867	75,0	40;30	100,0	0;0	0,7630	“t”: 0,0156
	100,0	0;0	60;30	0,6536	“t”: 0,0493	100,0	60;30	150,0	0,0	0,8242	“t”: 0,0119
	150,0	0;0	40;30	0,4624	“t”: 0,0017	150,0	40;30	200,0	0,0	0,7707	“t”: 0,0232
	200,0	0;0	120;30	0,8969	“t”: 0,0015						
15,0	75,0	0;0	40;30	0,2462	“t”: 0,2871	75,0	40;30	100,0	0;0	0,5779	“t”: 0,1034
	100,0	0;0	40;30	0,2842	“t”: 0,4783	100,0	40;30	150,0	0;0	0,1912	“t”: 0,0310
	150,0	0;0	120;30	0,1581	“t”: 0,0518	150,0	120;30	200,0	0;0	0,2112	“t”: 0,1084
	200,0	0;0	40;30	0,6819	“t”: 0,0083						
10,0	75,0	0;0	80;60	0,0441	“MWU”: 0,0809	75,0	80;60	100,0	0,0	0,5730	“t”: 0,4420
	100,0	0;0	40;30	N.C.	N.C.	100,0	40;30	150,0	0,0	0,6080	“t”: 0,0605
	150,0	0;0	160;30	0,8131	“t”: 0,6893	150,0	160;30	200,0	0,0	0,5857	“t”: 0,3256
	200,0	0;0	120;30	0,9531	“t”: 0,1746						

**Observações:** (1) As siglas “t” e “MWU” remetem ao teste t (paramétrico) e ao teste de Mann-Whitney U (não paramétrico), nesta ordem; (2) A sigla N.C. significa que o p-valor não foi computado pelo software PAST®.

**Tabela 21** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões –  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos).

<b>Testes para comparação entre residuais médios de turbidez (<math>\alpha = 0,05</math>) obtidos na Etapa 02 para o cenário de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões (<math>G_{IC}</math> e <math>T_{IC}</math> nulos)</b>					
Velocidade de flotação (m.h <sup>-1</sup> )	Gf (s <sup>-1</sup> )	Teste de Levene (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)	Teste <i>a posteriori</i> (post-hoc)	Teste <i>post-hoc</i> (p-valores)
20,0	75,0	0,0604	Kruskal-Wallis: 0,0487	Dunn's <i>post hoc</i>	75x100: 0,1129; 75x150: 0,0066; 75x200: 0,3650; 100x150: 0,2575; 100x200: 0,4969; 150x200: 0,0700;
	100,0				
	150,0				
	200,0				
15,0	75,0	0,1102	One-Way ANOVA: 0,0046	Tukey's pairwise	75x100: 0,0696; 75x150: 0,0048; 75x200: 0,0099; 100x150: 0,2614; 100x200: 0,5206; 150x200: 0,9339;
	100,0				
	150,0				
	200,0				
10,0	75,0	0,0355	Kruskal-Wallis: 0,0378	Dunn's <i>post hoc</i>	75x100: 0,1742; 75x150: 0,0046; 75x200: 0,0542; 100x150: 0,1410; 100x200: 0,5713; 150x200: 0,3650;
	100,0				
	150,0				
	200,0				

### Análises aplicadas aos residuais de cor aparente

**Tabela 22** – Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de cor aparente da Etapa 02.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de cor aparente obtidos na Etapa 02												
$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )	$Gf = 75,0s^{-1}$			$Gf = 100,0s^{-1}$			$Gf = 150,0s^{-1}$			$Gf = 200,0s^{-1}$		
	$V_{\text{flot 01}}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 02}}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 03}}$ ( $10m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 01}}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 02}}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 03}}$ ( $10m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 01}}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 02}}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 03}}$ ( $10m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 01}}$ ( $20m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 02}}$ ( $15m.h^{-1}$ )	$V_{\text{flot 03}}$ ( $10m.h^{-1}$ )
	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
0;00	0,2513	0,0671	0,5875	0,4797	0,7040	0,2706	0,5203	0,8227	0,8546	0,2827	0,7861	0,5298
40;30	0,9541	0,3888	1,0000	0,7240	1,0000	0,9243	0,0000	0,0000	0,2310	0,4397	0,9600	0,8370
40;60	0,1342	0,5875	0,9118	0,9576	0,2455	0,7218	0,1863	0,0979	0,3976	0,8820	0,3024	0,4985
60;30	0,5823	0,3154	0,8089	0,5638	0,9396	0,7477	0,2665	0,7972	0,3976	0,6907	0,3529	0,2479
60;60	0,6345	0,9910	0,9644	0,6180	0,6430	0,4144	0,2695	0,1484	0,3888	0,8516	0,2293	0,3597
80;30	0,1111	0,3529	0,9935	0,2475	0,0000	0,9857	0,6738	0,0000	0,7804	0,8354	0,3927	0,5042
80;60	0,4648	0,1306	0,6215	0,8022	0,2760	0,1630	0,8943	0,3322	0,9644	0,6050	0,5853	0,7587
120;30	0,7348	0,6307	0,2630	0,9644	0,2139	0,4633	0,9653	0,2028	0,2327	0,5731	0,2960	0,1807
120;60	0,5378	0,0000	0,1180	0,0316	0,7175	0,0000	0,0812	0,2665	0,0000	0,8811	0,3657	0,9744
160;30	0,6600	0,1461	0,9857	0,3763	0,6446	0,4633	0,8883	0,0000	0,0000	0,0513	0,6132	0,4125
160;60	0,7151	0,7078	0,2665	0,9355	0,7240	0,0000	0,7503	0,1916	0,6678	0,4243	0,5982	0,0000

**Tabela 23** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos).

<b>Testes para comparações entre duas médias (<math>\alpha = 0,05</math>) – Residuais de cor aparente obtidos na Etapa 02</b>											
Velocidade de Flotação ( $m.h^{-1}$ )	Comparações por valor de Gf					Comparações entre valores de Gf					
	Gf ( $s^{-1}$ )	Ausência de indução	Indução ótima	Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)	Indução ótima		Ausência de indução		Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)
		G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub> ( $s^{-1}$ ; s)	G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub> ( $s^{-1}$ ; s)			Gf ( $s^{-1}$ )	G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub> ( $s^{-1}$ ; s)	Gf ( $s^{-1}$ )	G <sub>IC</sub> ; T <sub>IC</sub> ( $s^{-1}$ ; s)		
20,0	75,0	0;0	80;30	0,7628	“t”: 0,9418	75,0	80;30	100,0	0;0	0,1037	“t”: 0,0054
	100,0	0;0	60;30	0,2844	“t”: 0,0040	100,0	60;30	150,0	0,0	0,6643	“t”: 0,0006
	150,0	0;0	160;30	0,7883	“t”: 0,0000	150,0	160;30	200,0	0,0	0,1279	“t”: 0,0094
	200,0	0;0	60;30	0,4074	“t”: 0,0074						
15,0	75,0	0;0	60;30	0,5483	“t”: 0,2741	75,0	60;30	100,0	0;0	0,5488	“t”: 0,1404
	100,0	0;0	60;30	0,5151	“t”: 0,5065	100,0	60;30	150,0	0;0	0,5804	“t”: 0,0825
	150,0	0;0	160;30	0,2988	“MWU”: 0,3758	150,0	160;30	200,0	0;0	0,2167	“MWU”: 0,3827
	200,0	0;0	80;30	0,6424	“t”: 0,3541						
10,0	75,0	0;0	60;30	0,8985	“t”: 0,0539	75,0	60;30	100,0	0,0	0,4465	“t”: 0,8047
	100,0	0;0	160;60	0,0671	“MWU”: 0,6579	100,0	160;60	150,0	0,0	0,0586	“MWU”: 0,0765
	150,0	0;0	80;60	0,5077	“t”: 0,1126	150,0	80;60	200,0	0,0	0,2225	“t”: 0,4842
	200,0	0;0	120;60	0,1563	“t”: 0,1943						

Observação: As siglas “t” e “MWU” remetem ao teste t (paramétrico) e ao teste de Mann-Whitney U (não paramétrico), nesta ordem.



**Tabela 24** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 02 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões –  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos).

<b>Testes para comparação entre residuais médios de cor aparente (<math>\alpha = 0,05</math>) obtidos na Etapa 02 para o cenário de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões (<math>G_{IC}</math> e <math>T_{IC}</math> nulos)</b>					
Velocidade de flotação ( $m.h^{-1}$ )	Gf ( $s^{-1}$ )	Teste de Levene (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)	Teste <i>a posteriori</i> ( <i>post-hoc</i> )	Teste <i>post-hoc</i> (p-valor)
20,0	75,0	0,0190	Kruskal-Wallis: 0,0337	Dunn's <i>post hoc</i>	75x100: 0,1742; 75x150: 0,0032; 75x200: 0,1742; 100x150: 0,1129; 100x200: 1,0000; 150x200: 0,1129;
	100,0				
	150,0				
	200,0				
15,0	75,0	0,0698	One-Way ANOVA: 0,0043	Tukey's pairwise	75x100: 0,0420; 75x150: 0,0062; 75x200: 0,0062; 100x150: 0,5140; 100x200: 0,5140; 150x200: 1,0000;
	100,0				
	150,0				
	200,0				
10,0	75,0	0,4416	One-Way ANOVA: 0,0027	Tukey's pairwise	75x100: 0,0250; 75x150: 0,0055; 75x200: 0,0031; 100x150: 0,6706; 100x200: 0,4096; 150x200: 0,9590;
	100,0				
	150,0				
	200,0				



### APÊNDICE C – Análises estatísticas características da Etapa 03

O software *PAST® (PAleontological STatistics)*, de acesso livre, também foi aplicado à realização das análises estatísticas da Etapa 03.

As análises estatísticas aplicadas aos valores residuais obtidos para cada parâmetro estudado na Etapa 03 (turbidez, cor aparente e absorvância UV –  $\lambda$  254nm) fundamentaram-se em procedimento idêntico ao descrito no Apêndice B, relativo às análises aplicadas aos dados da Etapa 02.

Os testes dedicados à verificação da existência ou não de diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios amostrados fundamentaram-se novamente na formulação de duas hipóteses centrais:

$H_0$  (ou hipótese nula): não há diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios comparados;

$H_1$  (ou hipótese alternativa): existe diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais médios comparados (ou pelo menos entre dois deles, para o caso de comparação entre três ou mais valores).

Com o nível de significância ( $\alpha$ ) adotado tendo sido fixado em 5,0%, a aplicação dos testes estatísticos e obtenção de p-valores iguais ou superiores ao valor de  $\alpha$  (0,05) levou à aceitação da hipótese nula ( $H_0$ ), com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%. A identificação de p-valores inferiores ao valor de  $\alpha$  (0,05) levou à rejeição da hipótese nula ( $H_0$ ) e à aceitação da hipótese alternativa ( $H_1$ ), com base em nível de significância ( $\alpha$ ) de 5,0%.

O teste “t” (paramétrico) e o teste de Mann-Whitney U (não paramétrico) foram aplicados quando da comparação entre os valores residuais médios característicos de apenas dois grupos distintos. A escolha pelo teste paramétrico ou não paramétrico deu-se com base nos p-valores resultantes do teste de normalidade de Shapiro-Wilk W e do teste “F”, para a igualdade entre variâncias, testes estes aplicados aos valores residuais médios comparados. Para cada teste (“t” ou Mann-Whitney U), a comparação do p-valor calculado com o valor do nível de significância pré-estabelecido ( $\alpha = 0,05$ ) permitiu constatar a existência ou não de diferença estatisticamente significativa entre os valores residuais em análise e concluir, então, o teste.

Quando a comparação se deu entre três ou mais valores residuais médios, como ocorrido a partir da comparação entre os residuais dos cenários de ausência de indução de colisões ( $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos) obtidos para cada  $G_f$  (50, 75 e  $100s^{-1}$ ) e  $V_{flot}$  (20, 15 e  $10m.h^{-1}$ ), os testes aplicados foram One-Way ANOVA (paramétrico) e Kruskal-Wallis (não paramétrico). A escolha pelo teste paramétrico ou não paramétrico foi condicionada pelos p-valores resultantes do teste de normalidade de Shapiro-Wilk  $W$  e, neste contexto, do teste de homogeneidade de variâncias de Levene, testes estes aplicados aos residuais médios comparados.

Quando os p-valores obtidos a partir da aplicação dos testes de One-Way ANOVA ou Kruskal-Wallis foram iguais ou superiores ao valor de  $\alpha$  (0,05), aceitou-se a hipótese nula ( $H_0$ ) (ausência de diferença estatisticamente significativa entre os residuais médios comparados). Por outro lado, quando os p-valores obtidos foram inferiores ao valor  $\alpha$  (0,05), rejeitou-se a hipótese nula ( $H_0$ ) e aceitou-se a hipótese alternativa ( $H_1$ ) (existência de diferença estatisticamente significativa entre pelo menos dois dos valores residuais médios comparados).

Quando aceita a hipótese alternativa ( $H_1$ ), foram aplicados testes *a posteriori* (*post hoc*) aos valores residuais médios comparados para localizar a ocorrência das diferenças estatisticamente significativas identificadas. Em outras palavras, os residuais médios associados a cada um dos valores de  $G_f$  explorados (50, 75 e  $100s^{-1}$ ) foram comparados entre si e foi determinado um p-valor a partir de cada comparação. Quando inferiores ao valor de  $\alpha$  (0,05), tais p-valores indicaram a manifestação de diferença estatisticamente significativa entre os residuais comparados, permitindo a conclusão do teste.

De forma semelhante à adotada no Apêndice B, a escolha pelos modelos de testes *a posteriori* utilizados (quando necessário) foi condicionada à natureza do teste previamente aplicado à comparação entre valores residuais médios. O teste de Tukey's pairwise foi utilizado posteriormente ao teste paramétrico de One-Way ANOVA, enquanto o teste de Dunn foi utilizado posteriormente ao teste não paramétrico de Kruskal-Wallis.

### Análises aplicadas aos residuais de turbidez

**Tabela 25** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de turbidez da Etapa 03.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de turbidez obtidos na Etapa 03									
$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )	$Gf = 50,0s^{-1}$			$Gf = 75,0s^{-1}$			$Gf = 100,0s^{-1}$		
	$V_{\text{flot 01}}$ (20m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 02}}$ (15m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 03}}$ (10m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 01}}$ (20m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 02}}$ (15m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 03}}$ (10m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 01}}$ (20m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 02}}$ (15m.h <sup>-1</sup> )	$V_{\text{flot 03}}$ (10m.h <sup>-1</sup> )
	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
0;0	0,3260	0,9676	0,5570	0,8049	0,3948	0,8061	0,7421	0,8920	0,1101
40;05	0,8439	0,5048	0,2059	0,2848	0,1399	0,7262	0,5791	0,7854	0,9755
60;05	1,0000	0,3631	0,4917	0,7470	0,9082	0,6678	0,0137	0,8648	0,7538
80;05	0,7042	0,8428	0,9637	0,2085	0,5007	0,4990	0,6325	0,8347	0,5475
100;05	0,9953	0,3136	0,0648	0,0706	0,3698	0,7262	0,3976	0,9775	0,0944

**Tabela 26** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos).

Testes para comparações entre duas médias ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de turbidez obtidos na Etapa 03											
Velocidade de flotação (m.h <sup>-1</sup> )	Comparações por valor de Gf					Comparações entre valores de Gf					
	Gf (s <sup>-1</sup> )	Ausência de indução	Indução ótima	Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)	Indução ótima		Ausência de indução		Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)
		$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)	$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)			Gf (s <sup>-1</sup> )	$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)	Gf (s <sup>-1</sup> )	$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)		
20,0	50,0	0;0	40;05	0,2953	“t”: 0,6211	50,0	40;05	75,0	0;0	0,6882	“t”: 0,0909
	75,0	0;0	60;05	0,1123	“t”: 0,2824	75,0	60;05	100,0	0;0	0,7377	“t”: 0,0069
	100,0	0;0	100;05	0,6692	“t”: 0,7779						
15,0	50,0	0;0	80;05	0,0211	“MWU”: 0,0808	50,0	80;05	75,0	0;0	0,0057	“MWU”: 0,0808
	75,0	0;0	80;05	0,1886	“t”: 0,4940	75,0	80;05	100,0	0;0	0,8168	“t”: 0,0217
	100,0	0;0	100;05	0,9585	“t”: 0,0405						
10,0	50,0	0;0	60;05	0,8104	“t”: 0,0410	50,0	60;05	75,0	0;0	0,3467	“t”: 0,1283
	75,0	0;0	40;05	0,0944	“t”: 0,1624	75,0	40;05	100,0	0;0	0,6296	“t”: 0,6487
	100,0	0;0	100;05	0,9714	“t”: 0,1074						

**Observação:** As siglas “t” e “MWU” remetem ao teste t (paramétrico) e ao teste de Mann-Whitney U (não paramétrico), nesta ordem.

**Tabela 27** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de turbidez da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões –  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos).

<b>Testes para comparação entre residuais médios de turbidez (<math>\alpha = 0,05</math>) obtidos na Etapa 03 para o cenário de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões (<math>G_{IC}</math> e <math>T_{IC}</math> nulos)</b>					
<b>Velocidade de flotação (m.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Gf (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Teste de Levene (p-valor)</b>	<b>Teste entre médias (p-valor)</b>	<b>Teste <i>a posteriori</i> (<i>post hoc</i>)</b>	<b>Teste <i>post-hoc</i> (p-valor)</b>
20,0	50,0	0,2866	One-Way ANOVA: 0,0006	Tukey's pairwise	50x75: 0,0080; 50x100: 0,0005; 75x100: 0,0330;
	75,0				
	100,0				
15,0	50,0	0,1922	One-Way ANOVA: 0,0008	Tukey's pairwise	50x75: 0,0069; 50x100: 0,0007; 75x100: 0,0784;
	75,0				
	100,0				
10,0	50,0	0,1600	One-Way ANOVA: 0,0009	Tukey's pairwise	50x75: 0,0113; 50x100: 0,0007; 75x100:0,0477;
	75,0				
	100,0				

### Análises aplicadas aos residuais de cor aparente

**Tabela 28** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) aos valores residuais médios de cor aparente da Etapa 03.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de cor aparente obtidos na Etapa 03									
$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )	$Gf = 50,0s^{-1}$			$Gf = 75,0s^{-1}$			$Gf = 100,0s^{-1}$		
	$V_{flot\ 01}$ (20m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 02}$ (15m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 03}$ (10m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 01}$ (20m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 02}$ (15m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 03}$ (10m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 01}$ (20m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 02}$ (15m.h <sup>-1</sup> )	$V_{flot\ 03}$ (10m.h <sup>-1</sup> )
	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
0;0	1,0000	0,6298	0,0000	0,0000	0,6298	0,6439	0,0000	0,0000	1,0000
40;05	0,3702	0,0000	0,0000	0,4709	0,0000	1,0000	0,0000	0,0000	0,0000
60;05	0,6439	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,3584	0,0000	0,4709
80;05	0,6298	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,4557	0,9835	0,9835	0,0000
100;05	0,4709	0,4709	0,6439	0,6298	0,0000	0,6298	0,0000	0,7778	0,0000

**Tabela 29** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos).

Testes para comparações entre duas médias ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de cor aparente obtidos na Etapa 03											
Velocidade de flotação (m.h <sup>-1</sup> )	Comparações por valor de Gf					Comparações entre valores de Gf					
	Gf (s <sup>-1</sup> )	Ausência de indução	Indução ótima	Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)	Indução ótima		Ausência de indução		Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)
		$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)	$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)			Gf (s <sup>-1</sup> )	$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)	Gf (s <sup>-1</sup> )	$G_{IC}; T_{IC}$ (s <sup>-1</sup> ; s)		
20,0	50,0	0;0	40;05	0,7312	“t”: 0,1931	50,0	40;05	75,0	0;0	0,0943	“MWU”: 0,1642
	75,0	0;0	100;05	0,2585	“MWU”: 0,8222	75,0	100;05	100,0	0;0	0,7312	“MWU”: 0,1642
	100,0	0;0	100;05	1,0000	“MWU”: 0,6193						
15,0	50,0	0;0	40;05	0,6051	“MWU”: 0,3758	50,0	40;05	75,0	0;0	0,6051	“MWU”: 0,2611
	75,0	0;0	40;05	0,7312	“MWU”: 0,6428	75,0	40;05	100,0	0;0	0,6112	“MWU”: 0,4936
	100,0	0;0	60;05	0,2036	“MWU”: 0,3458						
10,0	50,0	0;0	40;05	0,4000	“MWU”: 0,0722	50,0	40;05	75,0	0;0	0,6123	“MWU”: 0,5002
	75,0	0;0	40;05	0,7408	“t”: 0,3147	75,0	40;05	100,0	0;0	1,0000	“t”: 1,0000
	100,0	0;0	100;05	0,5000	“MWU”: 0,8137						

**Observação:** As siglas “t” e “MWU” remetem ao teste t (paramétrico) e ao teste de Mann-Whitney U (não paramétrico), nesta ordem.

**Tabela 30** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de cor aparente da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões –  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos).

<b>Testes para comparação entre residuais médios de cor aparente (<math>\alpha = 0,05</math>) obtidos na Etapa 03 para o cenário de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões (<math>G_{IC}</math> e <math>T_{IC}</math> nulos)</b>					
<b>Velocidade de flotação (m.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Gf (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Teste de Levene (p-valor)</b>	<b>Teste entre médias (p-valor)</b>	<b>Teste <i>a posteriori</i> (post hoc)</b>	<b>Teste <i>post-hoc</i> (p-valor)</b>
20,0	50,0	0,3771	Kruskal-Wallis: 0,0257	Dunn's <i>post hoc</i>	50x75: 0,1761; 50x100: 0,0068; 75x100: 0,1761;
	75,0				
	100,0				
15,0	50,0	0,8838	Kruskal-Wallis: 0,0650		
	75,0				
	100,0				
10,0	50,0	0,8047	Kruskal-Wallis: 0,0472	Dunn's <i>post hoc</i>	50x75: 0,0968; 50x100: 0,0157; 75x100: 0,4503;
	75,0				
	100,0				



### Análises aplicadas aos residuais de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm

**Tabela 31** - p-valores do Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) para residuais médios de absorvância UV em comprimento de onda ( $\lambda$ ) de 254nm da Etapa 03.

Teste de Normalidade de Shapiro-Wilk W ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de absorvância UV $\lambda$ 254nm obtidos na Etapa 03									
$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )	$Gf = 50,0s^{-1}$			$Gf = 75,0s^{-1}$			$Gf = 100,0s^{-1}$		
	$V_{flot\ 01}$ (20m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 02}$ (15m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 03}$ (10m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 01}$ (20m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 02}$ (15m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 03}$ (10m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 01}$ (20m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 02}$ (15m.h $^{-1}$ )	$V_{flot\ 03}$ (10m.h $^{-1}$ )
	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor	p-valor
0;0	0,8776	0,2983	0,7804	0,6369	1,0000	0,4633	0,0000	0,1321	0,0000
40;05	0,0000	0,6878	0,8428	0,7563	0,1939	0,7804	0,8428	0,8428	0,0000
60;05	0,7804	N.C.	0,8428	0,0000	0,4633	0,6369	1,0000	0,4633	0,4633
80;05	0,5367	0,1939	0,7017	0,0000	0,6369	0,2530	0,9152	0,5665	0,1139
100;05	0,1939	0,7804	0,6369	0,1223	0,7804	0,0000	0,9352	0,7804	0,6369

Observação: A sigla N.C. significa que o p-valor não foi computado pelo software PAST®.

**Tabela 32** - p-valores de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes de dois grupos distintos).

Testes para comparações entre duas médias ( $\alpha = 0,05$ ) – Residuais de absorvância UV $\lambda$ 254nm obtidos na Etapa 03											
Velocidade de flotação (m.h $^{-1}$ )	Comparações por valor de Gf					Comparações entre valores de Gf					
	Gf ( $s^{-1}$ )	Ausência de indução	Indução ótima	Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)	Indução ótima		Ausência de indução		Teste F (p-valor)	Teste entre médias (p-valor)
		$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )	$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )			Gf ( $s^{-1}$ )	$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )	Gf ( $s^{-1}$ )	$G_{IC}; T_{IC}$ ( $s^{-1}; s$ )		
20,0	50,0	0;0	40;05	0,7578	“MWU”: 0,0765	50,0	40;05	75,0	0;0	0,1308	“MWU”: 0,0765
	75,0	0;0	60;05	0,6087	“t”: 1,0000	75,0	60;05	100,0	0;0	0,7000	“MWU”: 0,0808
	100,0	0;0	100;05	0,0796	“MWU”: 0,6579						
15,0	50,0	0;0	80;05	0,5961	“t”: 0,2153	50,0	80;05	75,0	0;0	0,2823	“t”: 0,0088
	75,0	0;0	40;05	0,2823	“t”: 0,4345	75,0	40;05	100,0	0;0	0,6348	“t”: 0,8528
	100,0	0;0	100;05	0,2159	“t”: 0,1580						
10,0	50,0	0;0	80;05	0,3393	“t”: 0,0699	50,0	80;05	75,0	0;0	0,7172	“t”: 0,0970
	75,0	0;0	40;05	0,5352	“t”: 0,1496	75,0	40;05	100,0	0;0	0,4578	“MWU”: 0,6579
	100,0	0;0	100;05	0,1972	“MWU”: 0,1157						

Observação: As siglas “t” e “MWU” remetem ao teste t (paramétrico) e ao teste de Mann-Whitney U (não paramétrico), nesta ordem.

**Tabela 33** - Valores de p-valor obtidos com a aplicação de testes para a verificação de semelhança estatística ( $\alpha = 0,05$ ) entre valores residuais médios de absorvância UV ( $\lambda$  254nm) da Etapa 03 (comparação entre médias provenientes do cenário de ausência de indução de colisões –  $G_{IC}$  e  $T_{IC}$  nulos).

<b>Testes para comparação entre residuais médios de absorvância UV (<math>\lambda</math> 254nm) (<math>\alpha = 0,05</math>) obtidos na Etapa 03 para o cenário de FAD na ausência da fase de indução mecânica de colisões (<math>G_{IC}</math> e <math>T_{IC}</math> nulos)</b>					
<b>Velocidade de flotação (m.h<sup>-1</sup>)</b>	<b>Gf (s<sup>-1</sup>)</b>	<b>Teste de Levene (p-valor)</b>	<b>Teste entre médias (p-valor)</b>	<b>Teste <i>a posteriori</i> (<i>post hoc</i>)</b>	<b>Teste <i>post-hoc</i> (p-valor)</b>
20,0	50,0	0,2718	Kruskal-Wallis: 0,0265	Dunn's <i>post hoc</i>	50x75: 0,1779; 50x100: 0,0070; 75x100: 0,1779;
	75,0				
	100,0				
15,0	50,0	0,0541	One-Way ANOVA: 0,0019	Tukey's pairwise	50x75: 0,0053; 50x100: 0,0022; 75x100: 0,6301;
	75,0				
	100,0				
10,0	50,0	0,3814	Kruskal-Wallis: 0,0650		
	75,0				
	100,0				

